

建築研究資料

Building Research Data

No. 193

March 2019

東日本大震災における地震被害を踏まえた

吊り天井の基準の整備に資する検討

A Study on the Establishment of Standards of Suspended Ceilings

Based on Seismic Damage from the Great East Japan Earthquake

脇山善夫、石原直、元結正次郎、清家剛、坂本功、大宮幸、沖佑典

Yoshio WAKIYAMA, Tadashi ISHIHARA, Shojiro MOTOYUI,

Tsuyoshi SEIKE, Isao SAKAMOTO, Sachi OHMIYA, Yusuke OKI

国立研究開発法人 建築研究所

Published by

Building Research Institute

National Research and Development Agency, Japan

はしがき

東日本大震災では吊り天井の脱落等の被害が多数生じました。国土交通省の発表によれば、死者 5 名、負傷者 72 名以上、被害件数は約 2000 件判明、とされています。

震災直後の平成 23 年度建築基準整備促進事業の中で「地震被害を踏まえた非構造部材の基準の整備に資する検討」が（一社）建築性能基準推進協会を事業主体として実施されました。建築研究所は「地震被害を踏まえた非構造部材の耐震性に関する研究」を同年度に実施し、当該事業と共同研究（一部は技術指導）を行いました。内容は、被害状況の整理・分類と、基準のあり方の検討とに大きく分けられます。前者では被害状況把握のためのアンケートや現地調査を実施し、後者では対策を講ずるべき範囲、耐震的な仕様、設計用外力の設定、等を検討しました。学識経験者等からなる委員会を設置して内容に関して様々な観点からご意見をいただきながら検討が進められ、平成 24 年 3 月に当該事業としての報告書がまとめられました。

その成果をもとにして、平成 24 年度以降に国土交通省で技術基準が検討され、国土技術政策総合研究所が設置した建築構造基準検討委員会での審議等を経て、平成 24 年 7 月には「建築物における天井脱落対策試案」が公開されました。平成 25 年 7 月及び 8 月には「特定天井」に関する改正建築基準法施行令及び制定・改正された関連告示が公布され、平成 26 年 4 月から施行されています。公布直後の平成 25 年 9 月には技術基準の解説が公開され、告示等により具体的な運用方法、許容耐力を定めるための試験・評価法、設計事例などが示されました。また平成 25 年度の建築基準整備促進事業では特定天井の追加基準の検討が実施され、同様の経緯を経て平成 28 年 5 月に告示に追加されました。これらの検討段階においても建築研究所は主に技術的な面からの支援を行ってきました。

本資料は東日本大震災直後の平成 23 年度建築基準整備促進事業での検討の内容を記録として残して共有するためにまとめたものです。上述のとおり、本資料に示された成果を踏まえ、平成 24 年以降にも基準化に向けた様々な検討が実施され、本資料 6 章で記載されていた平成 23 年度末時点での課題の多くは技術的・行政的な追加検討を経て、解決・判断されています。

本資料が上記基準等の策定の背景を理解する一助となると共に、天井の耐震性を検討する上での参考資料となることを期待します。

末筆ながら、本資料の調査研究に携わられた方、ご協力いただいた方に厚く御礼申し上げます。

平成 31 年 3 月

国立研究開発法人建築研究所
理事長 緑川光正

東日本大震災における地震被害を踏まえた吊り天井の基準の整備に資する検討

脇山善夫*1、石原直*1、元結正次郎*2、清家剛*3、坂本功*4、大宮幸*5、沖佑典*6

概要

本資料は、東日本大震災における吊り天井の脱落被害を踏まえ、平成 23 年度の建築基準整備促進事業として実施された（イ）東日本大震災による被害状況の整理・分類、と（ロ）東日本大震災の被害状況を踏まえた基準のあり方の検討、の 2 つを基に一部を修正してまとめたものである。（イ）に関しては、アンケート調査や現地調査により東日本大震災における天井の脱落等の被害状況を把握するとともに、対策を考える上で着目すべき項目等をまとめている。（ロ）に関しては、対策の基本的な枠組みや対策を取るべき天井の重量・規模・高さについての検討、耐震的な仕様の検討、天井の設計用地震力の設定等に関する検討をまとめている。

（所属は検討当時の平成 23 年度のもの）

- *1 （独）建築研究所 主任研究員
- *2 東京工業大学大学院 教授
- *3 東京大学大学院 准教授
- *4 東京大学 名誉教授
- *5 （一社）建築性能基準推進協会

（平成 30 年度 所属）

- *6 国立研究開発法人建築研究所 研究員

A Study on the Establishment of Standards of Suspended Ceilings
Based on Seismic Damage from the Great East Japan Earthquake

by

Yoshio WAKIYAMA^{*1}, Tadashi ISHIHARA^{*1}, Shojiro MOTOYUI^{*2},
Tsuyoshi SEIKE^{*3}, Isao SAKAMOTO^{*4}, Sachi OHMIYA^{*5}, Yusuke OKI^{*6}

ABSTRACT

This report is a revised version of the report based on the Building Standards Promotion Project in FY 2011, which was implemented in light of the fall of suspended ceilings at the time of the Great East Japan Earthquake. The contents are as follows: (a) arrangement and classification of the damage situation caused by the earthquake; and (b) examination of the criteria based on the damage situation. For (a), we grasp the damage situation such as the fall of ceiling in the earthquake through a questionnaire survey and field surveys, and summarize the items that should be paid attention to in considering the measures. For (b), we consider the basic framework of countermeasures, the weight, size, and height of the ceiling to be taken a measure for, and summarize the studies on seismic specifications and the setting of seismic forces for design of ceilings.

(Affiliations are as of FY 2011)

*1 Building Research Institute

*2 Tokyo Institute of Technology

*3 The University of Tokyo

*4 Professor Emeritus, The University of Tokyo

*5 Building Performance Standardization Association

(Affiliation is as of FY 2018)

*6 Building Research Institute

目次

1. はじめに	1-1
2. 地震による天井の脱落被害	2-1
2. 1 東日本大震災における天井脱落被害のアンケート調査	2-2
2. 1. 1 16都県の特定行政庁へのアンケート	2-2
2. 1. 2 (一社)日本建設業連合会へのアンケート調査	2-8
2. 2 東日本大震災における天井脱落被害の現地調査	2-36
2. 2. 1 目的	2-36
2. 2. 2 調査対象	2-36
2. 2. 3 被害	2-37
2. 2. 4 現地被害調査のまとめ	2-37
2. 3 近年の地震における天井脱落被害の文献等調査	2-89
2. 4 地震による天井脱落被害に関するまとめ	2-90
3. 天井の耐震対策の検討	3-1
3. 1 天井の耐震対策を考える際の基本的な枠組	3-1
3. 2 天井の耐震対策の適用範囲	3-2
3. 2. 1 適用範囲の検討に用いる指標	3-2
3. 2. 2 天井脱落による危害の可能性	3-5
3. 2. 3 天井の耐震対策の適用範囲	3-6
4. 天井の耐震的な仕様の検討	4-1
4. 1 用語の定義	4-1
4. 1. 1 天井面を支持する構成による分類	4-1
4. 1. 2 天井の仕上げ方法による分類	4-1
4. 1. 3 “在来工法による天井”の代替用語	4-1
4. 1. 4 システム天井	4-1
4. 1. 5 天井に関する用語、部材名称等の定義	4-2
4. 2 対象とする範囲	4-4
4. 3 耐久性	4-4
4. 4 仕様1：長期荷重、地震荷重に対する仕様	4-4
4. 4. 1 吊り天井の鉛直方向の荷重の負担（長期荷重に対して）	4-4
4. 4. 2 吊り天井の鉛直方向の荷重の負担（地震荷重に対して）	4-4
4. 4. 3 地震時の水平方向の慣性力の負担	4-4
4. 4. 4 天井の縁切り	4-6
4. 5 仕様2：フェイルセーフの仕様	4-7
5. 吊り天井の耐震性に関する計算方法の検討	5-1
5. 1 許容応力度設計を前提とした吊り元の揺れの評価方法	5-3
5. 1. 1 背景と前提条件	5-3

5.1.2	1自由度系の床応答スペクトル	5-4
5.1.3	多自由度系への拡張	5-6
5.1.4	評価法の簡略化	5-11
5.2	吊り天井の固有周期及び許容耐力	5-18
5.2.1	在来工法天井の野縁方向	5-18
5.2.2	在来工法天井の野縁受け方向	5-20
5.2.3	耐震性に配慮した仕様の静的加力実験	5-24
5.2.4	座屈する場合の許容耐力	5-27
5.2.5	その他の吊り天井の固有周期と許容耐力	5-29
5.3	吊り天井の地震時挙動に関する検討	5-30
5.3.1	実験による吊り天井の地震時挙動の例	5-31
5.3.2	数値解析による検討	5-34
5章	参考文献	5-42
5章	付録	A5-1
A5.1	吊り元の揺れのエネルギスペクトル	A5-1
A5.2	構造種別ごとに固有周期を仮定した場合の水平震度	A5-3
A5.3	天井面の安定性および圧縮耐力	A5-4
5章	付録 参考文献	A5-10
6.	まとめと今後の課題	6-1
6.1	まとめ	6-1
6.2	今後の課題	6-3
6.3	追補	6-6

1. はじめに

平成20年度より、建築基準法に係る技術基準整備のための検討について、民間の能力を積極的に活用して、基準の整備、見直しを図ることを目的とした建築基準整備促進事業が実施された。国が建築基準の整備を促進する上で必要となる調査事項を提示し、これに基づき、基礎的なデータ・技術的知見の収集・蓄積等の調査及び技術基準の原案の基礎資料の作成を行う民間事業者等を公募によって募り、最も適切な調査の内容、実施体制等の計画を提案した者に対して、国が当該調査を支援するものである。

平成23年度の建築基準整備促進事業では国土交通省より調査事項番号41「地震被害を踏まえた非構造部材の基準の整備に資する検討」について平成23年4月8日より事業主体の募集が行われ、同4月28日に事業主体等の採択が公表された。同調査事項の調査目的は「今回の東日本大震災による被害を踏まえ、非構造部材のうち、大規模空間を持つ建築物の天井脱落に関する基準のあり方について検討する」こととされ、（イ）東日本大震災による被害状況の整理・分類、と（ロ）東日本大震災の被害状況を踏まえた基準のあり方の検討、の2つが調査の内容として提示された。

建築性能基準推進協会（以下、当協会）は同調査事項に応募し、審査を経て事業主体として採択された。同調査事項は原則として独立行政法人建築研究所（以下、建築研究所とする）との共同研究により実施するものとされており、（イ）に関する調査は建築研究所の技術指導を得て、（ロ）に関する調査は建築研究所の間で締結した共同研究協定の下で実施した。

調査は、当協会に委員会及び、天井地震被害調査WG、天井構法検討WG、天井耐震計画WGの3つのWGを設置して行われた。（イ）に関して、天井地震被害調査WGにより、特定行政庁及び関係業界団体に東日本大震災による天井地震被害についてアンケート調査を行うとともに、天井被害の現地被害調査、過去の地震被害の文献調査等を行い、天井被害について整理・検討した。（ロ）に関して、天井耐震計画WGは、吊り元の揺れの評価方法、吊り天井の固有周期及び許容耐力、吊り天井の地震時挙動など、吊り天井の耐震性に関する計算方法を検討し、天井構法検討WGは、天井の耐震対策の適用範囲、天井の耐震的な仕様に関して検討した。委員会及び各WGの名簿を次頁以降に掲載する。

本調査による検討は平成23年5月より開始した。同6月初めには第1回委員会を実施し、同7月には、東日本大震災における天井の被害状況について、天井地震被害調査WGが特定行政庁へのアンケート、および天井被害の現地調査をまとめ、国土交通省に中間報告書を提出した。本資料は、中間報告書の内容を合わせて取りまとめたものである。

地震による天井脱落対策に関する検討委員会・WG名簿 ※所属・肩書は平成24年3月時点

委員会

委員長	坂本 功	東京大学	名誉教授
委員	寺本 隆幸	東京理科大学	名誉教授
	深尾 精一	首都大学東京	都市環境学部 教授
	元結正次郎	東京工業大学	大学院 総合理工学研究科 教授
	清家 剛	東京大学大学院	新領域創成科学研究科 准教授
	長谷川直司	独立行政法人建築研究所	建築生産研究グループ長兼材料研究グループ長
	五條 渉	独立行政法人建築研究所	住宅・都市研究グループ長
	石原 直	独立行政法人建築研究所	国際地震工学研究センター 主任研究員
	脇山 善夫	独立行政法人建築研究所	建築生産研究グループ 主任研究員
協力委員	笠原 隆	文部科学省	大臣官房文教施設企画部施設企画課 防災推進室室長 (平成24年1月31日まで)
	森 政之	文部科学省	大臣官房文教施設企画部施設企画課 防災推進室室長 (平成24年2月1日より)
	杉藤 崇	国土交通省	住宅局 建築指導課 建築物防災対策室長
	松井 康治	国土交通省	住宅局 建築指導課課長補佐
	西山 功	国土交通省	国土技術政策総合研究所 建築研究部長
	向井 昭義	国土交通省	国土技術政策総合研究所 建築研究部建築新技術研究官
	深井 敦夫	国土交通省	国土技術政策総合研究所 建築研究部基準認証システム研究室長
オブザーバー	金井 昭典	独立行政法人建築研究所	研究総括監

天井地震被害調査WG

主査	清家 剛	東京大学大学院 新領域創成科学研究科	准教授
委員	坂本 功	東京大学	名誉教授
	元結正次郎	東京工業大学大学院 総合理工学研究科	教授
	名取 発	東洋大学 ライフデザイン学部	准教授
	山田 哲	東京工業大学 応用セラミックス研究所	准教授
協力委員	佐藤 勝次	文部科学省 大臣官房文教施設企画部施設企画課	防災推進室専門官
	松井 康治	国土交通省 住宅局建築指導課	課長補佐
	田伏 翔一	国土交通省 住宅局建築指導課	係長
	西山 功	国土交通省 国土技術政策総合研究所	建築研究部長
	深井 敦夫	国土交通省 国土技術政策総合研究所	建築研究部基準認証システム研究室長
オブザーバー	金井 昭典	独立行政法人建築研究所	研究総括監
	石原 直	独立行政法人建築研究所	国際地震工学研究センター 主任研究員
	脇山 善夫	独立行政法人建築研究所	建築生産研究グループ 主任研究員

天井構法検討WG

主査	清家 剛	東京大学大学院 新領域創成科学研究科	准教授
委員	坂本 功	東京大学	名誉教授
	元結正次郎	東京工業大学大学院 総合理工学研究科	教授
	名取 発	東洋大学 ライフデザイン学部	准教授
	山田 哲	東京工業大学 応用セラミックス研究所	准教授
	石原 直	独立行政法人建築研究所	国際地震工学研究センター 主任研究員
	脇山 善夫	独立行政法人建築研究所	建築生産研究グループ 主任研究員
協力委員	佐藤 勝次	文部科学省 大臣官房文教施設企画部施設企画課	防災推進室専門官
	松井 康治	国土交通省 住宅局建築指導課	課長補佐
	田伏 翔一	国土交通省 住宅局建築指導課	係長
	西山 功	国土交通省 国土技術政策総合研究所	建築研究部長
	深井 敦夫	国土交通省 国土技術政策総合研究所	建築研究部基準認証システム研究室長
オブザーバー	金井 昭典	独立行政法人建築研究所	研究総括監

1. はじめに

天井耐震計画WG

主査	元結正次郎	東京工業大学大学院	総合理工学研究科	教授
委員	河野 守	東京理科大学	工学部第二部	教授
	清家 剛	東京大学大学院	新領域創成科学研究科	准教授
	石原 直	独立行政法人建築研究所	国際地震工学研究センター	主任研究員
	脇山 善夫	独立行政法人建築研究所	建築生産研究グループ	主任研究員
協力委員	松井 康治	国土交通省	住宅局建築指導課	課長補佐
	田伏 翔一	国土交通省	住宅局建築指導課	係長
	向井 昭義	国土交通省	国土技術政策総合研究所	建築研究部 建築新技術研究官
	喜々津仁密	国土交通省	国土技術政策総合研究所	総合技術政策研究センター主任研究官
オブザーバー	金井 昭典	独立行政法人建築研究所		研究総括監

2. 地震による天井の脱落被害

本章では、地震による天井の脱落被害について把握するために、アンケート調査（2.1）、現地被害調査（2.2）、文献調査（2.3）を行い、それらについてまとめている（2.4）。

東日本大震災による天井被害のアンケート調査は特定行政庁と（一社）日本建設業連合会に対して行い、それぞれ2.1.1と2.1.2にまとめている。前者については、2.2で実施した現地被害調査の事例の選定につなげている。

東日本大震災による天井脱落被害の現地調査では13事例について情報収集・整理を行った。その中でやや特別なものを除いた11事例について、情報を横並びに整理した上で更に詳細な整理・検討を行った。

地震による天井脱落の文献調査は、新聞、テレビ、インターネット等から情報収集を行うとともに、（一社）日本建築学会の地震被害調査報告、国土技術政策総合研究所および建築研究所が実施した地震被害調査報告、建築基準整備促進事業による過去の調査報告からも情報収集を行った。

以下、それぞれの調査結果について各節で記述する。

2. 1 東日本大震災における天井脱落被害のアンケート調査

2.1.1 16 都県の特定行政庁へのアンケート

(1) 調査概要

1) 調査目的等

本アンケートは、東日本大震災による天井被害建築物の概要を緊急に把握するとともに、現地調査を行うための基礎資料とすることを目的として実施したものである。

なお、本アンケートは、下記2)に示すとおり地震による天井脱落等の被害の情報があった建築物を対象として実施したものであるため、天井被害があった建築物の全容を把握するものではないことに留意する必要がある。

2) 調査対象

平成23年5月17日現在において、新聞、テレビ、インターネット等で同年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震、3月12日に発生した新潟県中越地方を震源とする地震、3月15日に発生した静岡県東部を震源とする地震により、天井が脱落したと報道された建築物及び日本建築学会ホームページ等により情報を入手した建築物で、建設地及び名称が特定された建築物を対象とした。なお、当協会に設置した「地震による天井脱落対策に関する検討委員会」委員及びW G委員による現地調査が行われた建築物及び現地調査を行う予定が明らかな建築物については本アンケート調査の対象外とした。

3) 調査方法

国土交通省から対象建築物のある16都県の特定行政庁にアンケート票を送付し、67の特定行政庁から回答を得た。

なお、調査票の記入にあたっては、可能な範囲で現地調査、所有者又は管理者等へのヒアリング等を行って記入いただくよう依頼した。

4) 調査年月日

平成23年5月20日～5月27日

5) 有効回答件数

151件

6) アンケート結果

有効回答件数151件についてアンケート項目別の単純集計を行った結果は以下のとおりである。

(2) 単純集計結果

1) 建物の諸元

①建築時期 (図2.1)

昭和56年以前が42件(28%)、昭和56年以降(新耐震基準施行)が106件(71%)であった。

なお、技術的助言「大規模空間を持つ建築物の天井の崩落対策について」が出された平成13年以降は19件であった。

②地上階数 (図2.2)

1階が18件、2階が50件、3階が34件、4階が21件、5階が10件、6～10階が14件、11階以上が2件であった。

2) 被災場所の諸元

①被災場所の用途 (表 2.1)

体育館・体育室が 72 件 (48%)、エントランスホール・コンコース・展示場・食堂・礼拝堂が 39 件 (26%)、事務所・会議室・教室が 10 件 (6.6%)、会議場・裁判所が 6 件 (4%) であり、その他の用途の件数は表 2.1 のとおりである。

②被災場所のおおよその広さ (図 2.3)

100 m²未満が 16 件 (11%)、100~500 m²未満 が 30 件 (20%)、500~1,000 m²未満が 38 件 (25%)、1,000 m²超が 54 件 (36%) であった。

③被災場所のおおよその天井高さ (図 2.4)

5m未満が 42 件 (28%)、5.1m~10m以下が 27 件 (18%)、10.1~15m以下が 65 件 (43%)、15m超が 7 件 (5%) であった。

3) 被災天井の諸元

①天井下地 (図 2.5)

金属が 89 件 (59%)、システム天井が 25 件 (17%)、木製が 6 件 (4%)、直天井が 7 件 (5%) であった。

②天井仕上げ材料 (図 2.6)

ボードが 104 件 (69%)、グラスウールが 18 件 (12%)、金属が 8 件 (5%)、木が 2 件 (1%) であった。

③クリアランス措置 (図 2.7)

ありが 18 件 (12%)、なしが 75 件 (49%)、不明が 9 件 (6%) であった。

④振れ止めの設置 (図 2.8)

ありが 34 件 (23%)、なしが 53 件 (35%)、不明が 11 件 (7%) であった。

*クリアランス措置及び振れ止め設置の両方を措置していたと回答したものは 12 件あった。

なお、アンケートでは「措置あり」とされている建築物でも、当協会による現地調査では振れ止めの措置状況が部分的に限定されていた建築物もあった。

4) 被害状況の諸元

①被害の発生した時期 (図 2.9)

本震によるものが 93 件 (62%)、本震と余震によるものが 47 件 (31%)、余震によるものが 3 件 (2%) であった。

②天井落下の状況 (図 2.10)

天井の多くが落下 43 件 (28%)、天井の一部落下が 86 件 (57%)、天井の一部破損 (落下なし) が 17 件 (11%) であった。

③人的被害の有無 (図 2.11)

死者ありが 3 件 (2%)、負傷者ありが 7 件 (5%)、死傷者なしが 135 件 (89%) であった。
(*原因が落下した天井部材であったかどうかは不明)

2. 地震による天井脱落被害

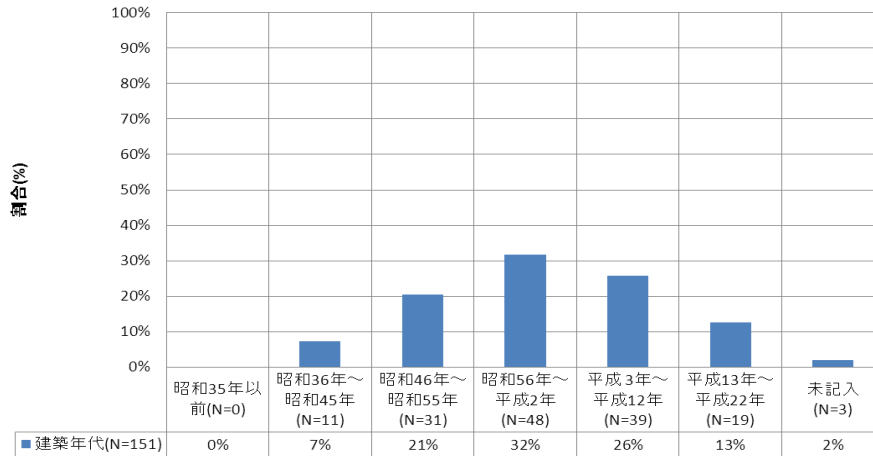


図 2.1 建築時期

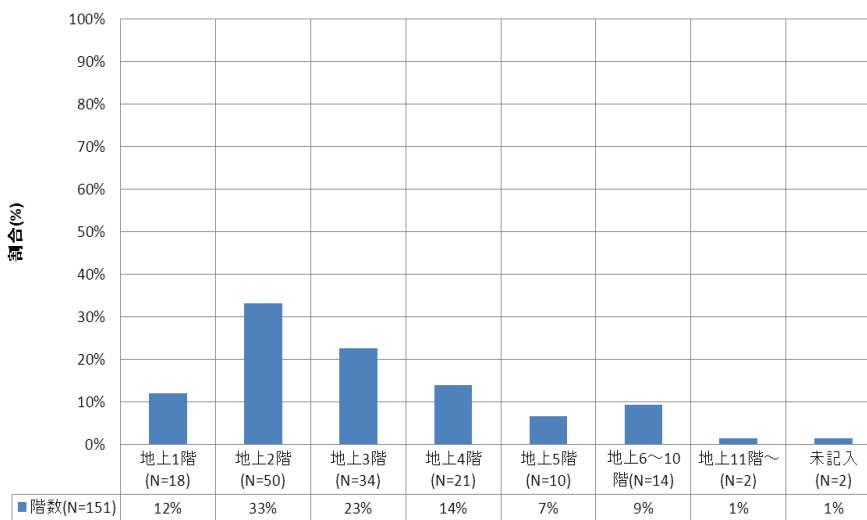


図 2.2 地上階数

表 2.1 被災場所の用途

用途	件数	割合
体育館（アリーナ、弓道場などを含む）、体育室	72	47.7%
エントランスホール、コンコース、展示場、食堂、礼拝堂	39	25.8%
事務所、会議室、教室	10	6.6%
会議場、裁判所	6	4.0%
プール	5	3.3%
劇場、映画館	4	2.6%
工場、給食センター	3	2.0%
通路、トイレ	3	2.0%
店舗	2	1.3%
倉庫	2	1.3%
ボーリング場	2	1.3%
未記入	3	2.0%
計	151	100.0%

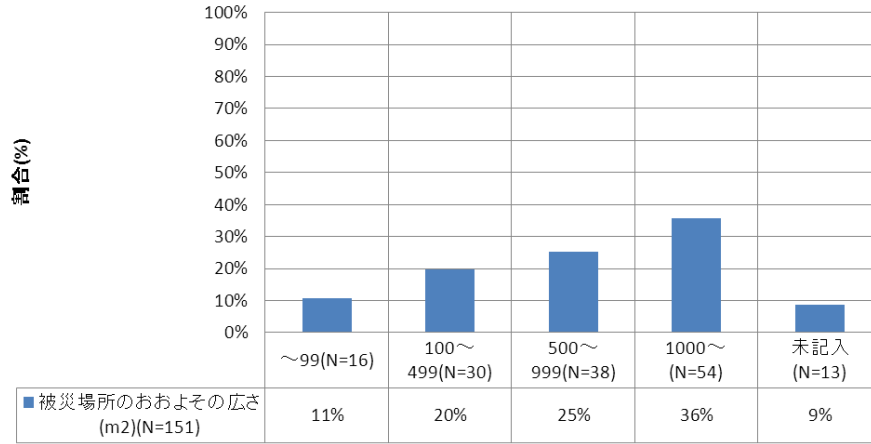


図 2.3 被災場所のおおよその広さ

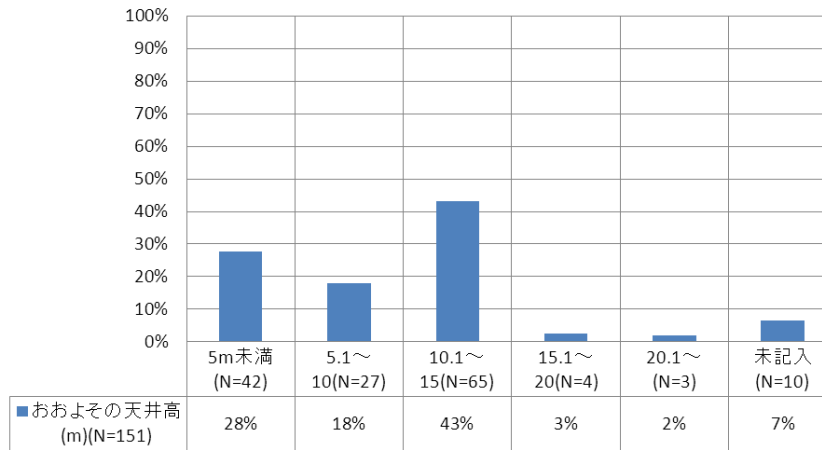


図 2.4 被災場所のおおよその天井高 (m)

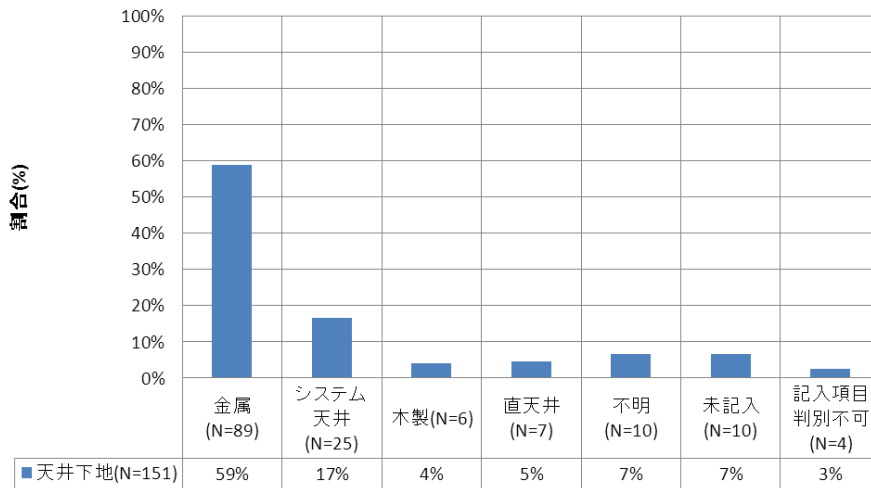


図 2.5 天井下地

2. 地震による天井脱落被害

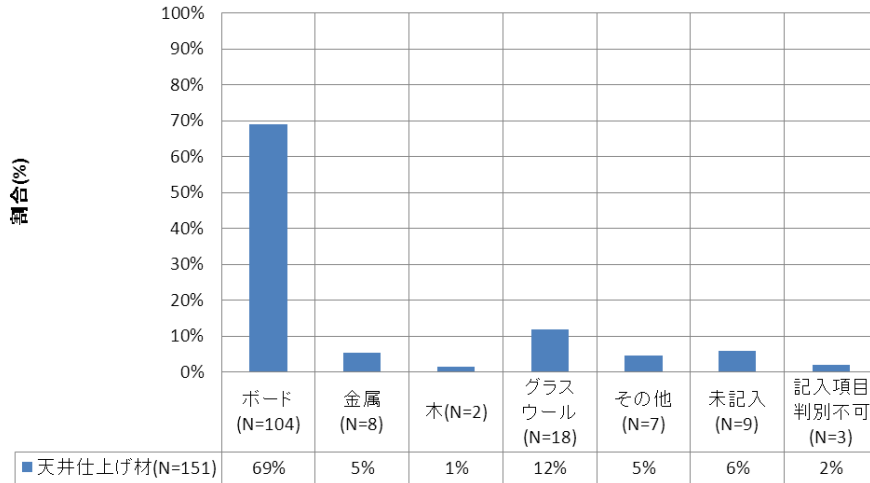


図 2.6 天井仕上げ材

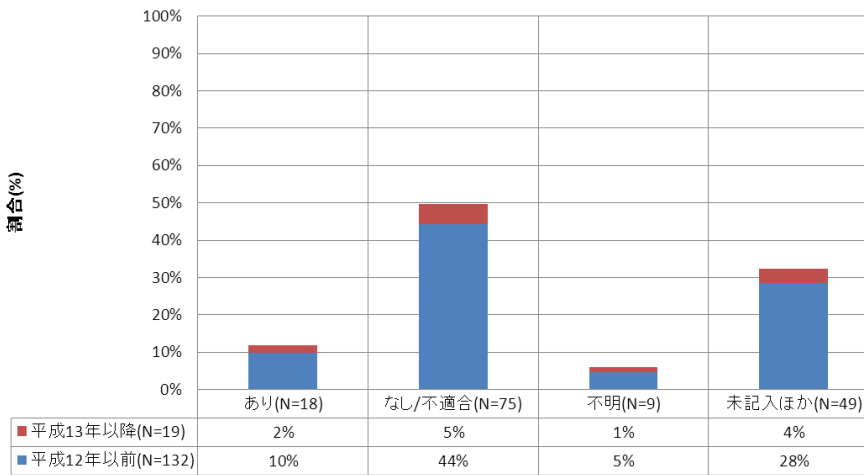


図 2.7 クリアランス措置

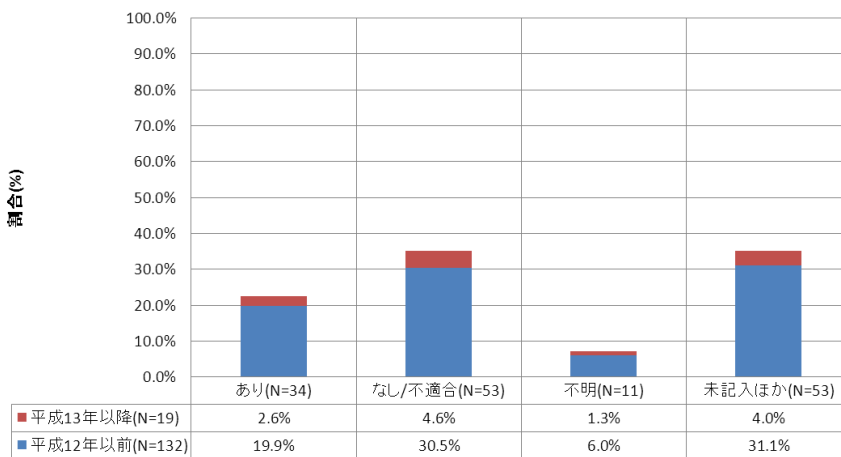


図 2.8 振れ止めの設置

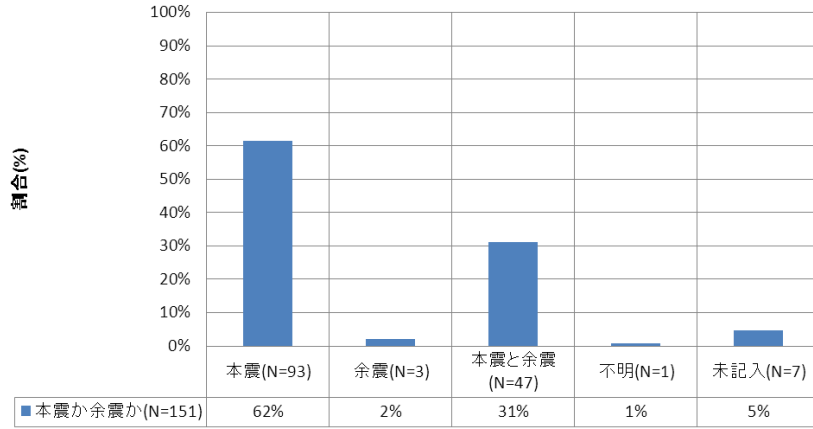


図 2.9 被害の発生した時期

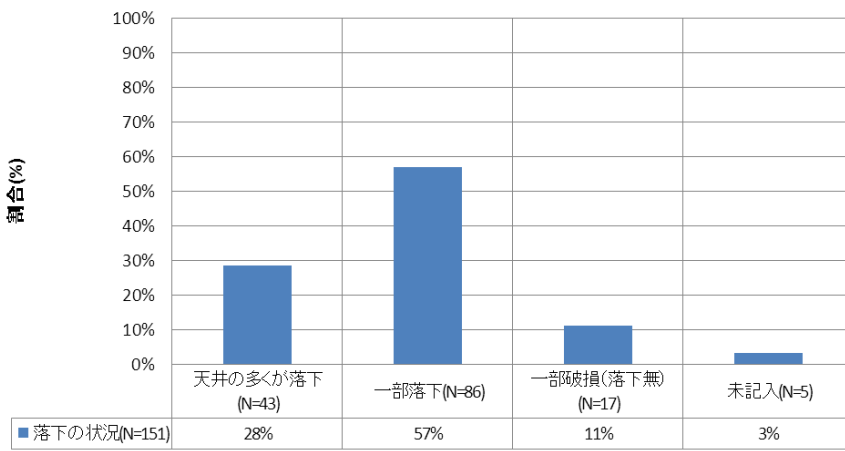


図 2.10 天井落下の状況

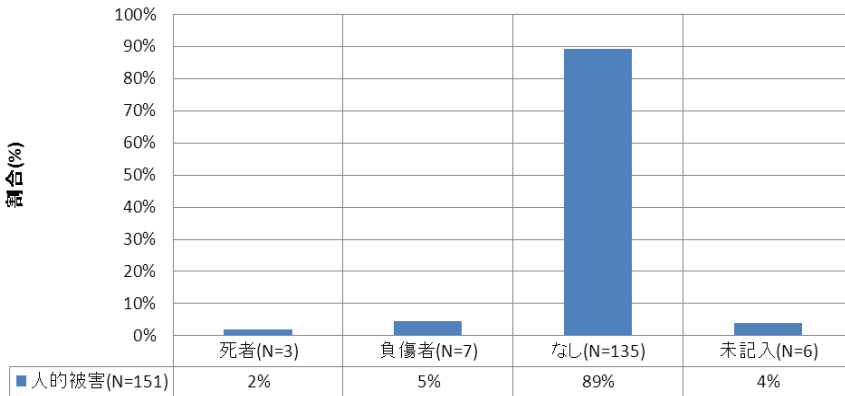


図 2.11 人的被害の有無

2.1.2 (一社) 日本建設業連合会へのアンケート調査

(1) 調査概要

本アンケート調査は、平成23年8月8日に当協会より、(一社) 日本建設業連合会へ依頼を行い、18社より回答を得た。

本調査の回答によると、東日本大震災において天井に被害が生じた件数は18社で約2,000件に上ることが分かった。さらに、個別の被害状況等を把握するため、別紙1(pp.2-10~2-11)の調査票による抽出調査を実施した。対象建築物については、以下の①と②に該当する建築物がおおよそ半数程度ずつとなるよう依頼し、215件の回答を得た。

① 不特定多数の人が利用する大空間を有する建築物(体育館、ホール、映画館等)

② ①以外の建築物で、天井について顕著な被害が見られた建築物(多様な用途が含まれるよう依頼) 集計結果を以下に示す。(215件中4件は被害無しとの回答であったため、211件について集計した。)

(2) 集計結果

1) 所在地と震度

① 所在地(問3)

宮城県が78件(40%)と多く、地域的には東北地方(岩手県、山形県、宮城県、福島県)で118件(56%)であった。

② 所在地の震度(問4)

震度6弱が最も多く(83件/39.3%)、震度5強以上が179件(84.8%)であった。

2) 建築物概要

③ 構造(問6)と構造躯体の被害有無(問35-1)

構造はS造が138件(65.4%)が多かった。構造躯体の地震被害は無しとの回答が173件(82.0%)であった。

④ 建築時期(問13)

1996(平成8)~2003(平成15)年が67件(31.8%)、2004(平成16)年以後が55件(26.1%)と多い。

⑤ 地上階数(問9-1)

地上階数は、1~2階が100件(47.4%)、3~5階が76件(36.0%)と多い。

3) 被災場所・天井の概要

⑥ 被災場所の主要な用途(問18)

店舗・売り場36件(17.1%)、事務所35件(16.6%)、ホール12件(5.7%)、工場12件(5.7%)となっており、これら用途が全体の45%を占めている。

⑦ 被災場所の室のおおよその広さ(問27)

500㎡未満が63件(29.9%)、500~1,000㎡未満が35件(16.6%)、5,000㎡以上が24件(11.4%)である。

⑧ 被災場所の天井下地(問28)

金属製下地が172件(81.5%)、システム天井(ライン)が18件(8.5%)である。

⑨被害の概要（問 34-1、問 34-2）

在来工法：仕上材のみ落下が 102 件（26.4%）、クリップ外れが 114 件（29.5%）、ハンガー開きが 63 件（16.3%）と多い。

システム天井：パネルのみ落下が 20 件（44.4%）と多い。

⑩天井仕上げ材の重ね枚数（問 30）

1 枚張りが 135 件（64.0%）と多く、2 枚張りは 63 件（29.9%）である。

⑪天井面のおおよその形状（問 33）

床面に対する天井面の形状は、水平・フラットが 172 件（67.5%）と多い。

⑫天井落下の状況（問 22）

天井の多くが落下が 46 件（21.8%）、一部落下が 117 件（55.5%）である。

⑬天井落下の発生した場所の天井面内での位置（問 23）

平天井の端部での脱落が 133 件（36.1%）、天井面の中央部分が 75 件（20.4%）、段差部・折れ曲がり部が 49 件（13.3%）、設備機器との取り合いが 71 件（19.3%）である。

4) 振れ止め、クリアランスの措置について

⑭振れ止めの設置について（問 44）

振れ止めは、設置なしが 93 件（44.1%）、設置有りが 110 件（52.1%、うち 29 件（13.7%）はブレースの設置状況不明）。

⑮クリアランスの措置について（問 41～問 43）

天井面と周囲の壁等間に十分な隙間があるか（問 41）については、無しが 185 件（88%）と多い。

段差などでの隙間や、設備のとの隙間については、該当する段差や設備があるかを含めて聞いている。段差など天井面の剛性が異なる部分相互に隙間があるか（問 42）については措置無しが 107 件であり、段差などがあるとする回答（措置あり又は措置なしと回答があったものの）の総数に対して 88.4%を占める。天井面と設備の間に隙間があるか（問 43）については 169 件が措置なしであり、天井面に設備があるとする回答（措置あり又は措置なしと回答があったもの）の総数に対して 90.9%を占める。

調査票（別紙 1）およびそれらの各問に対する集計結果を次ページ以降に示す。なお、問 1（会社名）、問 2（建築物の名称）、問 40（現地調査の可否）は、以下のアンケート集計では除外している。

2. 地震による天井脱落被害

【調査票No.】

別紙1

2. 東日本大震災における天井被害に関する調査票(個別票)

下記事項につきましてご回答のほど、ご協力をお願いします。

■本調査票の記載者情報

1 会社名

■天井被害のあった建築物の情報をご記入下さい。

2 建築物の名称(可能であれば、ご記入をお願いいたします。)
 3 所在地 都道府県
 4 所在地の震度 1. 4以下 2. 5弱 3. 5強 4. 6弱 5. 6強以上
 5 所在地 区.市.町.村(可能であれば、ご記入をお願いいたします。)

-----以下の質問に対し、右端の欄に番号でご回答下さい(一部、数値、文字記載もあります)----- 回答欄↓

6 構造 (壁がRC造、屋根がS造の場合は 4. S+RC造になります)	1. S造 2. RC造 3. SRC造 4. S+RC造 5. S+SRC造 6. RC+SRC造 7. S+RC+SRC造 8. その他(回答欄に具体的に記載)	
7 天井の吊り元	1. スラブ 2. 鉄骨大梁 3. Cチャンネル 4. ALCパネル 5. 鋼板製屋根 6. その他(回答欄に具体的に記載)	
8 吊り元との接合	1. インサートねじ込み 2. 接合金物(引っ掛ける形のもの) 3. インサート金物 4. 溶接 5. その他(回答欄に具体的に記載)	
9 階数	地上階数 地下階数	
10 高さ	m単位でお答え下さい	
11 延べ面積	m ² 単位でお答え下さい	
12 建築物の用途(確認申請に準じた用途)	体育館、ホテル、劇場、百貨店、工場、博物館等具体的にご記入下さい	
13 建築時期	西暦でお答え下さい	
14 耐震改修の有無	1. 有 2. 無	
15 天井の改修の有無	1. 有 2. 無	
16 改修ありの場合は改修内容をご記入下さい	1. 有 の場合は改修時期(西暦でご記入下さい)	
■被災状況についてご記入下さい。		
17 1棟内の被災箇所	1. 一箇所 2. 複数箇所	
18 被災場所の主要な用途	ホール、アリーナ、プール、廊下通路、事務室、等具体的にご記入下さい	
19 被災場所の存する階	16. で答えた場所の存する階をご記入下さい	
20 被害の発生した日時(本震か余震か)	1. 本震(3月11日14:46) 2. 余震 2. 余震 とお答えの場合、その日時をご記入下さい	
21 被災時の利用状況	1. 在室者あり 2. 在室者なし 3. 不明	
22 天井落下の状況	1. 天井の多くが落下 2. 一部落下 3. 一部破損(落下は無し)	
23 天井落下の発生した場所の天井面内での位置(該当するものを選択(複数選択可))	1. 平天井の端部で脱落 2. 天井面の中央部分で脱落 3. 段差部・折れ曲がり部で天井が脱落 4. 設備機器との取り付け部分で脱落 5. その他()	
24 人的被害の有無	1. 有 2. 無 1. 有 とお答えの場合の死者数をご記入下さい 1. 有 とお答えの場合の負傷者数をご記入下さい	
25 被災場所のおおよその天井高さ	m単位でお答え下さい	
26 被災場所の天井ふところのおおよその高さ	m単位でお答え下さい	
27 被災場所の室のおおよその広さ	m ² 単位でお答え下さい	
28 被災場所の天井下地(わかる範囲で)	1. 木製下地 2. 金属製下地 3. システム天井(ライン) 4. システム天井(クロス) 5. 直天井 6. 不明 7. その他(回答欄に具体的に記入ください)	
29 被災場所の天井仕上げ材料(わかる範囲で)	1. 木製板(合板等) 2. ロックウール吸音板 3. せつこうボード 4. けい酸カルシウム版 5. 金属 6. 不明 7. その他(回答欄に具体的に記入ください)	
30 被災場所の天井仕上げ材の重ね枚数	1. 1枚(直張り) 2. 2枚 3. 3枚以上 4. その他	
31 天井落下に影響した(可能性のある)設備(該当するものを選択(複数選択可))	1. 空調 2. 照明 3. スピーカー 4. スプリンクラー 5. 給排水設備 6. 不明 7. 無 8. その他(回答欄に具体的に記入ください)	
32 上記設備の振れ止め等の耐震対策の有無	1. 有 2. 無	
33 天井面のおおよその形状(該当するものを選択(複数選択可))	床面に対し 1. 水平・フラット 2. 傾斜 3. 曲面 4. 段差あり 5. その他(回答欄に具体的に記入ください)	
34 被害の概要(該当するものを選択(複数選択可))		

	<p>【在来工法】（複数選択可）</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 天井仕上材のみの落下（野縁から仕上材のみが脱落） 2. 野縁と野縁受けを接合するクリップの外れ 3. 野縁受け同士をつなぐ接合部の（金物、溶接）の外れ 4. 野縁受けとつりボルトを接合するハンガの開き、破断、外れ 5. プレースの接合部（溶接、金物）の外れ 6. つりボルト自体の破断 7. 吊りボルト上部の接合金物の外れ 8. つりボルトの溶接接合部の破断 9. その他の被害（回答欄に具体的にご記入ください） 	<p>（上記の被害の中で特に顕著に見られた被害を下欄にご記入下さい。）</p>
	<p>【システム天井】（複数選択可）</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 天井パネルのみの落下 2. パー同士の継手接合部、クロス接合部の破断、外れ 3. Tバーとつりボルトを接合するTハンガの開き、破断、外れ 4. Tバーと野縁受けを接合するCTハンガの開き、破断、外れ 5. Hバーと野縁受けを接合するCHクリップの外れ 6. 野縁受けとつりボルトを接合するハンガの開き、破断、外れ 7. プレースの接合部（溶接、金物）の外れ 8. つりボルト自体の破断 9. つりボルトの溶接接合部の破断 10. その他の被害（回答欄に具体的にご記入ください） 	<p>（上記の被害の中で特に顕著に見られた被害を下欄にご記入下さい。）</p>
	<p>【その他の天井】</p> <p>被害内容（回答欄に具体的にご記入ください）</p>	
35 構造躯体の被害の有無	<p>1. 有 2. 無</p> <p>（複数選択可）</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 主要な柱の破壊 2. 大梁の破壊 3. 耐力壁の破壊 4. 基礎の破壊 5. 基礎ぐいの破壊 6. 小屋組の破壊 7. 土台の破壊 8. 斜材の破壊 9. 床版の破壊 10. 屋根版の破壊 11. その他の被害（回答欄に具体的にご記入ください） 	<p>（上記の被害の中で特に顕著に見られた被害を下欄にご記入下さい。）</p>
被害ありの場合は右欄から選択してください		
36 上記構造躯体の被害内容の詳細（可能であれば、ご記入をお願いします。）		
37 復旧の状況	<ol style="list-style-type: none"> 1. 復旧済 2. 復旧工事中 3. 被災時のまま（落下物撤去済） 4. 被災時のまま（落下物未撤去） 	
38 復旧の方法（可能であれば、ご記入をお願いいたします。）	<ol style="list-style-type: none"> 1. 従前と同じ仕様で復旧 2. 従前と違う仕様で復旧（落下防止対策等を講じるための仕様の変更） 3. 従前と違う仕様で復旧（落下防止対策を目的とするものではない仕様の変更） 	
39 2. 従前と違う仕様（落下防止対策等を講じるための仕様の変更）で復旧した場合、その落下防止対策		
40 現地調査の可否（可能であれば、ご記入をお願いいたします。）	<ol style="list-style-type: none"> 1. 可能 2. 不可 3. 不明（施主に問い合わせが必要） 	
■クリアランスの措置状況、振れ止めの設置状況		
41 クリアランスの措置について（天井面と周囲の壁等の間に、十分な隙間があるかどうか）	<ol style="list-style-type: none"> 1. 措置なし 2. 措置あり（クリアランスの間隔など具体的な措置内容を回答欄にご記入下さい） 	
42 クリアランスの措置について（凹凸、段差など天井面の剛性が異なる部分相互に、隙間があるかどうか）	<ol style="list-style-type: none"> 0. 天井面の剛性の異なる部分なし 1. 措置なし 2. 措置あり（クリアランスの間隔など具体的な措置内容を回答欄にご記入下さい） 	
43 クリアランスの措置について（天井面と設備の間に、隙間があるかどうか）	<ol style="list-style-type: none"> 0. 天井面に設備なし 1. 措置なし 2. 措置あり（クリアランスの間隔など具体的な措置内容を回答欄にご記入下さい） 	
44 振れ止めの設置について（つりボルトにプレースを設置する等）※水平部材は振れ止めには含まない。	<ol style="list-style-type: none"> 1. 設置していない 2. 設置あり（つりボルトの大半にプレースを設置） 3. 設置あり（つりボルトの半数程度にプレースを設置） 4. 設置あり（つりボルトの2～3割程度にプレースを設置） 5. 設置あり（つりボルトのごく一部にプレースを設置） 6. 設置あり（プレースの設置状況不明） 	
45 当該建築物は、天井崩落対策に係る技術的助言（平成13年6月1日国住指発第357号、平成15年10月15日国住指発第2402号）を参考としていましたか	<ol style="list-style-type: none"> 1. 参考としていた 2. 参考としていない 3. 不明 	
<p>■天井落下の被害状況が分かる写真をご提供いただける場合は、ワードファイルに写真データを貼り付けたものをご提供をお願いいたします。</p> <p>（写真イメージ）</p> <p>天井落下の被害の概要が分かる写真、天井の吊り方が分かる写真、周囲との壁との取り合いが分かる写真、天井板や下地材などのような材料が落下したのか分かる写真</p> <p>ご協力ありがとうございました。</p>		

問3：所在地 都道府県

・都道府県名で回答

表 2.2 都道府県別

都道府県	件数
岩手県	13
山形県	3
宮城県	78
福島県	24
栃木県	13
群馬県	1
茨城県	26
千葉県	19
埼玉県	5
東京都	15
神奈川県	8
未回答	6

211

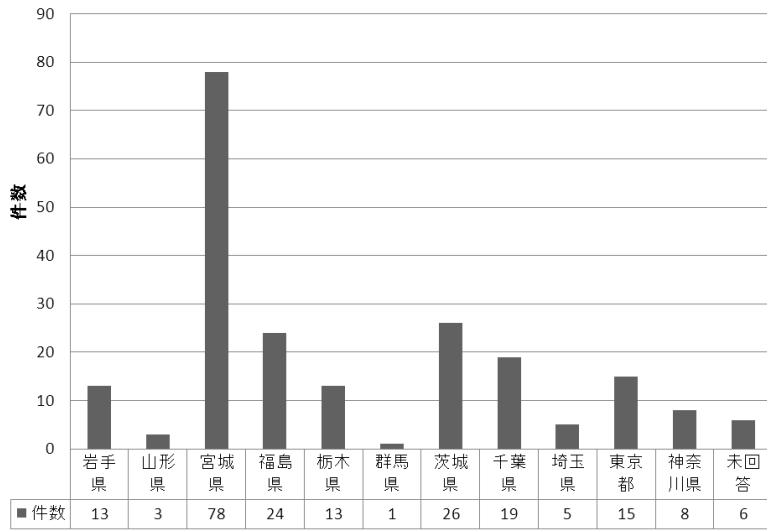


図 2.12 都道府県別

問4：所在地の震度

選択肢・5択／1. 4以下 2. 5弱 3. 5強 4. 6弱 5. 6強以上

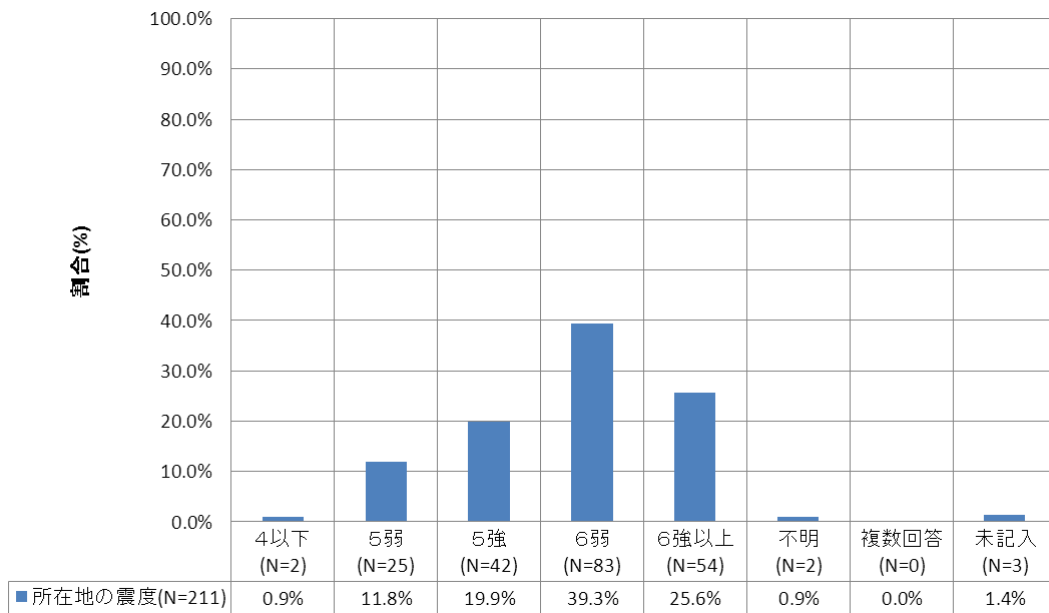


図 2.13 所在地の震度 (N=211)

問6：構造

選択肢・8 択（壁が RC 造、屋根が S 造の場合は 4. S+RC 造と回答）

1. S 造 2. RC 造 3. SRC 造 4. S+RC 造 5. S+SRC 造 6. RC+SRC 造
7. S+RC+SRC 造 8. その他(回答欄に具体的に記載)

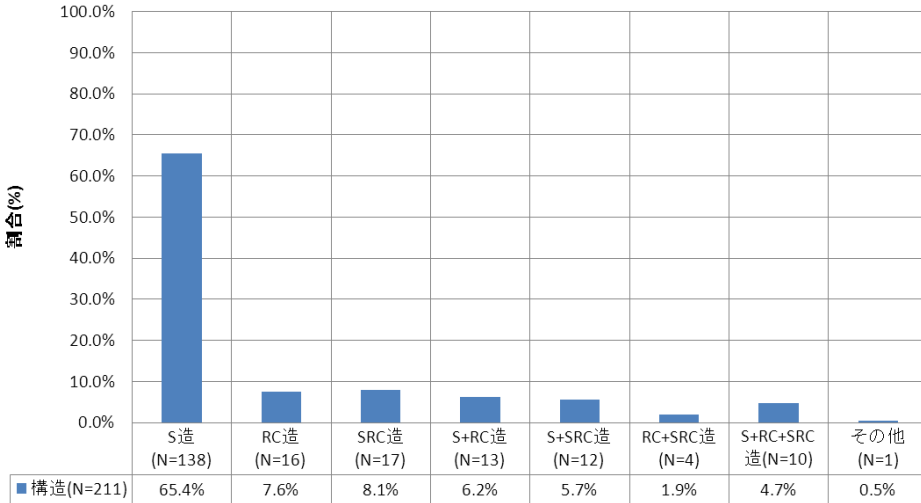


図 2.14 構造 (N=211)

※「8.その他」の回答（1件） 柱 CFT,梁 S

問7：天井の吊り元

選択肢・6 択

1. スラブ 2. 鉄骨大梁 3. Cチャンネル 4. ALCパネル 5. 鋼板製屋根
6. その他(回答欄に具体的に記載)

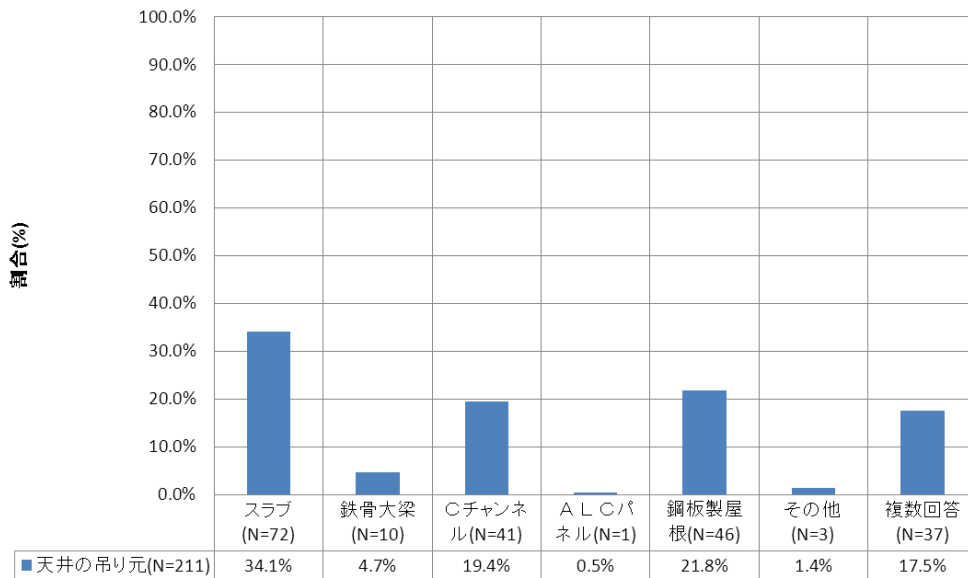


図 2.15 天井の吊り元 (N=211)

※「6 その他」の回答：鉄骨下地直天井、鉄骨ぶどう棚、1,2,3 の混合、鉄板

問8：吊り元との接合

選択肢・5択

1. インサートねじ込み
2. 接合金物(引っ掛ける形のもの)
3. インサート金物
4. 溶接
5. その他(回答欄に具体的に記載)

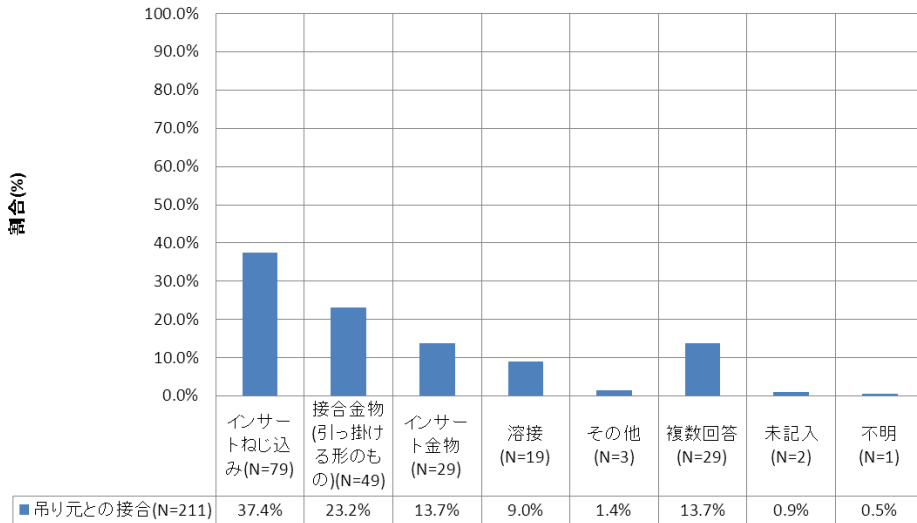


図 2.16 吊元との接合 (N=211)

※「5 その他」の回答：H 鋼挟み込み、折半インサート、ネグロスねじ止め

問9-1：階数 (地上)

※階数で回答→7 分類で集計

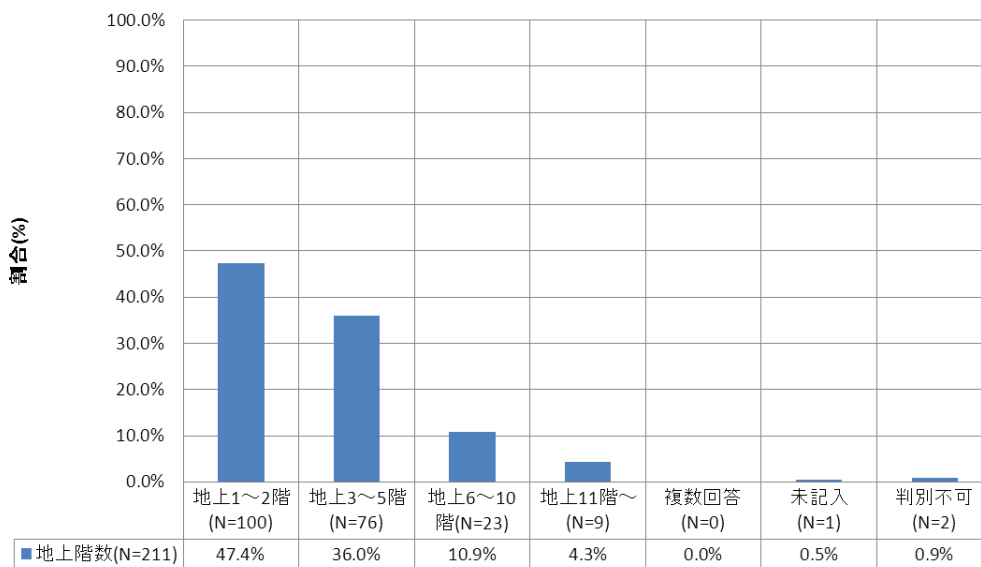


図 2.17 地上階数 (N=211)

問9-2：階数（地下）

※階数で回答→6分類で集計

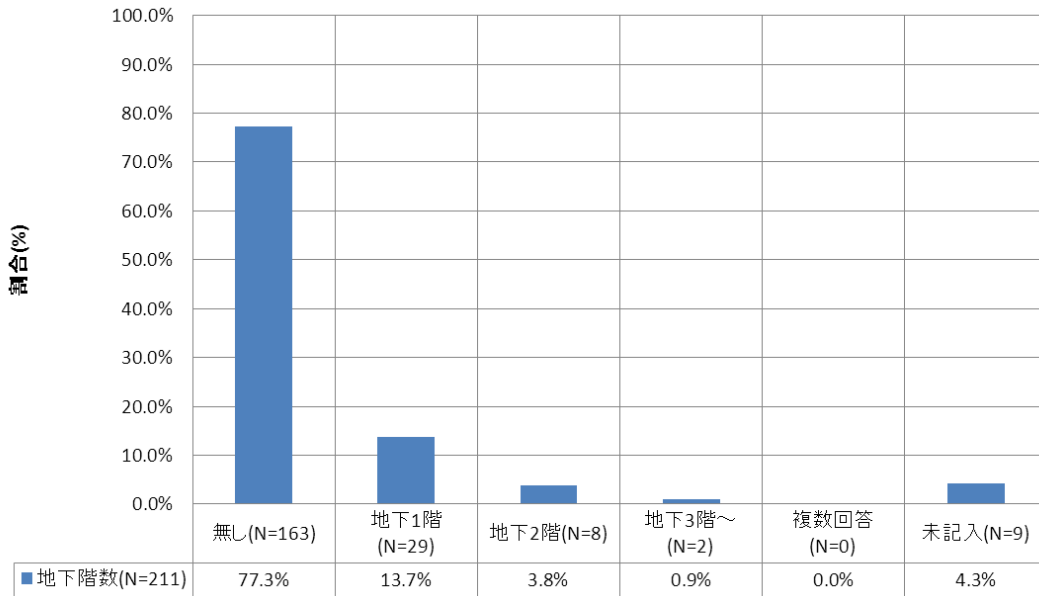


図 2.18 地下階数 (N=211)

問10：高さ

※mで回答→8分類で集計

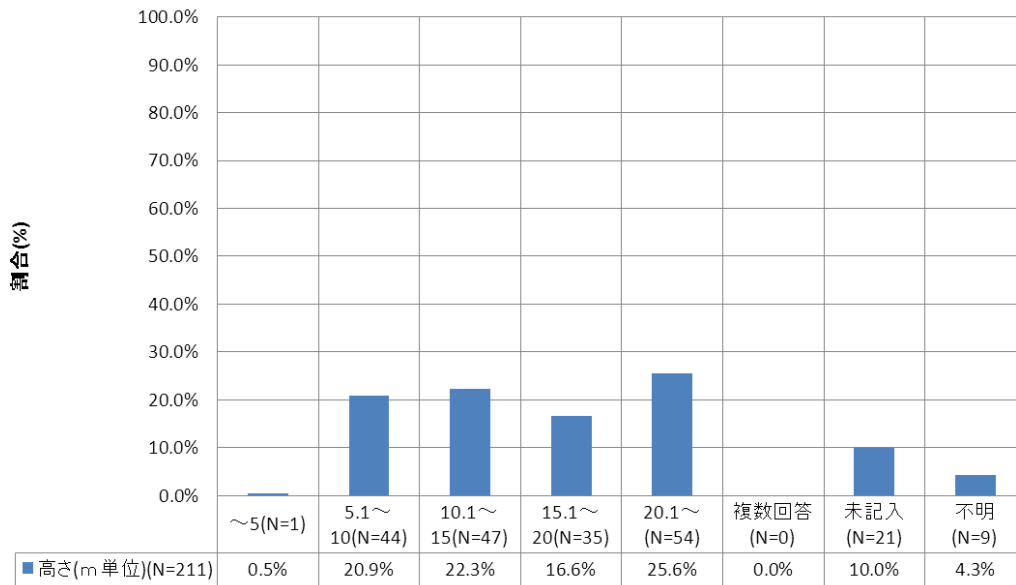


図 2.19 高さ (m単位) (N=211)

問 11：延べ面積

※m²で回答→7分類で集計

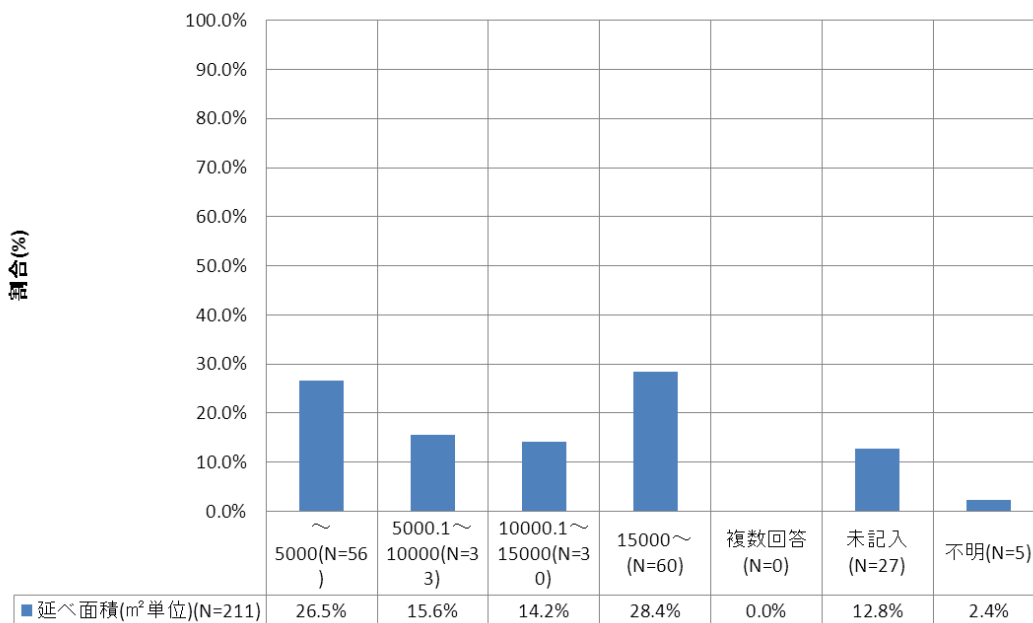


図 2.20 延べ面積 (m²単位) (N=211)

問 12：建築物の用途 (確認申請に準じた用途)

※自由記述

※複数用途の回答があった場合には、「その他」に分類

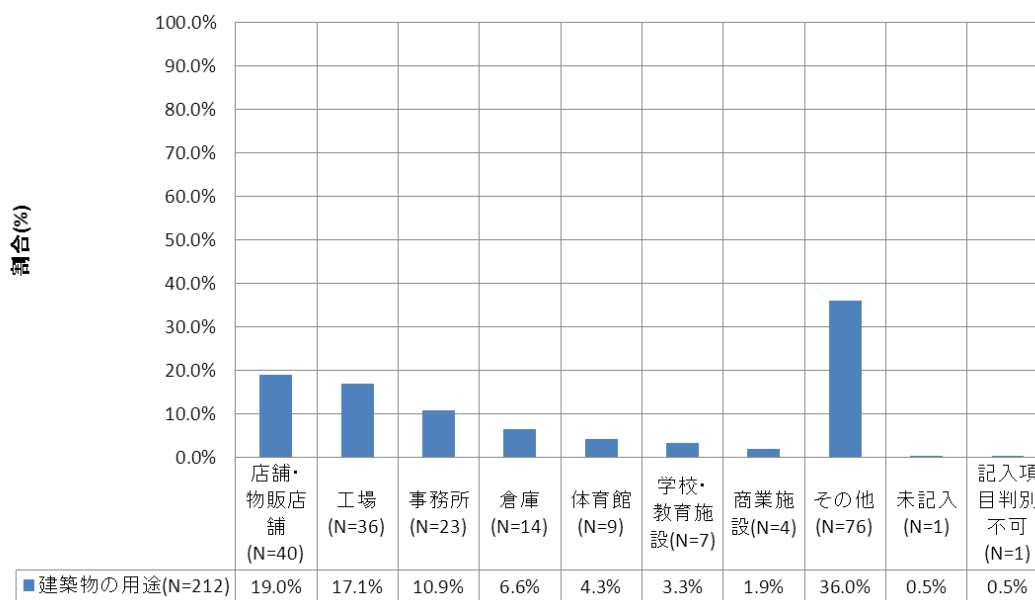


図 2.21 建築物の用途 (N=211)

問 13 : 建築時期

※西暦で回答→10分類で集計

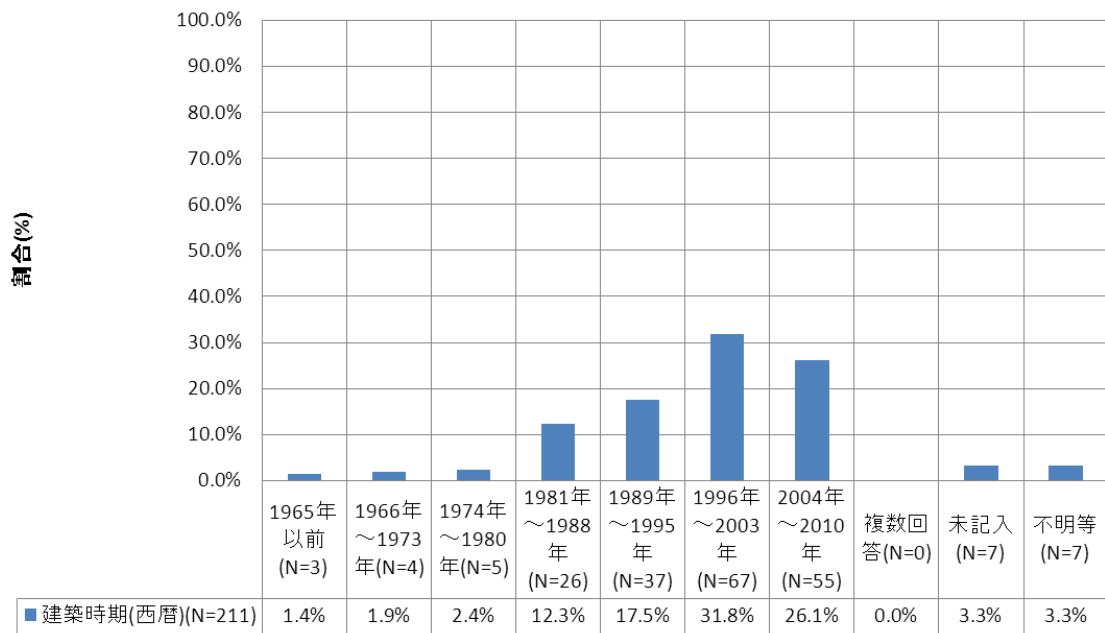


図 2.22 建築時期 (西暦) (N=211)

問 14 : 耐震改修の有無

選択肢・2択／ 1. 有 2. 無

表 2.3 耐震改修の有無

耐震改修の有無	件数	割合 (%)
有	6	3%
無	201	95%
未記入	2	1%
不明	2	1%

計 : 211

問 15-1 : 天井の改修の有無

選択肢・2択／ 1. 有 2. 無

表 2.4 天井の改修の有無

天井の改修の有無	件数	割合 (%)
有	17	8%
無	189	90%
複数回答	0	0%
未記入	3	1%
不明	2	1%

計 : 211

問 15-2 : 天井の改修年

※問 15-1 で有と答えた 17 件について

※西暦で回答

表 2.5 改修時期

改修時期	件数	割合 (%)
～2005 年	7	41%
2006 年～	5	29%
未記入	3	18%
不明	2	12%

問 16 : 改修方法

※自由記述 (回答 問 15-1 で有と答えた 17 件)

- ・耐震ブレース設置 (2 件)
- ・躯体耐震補強、内装改修
- ・テナント変更に伴う内装改修工事
- ・事務所テナント入れ替えに伴う一部天井組替え
- ・天井下地ブレース補強
- ・工場内部天井の新規作成
- ・シネマの天井改修工事
- ・耐震補強改修工事 (1 階～5 階)
- ・サブ核エリアの全面改修
- ・野縁クリップの開き止め、野縁受けハンガーの脱落防止のため、野縁受けで各部を挟みこみ、ビス止め、クリアランス設置
- ・スチールパイプの格子天井撤去。
- ・建築中で有った為全て再度施工を行った。
- ・天井の壁取り合い部にクリアランスをとる
- ・吊りボルトフレ止め
- ・耐震改修 (増設壁)

問 17 : 1 棟内の被災箇所

選択肢・2 択／ 1. 一箇所 2. 複数箇所

表 2.6 1 棟内の被災箇所

1 棟内の被災箇所	件数	割合 (%)
一箇所	25	12%
複数箇所	186	88%

計 : 211

問 18：被災場所の主要な用途

※自由記述

※複数用途の回答があった場合には、「その他」に分類

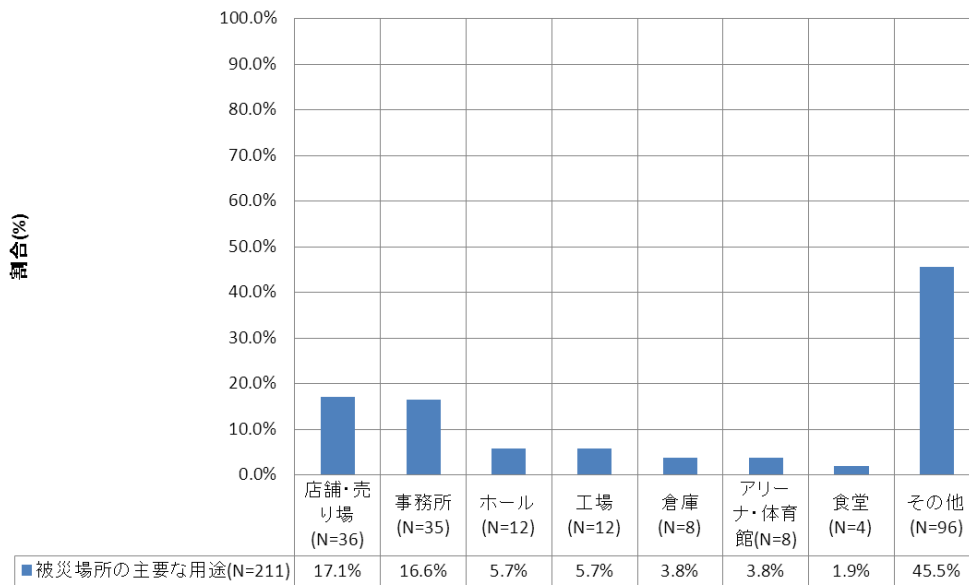


図 2.23 被災場所の主要な用途 (N=211)

問 19：被災場所の存する階

※階数で回答

※被災場所の位置を、概ね3層（下層・中層・高層）に分類、全層のうち7割程度が該当する階がある場合には全層とした。

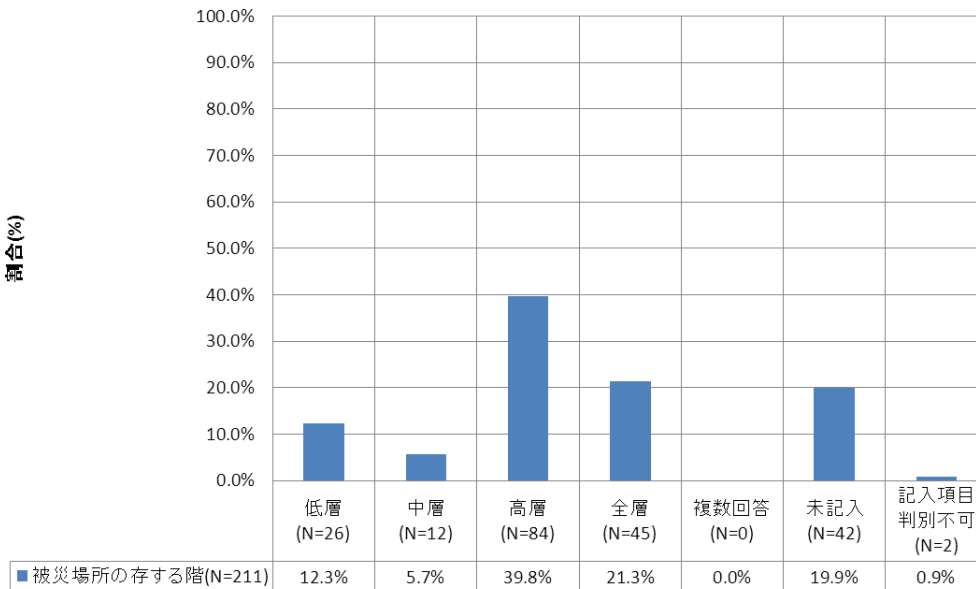


図 2.24 被災場所の存する階 (N=211)

問 20-1 : 被災の発生した日時

選択肢・2択 / 1. 本震 (3月11日 14:46) 2. 余震

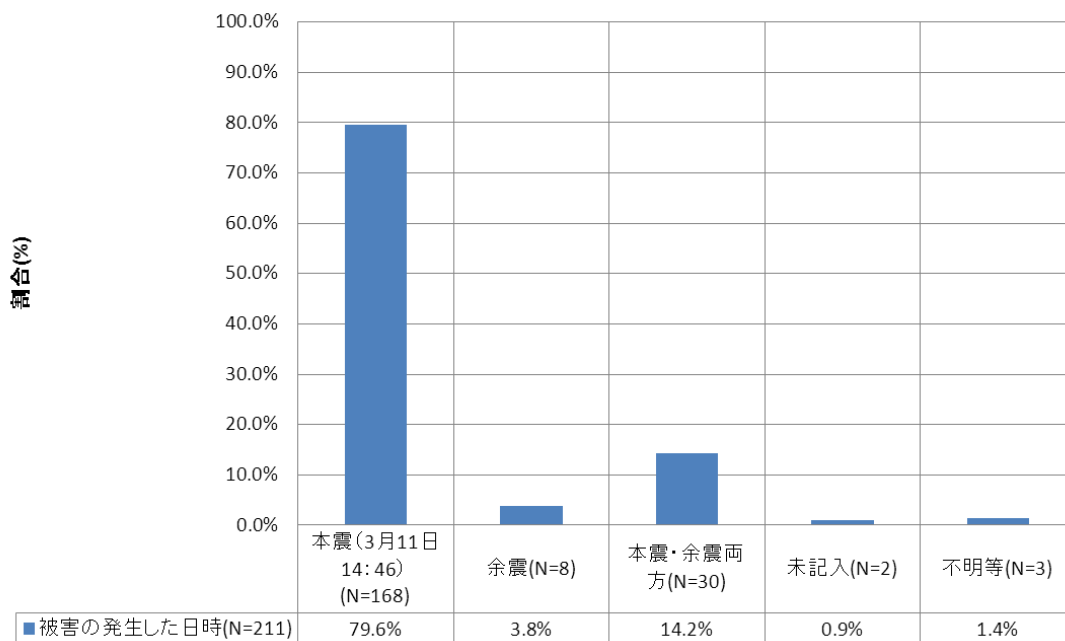


図 2.25 被害の発生した日時 (N=211)

問 20-2 : 余震日時

※自由回答

- ・ 3/11 (2件)
- ・ 4/7 (28件)
- ・ 4/11 (1件)
- ・ 随時 (1件)

問 21 : 被災時の利用状況

選択肢・3択 / 1.在室者あり 2.在室者なし 3.不明

表 2.7 被災時の利用状況

被災時の利用状況	件数	割合 (%)
在室者あり	134	64%
在室者なし	34	16%
不明	39	18%
複数回答	2	1%
未記入	1	0.5%
記入項目判別不可	1	0.5%

問 22 : 天井落下の状況

選択肢・3 択

1. 天井の多くが落下 2. 一部落下 3. 一部破損（落下は無し）

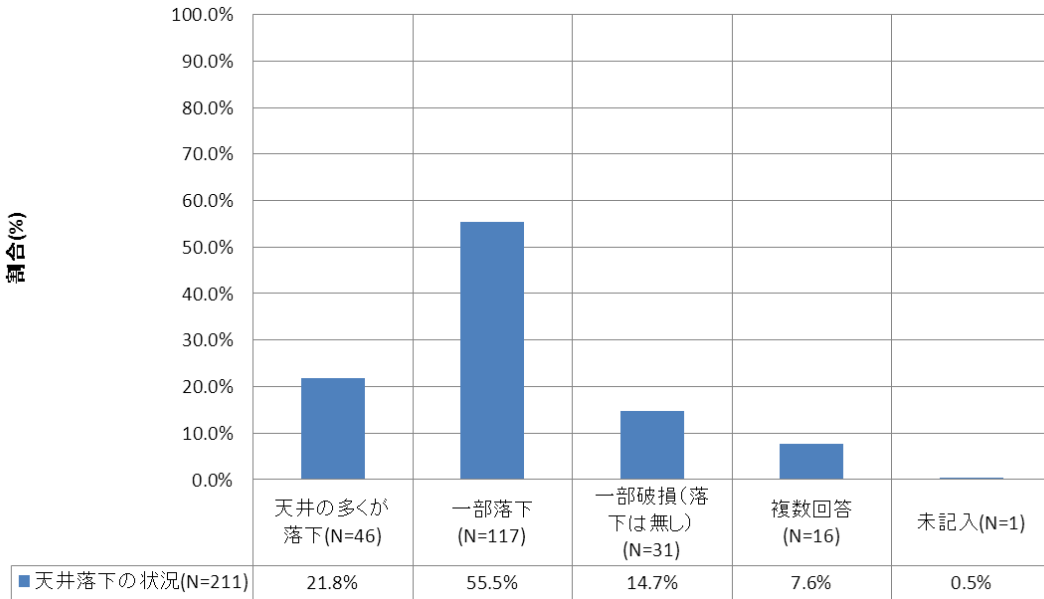


図 2.26 天井落下の状況 (N=211)

問 23 : 天井落下の発生した場の天井面内での位置

選択肢・4 択（複数回答可）

1. 平天井の端部で脱落 2. 天井面の中央部分で脱落 3. 段差部・折れ曲がり部で天井が脱落 4. 設備機器との取り合い部分 5. その他（ ）で脱落

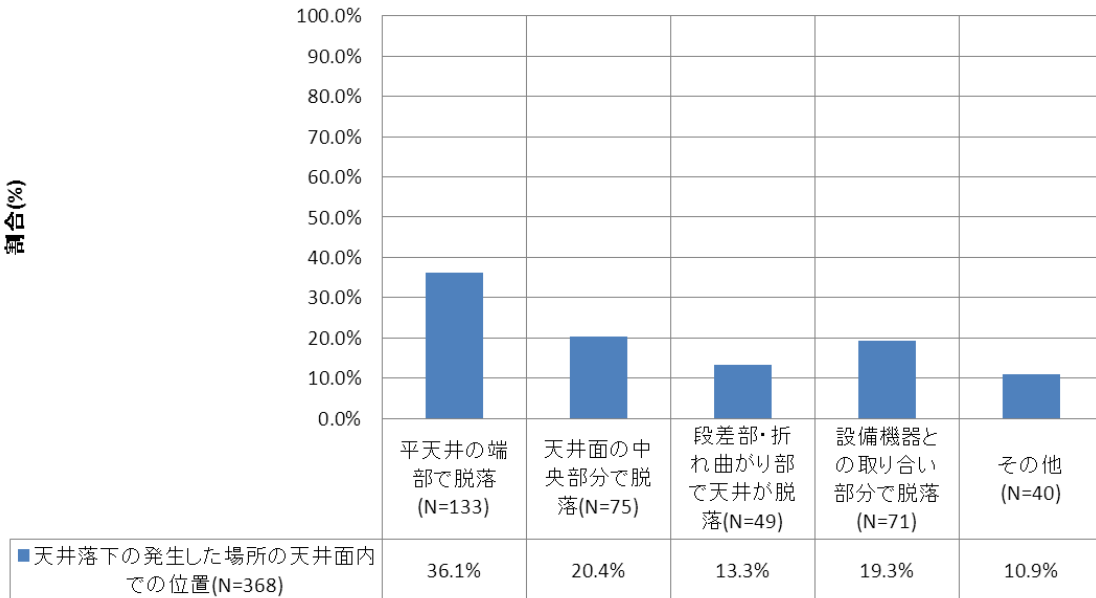


図 2.27 天井落下の発生した場所の天井面内での位置 (N=368)

※「5その他」の回答：

全面／天井ボードの端部が欠け／可動吊り部材と壁が衝突し、壁が一部破損／ぶどう棚と躯体の接合部の破損防火区画壁取合い部で脱落／区画壁の破損による天井ボードの脱落、及び脱落はなかったがハンガークリップの外れ多数／柱廻り／シャッター取合い／パーティション部／落下はなし。吊ボルトが天井を貫通して落下／ユニットなのでユニットでの端部／壁・間柱取合い／軒天全面／脱落なし（2件）

問 24-1：人的被害の有無

選択肢・2択 / 1. 有 2. 無

表 2.8 人的被害の有無

人的被害の有無	件数
有	6
無	197
未記入	8
記入項目判別不可	0

問 24-2：死者数

※人数で回答（問 24-1 で有と答えたものについて）

表 2.9 死者数

死者数	件数
0名	5
未記入	1
記入項目判別不可	0

問 24-3：負傷者数

※人数で回答（問 24-1 で有と答えたものについて）

表 2.10 負傷者数

負傷者数	件数
～2名	1
3名～	5
未記入	0
記入項目判別不可	0

問 25：被災場所のおおよその天井高さ

※mで回答→8分類で集計

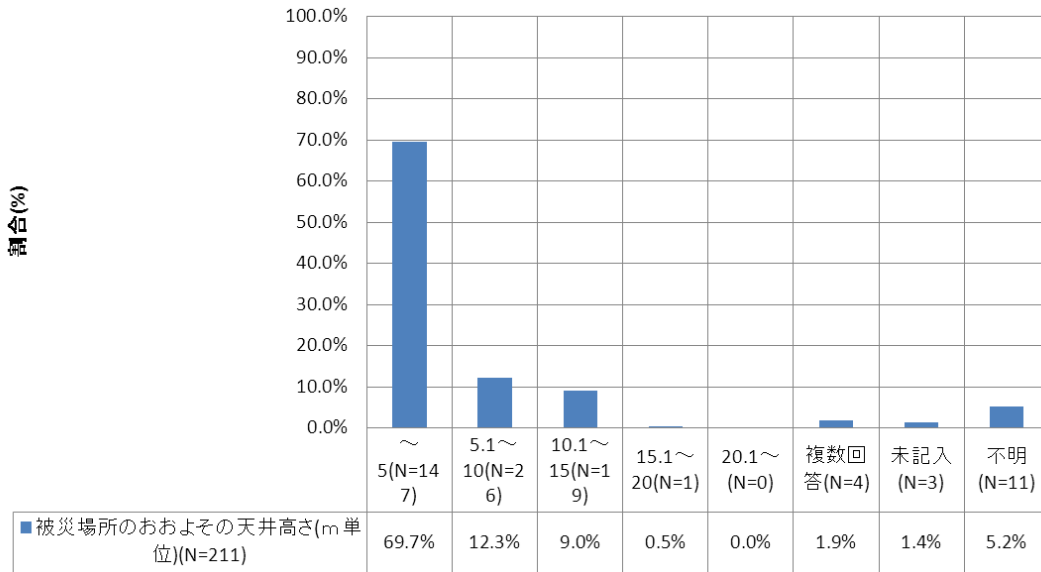


図 2.28 被災場所のおおよその天井高さ (m 単位) (N=211)

問 26：被災場所の天井のふところのおおよその高さ

※mで回答→8分類で集計

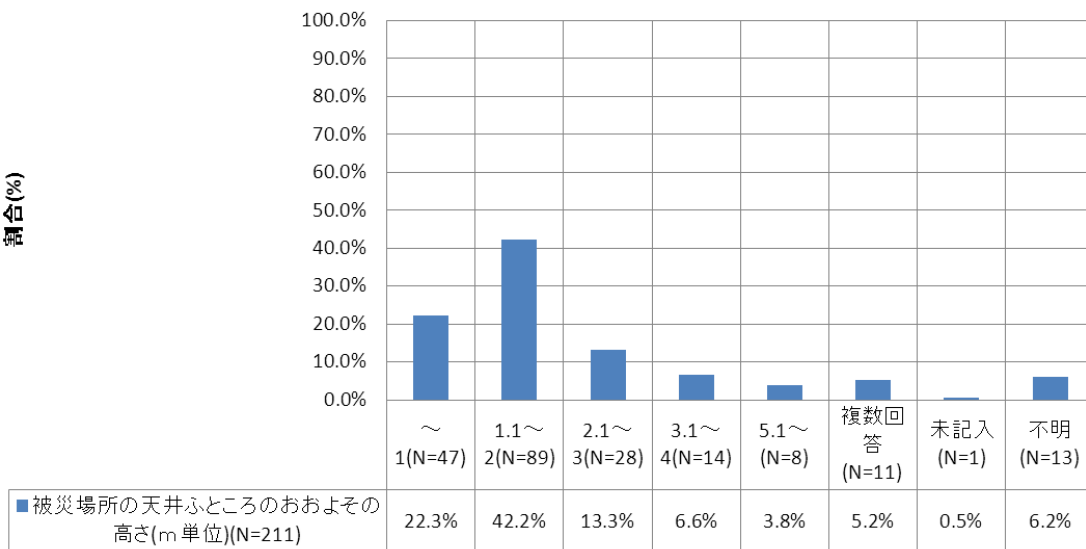


図 2.29 被災場所の天井ふところのおおよその高さ (m 単位) (N=211)

問 27：被災場所の室のおおよその広さ

※㎡で回答→11分類で集計

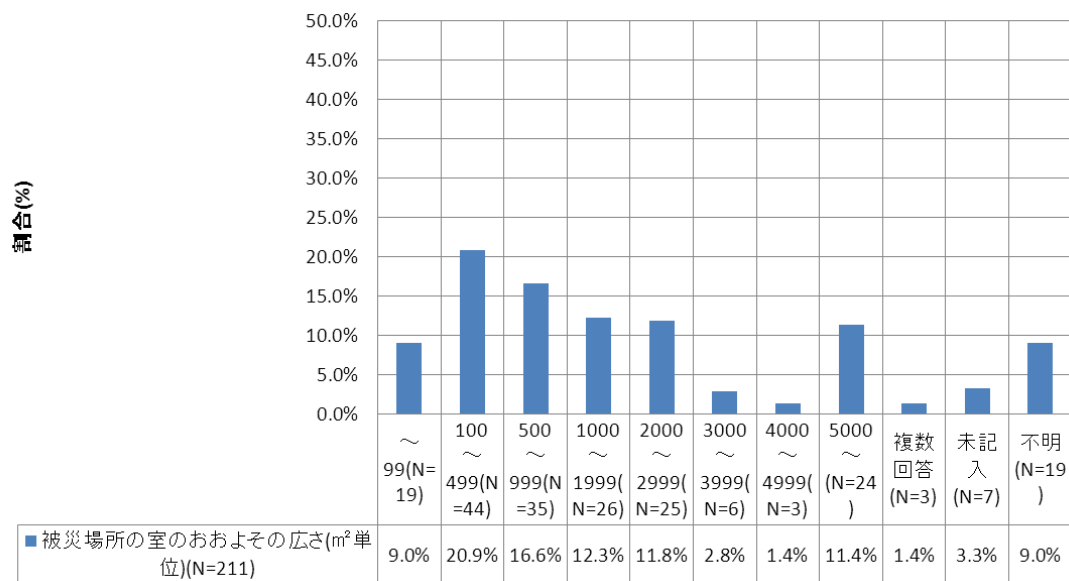


図 2.30 被災場所の室のおおよその広さ (㎡単位) (N=211)

問 28：被災場所の天井下地

選択肢・7択

1. 木製下地 2. 金属製下地 3. システム天井 (ライン) 4. システム天井 (クロス) 5. 直天井
6. 不明 7. その他 (回答欄に具体的に記入)

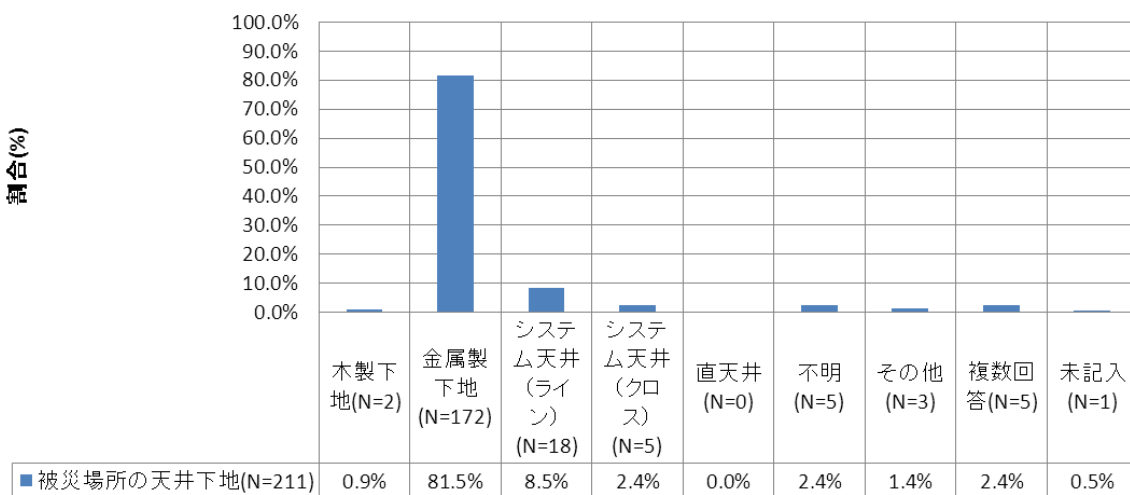


図 2.31 被災場所の天井下地 (N=211)

※「7 その他」の回答：鉄骨下地直天井、EXP 対応(片方吊ボルト、もう1方レール)、アルミスパンドレル専用下地(ステンレス)

問 29 : 被災場所の天井仕上げ材料

選択肢・7択

1. 木製板(合板等) 2. ロックウール吸音板 3. せっこうボード 4. けい酸カルシウム版 5. 金属 6. 不明 7. その他(回答欄に具体的に記入)

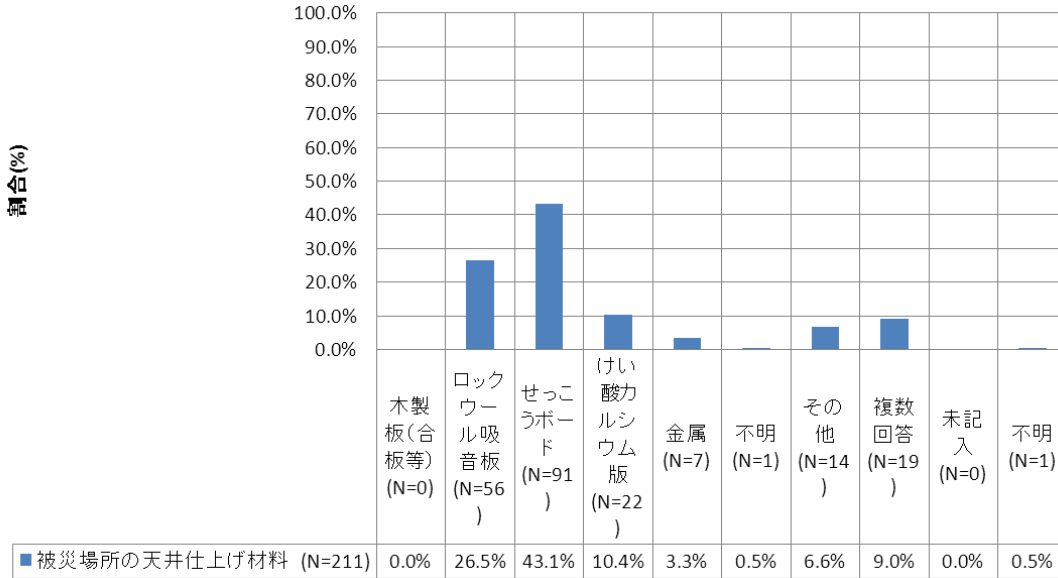


図 2.32 被災場所の天井仕上げ材料 (N=211)

問 30 : 被災場所の天井仕上げ材の重ね枚数

選択肢・4択 / 1.1枚(直張り) 2.2枚 3.3枚以上 4.その他

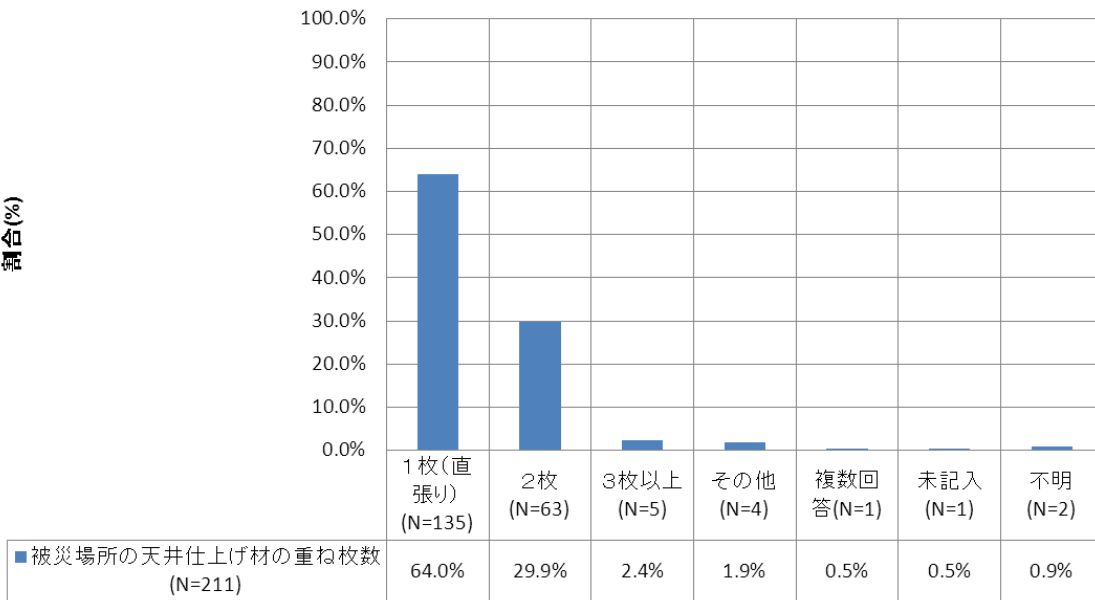


図 2.33 被災場所の天井仕上げ材の重ね枚数 (N=211)

問 31 : 天井落下に影響した (可能性のある) 設備

選択肢・8 択 (複数回答可)

1. 空調 2. 照明 3. スピーカー 4. スプリンクラー 5. 給排水管設備 6. 不明
7. 無 8. その他 (回答欄に具体的に記入)

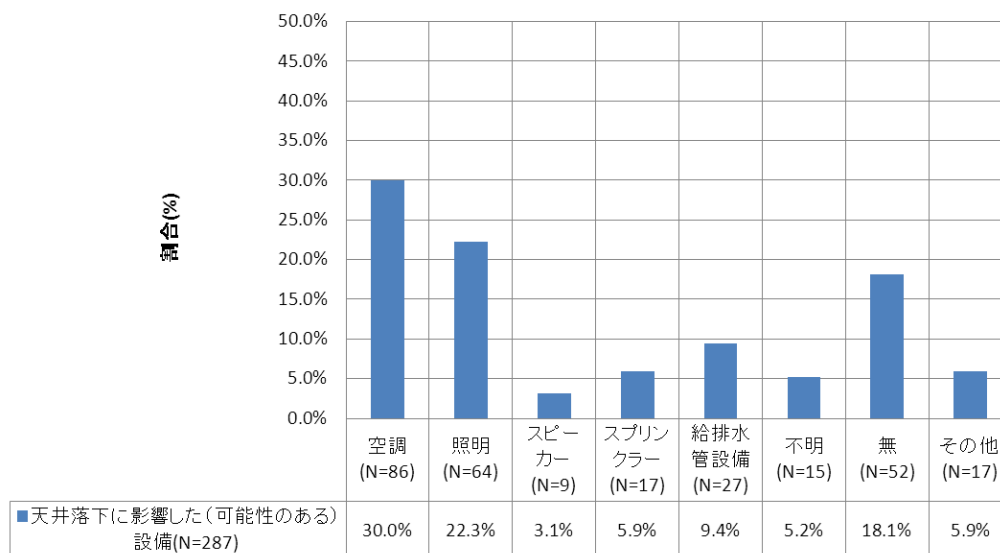


図 2.34 天井落下に影響した (可能性のある) 設備 (N=287)

※「8その他」の回答:

排煙口、電気ケーブル、ガラス防煙垂壁、テレビモニター他、テレビ会議設備モニター、シャッター、電気ケーブルラック、天井内歩廊、換気ダクト天井突きだし部

問 32 : 問 31 の振れ止め等の耐震対策

選択肢・2 択 / 1. 有 2. 無

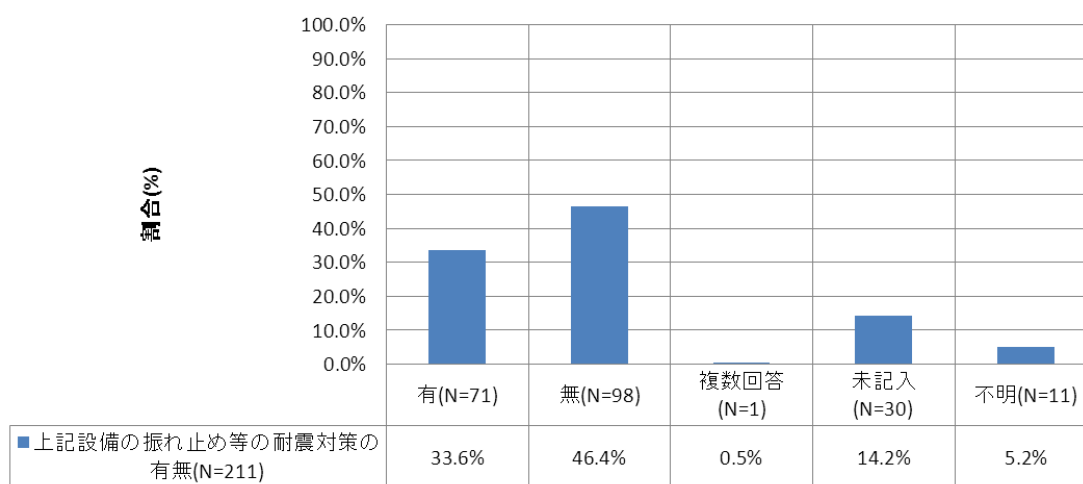


図 2.35 上記設備の振れ止め等の耐震対策の有無 (N=211)

※複数回答の内容: 混在していた

問 33 : 天井面のおおよその形状

選択肢・5 択 (複数回答可)

床面に対し 1. 水平・フラット 2. 傾斜 3. 曲面 4. 段差あり 5. その他 (回答欄に具体的に記入)

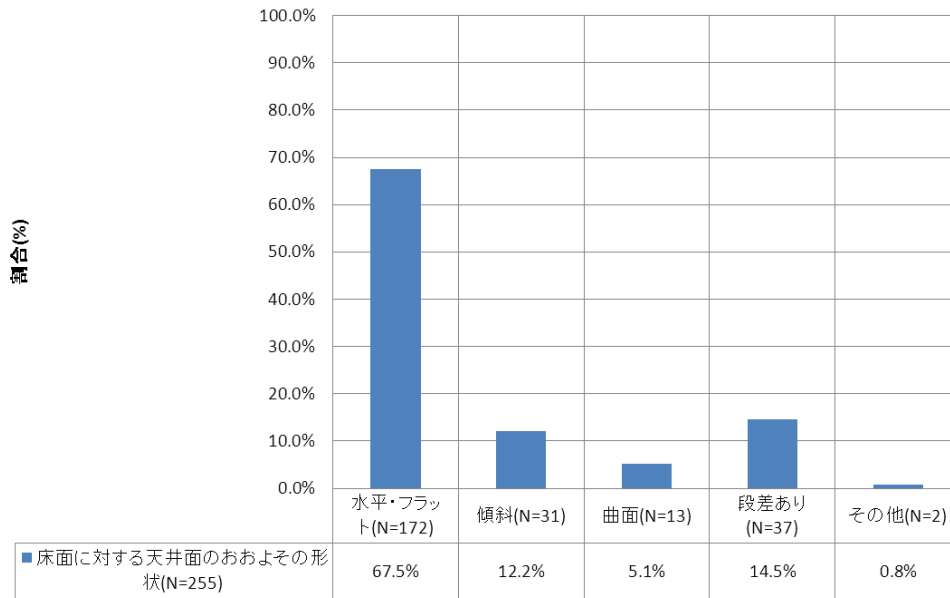


図 2.36 床面に対する天井面のおおよその形状 (N=255)

※「5 その他」の回答：ホールの天井

問 34-1 : 被害の概要 (在来工法)

選択肢・9 択 (複数回答可)

1. 天井仕上材のみの落下 (野縁から仕上材のみが脱落)
2. 野縁と野縁受けを接合するクリップの外れ
3. 野縁受け同士をつなぐ接合部の (金物、溶接) の外れ
4. 野縁受けと吊りボルトを接合するハンガーの開き、破断、外れ
5. ブレースの接合部 (溶接、金物) の外れ
6. 吊りボルト自体の破断
7. 吊りボルト上部の接合金物の外れ
8. 吊りボルトの溶接接合部の破断
9. その他の被害 (回答欄に具体的に記入)

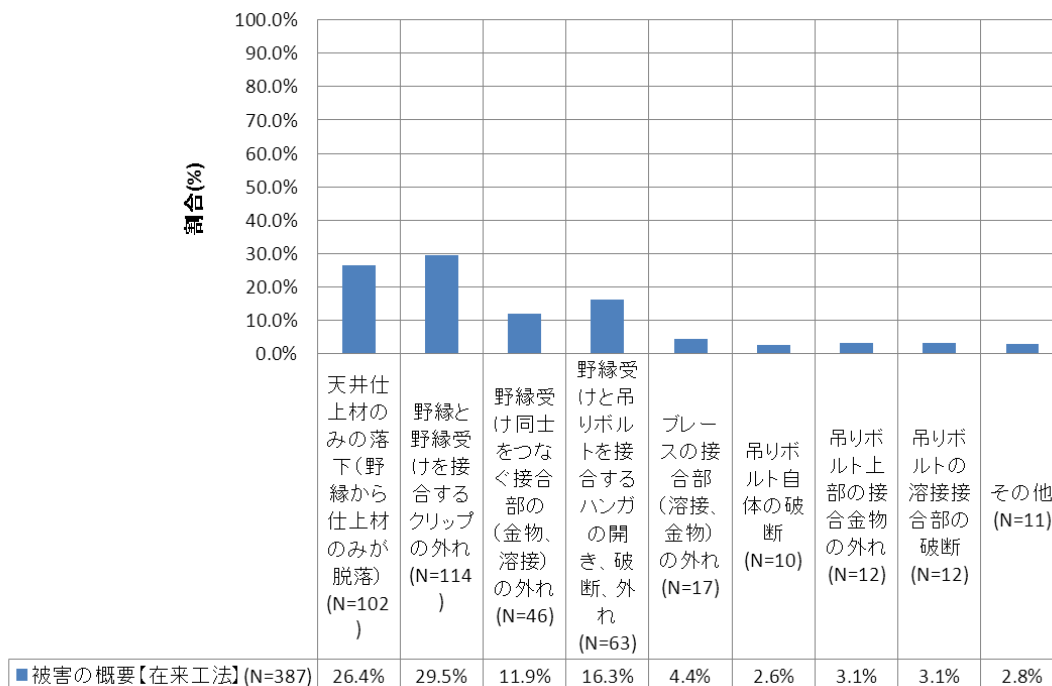


図 2.37 被害の概要【在来工法】(N=387)

※「9 その他」の回答：

内壁と衝突して、野縁、野縁受けが座屈／天井段差間の壁が下地(スタッド)と共に脱落／津波被害あり

表 2.11 顕著に見られた被害状況（在来工法）

顕著に見られた被害状況（在来工法）		件数	割合
1	天井仕上材のみの落下（野縁から仕上材のみが脱落）	14	14%
2	野縁と野縁受けを接合するクリップの外れ	50	52%
3	野縁受け同士をつなぐ接合部の（金物、溶接）の外れ	5	5%
4	野縁受けと吊りボルトを接合するハンガーの開き、破断、外れ	12	12%
5	ブレースの接合部（溶接、金物）の外れ	1	1%
6	吊りボルト自体の破断	0	0%
7	吊りボルト上部の接合金物の外れ	0	0%
8	吊りボルトの溶接接合部の破断	1	1%
9	その他	14	14%

問 34-2 : 被害の概要 (システム天井)

選択肢・9択 (複数回答可)

1. 天井パネルのみの落下
2. バー同士の継手接合部、クロス接合部の破断、外れ
3. Tバーと吊りボルトを接合するTハンガーの開き、破断、外れ
4. Tバーと野縁受けを接合するCTハンガーの開き、破断、外れ
5. Hバーと野縁受けを接合するCHクリップの外れ
6. 野縁受けと吊りボルトを接合するハンガーの開き、破断、外れ
7. ブレースの接合部 (溶接、金物) の外れ
8. 吊りボルト自体の破断
9. 吊りボルトの溶接接合部の破断
10. その他の被害 (回答欄に具体的に記入)

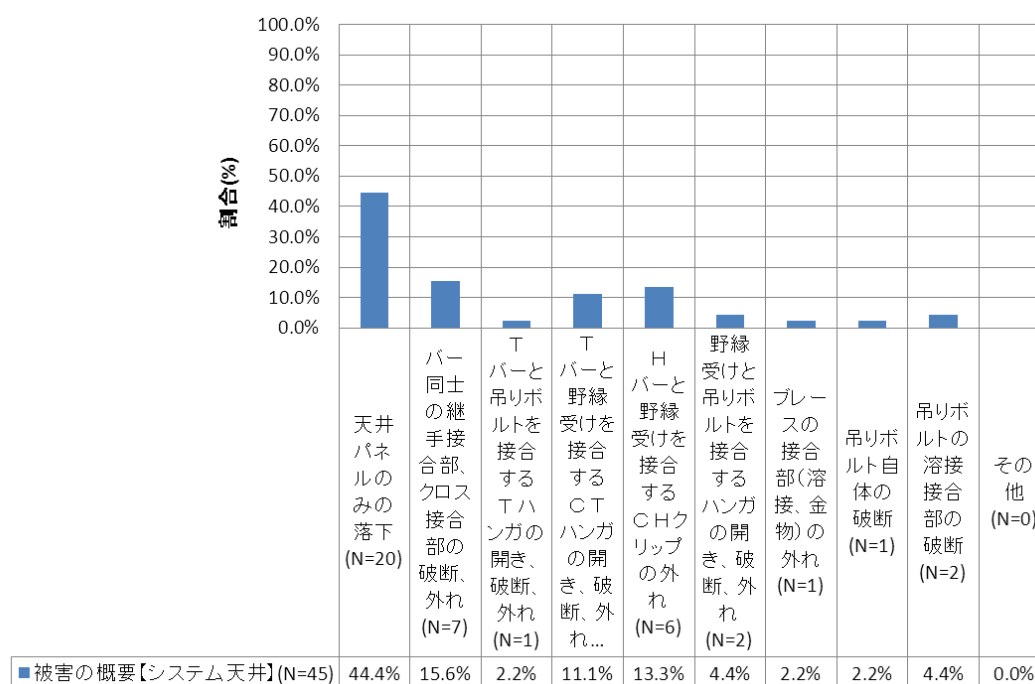


図 2.38 被害の概要【システム天井】(N=45)

※「10 その他」の回答：なし (0件)

表 2.12 顕著に見られた被害状況 (システム天井)

顕著に見られた被害状況 (システム天井)		件数	割合
1	天井パネルのみの落下	8	42%
4	Tバーと野縁受けを接合するCTハンガーの開き、破断、外れ	1	5%
5	Hバーと野縁受けを接合するCHクリップの外れ	2	11%
6	野縁受けと吊りボルトを接合するハンガーの開き、破断、外れ	2	11%
11	その他の回答	6	32%

問 35-1 : 構造躯体の被害有無

選択肢・2択 / 1. 有 2. 無

表 2.13 構造躯体の被害の有無

構造躯体の被害の有無	件数	割合 (%)
有	21	10.0%
無	173	82.0%
未記入	7	3.3%
不明	10	4.7%

問 35-2 : 構造躯体の被害内容

選択肢・11択 (複数回答可)

1. 主要な柱の破壊 2. 大梁の破壊 3. 耐力壁の破壊 4. 基礎の破壊
 5. 基礎ぐいの破壊 6. 小屋組の破壊 7. 土台の破壊 8. 斜材の破壊
 9. 床版の破壊 10. 屋根版の破壊 11. その他の被害 (回答欄に具体的に記入)

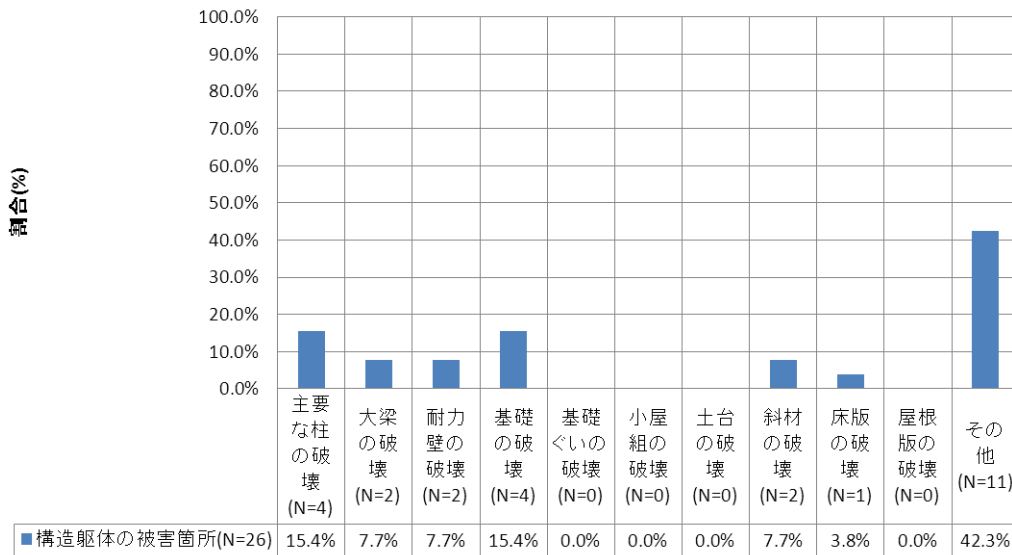


図 2.39 構造躯体の被害箇所 (N=26)

問 36 : 問 35 の構造躯体の被害内容の詳細

回答 : 7 件
筋かい (鋼管ブレース) ガセットプレートの変形 (2 件)
柱壁が RC 造、屋根が S 造+折半屋根の構造で、屋根受け鉄骨仕口廻りに損傷
水平屋根ブレースの破断が該当天井を有する室で各所にみられた。
鉄骨小梁を斜めに架けた場所 1 か所のボルト破断
アンカーボルト降伏
構造体では無いが、間仕切 ALC 板の倒壊有り (2F 分の 1/2 程度)

問 37 : 復旧の状況

選択肢・4 択

1. 復旧済 2. 復旧工事中 3. 被災時のまま（落下物撤去済） 4. 被災時のまま（落下物未撤去）

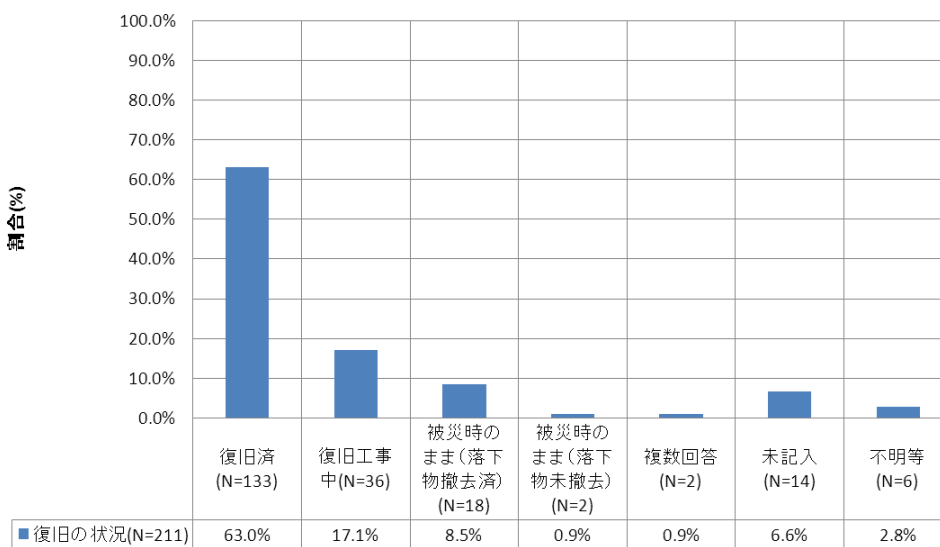


図 2.40 復旧の状況 (N=211)

問 38 : 復旧の方法

選択肢・3 択

1. 従前と同じ仕様で復旧 2. 従前と違う仕様で復旧（落下防止対策等を講じるための仕様の変更）
3. 従前と違う仕様で復旧（落下防止対策を目的とするものではない仕様の変更）

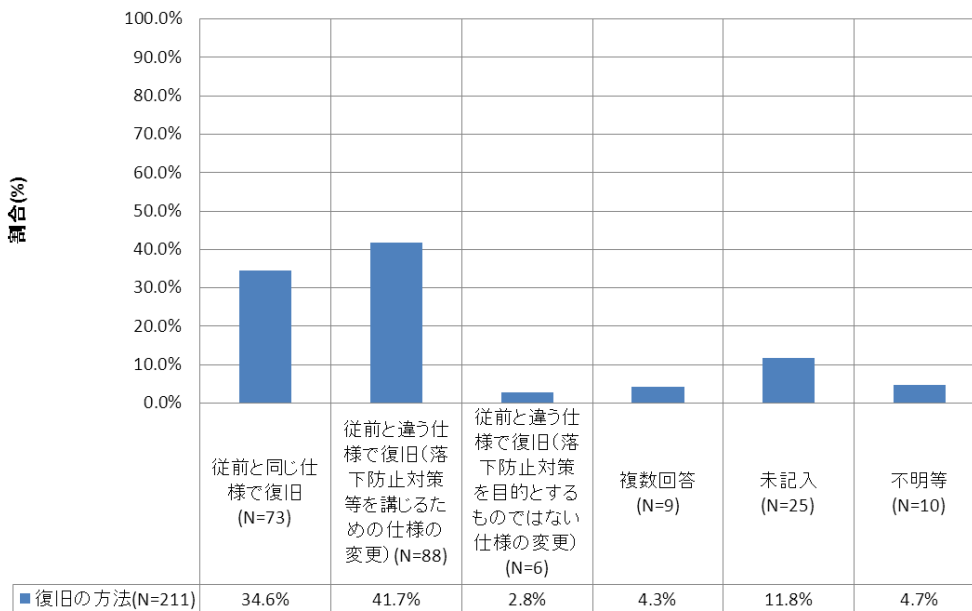


図 2.41 復旧の方法 (N=211)

問 39 : 従前と違う仕様で復旧した場合の落下防止対策

※自由記述

※回答をもとに、以下のとおり（1～17）に分類

表 2.14 落下防止対策

落下防止対策		
内容		件数
1	振れ止め(耐震ブレース)の設置・補強	49
2	クリアランス設置・変更	21
3	接合金物の補強	16
4	天井下地の補強・耐震化	14
5	設備機器振れ止めの設置・補強	8
6	天井材の撤去・軽量化	8
7	天井材の落下防止金物取付け	5
8	吊りボルト・野縁受けの増強	3
9	躯体の補強	3
10	CTハンガーの補強	3
11	間仕切壁固定の補強	3
12	天井段差部の補強	2
13	天井周囲の固定	2
14	システム天井から在来天井に変更	2
15	在来天井からシステム天井に変更	1
16	天井板の変更	1
17	不明	3

問 41 : クリアランスの措置について（天井面と周囲の壁等の間に、十分な隙間があるかどうか）

選択肢・3択

1.措置なし

2.措置あり（クリアランスの間隔など具体的な措置内容を回答欄に記入）

表 2.15 クリアランスの措置について（天井面と周囲の壁などの間に、十分な隙間があるかどうか）

クリアランスの措置について（天井面と周囲の壁等の間に、十分な隙間があるかどうか）	件数	割合（%）
措置なし	185	88%
措置あり（クリアランスの間隔など具体的な措置内容）	22	10%
複数回答	0	0%
未記入	4	2%

クリアランスに対する回答[（ ）内は件数]：

6mm（1）、10mm（1）、25mm（1）、30mm（1）、50mm（2）、150mm（1）、170mm（1）、50以上（1）、10～20mm（1）、その他（元々ユニット状の天井が吊られており、各ユニットの周囲にクリアランスがある／天井の各パネルには隙間がある）

問 42：クリアランスの措置について（凹凸、段差など天井面の剛性が異なる部分相互に、隙間があるかどうか）

選択肢・3択

- 1.措置なし
- 2.措置あり（クリアランスの間隔など具体的な措置内容を回答欄に記入）

表 2.16 クリアランスの措置について
 （凹凸、段差など天井面の剛性が異なる部分相互に、隙間があるかどうか）

クリアランスの措置について（凹凸、段差など天井面の剛性が異なる部分相互に、隙間があるかどうか）	件数	割合（%）
天井面の剛性の異なる部分なし	85	40.3%
措置なし	107	50.7%
措置あり（クリアランスの間隔など具体的な措置内容）	14	6.6%
未記入	4	1.9%
不明	1	0.5%

クリアランスに対する回答[（ ）内は件数]：

5mm（1）、20mm（1）、30mm（1）、その他（段差部分・柱廻り・壁取合いに50mmのクリアランスを取っている／段差部には見切りがあり、見切りとパネルには隙間があいている

問 43：クリアランスの措置について（天井面と設備の間に、隙間があるかどうか）

選択肢・3択

- 1.措置なし
- 2.措置あり（クリアランスの間隔など具体的な措置内容を回答欄にご記入下さい）

表 2.17 クリアランスの措置について（天井面と設備の間に、隙間があるかどうか）

クリアランスの措置について（天井面と設備の間に、隙間があるかどうか）	件数	割合（%）
天井面に設備なし	15	7%
措置なし	169	80%
措置あり（クリアランスの間隔など具体的な措置内容）	17	8%
未記入	5	2%
不明	5	2%

クリアランスに対する回答[（ ）内は件数]：

30mm（2）、50mm（1）、その他（設備機器廻りに50～100mmのクリアランスを取っている／設備配管と天井吊ボルトの間を300mm～400mmの離隔を取っていた／照明器具とのクリア12.5mm.）

問 44：振れ止めの設置について（吊りボルトにブレースを設置する等）※水平部材は振れ止めに含まない。

選択肢・6 択

- 1.設置していない
- 2.設置あり（吊りボルトの大半にブレースを設置）
- 3.設置あり（吊りボルトの半数程度にブレースを設置）
- 4.設置あり（吊りボルトの2～3割程度にブレースを設置）
- 5.設置あり（吊りボルトのごく一部にブレースを設置）
- 6.設置あり（ブレースの設置状況不明）

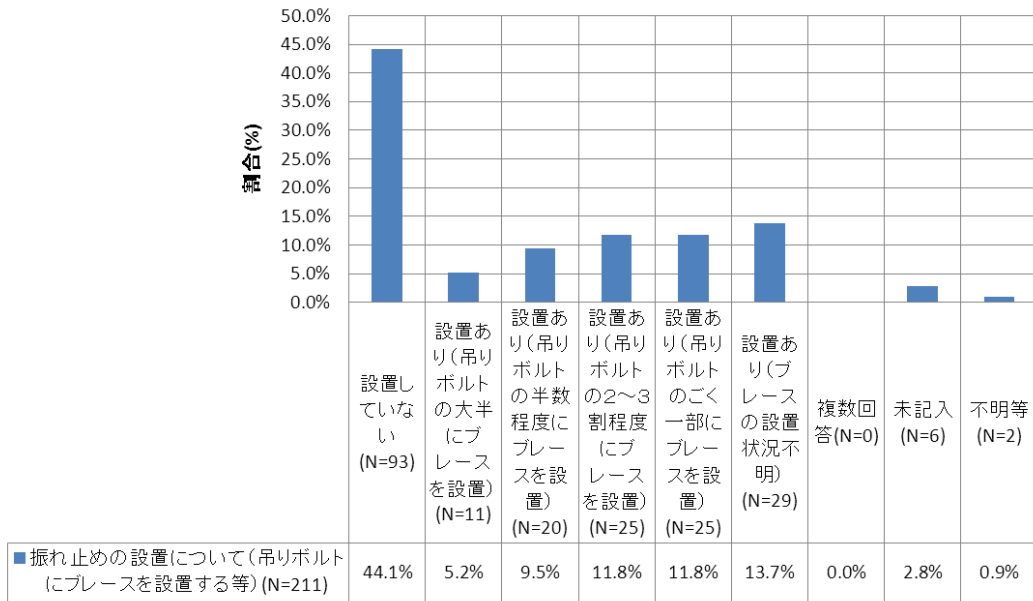


図 2.42 振れ止めの設置について（吊りボルトにブレースを設置する等）(N=211)

問 45：当該建築物は、天井崩落対策に係る技術的助言（平成 13 年 6 月 1 日国住指発第 357 号、平成 15 年 10 月 15 日国住指発第 2402 号）を参考としていましたか

選択肢・3 択

- 1.参考としていた
- 2.参考としていない
- 3.不明

表 2.18 当該建築物は、天井崩落対策に係る技術的助言を参考としていましたか

当該建築物は、天井崩落対策に係る技術的助言を参考としていましたか	件数	割合 (%)
参考としていた	29	14%
参考としていない	121	57%
不明	60	28%
未記入	1	0%

2. 2 東日本大震災における天井脱落被害の現地調査

2.2.1 目的

東日本大震災による天井脱落の情報を収集し、被害防止・軽減のための対策や基準のあり方について検討するためには、天井の種類や被災場所の用途等といった基本的な情報に加え、下地構成を含む天井の仕様、被害箇所・部位、損傷・破壊形態等の詳細な情報についても把握しておく必要がある。これらの詳細な情報を得ることを目的として、現地調査を実施することとした。

なお、本検討は平成 23 年度に開始されたものであり、震災から一定の期間が経過しているため、被害のあった天井の補修・改修等が進んでいるものも多い状況であり、現地調査は被災状況が確認できるものを優先して可能な範囲で実施した。

2.2.2 調査対象

現地調査の対象を絞り込むため、2.1.1 に示したアンケート調査をまず実施し、発生した天井被害に関する基本的な情報を収集した。アンケートでは必ずしも大規模空間¹⁾に限定することなく、幅広く情報を求めている。アンケートの結果から、被災状況が保存されているものを優先するとともに、建築物の用途、被災場所の規模、天井の損傷・破壊形態等が偏らないように対象建築物の候補を選定した。中には震災後に学会や他機関等で現地調査がなされ被害状況が報告されているものもあるが、被害や地震後の対応に特徴のあるものや、震災前の天井の耐震改修が功を奏したと思われるものは候補に含めた。建築物 A~J については同年 5 月下旬から 7 月中旬にかけて現地調査を実施した。被害のあった天井の補修・改修等が済んでいたものや進められていたものもあるが、現地に赴いて調査を行ったものは、建築物内部の空間構成や構造に加えて天井の仕様等を把握するとともに、被災時の状況に関する詳細な情報を収集している。

表 2.19 に、建築物 A~J について、建築物の諸元、被害発生時の諸元、天井被害発生場所の諸元、脱落した箇所の天井の詳細な仕様、被害状況をまとめて示す。建築物 J では 2 つの場所を取り上げ、計 11 事例について整理した。これらの情報はアンケートの回答と現地調査時の目視や計測、ヒアリング等に基づいているが、天井の仕様等については調査の中で確認できた範囲のものであることを予めお断りしておく。以下、対象建築物やその天井等の概要を述べる。

(a) 建築物及び被災場所の諸元

対象建築物は、宮城県、福島県、茨城県の 3 県にあり、本震の際の震度は 5 強から 6 強である。建設年は、いわゆる新耐震基準が施行された昭和 56 年より前の建築物が 3 件、以降のものが 7 件であり、後者のうち天井に関する最初の技術的助言が出された平成 13 年以降のものは 2 件 (A、E) である。被災場所は、今回の震災前にも天井脱落被害の報告がある空港ロビー、体育館、ホールといった用途に加えて、展示室、観覧席・通路、会議場という用途も選択した。被災場所のおおよその広さは 500m² 未満のものが 1 事例 (I)、天井の脱落防止対策に関して調査対象となる 500m² 以上のもの²⁾が 10 事例 (A、B、C、D、E、F、G、H、J) である。被災場所のおおよその天井高さは、5 m 未満のものが 4 事例 (G、H、I、J (展示室))、10 m 以上のものが 7 事例 (A、B、C、D、E、F、J (ホール)) である。

(b) 天井の仕様等に関する詳細な情報

上述の選定経緯の結果として在来工法による天井又はそれに準ずる天井が主な調査対象となった。天井板は在来工法のほとんどが捨て張り工法である。被災場所の天井の形状は一様に水平なもののほか、一様な勾配のあるもの (山形架構の屋根面に平行な勾配天井)、天井の断面形状の一方向が複雑なもの、段差が多いものなどを含んでいる。天井の吊り元は、スラブや鋼板製屋根等である。吊り元との接合は

接合金物やインサートによる。吊り長さは短いもので50cm程度、長いもので4m弱である。ダクト等により部分的に吊りボルトが不足していたと考えられるもの（A、J（展示室））もある。震災前に天井の補強・改修がなされていたものが2事例（C、D）含まれている。

2.2.3 被害

建築物Dを除く全ての10事例で、天井が床面まで落下した。天井板が天井下地と一体で床面まで落下したものが多く、野縁受けより下の部分がハンガーから脱落したのもあった。後述の(b)及び(c)のとおり特定の箇所や部材・接合部の損傷に起因するもののほか、天井の脱落や垂れ等の被害の主な要因としては、山形架構の屋根面に平行な勾配天井の耐震性に関する配慮不足、斜め部材の配置の偏りや量の不足、ダクト等による吊りボルトの不足、が挙げられる。

なお、全ての建築物の構造躯体は軽微なものを除いて特に構造的な被害を被っていない。

(a) 人的被害

10事例のうち7事例が被害発生時に使用中であったが、被災場所に居た人々が被災場所以外の所へ即座に避難したという事例も多く、人的被害は2事例に留まっている。時間帯や曜日、使用状況等によってはより多くの人的被害を生じた可能性があると考えられる。

(b) 被害箇所の天井面内の位置

天井が全面的に脱落（全面・ほぼ全面・区切られた一面の天井が脱落）したものは3事例（A、G、I）である。部分的に脱落した箇所の天井面内での位置は、端部・他の部位との取り合い部が8事例（A、B、C、D、E、F、H、J（展示室））と最も多く、段差部・折れ曲がり部が5事例（C、D、E、H、J（ホール））、天井面の中央部（山形架構の棟と軒との中間部を含む。）が4事例（B、D、E、F）である。その他、エキスパンションジョイント部での天井の脱落も1事例（H）確認された。位置としては従来の被害と同様である。

(c) 部材の被害状況

部材の被害状況としては、従来から指摘されているクリップの外れが多い（A、B、C、E、F、H）が、これまであまり着目されていなかったハンガーの開きやそれに起因すると考えられる天井の脱落がいくつかの事例（B、C、G、H、I、J（展示室））で見られた。

技術的助言に沿った措置が施されていたと考えられる建築物Eについては、H形鋼の梁に取り付けられた吊りボルトの吊り元の金物や、斜め部材の点付け溶接が地震時の振動によって損傷し、多くの箇所で外れてしまったため、天井が脱落するに至ったと思われる。

2.2.4 現地被害調査のまとめ

本節では東日本大震災による天井脱落に関して、天井の仕様等の詳細情報を得るために実施した現地調査について報告した。限られた範囲であるが、調査結果から天井脱落対策等を考える上で着目すべき項目をまとめると次のようになる。

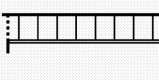


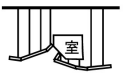
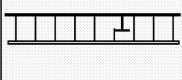
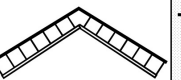
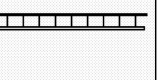
- ・天井の形状： 山形架構の屋根面に平行な天井
- ・天井の箇所： 端部、段差部・折り曲がり部、エキスパンションジョイント部
- ・下地の構成・配置： 斜め部材の配置のバランスと量、接合部（金物、溶接）の外れ、ダクト等による吊りボルトの不足

2. 地震による天井脱落被害

・部材単体： クリップの外れ、ハンガーの開き

- 1)、2) 建築物防災週間に実施されている国土交通省の調査では、500m²以上の空間を有する体育館等の吊り天井が調査対象とされている。(例えば、国土交通省：建築物防災週間において行った各種調査結果について、平成22年12月17日 (以下 URL)
http://www.mlit.go.jp/report/press/house05_hh_000215.html)

表 2.19 現地被害調査対象事例

		建築物A	建築物B	建築物C	建築物D	建築物E	建築物F	建築物G
現地調査日(平成23年)		6/28	6/28	7/3	7/3	7/4	7/4	7/4
建築物の諸元	建設地	茨城県	茨城県	宮城県	宮城県	宮城県	宮城県	宮城県
	建設年	平成22	昭和60	昭和62	昭和48	平成17	平成6	平成12
	構造	S造	SRC造・S造・RC造	RC造・S造	SRC造	S造・RC造	S造	S造
被害発生時の諸元	被害が発生した地震 /本震時の周辺の震度	本震/6弱	本震・余震/6弱	本震・余震/6弱	本震/6弱	本震・余震/6強	本震・余震/6強	本震・余震/6弱
	被害発生時の使用状況	使用中	使用中	使用中	不使用	使用中	使用中	使用中
被災場所の主な用途		空港ロビー	体育館	ホール	ホール	体育館	体育館	展示室
被災場所のおおよその広さ(m ²)/天井高さ(m)		942/14.0	1800/10.7~14.9	1100/14.9	900/15	850/10.7~11.6	942/11.6~14.6	1450/3.6
天井種類	在来工法による天井 及びそれに準ずる天井	○	○	○	○	○	○	○
	システム天井							
	木製下地の天井							
天井の断面形状		一様に水平	一様な勾配	一方向が複雑	一方向が複雑	一様に水平	一様な勾配	一様に水平
天井の断面概要図								
脱落した 箇所の 天井の 詳細な 仕様	吊り元 ※[]内は脱落 箇所以外	スラブ			[○(RCスラブ)]	[○(RCスラブ)]		○(鉄骨フラットスラブ)
		鉄骨大梁				[○]	○	
	吊り元との 接続 ※[]内は脱落 箇所以外	○チャンネル		○(母屋材)	○(シーリング室下横架材)	○(1次下地)		○(母屋材)
		ALCパネル						
	天井板	鋼板製屋根	○				○	
		インサートねじ込み			○	[○]		
		接合金物(引っ掛ける形のもの)		○	○		○	○
	天井の 詳細な 仕様	溶接			[○]	○		
		その他						○
		捨て張り工法	○	○	○	○	○	○
詳細な 仕様	直張り工法							
	その他							
	おおよその吊り長さ(cm)	160	230~310	50	60	70~100	75	52~53
詳細な 仕様	吊りボルト等への斜め部材・ 水平部材	斜め部材	○		○(一方向)[両方向]	○	○	
	※[]内は脱落箇所以外	その内、配置に偏りを確認したもの	○			○	○	
	水平部材	○	○					
脱落した 箇所の 天井の 被害状況	クリアランスあり	○(一方向)		○(一方向)	○	○		○
	ダクト等による吊りボルトの不足	○						
	天井の補強・改修あり ※[]内は脱落箇所以外				[○] [クリップねじどめ・溶接、 斜め部材設置]	○ (全面改修、天井断面形状 変更、天井仕様変更)		
脱落した 箇所の 天井の 被害状況	被害箇所の 天井面内の 位置	全面・ほぼ全面・区切られた一面	○					○
		端部・他の部位との取り合い部	○	○	○	○	○	○
		平面の中央部		○		○	○	○
		段差部・折れ曲がり部			○	○	○	○
		その他						
	部材被害の状況	吊り元との接合の外れ				○	○	
		斜め部材の溶接部の外れ					○	
		ハンガーの開き		○	○			○
		ハンガーの吊りボルトからの外れ		○				
		野縁受け継手部の外れ(金物接合)					○	○
天井の床面への落下	野縁受け同士の溶接の外れ			○				
	野縁受けのハンガーからの外れ		○	○				
	野縁受けがハンガーから外れて落下			○			○	
	クリップの野縁受けからの外れ	○	○	○	○	○	○	
	天井板が天井下地と一体で落下	○	○	○	○	○	○	
人的被害の有無				○				

※天井の仕様・被害状況は現地調査で確認した範囲について記述。

2. 地震による天井脱落被害

現地調査日(平成23年)		建築物H	建築物I	建築物J		
		7/11	7/11	7/11		
建築物の諸元	建設地	福島県	福島県	福島県		
	建設年	平成5、7	昭和54	昭和45		
	構造	S造(一部SRC造)	SRC造	SRC造		
被害発生時の諸元	被害が発生した地震 /本震時の周辺の震度	本震/5強	本震/6強	本震・余震/5強		
	被害発生時の使用状況	不使用	不使用	使用中	不使用	
被災場所の主な用途		観覧席・通路	会議場	ホール	展示室	
被災場所のおおよその広さ(m ²)/天井高さ(m)		1450/2.5~3.2	207/3.1~4	700/15	500/4.5	
天井種類	在来工法による天井 及びそれに準ずる天井	○	○	○	○	
	システム天井				○	
	木製下地の天井			○		
天井の断面形状		段差が多い 部分的に曲面 一様な勾配	段差が多い	一方向が複雑	一様に水平	
天井の断面概要図						
脱落した箇所の天井の詳細な仕様	吊り元 ※[]内は脱落箇所以外	スラブ	○(デッキプレート)		○(デッキプレート)	
		鉄骨大梁				
		○チャンネル		○(母屋材)		
		ALCパネル		○	○	
	鋼板製屋根	○(最上階)				
	吊り元との接合 ※[]内は脱落箇所以外	インサートねじ込み	○		○	
		接合金物(引掛ける形のもの)	○	○		
		インサート金物		○		○
		溶接				
	その他					
天井板	捨て張り工法	○	○			
	直張り工法				○	
	その他			○	○	
おおよその吊り長さ(cm)		140~390	180	(曲面部吊りなし)	(2段吊り天井)	
吊りボルト等への斜め部材・水平部材 ※[]内は脱落箇所以外	斜め部材			○		
	その内、配置に偏りを確認したもの					
	水平部材			○		
	クリアランスあり					
ダクト等による吊りボルトの不足				○	○	
天井の補強・改修あり ※[]内は脱落箇所以外						
脱落した箇所の天井の被害状況	被害箇所の天井面内の位置	全面・ほぼ全面・区切られた一面		○		
		端部・他の部位との取り合い部	○		○	
		平面の中央部				
		段差部・折れ曲がり部	○		○	
		その他	○(Exp.J部)			
部材被害の状況	吊り元との接合の外れ 斜め部材の溶接部の外れ ハンガーの開き ハンガーの吊りボルトからの外れ 野縁受け継手部の外れ(金物接合) 野縁受け同士の溶接の外れ 野縁受けのハンガーからの外れ 野縁受けがハンガーから外れて落下 クリップの野縁受けからの外れ 天井板が天井下地と一体で落下 天井板が野縁から外れて落下	○(通路)	○		○	
					○	
		○				
		○	○		○	
		○				
		○	○		○	
		○				
		○				
		○	○		○	
天井の床面への落下		○	○	○	○	
人的被害の有無						

※天井の仕様・被害状況は現地調査で確認した範囲について記述。

建築物 A (茨城県小美玉市)**[基本データ]**

- ・ 建築時期：平成 22 年
- ・ 構造・階数：鉄骨造・地上 2 階（一部 3 階）
- ・ 延床面積：8057.58 m²
- ・ 被災場所の用途：空港ロビー
- ・ 被災場所のおおよその広さ：942 m²
- ・ 被災場所のおおよその天井高：14.0m

[建築物概要]

- ・ 吹き抜け上部の鋼板屋根のスパンは 17.7m。

[天井概要]

- ・ スプリンクラーはない。
- ・ 入口側端部に吊りボルトはない。

[技術的助言との対応（クリアランスの確保、斜め部材の設置）]

- ・ クリアランスが確保されていないところもあった。斜め部材は設置されていた。

[天井被害概要]

- ・ 被害発生時間：本震と余震の両方。
- ・ 本震で、出発ロビーの吹き抜け上部にある 7 枚の天井面のうち、1 枚が脱落し、1 枚の端部が垂れた。
- ・ 被災後に吹き抜け部の天井を撤去して、4 月 1 日には 2 階を含めて再開したとのこと。
- ・ エレベータを登ったところの売店上部の天井が本震で被害を受けて、余震で再び被害を受けたとのこと。
- ・ 天井裏の点検を 4 月 11 日以降に実施した際、天井裏にナットが落ちていたものの、どこから落下したものは分からずじまいだったとのこと。
- ・ 設計者から、「天井は 1.1G に耐えられるようにしているが、今回の地震による揺れを計算すると 1.18G であった」と説明を受けている、とのこと。

[天井以外の被害概要]

- ・ 3 階の設備機器、ダクトの保温カバーに被害が見られた。屋上（3 階）にある電気温水器のコンプレッサーが台座からずれ落ちた。

[天井落下時の状況及び負傷者]

- ・ 搭乗口の方へ退避したこと等により、負傷者は出なかったとのこと。

2. 地震による天井脱落被害



写真 A.1 天井が脱落した後の状況（平成 23 年 3 月 12 日撮影）
赤点線台形内が天井脱落箇所、赤楕円内が天井面が垂れた箇所



写真 A.2 被災後に天井面を張らなくした状況（平成 23 年 6 月 28 日撮影）

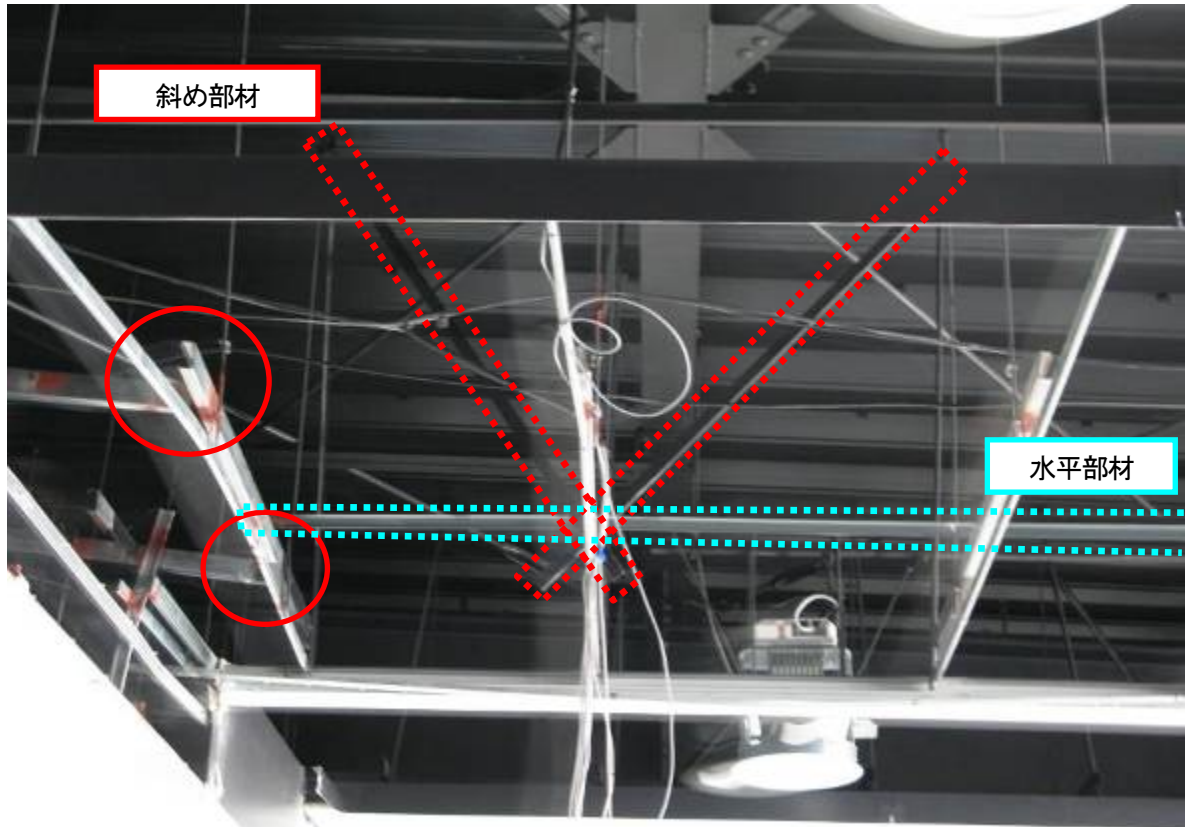


写真 A.3 脱落せずに残った下地の様子（搭乗口側：平成 23 年 3 月 12 日撮影）
赤円内箇所で吊りボルトに取り付けられた水平材に C 形鋼が突き付けられる形になっている

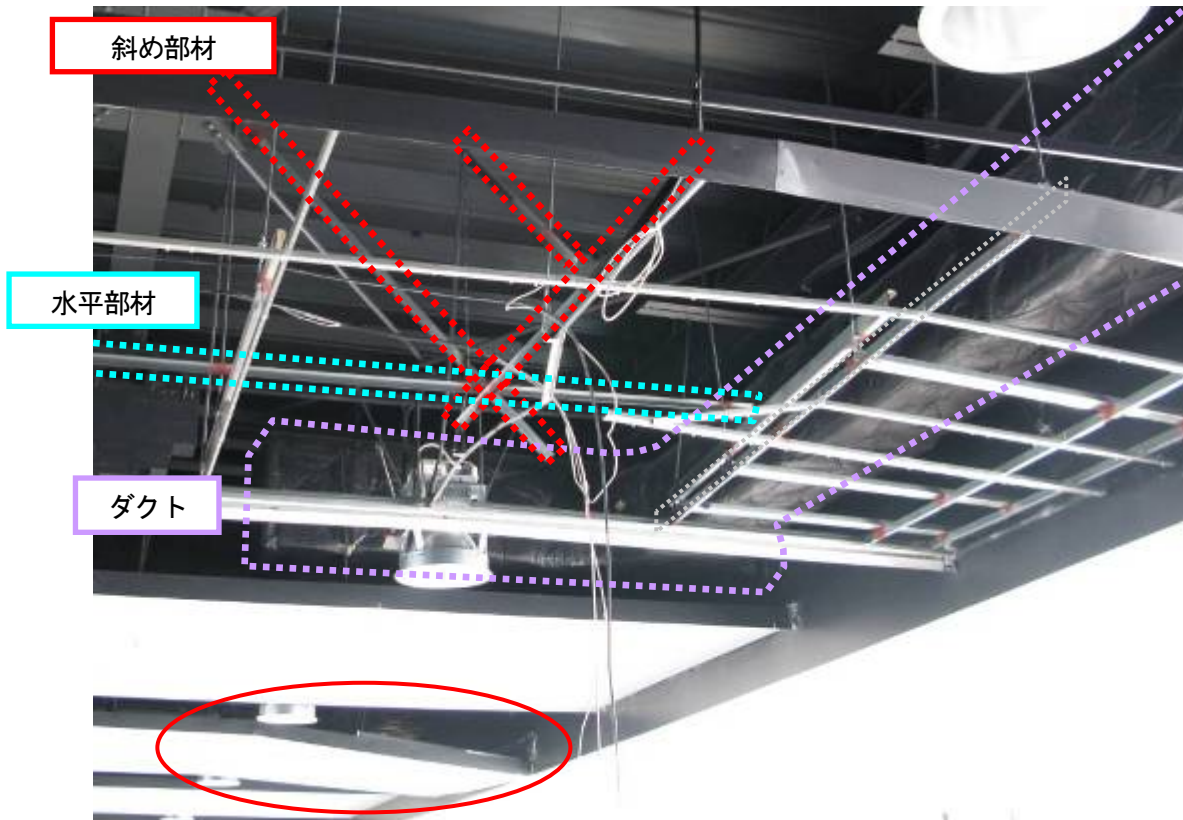


写真 A.4 脱落せずに残った下地の様子（入口側：平成平成 23 年 3 月 12 日撮影）
赤楕円内は端部で垂れた天井

建築物B（茨城県）

[基本データ]

- ・ 建築時期：昭和 60 年
- ・ 構造・階数：鉄骨鉄筋コンクリート造・鉄骨造・鉄筋コンクリート造・地上 2 階
- ・ 延床面積：4216.79 m²
- ・ 被災場所の用途：体育館アリーナ
- ・ 被災場所のおおよその広さ：1800 m²
- ・ 被災場所のおおよその天井高：10.7～14.9m

[建築物概要]

- ・ 山形架構（入母屋形状）。
- ・ アリーナは 37.4m×54.9m≒2050 m²。
- ・ アリーナの天井裏の四隅に排気用の設備がある。

[天井概要]

- ・ 吊り長さは 2.3～3.1m 程度。野縁間隔は 35～40cm。

[技術的助言との対応（クリアランスの確保、斜め部材の設置）]

- ・ 端部でクリアランスは取られていない。落下した部分の天井の下地材には水平部材があり、斜め部材はキャットウォーク下部に吊りボルトで溶接されているもののみ確認できた。

[天井被害概要]

- ・ 被害発生時間：本震と余震の両方。
- ・ 隅部の天井が部分的に落下している。衝突によると思われる。
- ・ 張間方向のスパン 1/4 の辺りの天井面中央部で天井が脱落している。ここではハンガーの開きが多く確認され、野縁受けの外れなども見られた。また、吊りボルトが弓なりに曲がっているものも見られた。
- ・ 体育館の内部は湿気が多いのかカビ臭く、天井のところどころにカビが見られた。また落下した天井も湿っているように感じた。

[天井落下時の状況及び負傷者]

- ・ 落下時にはアリーナで卓球が行われていたが、地震時に外へ逃げたため、人的被害はなかった。



写真 B.1 脱落した天井



写真 B.2 隅部での天井の損傷

2. 地震による天井脱落被害



写真 B.3 天井上端部の取り合い（北側）
（円内の溶接部分は損傷している）



写真 B.4 天井中程の状況（北側）
（斜め部材をキャットウォーク下部に溶接）

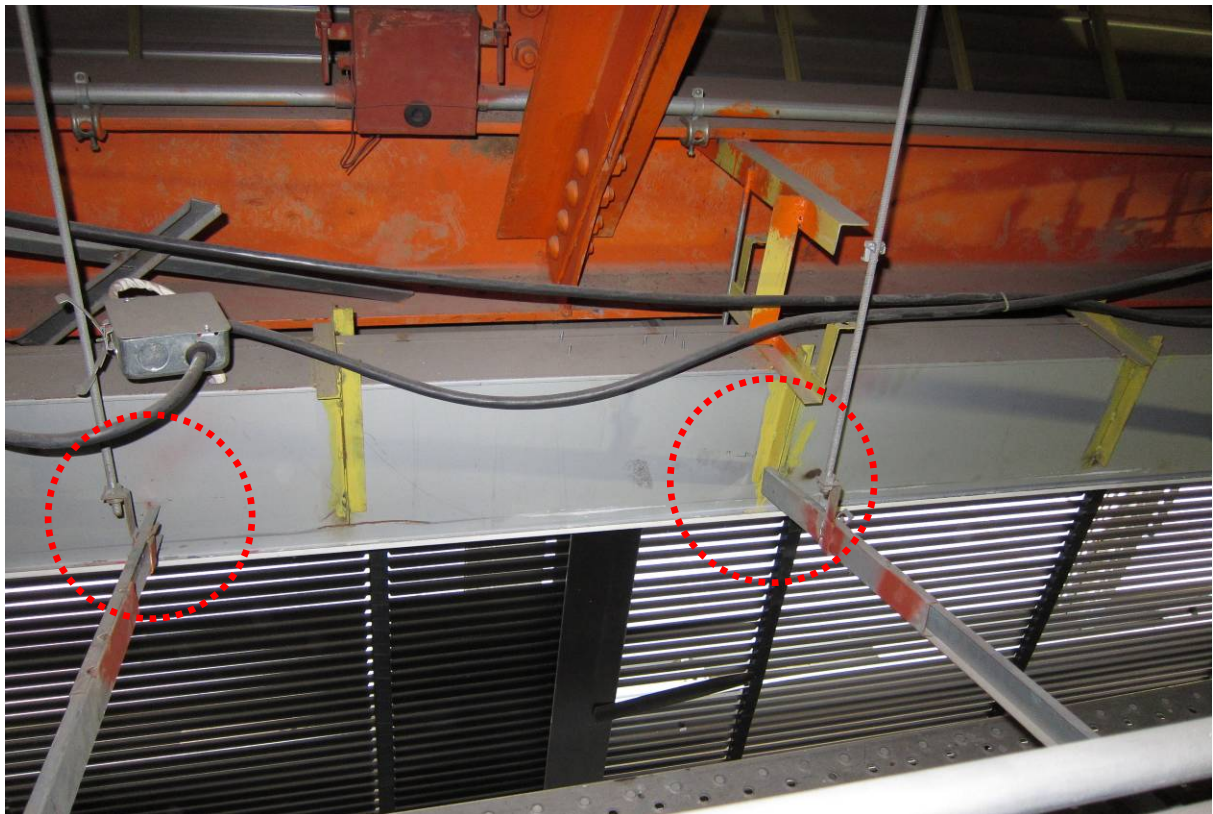


写真 B.5 天井下端部の取り合い（北側）（突き付け。溶接等による留め付けは確認されない）

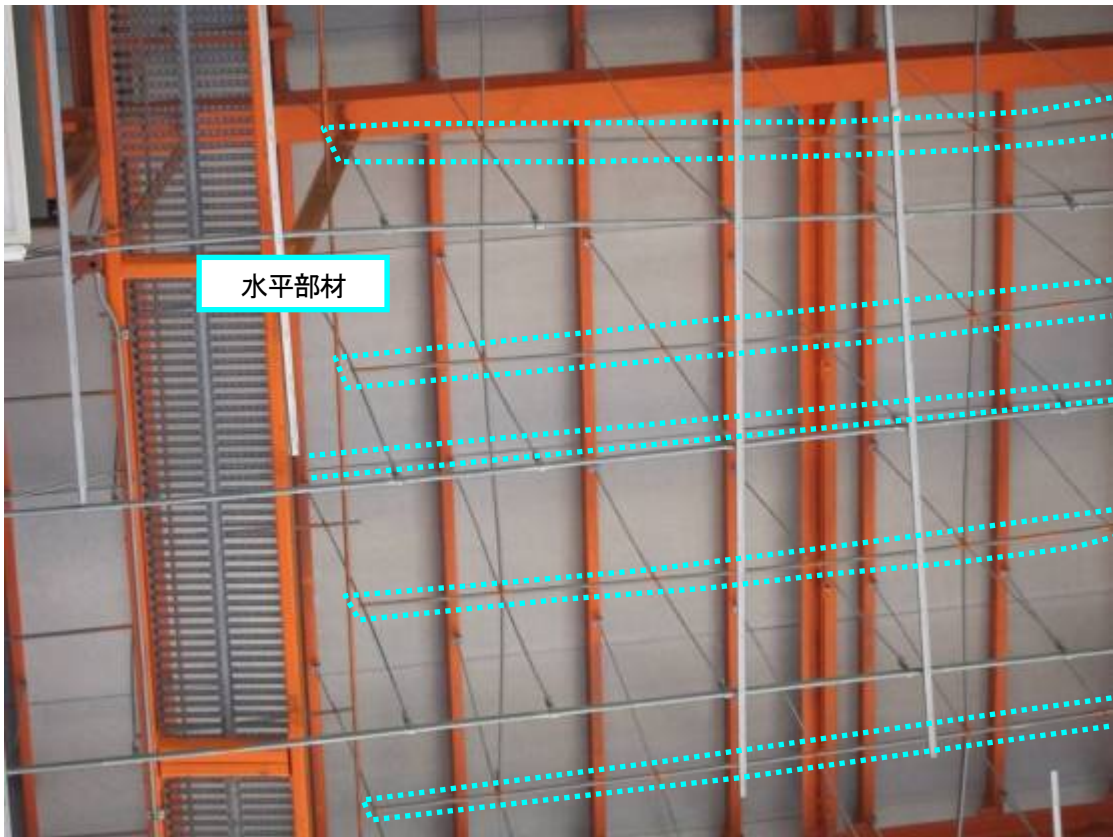


写真 B.6 脱落した天井の下地の様子



写真 B.7 天井脱落箇所の状況（円内でハンガーが開いている）



写真 B.8 天井脱落箇所のハンガーと野縁受けの接合箇所の状況
(ハンガーが軒並み外れており、溶接接合された野縁受け同士の接合箇所が損傷している)

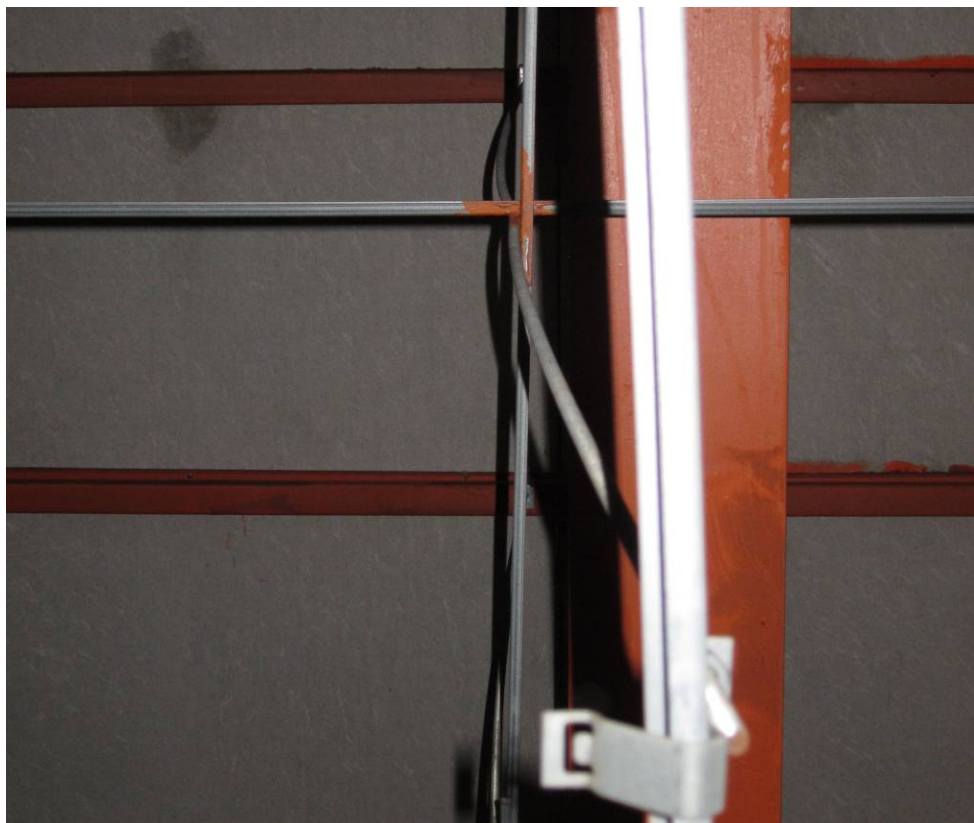
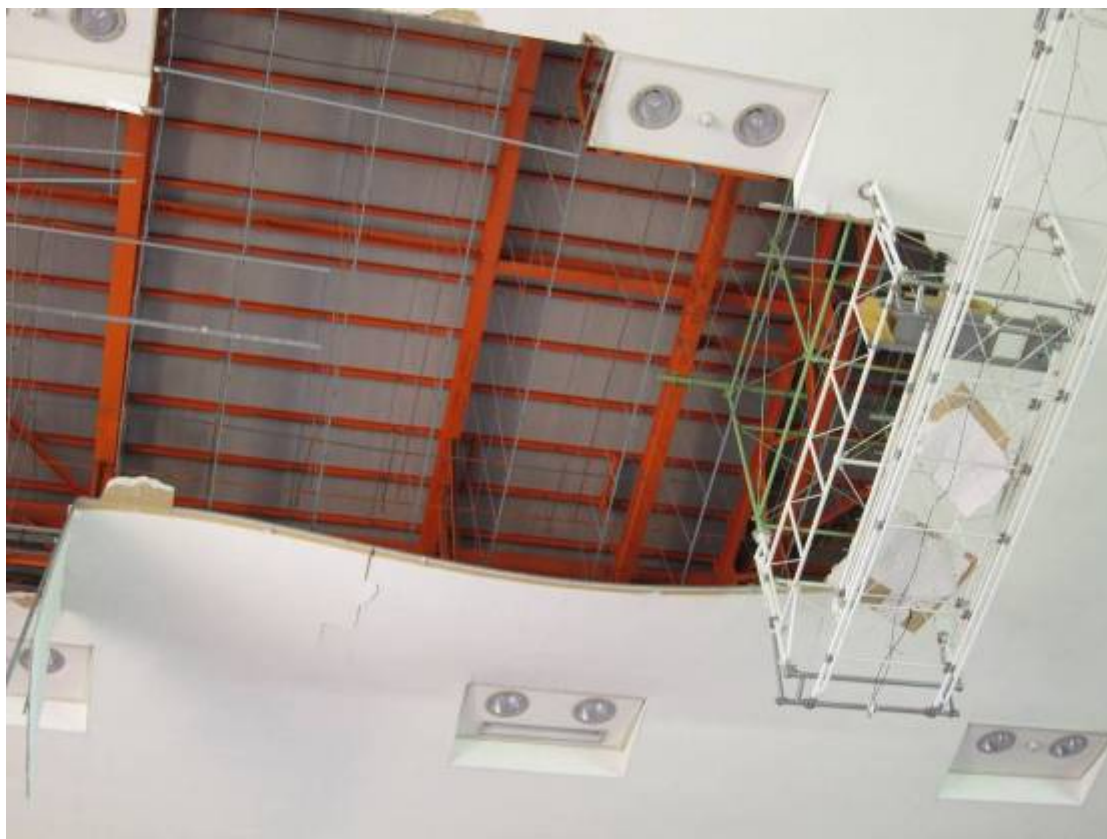


写真 B.9 天井脱落箇所の吊りボルトの損傷例 (ハンガーが開き、吊りボルトが弓なりに曲がっている)



写真B.10 床面に落下した天井



写真B.11 垂れたものの落下に至っていない天井

山形屋根架構に設置された天井の典型的な被害例と考えられる本体育館について、微動計測及び数値解析により、構造躯体の固有振動数や固有モード等の振動特性を把握した。

微動測定は平成 24 年 1 月中旬に屋根面で実施した。計測位置は図 2.43 に示す○印の点で、トラス梁の下弦材に 3 軸微動計測計を設置して計測を行った。図 2.44 に上下方向成分のフーリエ振幅スペクトルを示す。1 次は 0.323 秒と判断される。

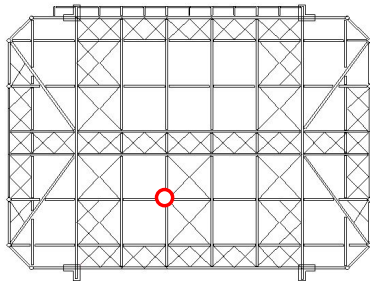


図 2.43 微動計測位置

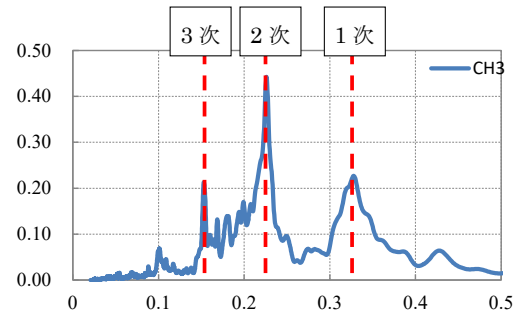
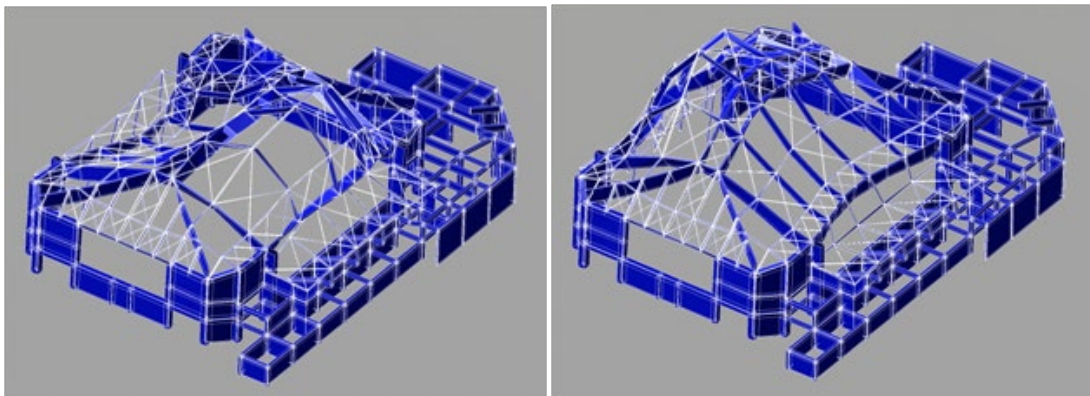


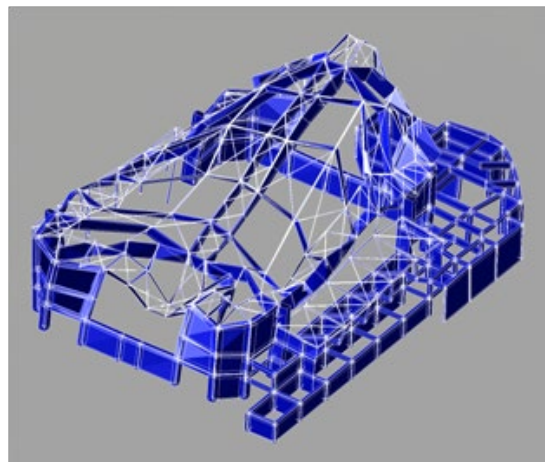
図 2.44 フーリエスペクトル (横軸は周期(sec.))

数値解析による固有値解析結果を図 2.45 に示す。固有周期は微動計測結果とよく対応している。1 次及び 2 次は張間 (短辺) 方向、3 次モードは桁行 (長辺) 方向の振動モードとなっている。1 次及び 2 次のモードで振幅が大きくなる箇所が、天井の脱落被害を生じた領域に対応していることが分かる。



(a) 1 次 $T_1=0.336\text{sec.}$

(b) 2 次 $T_2=0.323\text{sec.}$



(c) 3 次 $T_3=0.234\text{sec.}$

図 2.45 固有値解析結果

建築物 C (宮城県仙台市)**[基本データ]**

- ・ 建築時期：昭和 62 年
- ・ 構造・階数：鉄筋コンクリート造（一部鉄骨造）・地上 3 階（地下 2 階）
- ・ 延床面積：12949.32 m²
- ・ 被災場所の用途：ホール
- ・ 被災場所のおおよその広さ：1100 m²
- ・ 被災場所のおおよその天井高：14.9m

[建築物概要]

- ・ 大ホールと小ホールがある。

[天井概要]

- ・ 大ホールは 500 m²以上であることから天井の改修を行い、平成 19 年 3 月に完成したとのこと。改修方法は端部のクリアランスの確保と、ダブルクリップ等の溶接やビス止めによる補強ということである。現地調査で改修状況を確認した。
- ・ 落下部分の客席から天井までの高さを計測すると 14.9m、張間のスパンは 31m であった。水平の天井はボード 2 枚張り、勾配天井のボードは 3 枚張りであった。

[技術的助言との対応（クリアランスの確保、斜め部材の設置）]

- ・ 壁際にはクリアランスが取られており、斜め部材は設置されていないことを確認した。

[天井被害概要]

- ・ 被害発生時間：本震と余震の両方。
- ・ 大ホールと小ホール、いずれも在来工法の天井の脱落を生じたとのこと。
- ・ 4 月 7 日の余震で、大ホールでぶら下がっていた天井の範囲が広がったほか、隅部の天井が新たに落下したとのこと。

[天井以外の被害概要]

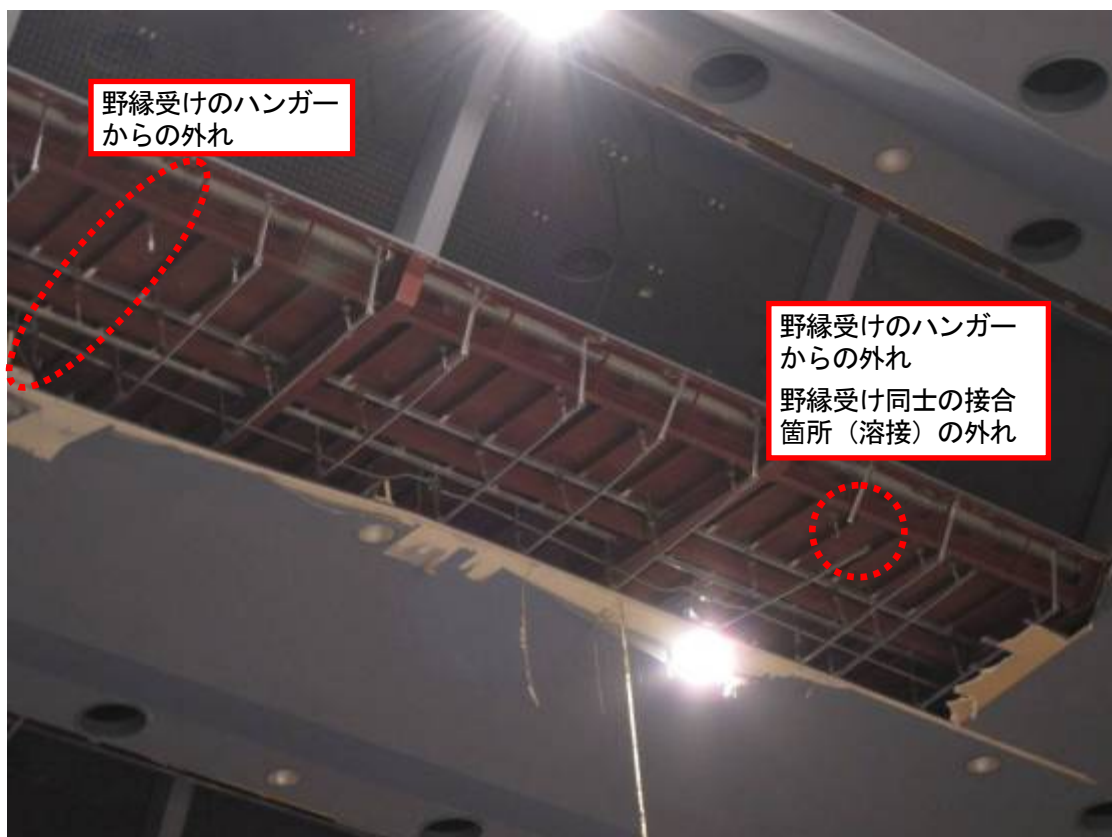
- ・ 余震で舞台上のダクトが落下したとのこと。

[天井落下時の状況及び負傷者]

- ・ 大ホールには平成 23 年 3 月 11 日の本震時に 600～700 名ほどがおり、うち 2 名が落下物により軽傷を負ったとのこと。



写真C.1 ホール上部の天井脱落



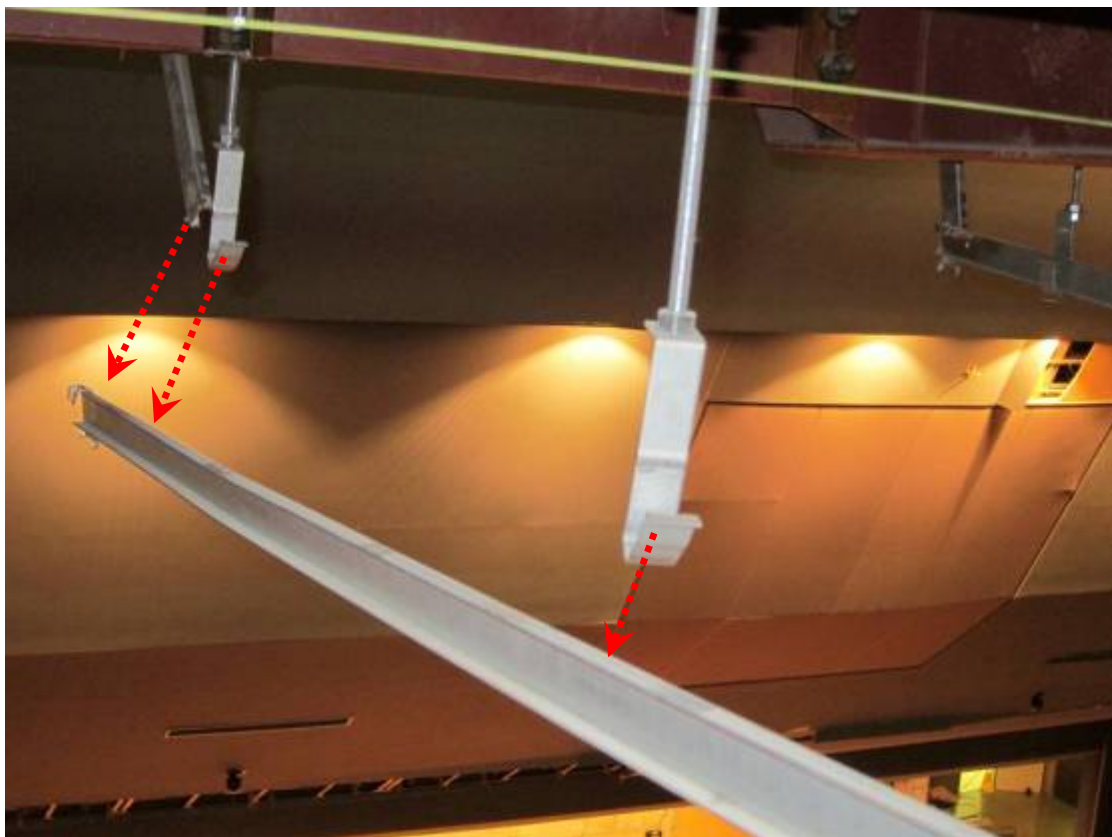
野縁受けのハンガーからの外れ

野縁受けのハンガーからの外れ
野縁受け同士の接合箇所（溶接）の外れ

写真C.2 シーリングスポット室下部の天井脱落
(野縁受けのハンガーからの外れ、脱落、野縁受け同士の接合箇所の外れ)



写真C.3 シーリングスポット室下の天井の詳細



写真C.4 シーリングスポット室の直下の天井被害の詳細
(野縁受け同士の溶接部の外れ、野縁受けのハンガーからの外れ、ハンガーの開き)



写真 C.5 シーリングスポット室周りの天井の被害

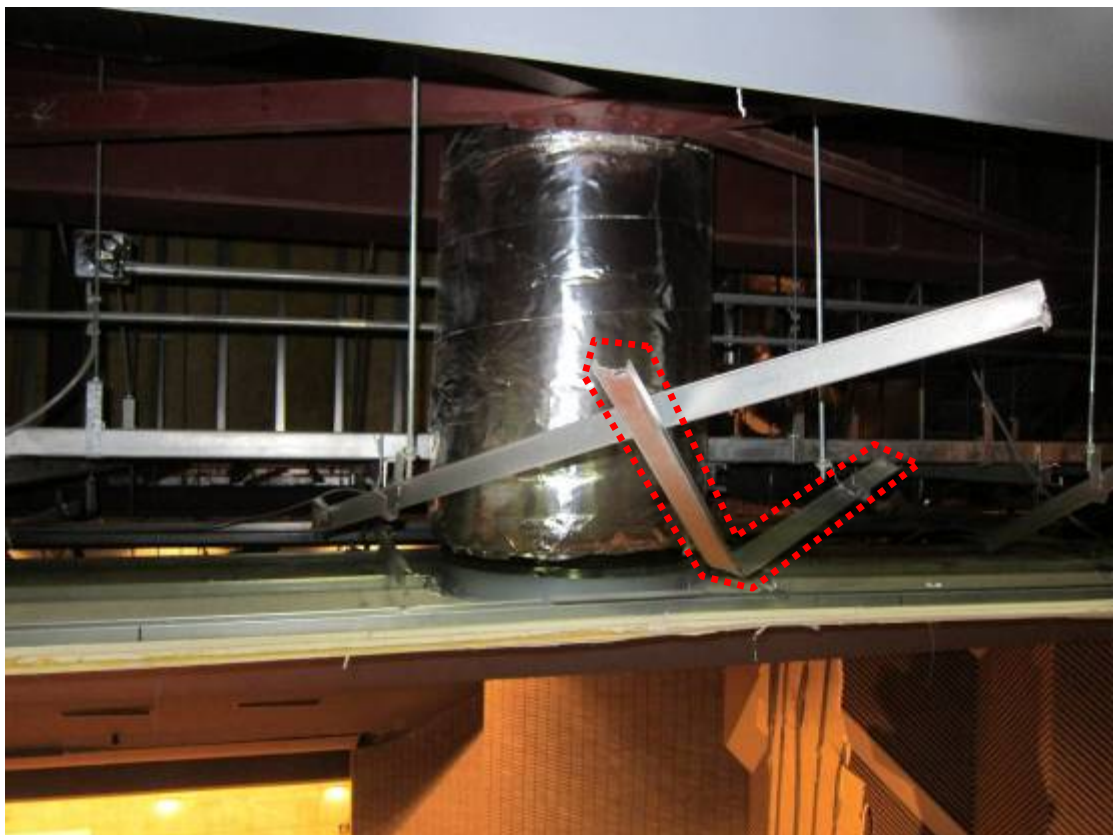


写真 C.6 シーリングスポット室周りの天井の被害
(野縁受けの曲がり)



写真 C.7 損傷した天井端部の下地の状況

建築物D（宮城県仙台市）

[基本データ]

- ・ 建築時期：昭和 48 年
- ・ 構造・階数：鉄骨鉄筋コンクリート造・地上 5 階（地下 2 階）
- ・ 延床面積：12800.22 m²
- ・ 被災場所の用途：大ホール
- ・ 被災場所のおおよその広さ：900 m²
- ・ 被災場所のおおよその天井高：15m

[天井概要]

- ・ 音響効果の改善を含めて天井の改修が行われ、平成 21 年 1 月に完成したとのこと。天井の形状は、以前の曲面を組み合わせたものから、平面を組合せたものに変更されたとのこと。
- ・ 屋根からアングル L50x50x4 を下ろして 1 次下地を吊り、1 次下地の端部は RC 造や鉄骨造の躯体に固定している。1 次下地から天井を吊り下げており、野縁は高さ 25mm の外部用のダブル野縁（内部用は高さ 19mm）を全て用いているとのことであり、300mm ピッチで配置している。吊りボルトは傾斜した天井面に対して 900mm ピッチで配置され、下地が比較的密に設けられている。
- ・ 1 次下地からの吊り長さは平坦部の短いところで 650mm であり、壁際のクリアランスも 10cm 程度取られている。
- ・ クリップにはネジ止めをする耐風クリップが用いられている。
- ・ 天井板は下地側から、けい酸カルシウム板 12mm 厚、繊維混入せつこう板 10mm 厚及び 8mm 厚の 3 枚張りである。けい酸カルシウム板 12mm 厚は面として張られているのではなく、ダブル野縁の幅に合わせて短冊状に加工されたものが使われている。

[技術的助言との対応（クリアランスの確保、斜め部材の設置）]

- ・ 壁際にはクリアランスが 10cm 程度取られていた。
- ・ 1 次下地からの吊り長さが短いところも多く、斜め部材は設置されていないが、耐震性に配慮した下地構成となっている。

[天井被害概要]

- ・ 被害発生時間：本震。
- ・ 天井の突出部分で、吊り元に点付け溶接をした吊りボルトが外れたために一部で天井が垂れたが、落下はしていない。
- ・ 野縁の衝突痕が壁に残っていた。

[天井以外の被害概要]

- ・ 設計者の調査によれば構造躯体の被害は見られないとのこと。

[天井落下時の状況及び負傷者]

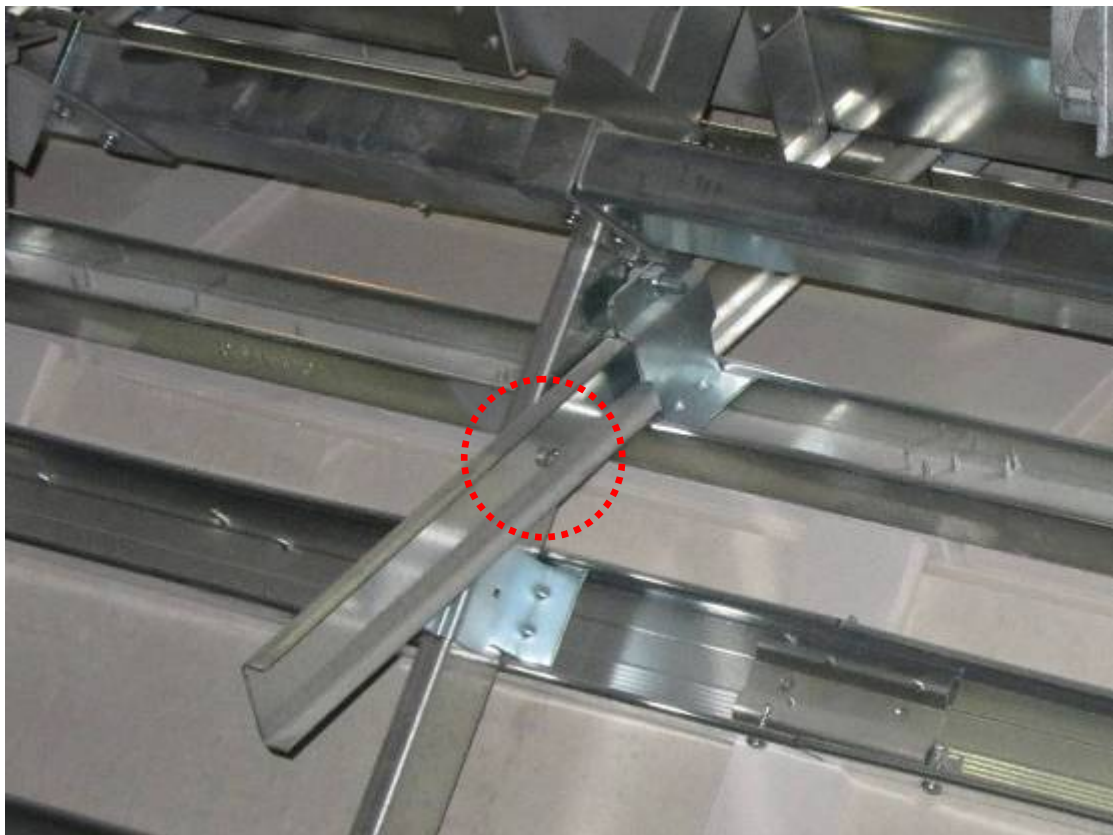
- ・ 大ホールは利用しておらず、負傷者はなかったとのこと。

[その他]

- ・ 調査時点では足場が組み終わった段階で、詳細な調査はこれからとのこと（内観は見通せない状態）。



写真D.1 天井詳細写真

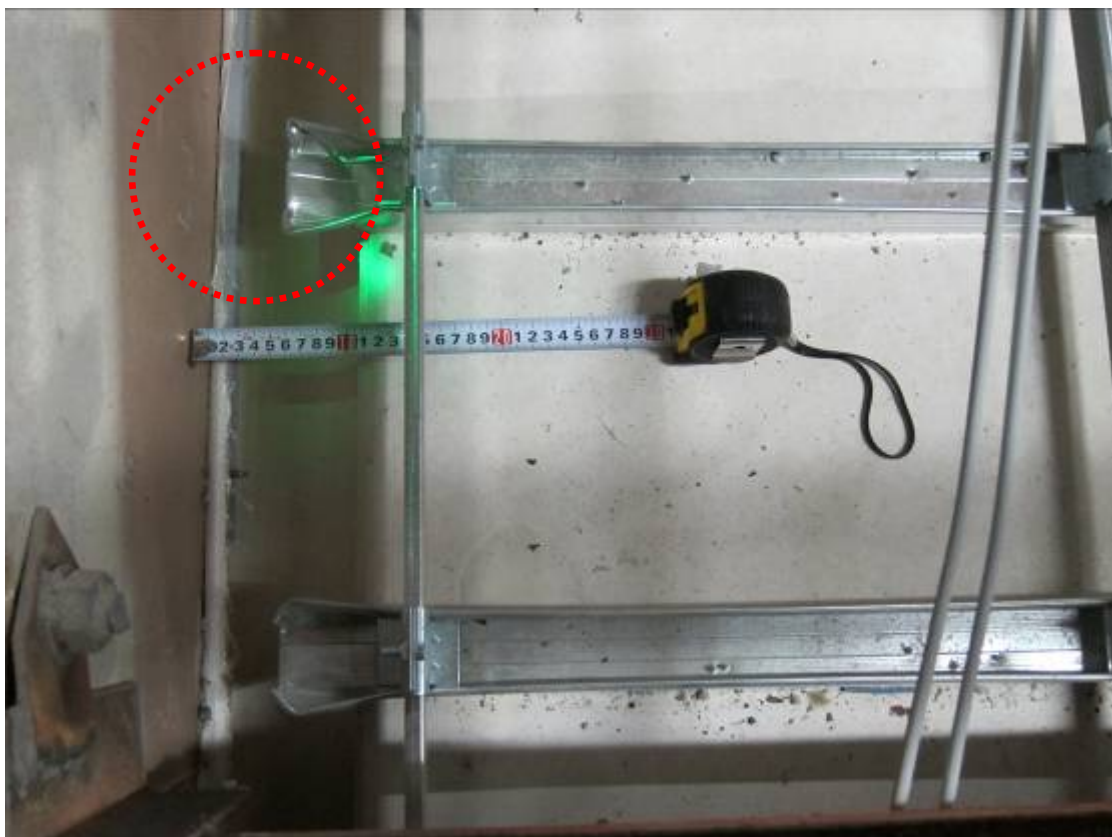


写真D.2 天井詳細写真（野縁受け同士をねじどめ）

2. 地震による天井脱落被害



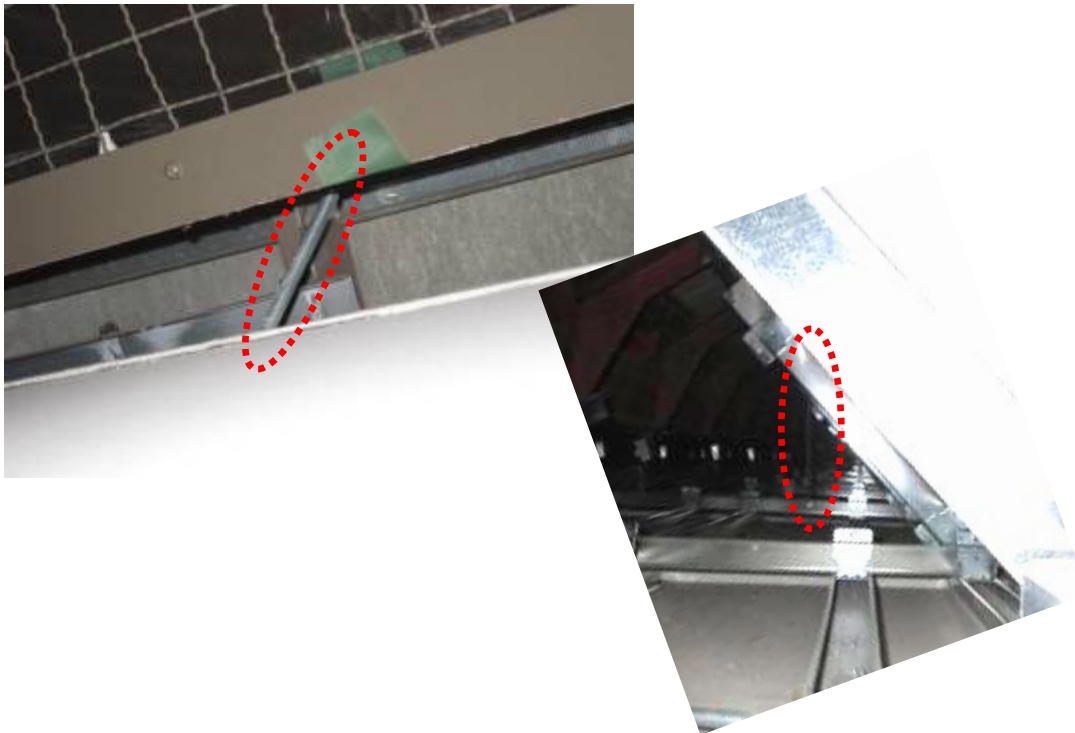
写真D.3 天井詳細写真



写真D.4 野縁端部の状況
(赤波線円内に野縁端部が衝突した跡)



写真D.5 シーリングスポット室下での天井の垂れ



写真D.6 シーリングスポット室下の天井下地の様子
(左写真では吊りボルトと吊り元の溶接部が外れている)

建築物E（宮城県大崎市）

[基本データ]

- ・ 建築時期：平成 17 年
- ・ 構造・階数：上部鉄骨造・下部鉄筋コンクリート造・地上 1 階
- ・ 延床面積：1229 m²
- ・ 被災場所の用途：屋内運動場
- ・ 被災場所のおおよその広さ：850 m²
- ・ 被災場所のおおよその天井高：10.7～11.6m

[建築物概要]

- ・ 屋根は 3/100 の勾配で舞台側（北側）から舞台反対側（南側）へと下がっている。
- ・ アリーナは、張間（大梁方向）24.4m×桁行き 33.2m=810 m²程度。アリーナ床面から天井までの高さは 10.7m（舞台と反対の妻壁側）～11.6m（舞台側）である。

[天井概要]

- ・ 天井は在来工法で、天井板はせっこうボード 9mm+ロックウール吸音板 12mm の 2 枚張りである。大梁の位置で区切られ、7 枚に分かれた平らな天井が、段差を付けて並んでいる。それぞれの天井は舞台側端部（梁際）で壁用のスタッド（リップ付き溝形鋼 C65x50）を用いて幕板が取り付けられている。

[技術的助言との対応（クリアランスの確保、斜め部材の設置）]

- ・ 各天井の張間方向端部では段違いの納まりで干渉しないように工夫されており、大梁との際には 10cm 程度のクリアランスが取られている。斜め部材は多数設置されており、図面にも明示されている。

[天井被害概要]

- ・ 被害発生時間：本震と余震の両方。
- ・ H 形鋼梁のフランジにかけた吊りボルトが、吊り金具とともに吊り元から外れて落下した被害も多く見られた。また斜め部材の点付け溶接は所々で地震により外れたと思われる。天井は調査時には、手で揺らせるような状態であった。
- ・ 天井からロックウール吸音板のみが剥がれ落ちている部分があった。
- ・ 落下部分は大梁（張間）のスパン中央部付近だけでなく、周辺部にもあった。周辺部の被害は柱との衝突が影響したと考えられる。
- ・ 平成 20 年の岩手宮城内陸地震でも、天井からパラパラと落下物があったとのこと。

[天井以外の被害概要]

- ・ ガラス、照明は損傷しなかったものの、余震で照明が少し下がっていた。

[天井落下時の状況及び負傷者]

- ・ 地震時は使用中であり体育館の外に避難した。



写真 E.1 天井脱落被害の状況（北側を見る）



写真 E.2 天井面を桁行方向、南方向に見通した様子
(東西方向に架かる梁の下フランジに、南側の天井面は下がり壁で接し、北側の天井面は端部で接する)

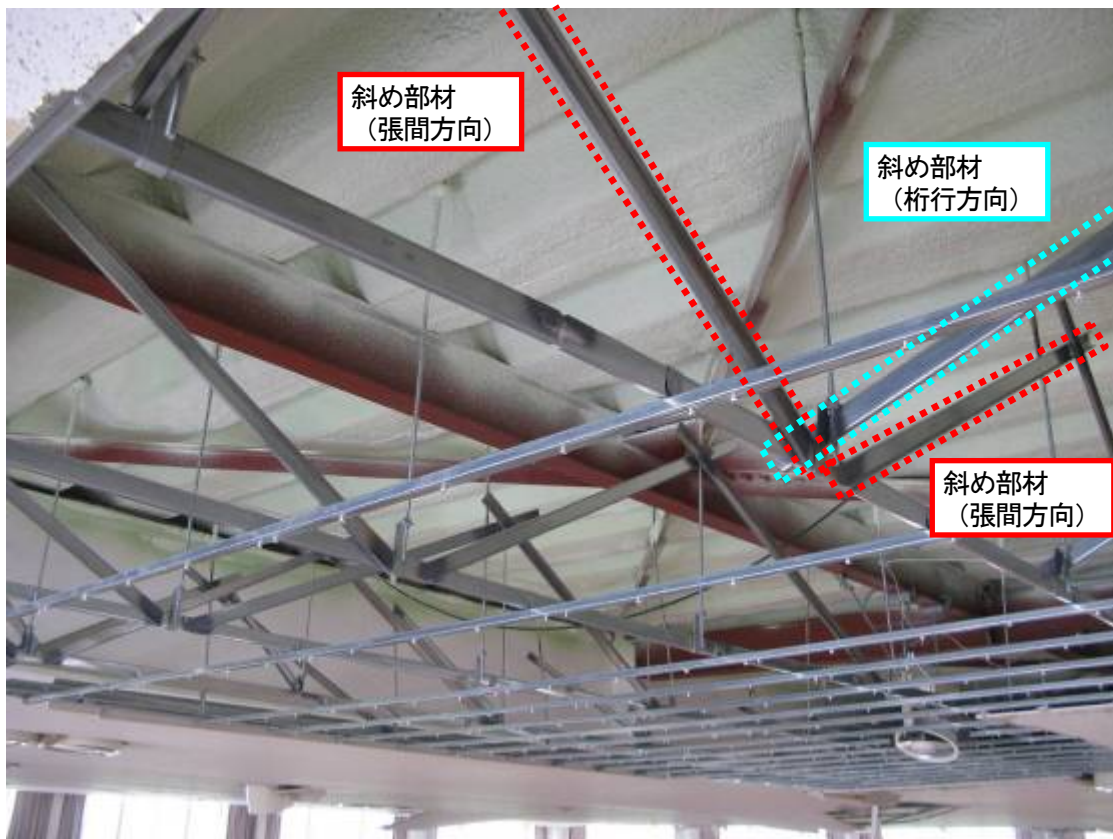


写真 E.3 天井裏の下地の配置



写真 E.4 斜め部材の溶接が外れた被害



写真E.5 H形鋼梁への吊り金具が外れた被害



写真E.6 被害により床面に落下した吊り金具、吊りボルト、ハンガー

2. 地震による天井脱落被害



写真E.7 天井面と梁下フランジとのクリアランス（天井の野縁方向）



写真E.8 野縁受け方向端部の状況（窓側の天井と、アリーナ天井端部の折り上げ部の間に隙間）



写真 E.9 天井板が野縁から外れて落下



写真 E.10 天井面の端部での垂れ下がり
(赤点線円内で野縁受け継手(金物接合)の外れ)

建築物F（宮城県大崎市）

[基本データ]

- ・ 建築時期：平成6年
- ・ 構造・階数：屋根部鉄骨造・上部柱，桁鉄骨鉄筋コンクリート造・下部鉄筋コンクリート造
- ・ 延床面積：1092 m²
- ・ 被災場所の用途：屋内運動場
- ・ 被災場所のおおよその広さ：942 m²
- ・ 被災場所のおおよその天井高：11.6～14.6m

[建築物概要]

- ・ アリーナは 32.7m×26.7m≒870 m²。

[天井概要]

- ・ 天井板は、せっこうボード9mm厚+ロックウール吸音板9mm厚。天井高は11.6～14.6m。

[技術的助言との対応（クリアランスの確保、斜め部材の設置）]

- ・ クリアランスは梁際にあるが、壁際にはない。
- ・ 斜め部材は、張間方向スパン1/4付近で落下した天井部分の下地については確認できなかったが、勾配天井下端と壁の取り合い部について確認できた。

[天井被害概要]

- ・ 被害発生時間：本震と余震の両方。
- ・ 桁行き方向の5スパン中、両端を除く中央の3スパンで天井が脱落。中央スパンは狭い。
- ・ 天井の落下範囲は余震で広がっているとのこと。

[天井以外の被害概要]

- ・ 下駄箱が倒れたが下校時間の前であった。理科室や家庭科室は使用していなかったとのこと。
- ・ 地震時は停電して校内放送はできなかったとのこと。

[天井落下時の状況及び負傷者]

- ・ 地震時は授業中で、埃が落ちてきたため尋常ではないと判断した先生が即座に児童を校庭に避難させた。

[その他]

- ・ 応急危険度判定で「危険」とされており、使用していない。避難所に指定されているが使用できなかったとのこと。



写真 F.1 天井被害の状況



写真 F.2 天井下地の状況（勾配天井の中間部）

2. 地震による天井脱落被害

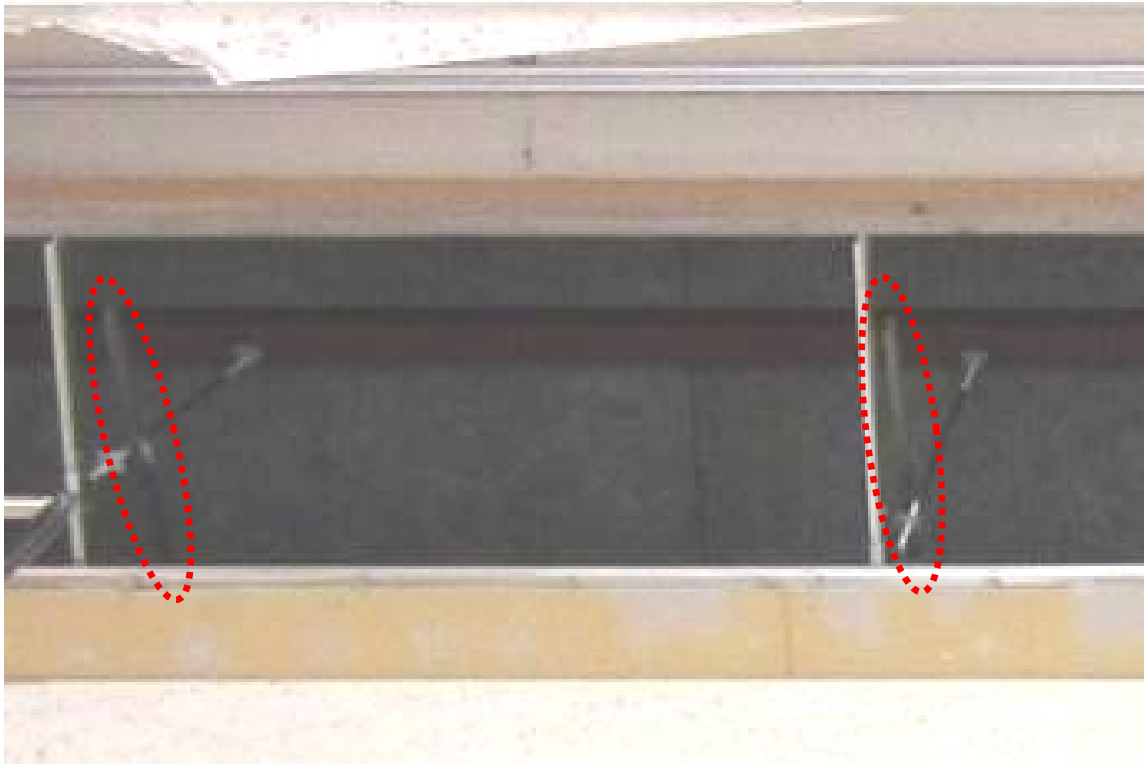


写真 F.3 勾配天井下端の天井下地の状況
(楕円点線部分に斜め部材と思われる部材が見える)

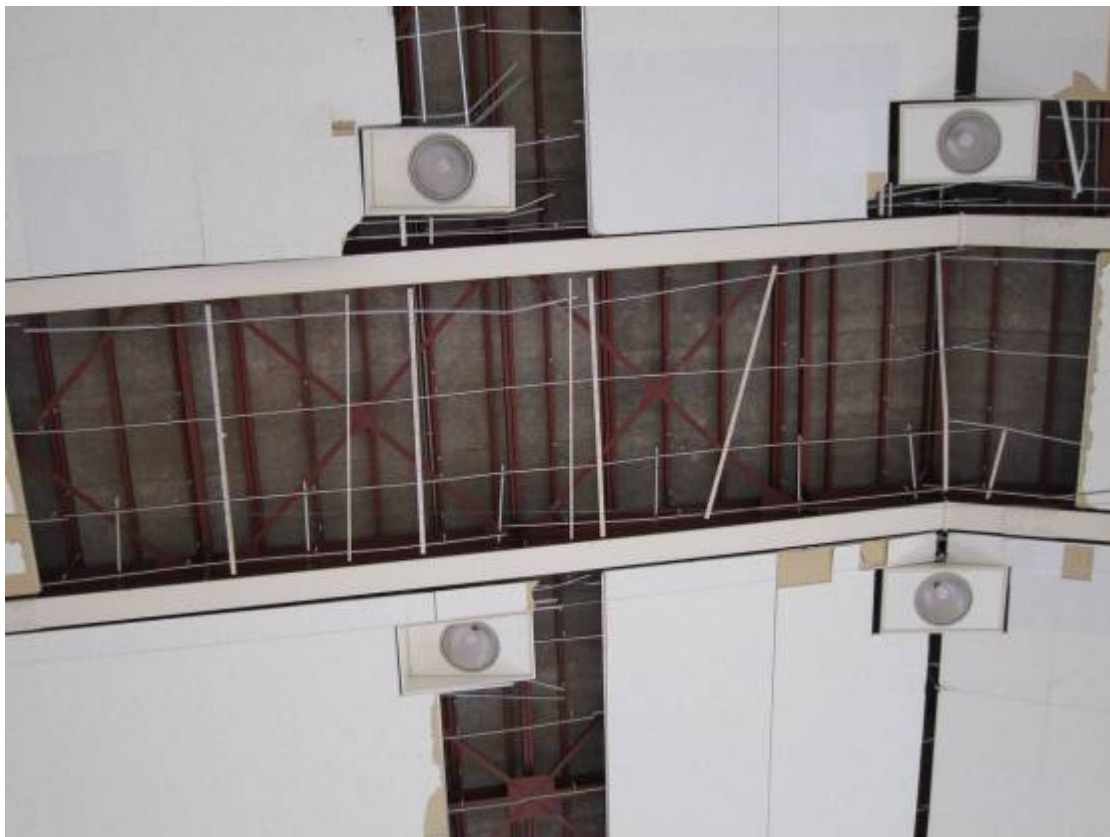


写真 F.4 天井被害状況

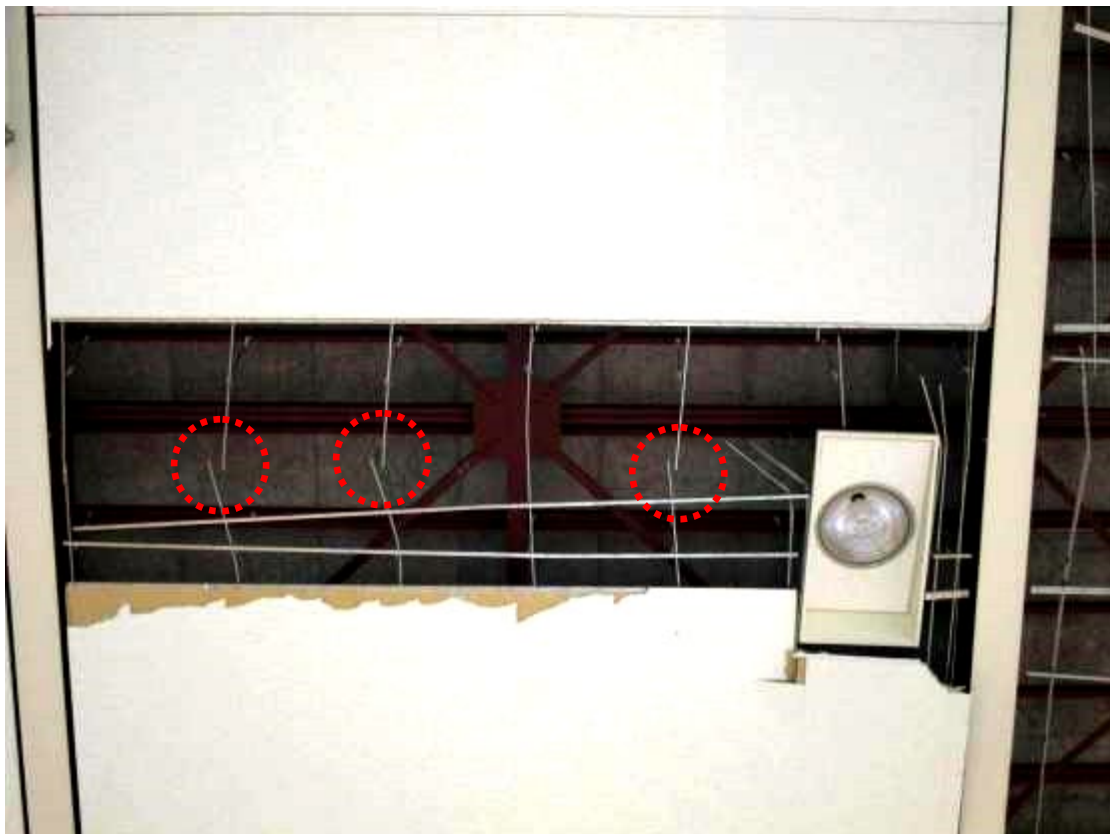


写真 F.5 野縁受けの接合箇所（金具接合）の外れ



写真 F.6 落下した部材

建築物 G (宮城県仙台市)

[基本データ]

- ・ 建築時期：平成 12 年
- ・ 構造・階数：鉄骨造（一部鉄筋コンクリート）・地上 7 階（地下 2 階）
- ・ 延床面積：21682.15 m²
- ・ 被災場所の用途：共有スペース
- ・ 被災場所のおおよその広さ：1453.21 m²（当該階の床面積は 2418.46 m²）
- ・ 被災場所のおおよその天井高：3.565m

[建築物概要]

- ・ 被害のあった 7 階の階高は 4.0m。

[天井概要]

- ・ 天井板は、せっこうボード 12.5mm+12.5mm の 2 枚張り。
- ・ 吊りボルトは 1m ピッチ、吊り長さは 490mm とのこと。
- ・ 7 階と同じ仕様の天井は 3 階であり、吊り長さは 30cm 程度とのこと。6 階の天井仕様は 7 階とは異なっていた。

[技術的助言との対応（クリアランスの確保、斜め部材の設置）]

- ・ 吊り長さが短いためか、斜め部材は設置されていない。
- ・ 内壁のプロフィリットガラスなどとのクリアランスは 20cm 程度あった。

[天井被害概要]

- ・ 被害発生時間：本震と余震の両方。
- ・ 平成 23 年 3 月 11 日の地震で 7 階の南側（防煙垂れ壁より南）の天井が落下したとのこと。
- ・ 平成 23 年 4 月 7 日深夜の余震で西側の天井が落下し、北東側の天井が垂れたとのこと。
- ・ 天井仕様が 7 階と同じである 3 階の天井は、被害を受けていなかった。

[天井以外の被害概要]

- ・ 天井がぶつかって、内壁のプロフィリットガラスが割れたとのこと。
- ・ スプリンクラーが作動して水が出たとのこと。

[天井落下時の状況及び負傷者]

- ・ 人的被害はなかったとのこと。



写真 G.1 天井脱落の状況（施設提供写真）



写真 G.2 天井脱落の状況（施設提供写真）

2. 地震による天井脱落被害



写真 G.3 天井被害の状況（施設提供写真）



写真 G.4 天井被害の状況（施設提供写真）

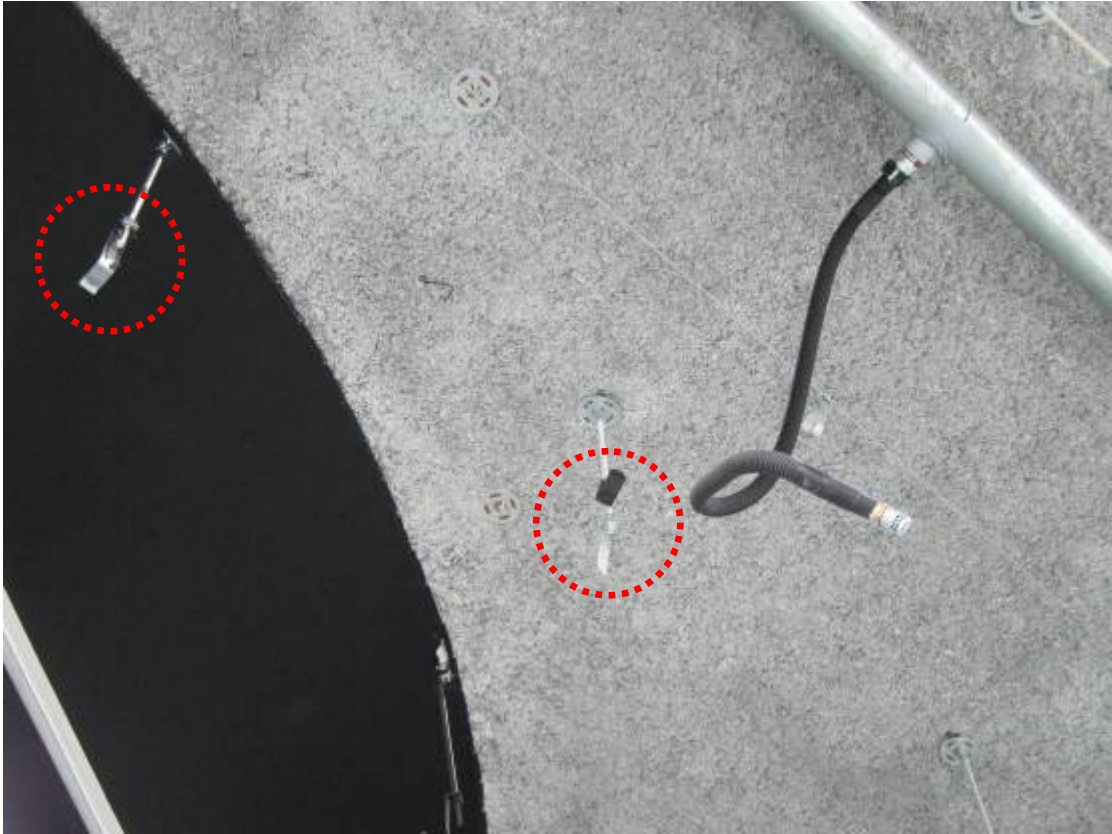


写真 G.5 ハンガーの開きの被害



写真 G.6 落下した天井に使われていた部材

建築物H（福島県福島市）

[基本データ]

- ・ 建築時期：平成5年・平成7年
- ・ 構造・階数：鉄骨造（一部鉄骨鉄筋コンクリート造）・地上7階（地下1階）
- ・ 延床面積：84847.897 m²
- ・ 被災場所の用途：客席・通路
- ・ 被災場所のおおよその広さ：1450 m²
- ・ 被災場所のおおよその天井高：2.5～3.2m

[建築物概要]

- ・ エキスパンションジョイントで3つの棟に分かれている。
- ・ 6階は屋根に鋼製折板が使われている。床から屋根下まで5.2m、窓側では折板の山の下まで6.4m。
- ・ 5階は、通路の柱から7.2m程度の片持ちで観客席がある。
- ・ 建物幅（長手方向）を計測すると236m。

[天井概要]

- ・ 6階は、床から屋根下まで5.2m、野縁まで2.5mであり、吊り長さは2.7m。窓側では折板の山の下まで6.4m、照明の下端まで2.5mであり、吊り長さは3.9m。
- ・ 5階は通路の柱からターフに向かって観客席が下がるのに合わせて天井も下がっており、吊り長さが長くなっていく。通路の天井は、5～6m毎に同じ形状が繰り返される構成。
- ・ 4～6階の天井の仕様は同じとのこと。

[技術的助言との対応（クリアランスの確保、斜め部材の設置）]

- ・ クリアランスは特にとられていない。
- ・ 通路等の天井裏はダクトや配線で一杯であり、斜め部材は設置されていなかった。観客席の上部の勾配天井でも斜め部材は確認できなかった。

[天井被害概要]

- ・ 被害発生時間：本震。
- ・ 3つの棟の内の真ん中の棟で天井脱落が発生した。
- ・ 6階では、エキスパンションジョイント周囲、天井端部、天井段差近傍などで脱落を確認した。
- ・ 5階では、エキスパンションジョイント周囲、客席、通路側の天井の段差近傍での損傷や脱落を確認した。
- ・ スプリンクラーが作動して水が出て、濡れたせっこうボードが脱落した箇所もあるとのこと。

[天井以外の被害概要]

- ・ 階段の壁に専用ボンドで貼られたせっこうボードが脱落していた。
- ・ スプリンクラーは、ヘッドで壊れたものもあるし、配管が壊れたものもあるとのこと。
- ・ エキスパンションジョイント部分が2階以上で潰れているとのこと。
- ・ エキスパンションジョイント部分のガラスが割れたが、物が当たった痕跡は無かったとのこと。

[天井落下時の状況及び負傷者]

- ・ 人的被害はなかったとのこと。



写真 H.1 6階における天井脱落



写真 H.2 上記被害箇所の詳細
(赤点線円内でハンガーの開きと野縁受けからの外れ)



写真 H.3 6階の通路部分の天井脱落
(左側が段差天井、右側が曲面天井。赤点線は天井の断面形状)



写真 H.4 上記天井の曲面天井の端部



写真 H.5 5階の天井脱落被害

(写真右側に見える勾配天井の脱落は、エキスパンションジョイントに近い箇所のみ)



写真 H.6 4階の脱落被害を生じていない天井

2. 地震による天井脱落被害



写真 H.7 5階通路での天井脱落被害



写真 H.8 4階通路の天井

建築物Ⅰ（福島県伊達郡）

[基本データ]

- ・ 建築時期：昭和 54 年
- ・ 構造・階数：鉄骨鉄筋コンクリート造・3 階建て
- ・ 延床面積：2405.79 m²
- ・ 被災場所の用途：会議場
- ・ 被災場所のおおよその広さ：207 m²
- ・ 被災場所のおおよその天井高：3.1～4m

[建築物概要]

- ・ 昭和 53 年の地震で被害を受けて建て替えた庁舎とのこと。
- ・ 20m くらいの杭を打っているとのこと。
- ・ 耐震診断をして補強を検討していたところだったとのこと。

[天井概要]

- ・ 1、2 階の執務室はシステム天井。2～3 階の議会関係諸室、会議室は在来工法による天井。
- ・ 屋根は鉄骨造の梁で屋根版は ALC パネル。床から屋根の ALC パネルまで 4.9m、天井高 3.1m であり、吊り長さは 1.8m 程度。脱落する以前の天井には段差部があった。

[技術的助言との対応（クリアランスの確保、斜め部材の設置）]

- ・ クリアランスは取られていない。斜め部材は設置されていない。

[天井被害概要]

- ・ 被害発生時間：本震。
- ・ 3 階の会議場の天井が全面的に脱落した。会議場の広さは、11.3m×17.6m≒200 m²。
- ・ 地震発生時に 1 階にいた人の話によると、1 階の天井は本震の際に、最初の 30 秒くらいは大丈夫だったものの、その後の大きな揺れにより次々と落下したとのこと。

[天井以外の被害概要]

- ・ 建物の西側が下がり、1/100 程度傾いているとのこと。
- ・ 屋根の水平ブレースの端部のボルトが外れていた以外は、構造的な被害は特になかったとのこと。
- ・ ガラスは入口のはめ殺しの 2 枚が割れていた。
- ・ 地震後には電源は落したままで入っていないとのこと。

[天井落下時の状況及び負傷者]

- ・ 地震の日は議会は休会で会議場は使われていなかったとのこと。その他の場所では業務中だったが、幸い怪我人はいなかったとのこと。

[その他]

- ・ 1 階に震度計が設置されている。30 秒くらいで電源が落ちたため、気象庁にデータは送られなかったものの記録されていたとのことであり、平成 23 年 6 月 23 日に本震の震度が 6 強と確定された。

2. 地震による天井脱落被害



写真 I.1 天井脱落被害（3階議場）



写真 I.2 天井脱落被害状況
(ハンガーの開きが多数確認される)



写真 I.3 天井脱落状況（3階議場）



写真 I.4 落下した天井の下面の状況

2. 地震による天井脱落被害



写真 I.5 3階議場隣室の被害状況

※左写真の赤点線四角内を見上げた様子が右写真



写真 I.6 3階議場の2つ隣の室の状況

建築物 J (福島県福島市)

[基本データ]

- ・ 建築時期：昭和 45 年
- ・ 構造・階数：鉄骨鉄筋コンクリート造・3 階建て（地下 1 階）
- ・ 延床面積：11438 m²
- ・ 被災場所の用途：ホール、展示室
- ・ 被災場所のおおよその広さ：700 m²（大ホール）、500（展示室）
- ・ 被災場所のおおよその天井高：15m（大ホール）、4.5m（展示室）

[建築物概要]

- ・ ホールは大ホールと小ホールの 2 つがある。
- ・ 展示室はホールとは別棟の建物の 3 階にある。

[天井概要]

- ・ 大ホールは数段の平らな天井と、それらをつなぐ曲面の天井で構成される。平らな天井は吊りボルトと野縁受けがあり、野縁受けに金具でとめつけられた木製下地に合板が張られている。曲面（下に凸のかまぼこ状）部分の木製天井は吊りボルト等で吊っていた様子はなく、接続する平らな天井の部材にくぎ打ちでとめられていたと思われる。
- ・ 展示室の空調は、作品に冷暖房の気流が直接に当たらないよう、二重の天井の間を空気を通して、天井面の細かい穴から吹き出すような方式を採っているとのこと。

[技術的助言との対応（クリアランスの確保、斜め部材の設置）]

- ・ 大ホール：クリアランスはなし。一部には斜め部材が設置されている。
- ・ 小ホール：クリアランス、斜め部材、ともになし。
- ・ 3 階展示室：クリアランス、斜め部材、ともになし。

[天井被害概要]

- ・ 被害発生時間：本震と余震の両方。
- ・ 大ホールでは曲面（下に凸のかまぼこ状）の木製天井が落下していた。
- ・ 小ホールでは、天井は落下していないものの、天井裏で野縁受けの変形が見られた。
- ・ 展示室の落下箇所では、ハンガーの開きが多数見られ、吊りボルトからのハンガーの外れも見られた。
- ・ 玄関ホールの光天井で照明の一部が破損して落下していた。ぶどう棚から吊られた天井にはクリップの外れが見られ、周辺の壁のコンクリートが一部破損していた。

[天井以外の被害概要]

- ・ 躯体に特に被害はないとのこと。
- ・ 施設全体で 100 枚近くのガラスが割れたとのこと。
- ・ 設備関係は、壊れているかどうか十分に確認できていないとのこと。

[天井落下時の状況及び負傷者]

- ・ 本震当日、大ホールには予定されている行事の主催者側のスタッフが 20 名程度居たが、けが人は出なかったとのこと。3 階の展示場は使っていなかったとのこと。

[その他]

- ・ 現地調査時点で、大ホールと 3 階展示場は地震時のままであった。

2. 地震による天井脱落被害



写真 J.1 ホールの天井脱落被害の状況



写真 J.2 上記の落下部分を見上げた様子



写真 J.3 上記被害箇所からの落下物



写真 J.4 天井落下箇所の天井裏からの様子



写真 J. 5 大ホールの天井裏の様子



写真 J. 6 大ホールの平らな天井の下地の詳細



写真 J.7 展示室の天井脱落

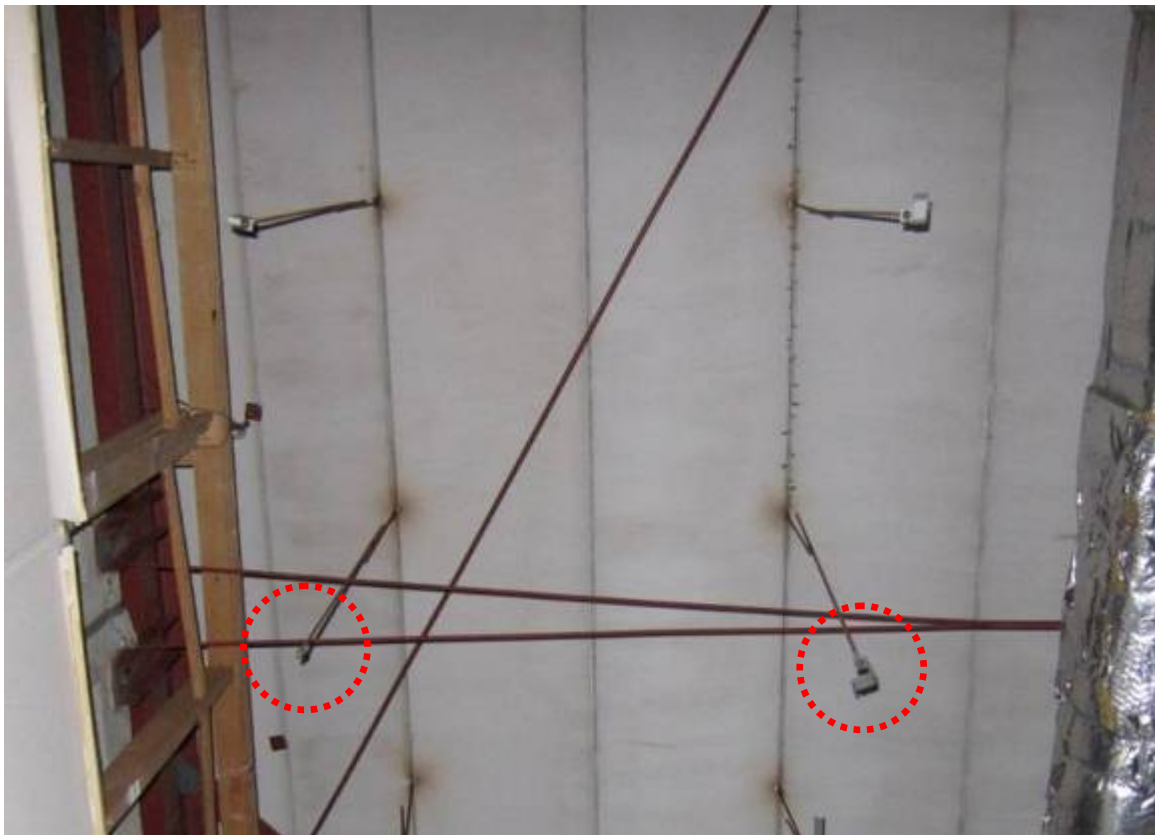


写真 J.8 展示室天井の吊り元の状況（野縁受けのハンガーからの脱落）
(左下のハンガーの脱落や、右下のハンガーの開きが見られる)



写真 J.9 展示室の天井の詳細写真
(青破線が下の天井の破断面、赤破線が上の天井の破断面)



写真 J.10 展示室の上の天井と下の天井の間の様子 (脱落した天井を撮影)

2. 3 近年の地震における天井脱落被害の文献等調査

東日本大震災における天井脱落被害については、新聞、テレビ、インターネット等より情報収集を行い、特定行政庁へのアンケート調査により更に具体的な被害情報を収集し、東日本大震災における天井脱落被害について整理した。またそれらの情報を基に天井脱落被害の現地調査を実施した。その他、(一社)日本建設業連合会へのアンケート調査を行い、天井脱落被害等について情報を収集した。

近年の地震における天井脱落被害については、主な地震被害情報についてまとめられている日本建築学会の地震被害調査報告、地震による単独の天井脱落被害についての報告も行っている国土技術政策総合研究所・建築研究所の地震被害調査報告から天井脱落被害について情報収集を行った。

同様に天井脱落被害について文献調査から整理した文献として、平成 20 年度建築基準整備促進補助金事業の調査報告「大規模空間を持つ建築物の天井脱落等およびスプリンクラー設備の地震時機能維持等に関する調査」((財)日本建築センター、戸田建設(株)、西松建設(株)／平成 21 年 3 月)がある。同報告の「2.2 近年の地震による天井の地震被害報告調査」では、同じく以下のような地震被害調査報告を収集し、地震により損傷した天井の位置、落下した部材等から被害状況について整理・分析を行っており、文献による天井脱落被害の調査にあたって参照した。

収集した主な地震被害調査報告

[日本建築学会によるもの]

- ・2000 年鳥取県西部地震災害調査報告 2001 年芸予地震災害調査報告，平成 13 年 10 月
- ・2003 年 5 月 26 日宮城県沖の地震災害調査報告 2003 年 7 月 26 日宮城県北部の地震災害調査報告，平成 16 年 3 月
- ・2004 年 10 月 23 日新潟県中越地震災害調査報告，平成 18 年 8 月
- ・2005 年福岡県西方沖地震災害調査報告(CD-ROM 付)，平成 17 年 9 月

[国土技術政策総合研究所・建築研究所によるもの]

- ・2001 年 3 月 24 日芸予地震被害調査報告—体育館など大空間を構成する建築物の天井落下一，平成 13 年 5 月
- ・宮城県沖地震調査報告，独立行政法人建築研究所，平成 15 年 7 月
- ・2003 年十勝沖地震における空港ターミナルビル等の天井の被害に関する現地調査報告，平成 15 年 10 月
- ・平成 16 年新潟県中越地震建築物被害調査報告(速報)全体版，平成 16 年 12 月
- ・スポパーク松森における天井落下事故調査報告—大空間を有するスポーツ等施設の天井落下一，平成 17 年 8 月
- ・能登半島地震及び三重県中部を震源とする地震の現地調査の実施状況について(速報)，平成 19 年 5 月
- ・平成 19 年(2007 年)能登半島地震建築物被害調査報告，平成 19 年 8 月
- ・中越沖地震に関する調査について，平成 19 年 8 月
- ・平成 20 年(2008 年)岩手・宮城内陸地震建築物被害調査報告，平成 20 年 9 月
- ・岩手県沿岸北部の地震建築物被害調査報告，平成 20 年 9 月

2. 4 地震による天井脱落被害に関するまとめ

本章では、アンケート調査、現地被害調査、文献調査より地震による天井脱落被害について整理した。

アンケート調査は特定行政庁と（一社）日本建設業連合会に対して実施し、建築時期、用途、天井種類、被害状況、人的被害の有無、の概要を把握するとともに、後者へのアンケート調査では復旧の状況についても情報収集を行った。

特定行政庁へのアンケート調査を踏まえて実施した天井被害の現地調査では11事例について被害情報を収集した。収集した情報を基に中間報告では、対策等を考える上で着目すべき項目として、以下のような項目を挙げ、その後の検討につなげた。

- ・天井の形状： 山形架構の屋根面に平行な天井
- ・天井の箇所： 端部、段差部・折り曲がり部、エキスパンションジョイント部
- ・下地の構成・配置： 斜め部材の配置のバランスと量、接合部（金物、溶接）の外れ、ダクト等による吊りボルトの不足
- ・部材単体： クリップの外れ、ハンガーの開き

過去の地震被害調査については、（一社）日本建築学会、国土技術政策総合研究所・建築研究所による地震被害調査報告から情報を収集した。同種の調査が調査報告「大規模空間を持つ建築物の天井脱落等およびスプリンクラー設備の地震時機能維持等に関する調査」において行われており、過去の地震による天井脱落被害については以下のように整理されている。

- ・地震被害調査報告に見られた天井被害を位置に着目して見ると、天井周辺部と構造体等の取り合い部分で生じた被害と、天井単独で生じた被害は、同数程度見られる。この傾向は天井種類で大きく異なるものではない。
- ・地震被害調査報告に見られた天井被害では、ハンガー、吊りボルト等の脱落については報告されておらず、それより下の部位での被害である。脱落する部材範囲について天井種類別に傾向を見ると、在来工法の天井では野縁とその仕上げ材の脱落が多く見られ、システム天井では天井仕上げ材のみの脱落が多く見られる。

今回現地調査を行った被害事例について過去の被害と特に異なる点としてはハンガーの開きがある。また、今回の現地調査から対策等を考える上で着目すべき項目として、“山形架構の屋根面に平行な天井”がある。このような形状の天井は地震時に生じる鉛直方向の顕著な揺れによって損傷することが近年の研究で確認されている。しかし文献調査では類似事例はあっても特徴的な被害としては認識されていない。

被害を受けた天井の技術的助言への対応状況については、特定行政庁へのアンケートや関連業界団体へのアンケートにおいてクリアランス措置や振れ止めの設置についての設問を設けたものの、対象とした天井被害事例で技術的助言への対応状況が明確に分かるものが少なかったため統計的な意味のある結果が得られず、調査を行った範囲では明確な対応関係は確認されなかった。現地被害調査では、斜め部材やクリアランスが設けられていたものは数事例あったものの両者について十分な措置がなされていたと考えられるものは1事例のみであった。斜め部材の偏った配置などが確認され、必ずしも技術的助言の趣旨に充分沿った形で措置されていないと考えられるものもある。

3. 天井の耐震対策の検討

3. 1 天井の耐震対策を考える際の基本的な枠組

天井の耐震対策を考える際の基本的な枠組みとして、耐震対策の適用範囲と耐震対策の方法を設定する必要がある。

耐震対策の適用範囲については、次節で述べる。

耐震対策の方法については、耐震的な天井の仕様を定める方法（仕様ルート）、天井の耐震性を計算で検証する方法（計算ルート）、その他高度な計算や実験などの特別な手段によって天井の耐震性を検証する方法（特殊検証ルート）が挙げられる。なお、いずれのルートにも共通する項目として、腐食等に関する耐久性の項目を設定する。また、仕様ルートについては、耐震的な天井の仕様（仕様1）に加え、地震時に天井が脱落しても人的被害を防ぐフェールセーフ機能を付加した仕様（仕様2）が代替として考えられる。

以上のことを、模式的に整理すると図3.1となる。

仕様ルート（耐久性の項目を含む。）については4章において、計算ルートについては5章において検討結果を記載する。なお、特殊検証ルートについては、その具体的な内容の検討まで踏み込んでいない。

ルートの選択に関する明確な判断・区別は行っていないが、集会室や体育館などは仕様又は計算ルートで対応することを目指して検討を行った。前提条件等は4章と5章で記述している。実務的な運用を考えると仕様ルートを選択することが多いと考えられるが、提案する仕様1・仕様2を適用し難い場合や、構造躯体に比較的高度な構造計算が適用される場合などでは計算ルートを選択することを想定した。また、音楽ホールに代表されるような、大空間で構造躯体や天井が特殊なもの（形状が複雑で重量が大きい天井、など）は特殊検証ルートでの個別の対策が必要と考え、本検討では特に取り上げないこととした。

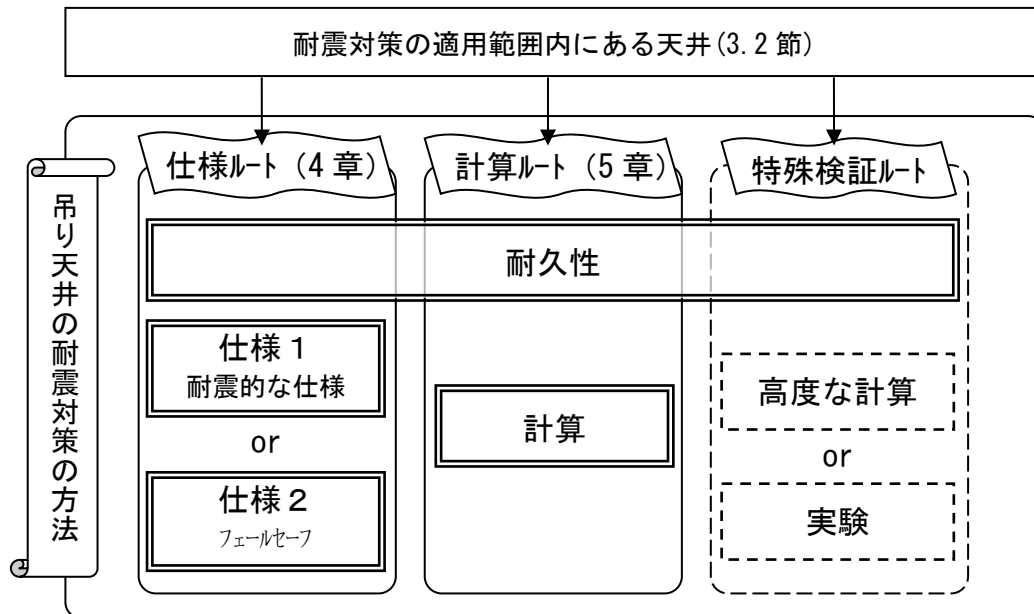


図3.1 天井の耐震対策を考える際の基本的な枠組みの模式図

3. 2 天井の耐震対策の適用範囲

3.2.1 適用範囲の検討に用いる指標

天井落下による人身への危害を考えた場合に関係する項目から、適用範囲を絞る際のパラメータを取り上げる。

天井落下が生じた場合の天井による人身への危害の発生度合いは、天井や室の面積、天井の質量等により影響される。人身への危害の大きさを、天井が落下して人体に衝突する際の運動エネルギー（落下により失った位置エネルギー）によると考えると、落下する天井の重量（単位質量×落下面積×重力加速度）、落下高さ（天井の設置高さ）により影響される。

これらより、適用範囲を絞る際のパラメーターとして、本案では以下の3つを取り上げた¹。

- ・天井単位面積質量
- ・面積（天井総面積、室面積）
- ・天井高さ

表 3.1 では、室面積、天井高さ、による分類について、該当する空間のイメージ（室用途）をあてはめて整理したものであり、各室用途に対して想定される天井単位面積質量を記号で示している。天井単位面積、天井総面積・室面積、天井高さ、について以下に説明する。

（1）天井単位面積質量（w）

地震時に一体となって脱落すると想定される部材を算入する（在来工法の天井材については、野縁受けを含めて下）。独自に吊り元を持っている照明や空調等は算入しない。

各種の天井について、上記の定義で単位面積質量を求めると、以下の通りに例示できる（PB：せっこうボード、RW：ロックウール吸音板、GW：グラスウール板。※は野縁等を用いるもの。）。

RW9mm+PB9.5mm+下地材	: 10.2~13.1 kg/m ² ※
PB9.5mm+下地材	: 7.1~10.0 kg/m ² ※
グリッドタイプ（木目ツキ板）	: 9.2kg/m ²
グリッドタイプ天井（RW）	: 5.5kg/m ²
ルーバー天井	: 2.9~5.8kg/m ²
クロスタイプ天井（GW）	: 4.8kg/m ²
膜天井（天井膜材のみ）	: 0.5kg/m ²
金属スパンドレル	: 6.5kg/m ² ~ ※

天井単位面積質量について検討するにあたり、6 kg/m²、10 kg/m²、20 kg/m²のあたりに区分の線を引いた。4つの区分はそれぞれ以下のように想定した。

¹適用範囲に関する議論では、以下のような項目も言及された。

1. 用途・属性（音楽ホール・避難経路、非常口周辺）
2. 居る人の属性（年齢、健康状態、その場所への慣れ）
3. 人が居る程度（人数の多さ、頻度）
4. 退避行動の可否（机の下に潜るなど）
5. 退避行動のし易さ（障害物の有無、非常口への距離）
6. 天井の吊り長さ
7. 天井面の断面形状
8. 天井材の鋭利さ

1～5は利用状況に依存するものであって建築物自体の状況に関わるものではない。耐震対策の適用範囲を検討する際に落下後の人身への危害に着目して位置エネルギーを取り上げていることに対し、6と7は損傷・落下等の起こりやすさに関する項目であり、位置エネルギーとも直接的には関係しない。8は吊り天井が損傷又は破壊した後の状態に関わっており状況に依存する。本検討では、建物自体に関するもので天井の位置エネルギーと関わり、状況に依存しない指標を取り上げて検討を行った。

- 6kg/m²未満：グラスウール板やロックウール吸音板を天井板とする軽い天井
- 6～10kg/m²：せっこうボード直張り程度の比較的軽い天井
- 10～20kg/m²：せっこうボード捨て張り（天井板2枚張り）程度の一般的な天井
- 20kg/m²以上：せっこうボード3枚張り以上で、音響に特に配慮する天井

(2) 面積

(a) 天井総面積 (A_c)

天井総面積は、同一階にあり、壁（天井勝ちの壁を含む）で囲われ、一体的に使われる室の、天井の総面積（床面への投影面積ではなく）とする。図 3.2 の平面概要図では天井が張られたハッチング部分の総和を、図 3.3 の断面図では勾配に沿った面積を天井総面積と考える。

(b) 室面積 (A_r)

室面積は、利用の際に室として一体的に用いられる範囲を合計した面積と考える。室面積について検討するにあたっては、表 3.1 のように、200 m²、500 m²、1000 m²のあたりに区分の線を引く。4つの区分はそれぞれ以下の様に想定した。

- 200 m²未満：会議室程度までの比較的小さな室の区分。
- 200～500 m²：小規模な体育館程度までを含む区分。
- 500～1000 m²：中規模な体育館程度までを含む区分。
- 1000 m²以上：大規模な体育館や劇場等を含む区分。

500 m²は、建築物防災週間に実施されている国土交通省の調査で、体育館等の天井を調査対象とする際の面積区分の数字でもある。小学校の体育館はアリーナ部分のみであれば 500 m²を切ることも多い。

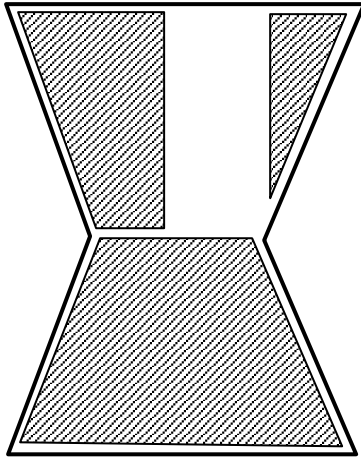
(3) 天井高さ (h)

天井高さは、床面から鉛直上向きに天井下面までの距離とする。天井高さとしては、最高天井高さ、平均天井高さ、などが挙げられるが、高所からの落下物が危険であることを考えて、最高天井高さをパラメーターとすることが考えられる（図 3.3）。ただし、採光等のための部分的に高くなっているごく狭い面積の天井等は、天井高さを算定する際の対象とはしない。天井高さの一例は以下とする。

- 住宅 : 2.5m 程度
- オフィス、スーパー : 2.5～4m
- ホームセンター : 4～5m
- 国体でのバレーボール会場設置基準 : 7m (10m 以上が望ましい)

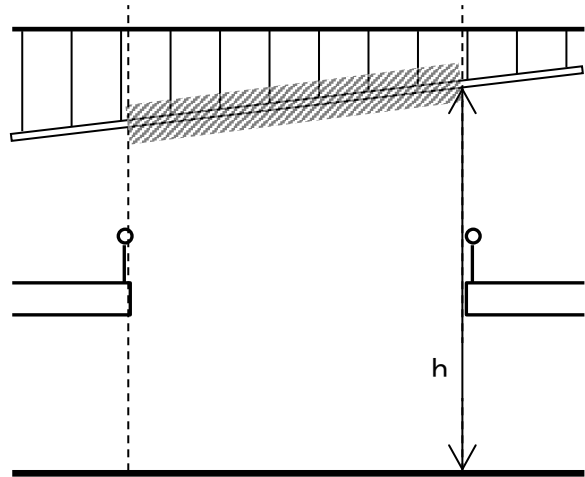
天井高さについて検討するにあたり、4m、6m、10mのあたりに区分の線を引く。4つの区分は、それぞれ以下のように想定した。

- 4m 未満：住宅、オフィス、スーパーなど
- 4～6m：ホームセンター、郊外型電器店、博物館展示室など
- 6～10m：体育館、宴会場など
- 10m 以上：音楽ホール、劇場、体育館など



※上記平面伏図（概要図）の室のハッチング部分が天井とすれば、3つの総和が天井総面積。

図 3.2 天井総面積のイメージ



※上記断面概要図の室について、hが天井高さ、ハッチング部分が天井総面積。

図 3.3 天井総面積、天井高さのイメージ

表 3.1 室面積(Ar)-天井高さ(h)、と、空間のイメージ(室用途)

	$0 < Ar < 50\text{m}^2$	$50 \leq Ar < 100\text{m}^2$	$100 \leq Ar < 200\text{m}^2$	$200 \leq Ar < 500\text{m}^2$	$500 \leq Ar < 1000\text{m}^2$	$1000\text{m}^2 \leq Ar$
$10\text{m} \leq h$	吹き抜け空間				●映画館(中) ●宴会場(中) ●★体育館(中)	■音楽ホール ■●劇場 ●映画館(大) ●宴会場(大) ●★体育館(大) ●★プール(大)
$6 \leq h < 10\text{m}$				■ライブハウス ●▲★体育館(小) ●★プール(小) ▲博物館展示室	●宴会場(中) ●★プール(中) ▲博物館展示室	▲倉庫建物
$4 \leq h < 6\text{m}$			▲博物館展示室	●図書館 ●★プール(小) ▲博物館展示室	●図書館 ▲博物館展示室	▲デパート(1階) ▲ホームセンター ▲郊外型電器店 ▲工場ライン
$h < 4\text{m}$	●教室 ●オフィス個室 ●ホテル個室 ●会議室(小) ▲病室	■音楽スタジオ ●宴会場(極小) ●会議室(中) ▲コンビニ ▲保育室	●宴会場(小) ●会議室(大)	●宴会場(小) ●図書館 ▲ファミレス(中)	●図書館 ▲スーパー(小) ▲ファミレス(大)	●ボウリング場 ▲デパート(一般階) ▲スーパー(中・大) ▲超高層ビルオフィス

■: $20\text{kg}/\text{m}^2 \leq w$ ●: $10\text{kg}/\text{m}^2 \leq w < 20\text{kg}/\text{m}^2$ ▲: $6\text{kg}/\text{m}^2 \leq w < 10\text{kg}/\text{m}^2$ ★: $0\text{kg}/\text{m}^2 < w < 6\text{kg}/\text{m}^2$

3.2.2 天井脱落による危害の可能性

平成13年芸予地震から平成23年東北地方太平洋沖地震までの地震による天井の落下事例について、横軸を天井単位面積質量、縦軸を天井高さ、としてプロットすると、図3.4のようになる。図中の番号は表3.2にまとめた被害事例の番号に対応している。△で示したものが人身被害報告のあった事例であり、事例2に関して重傷者が報告されている。

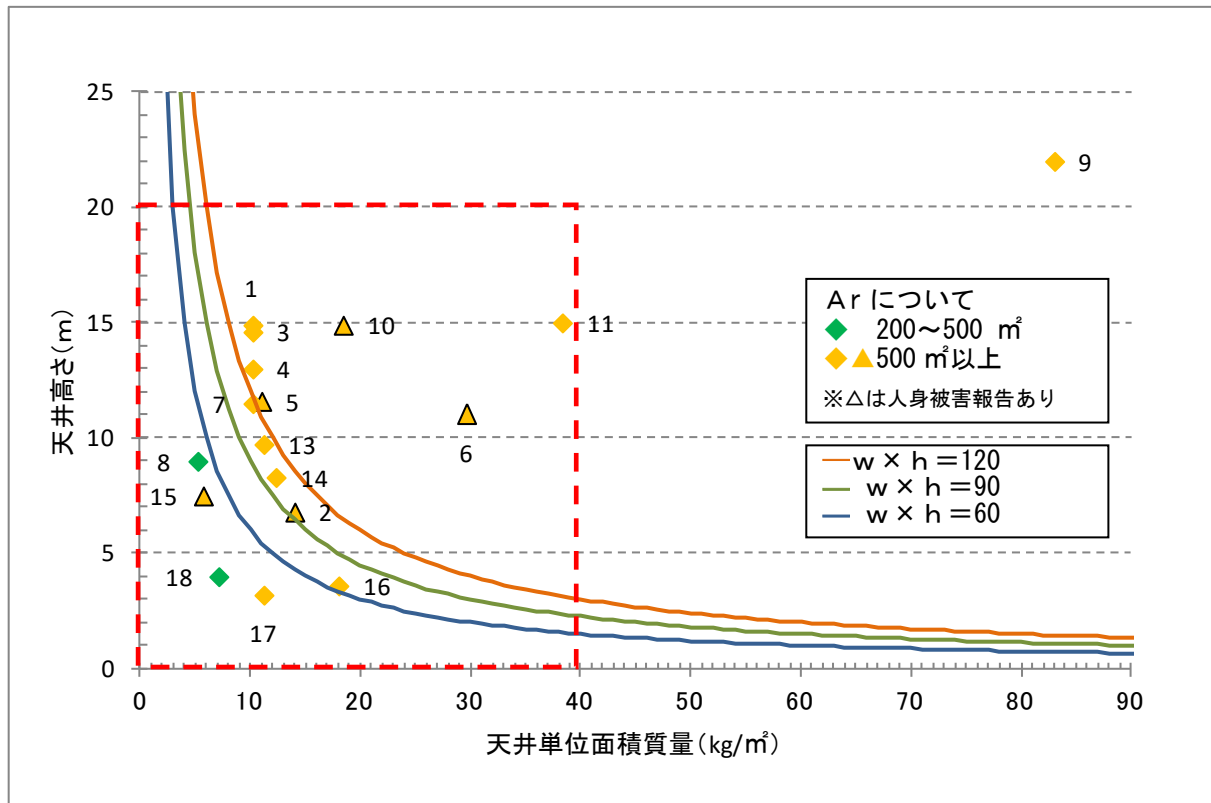


図3.4 地震被害事例の天井の分布（赤枠内の範囲が図3.5～図3.7の範囲）

3.2.3 天井の耐震対策の適用範囲

天井の耐震対策の適用範囲の検討では、室面積、天井高さ、天井単位面積質量の3つのパラメータについて取捨選択し、以下の4つの設定方法について検討した。天井総面積（ A_c ）は適用範囲の判断が難しくなるため実用性に欠けると判断し、パラメータから外した。また、軒裏の天井（軒天）は検討対象外とした。それぞれ合理的に検討されているが、4つめの単一の閾値を設ける方法が、一連の設計活動の中で適用範囲を判断する際の容易さという点では最も実用的な設定方法と言える。

（1）単位面積位置エネルギーによる設定方法

<考え方>

天井落下の際に、人体に衝突して危害を加える面積は限定されると考え、天井の単位面積位置エネルギーをもって適用範囲を設定することを考える。つまり、 $w \times h$ が一定以上になるものを適用範囲とする、という考え方である。

図 3.4 には、単位面積の天井の位置エネルギーが一定となる、ラインを、 $w \times h = 60, 90, 120$ 、についてそれぞれ示している。落下事例の中で重傷者の報告があったものは事例 2 のみであり、この事例では $w \times h = 95$ であるから、少なくとも $w \times h = 95$ 以下とすることが考えられる。

<合理性・実用性>

適用範囲の設定方法として合理的であるが、基本設計の段階で天井の材料の詳細が分からない場合もあり、実際の設計プロセスの中に必ずしもきちんと乗らない可能性もある。適用範囲の設定に際して面積が出てこないため、どんなに小さな空間（例：回り階段の吹き抜け）の天井でも適用範囲内になる可能性がある。

（2）一室の総位置エネルギーによる設定方法

<考え方>

天井の脱落はある広がりを持って生じるため、その被害の広がりと程度を含む指標として、一室の総ての天井に関する位置エネルギーを指標とする適用範囲の掛け方を考える。つまり、 $w \times h \times A_r$ が一定以上になるものを適用範囲とする、という考え方である。この場合、天井の総面積が広い場合に天井単位面積質量が比較的小さいものも適用範囲内となり、天井の総面積が狭い場合には天井単位面積質量が比較的大きいものでないと適用範囲内とはならない、という特徴がある。また、軽量の天井が高所にある場合（室面積 1000 m²超で、膜天井やガラスウール板など軽量の天井を用いる）は適用範囲外としても良い（下地材が落下しないという前提において）とする考え方もあり得る。

<合理性・実用性>

適用範囲の設定方法として包括的であるが、基本設計の段階で天井の材料の詳細が分からない場合もあり、実際の設計プロセスの中に必ずしもきちんと乗らない可能性もある。

（3）室面積に応じた天井高さ天井単位質量による設定方法

<考え方>

具体の室および面積帯を想定しながら、閾値を、天井高さ天井単位質量について設定する、という考え方である。表 3.1 のように、室面積が小さくなるほど、天井高さは低くなる傾向がある。適用範囲を考えるにあたっては室面積（3.2.1（2）(b)）における検討を踏まえて、面積帯 3 区分を設定して検討を行った。

[$0 \text{ m}^2 < Ar < 200 \text{ m}^2$] (図 3.5)

- ①在来工法で2枚張り以上 ($10\text{kg}/\text{m}^2$ 以上) の天井を適用範囲と考える。
 - ②在来工法で2枚張り ($10\sim 20\text{kg}/\text{m}^2$) の天井が 10m以下の高さにある場合を適用範囲外と考える。
- これらより、適用範囲が青色の網掛け部分となる。

[$200 \text{ m}^2 \leq Ar < 500 \text{ m}^2$] (図 3.6)

- ③在来工法で2枚張り以上 ($10\text{kg}/\text{m}^2$ 以上) の天井を適用範囲と考える。
 - ④在来工法で2枚張り ($10\sim 20\text{kg}/\text{m}^2$) の天井が 6m以下の高さにある場合を適用範囲外と考える。
- これらより、適用範囲が緑色の網掛け部分となる。

[$500 \text{ m}^2 \leq Ar$] (図 3.7)

- ⑤グラスウール板の天井よりも質量のあるもの ($6\text{kg}/\text{m}^2$ 以上) を適用範囲と考える。
 - ⑥在来工法2枚張り ($10\sim 20\text{kg}/\text{m}^2$) 又はそれより軽い天井が 6m以下の高さにある場合を適用範囲外と考える。
- これらより、適用範囲が橙色の網掛け部分となる。

<合理性・実用性>

空間の使われるイメージ(室用途)と関連させながら適用範囲について具体的に検討している。しかしながら、室面積により適用範囲となる天井高さが変わることについては、室面積により天井の落下による危険度が増すという説明は難しい(天井面が大きいほど衝突時衝撃が大きくなる、などは規定としての説明が難しい)。また、場合分けが多すぎると複雑になるという難点もある。

(4) 天井高さと室面積による設定方法

<考え方>

天井高さについては 3.2.1 (3) で区分の閾値として、4m、6m、10m という数字が挙げられている。また、室面積の区分を 3.2.1 (2) (b)で検討した際に、 200 m^2 、 500 m^2 、 1000 m^2 が区分の閾値として挙げられている。想定される室の具体の用途等を踏まえると、天井高さは 6m 以上～10m 以上、室面積は 200 m^2 以上～ 500 m^2 以上に、それぞれ閾値を設けるのが適当と考えられる(図 3.8)。

<合理性・実用性>

設計の初期段階でも適用範囲内かどうか判断でき、適用範囲として分かりやすい方法である。

3. 天井の耐震対策の検討

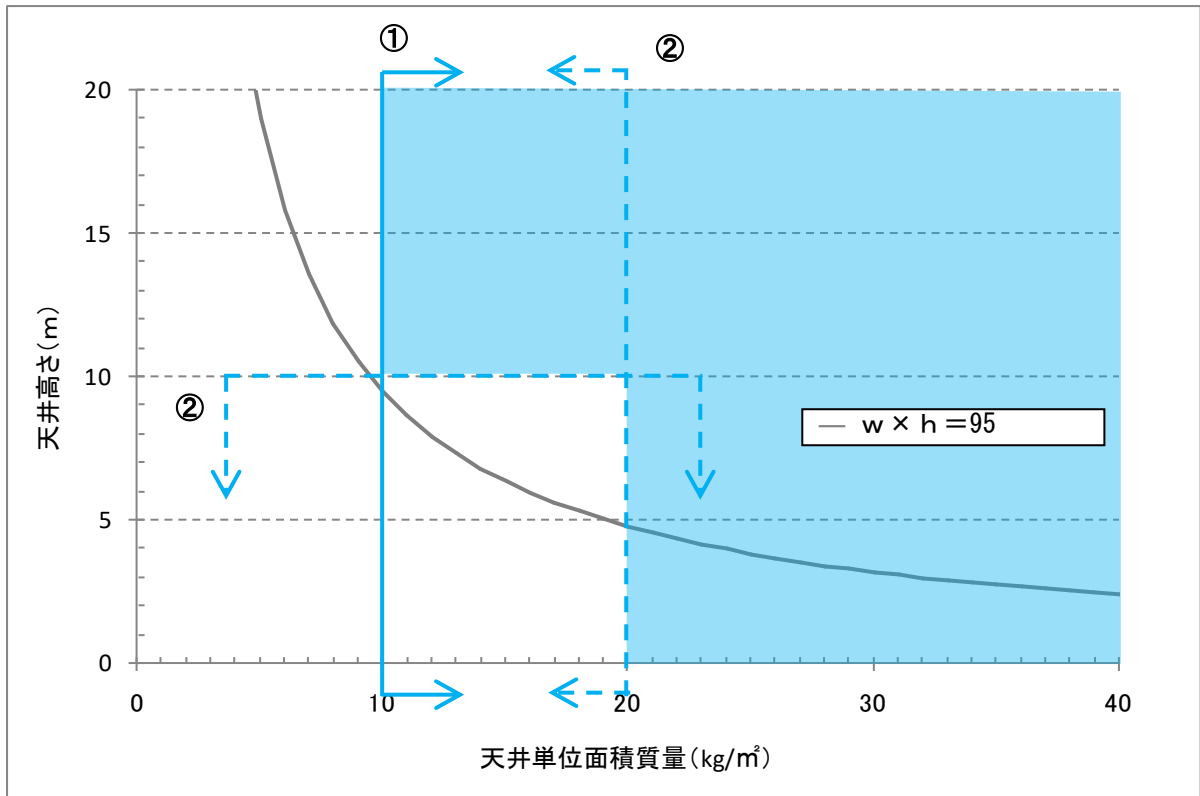


図 3.5 室面積 $A_r < 200 \text{ m}^2$ の適用範囲

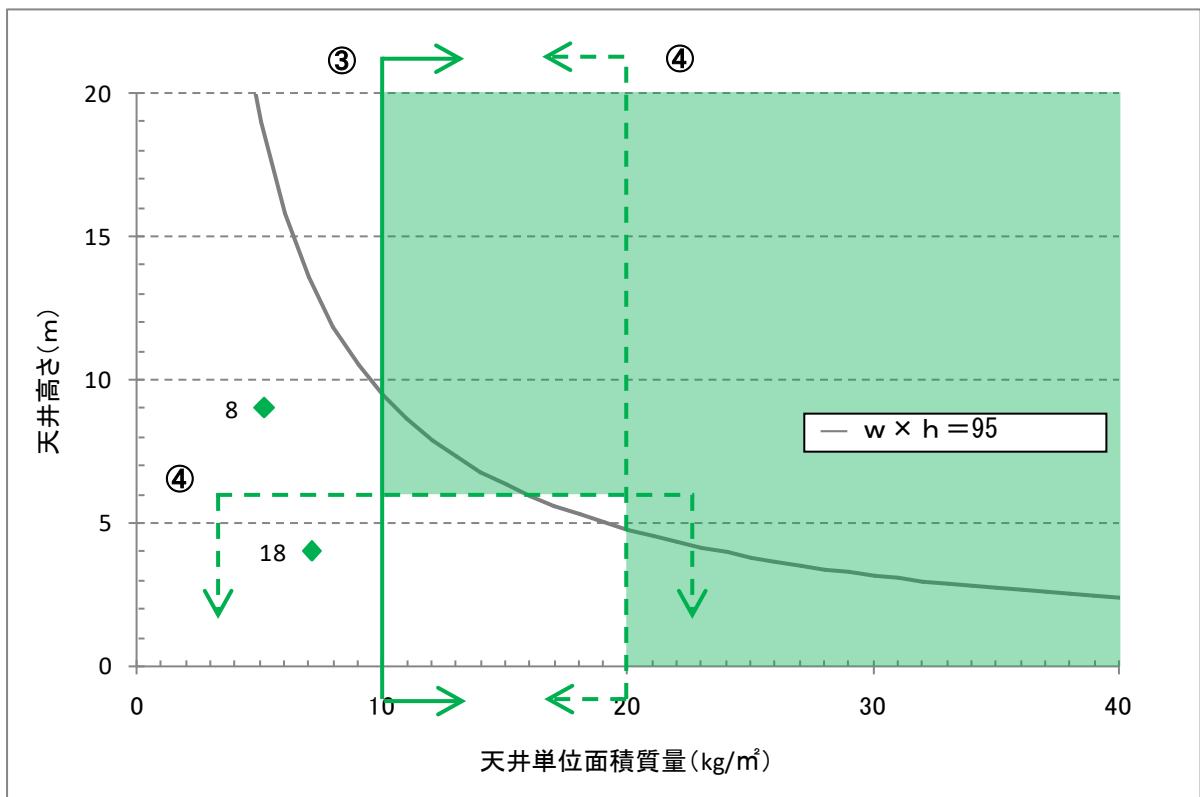


図 3.6 $200 \leq A_r < 500 \text{ m}^2$ の適用範囲 (緑色印は床面積で該当する事例)

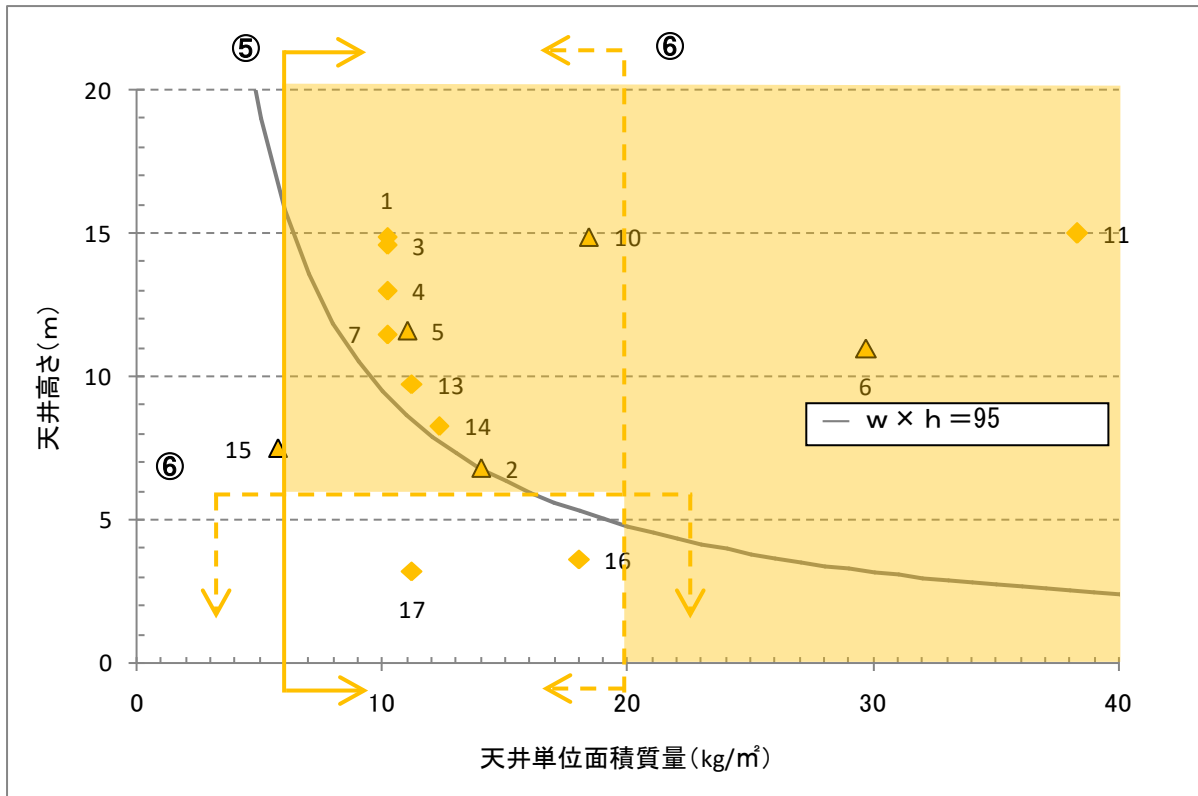


図 3.7 500 m² ≤ Ar の適用範囲（橙色印は床面積で該当する事例。△は人身被害報告あり）

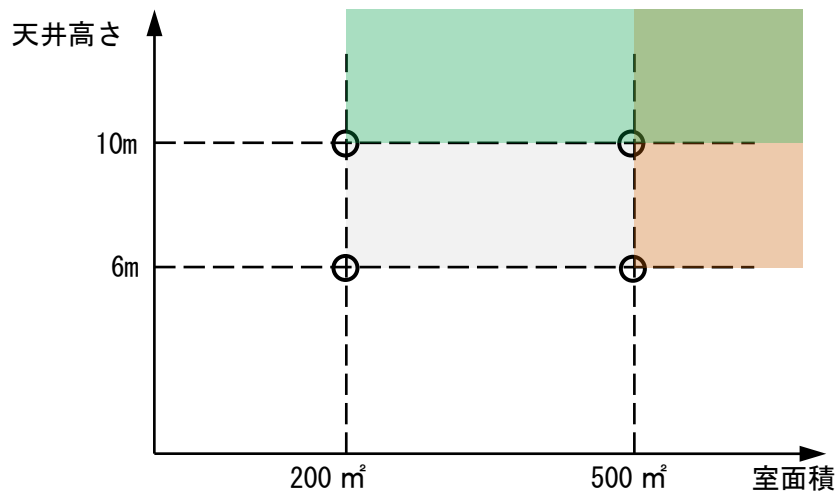


図 3.8 天井高さと室面積による設定方法

3. 天井の耐震対策の検討

表 3.2 地震による天井被害事例 (※表 2.19 から、脱落天井の詳細仕様と被害状況を外し、天井面材・単位面積質量、被害写真、パラメーター等を追加)

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
中間報告での名称		建築物B	-	建築物F	-	建築物E	-	-	-	-	建築物C	建築物D	建築物J
被災地震		2011東日本	2005宮城	2011東日本	2001芸予	2011東日本	2001芸予	2001芸予	2007能登	2011東日本	2011東日本	2011東日本	2011東日本
建築物の諸元	建設地	茨城県	宮城県	宮城県	広島県	宮城県	愛媛県	愛媛県	石川県	神奈川県	宮城県	宮城県	福島県
	建設年	昭和60	平成17	平成6	平成元	平成17	平成元年?	不明	昭和60	平成15	昭和62	昭和48	昭和45
	構造	SRC造・S造・RC造	S造	S造	SRC・RC・S造	S造・RC造	RC造・S造	SRC造・S造	S造	S造	RC造・S造	SRC造	SRC造
被害発生時の諸元	被害発生地震 /本震震度	本震・余震 6弱	5強	本震・余震 6強	6弱	本震・余震 6強	5弱	5強	6弱	5弱	本震・余震 6弱	本震 6弱	本震・余震 5強
	被害発生時の使用状況	使用中	使用中	使用中	使用中	使用中	(不明)	(不明)	不使用	使用中	使用中	不使用	使用中
被災場所の主な用途		体育館	プール	体育館	体育館	体育館	体育館	武道館	体育館	ホール	ホール	ホール	ホール
被災場所のおおよその広さ(m ²)		1800	1200	942	857.5	850	726	535.5	496	1400※1	1100	900	700
被災場所の天井高さ(m)		10.7~14.9	6.5~6.8	11.6~14.6	8~13	10.7~11.6	平均11	9.5~11.5	7~9	22	14.9	15	15
一続きの天井の 平面的広さ(m ²)	天井1枚の広さ			約6×27 =162		約4.5×26 =117			-				
	1室の天井の広さ ※2 吹き抜け上部の天井広さ ※2	(1800)	1200	162×4.5 =729	990	11.7×7 =81.9	(726)	500	(496)	(1400)	(1100)	(900)	(700)
天井種類	在来工法	○	○	○	○	○	○	○	○	△	○	○	○
	システム天井 木製下地								○				○
天井面材 PB:せっこうボード、RW:ロックウール吸音板 数字は、それぞれの材の厚みを示す。			けい酸カルシウム板8+RW12	PB9.5+RW9	PB9.5+RW	PB9.5+RW12	強化PB12.5+不燃せっこう積層板9.5	PB+RW	RW15	繊維混入PB13.6×5	PB(12.5×2)	けい酸カルシウム板12+繊維混入PB(10+B)	木製板
天井単位面積質量		10.2	14.0	10.2	10.2 ※3	11.0	29.7 ※4	10.2 ※3	5.2	83~88	18.4	38.3	
天井の断面概念図													
被害状況等写真													
天井の床面への落下 人的被害の有無		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
wh		109	95	149	133	128	327	117	47	1,826	274	575	
wAh		-196,452	114,240	108,569	131,274	104,504	237,184	58,650	-23,213	2,556,400	301,576	517,050	

※1 図面より概算

※2 () がついた数値は室面積で代用しているもの。






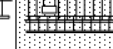




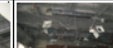

※3 天井板の厚さが不詳のためPB=9.5mm、RW=9mmと仮定して算定。

※4 不燃せっこう積層板は、同じ厚さの不燃積層PBと同等として算定。

パラメーター	吊元上下振動	大スパン	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	複雑な形状の天井	重量	6kg/m ² 以上	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		室面積	1,000m ² 以上	○	○	×	×	×	×	×	×	○	○	×
	500m ² 以上		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	200m ² 以上		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	1枚の天井面積	300m ² 以上	○	○	×	○	×	○	○	○	○	○	○	
		100m ² 以上	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	天井高さ	10m以上	○	×	○	○	○	○	○	×	○	○	○	
		6m以上	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
		4m以上	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
用途	座席等で移動困難	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	○		
	不特定多数	○	○	×	×	×	×	×	×	○	○	○		

表 3.2 地震による天井被害事例（続き）

（※表 2.19 から、脱落天井の詳細仕様と被害状況を外し、天井面材・単位面積質量、被害写真、パラメーター等を追加）

		13	14	15	16	17	18	19
中間報告での名称		—	建築物A	—	建築物G	建築物H	建築物I	建築物J
被災地震		2003十勝沖	2011東日本	2007三重	2011東日本	2011東日本	2011東日本	2011東日本
建築物の諸元	建設地	北海道	茨城県	三重県	宮城県	福島県	福島県	福島県
	建設年	平成15	平成22	平成19	平成12	平成5.7	昭和54	昭和45
被害発生時の諸元	構造	S造	S造	S造	S造	S造(一部SRC造)	SRC造	SRC造
	被害発生地震 /本震震度	5強	本震 6弱	5強	本震・余震 6弱	本震 5強	本震 6強	本震・余震 5強
	被害発生時の使用状況	不使用	使用中	使用	使用中	不使用	不使用	不使用
被災場所の主な用途		空港ロビー	空港ロビー	飲食店	展示室	観覧席・通路	会議場	展示室
被災場所のおおよその広さ(m ²)		756	942	980	1450	1450	207	500
被災場所の天井高さ(m)		9.73	8.3	3.6~7.5	3.6	2.5~3.2	3.1~4	4.5
一続きの天井の 平面的広さ(m ²)	天井1枚の広さ		3×11=33	—				
	1室の天井の広さ ※2 吹き抜け上部の天井広さ ※2	450	33×6 =198	486	(1450)	(1450)	207	500
天井種類	在来工法	○	○		○	○	○	○
	システム天井 木製下地			○				○
天井面材 PB:せっこうボード、RW:ロックウール吸音板 数字は、それぞれの材の厚みを示す。		PB9.5+RW12	PB9.5+RW15	PB9.5+木枠	PB15+PB15	PB9.5+RW12	PB9.5	
天井単位面積質量		11.2	12.3	5.7	18.0	11.2	7.1	
天井の断面概念図								
被害状況等写真								
天井の床面への落下		○	○	○	○	○	○	○
人的被害の有無				○				
wh		109	102	43	65	36	28	
wAh		49,039	20,214	20,777	93,960	51,968	5,879	

※2 () がついた数値は室面積で代用しているもの。

パラメーター	吊元上下振動	大スパン	○	○	○	×	○(観覧席)	×	△
	複雑な形状の天井		△	×	×	○	○	△	×
		重量	6kg/m ² 以上	○	○	○	○	○	○
	室面積	1,000m ² 以上	×	×	×	○	○	×	×
		500m ² 以上	○	○	○	○	○	×	○
		200m ² 以上	○	○	○	○	○	○	○
	1枚の天井面積	300m ² 以上	○	○	○	○	○	×	○
		100m ² 以上	○	○	○	○	○	○	○
	天井高さ	10m以上	×	×	×	×	×	×	×
		6m以上	○	○	○	×	×	×	×
		4m以上	○	○	○	×	×	○	○
	用途	座席等で移動困難	×	×	○	×	○	×	×
		不特定多数	○	○	○	○	○	×	○

3. 天井の耐震対策の検討

4. 天井の耐震的な仕様の検討

4. 1 分類と用語

4.1.1 天井面を支持形態による分類

天井の表面に張られている天井板材料が同じであっても、その天井板を支持する構成の違いによって、天井の耐震性等にも大きな差が出てくると考えられる。天井板を支持する構成の違いによる天井としては、以下のようなものが挙げられる。ここでは天井全般の分類を示すが、以降の「天井」は分類のうちの「吊り天井」を想定している。

例：直天井

吊り天井（在来工法による天井、システム天井）

格天井

4.1.2 天井の仕上方法による分類

屋内空間について様々な室を実現するために、天井の仕上げには様々な方法が用いられる。これらの仕上方法の違いによる天井としては、以下のようなものが挙げられる。

例：塗り仕上げ天井

張り仕上げ天井（在来工法による天井、膜天井）

はめ込み式天井（クロスタイプ天井、グリッドタイプ天井）

差し込み式天井（ラインタイプ天井）

4.1.3 “在来工法による天井”の代替用語

JIS A6517:建築用鋼製下地材（壁・天井）:2010に規定される建築用鋼製下地材を用いて下地を組んで、せっこうボード等で天井面を仕上げる天井を“在来工法（による）天井”と呼ぶことが多くある。しかしながら“在来工法”は、“長い年月の間に用いられてきて一般化した工法”というような意味であり、必ずしも“在来工法（による）天井”を適切に記述できる用語ではない。用いられている材料や、同一部位に用いられる工法の中での位置付け、天井の構成方法、などを踏まえると、以下のような呼び方が考えられる。

例：軽量鉄骨（による）天井

建築用鋼製下地材（による）天井

一般工法（による）天井

普通工法（による）天井

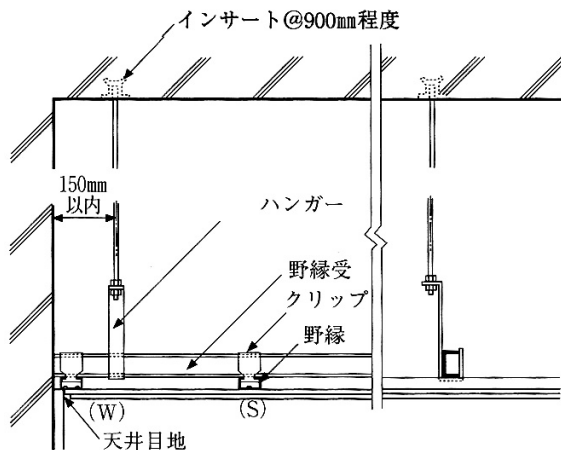
吊り張り工法（による）天井

4.1.4 システム天井

JIS A1445:2007「システム天井構成部材の試験方法」では、システム天井を以下のように定義している。「単位天井を組み合わせたつり天井で、天井パネルとして主に吸音材料を載せ掛け、照明器具、空調吹出し口などの設備の取付けが容易にできる機能をもつ天井」。体育館等に設けられるシステム天井を合わせて考えると、「単位天井を組み合わせたつり天井で、天井パネルとして主に吸音材料を載せ掛け、天井単位に合わせて照明器具等を設置する天井」などとなる。

4.1.5 天井に関する用語、部材名称等の定義

本項では、天井に関する用語や部材名称等について確認しておく。図 4.1 は在来工法による天井を RC 造建築物のスラブから吊る際の標準的な構成である。鉄骨造建築物の場合には、吊り金物を用いるなどして吊りボルトを懸垂して、天井を設置する。



(注) S：シングル野縁 W：ダブル野縁

図 4.1 在来工法による天井の構成

上記のような在来工法の天井について、「天井」の構成の概要を表 4.1 のように整理する。ここでは「天井」の範囲を、施工時の仕事の切れ目に従って決めている。例えば、同じ鉄骨造を想定した場合でも、折板から天井を吊る場合は吊りボルトを含んで下が「天井」であり、鉄骨梁から吊り金物を介して天井を吊る場合は吊り金物を含んで下が「天井」となる。

次ページに、表 4.1 等に表示される具体の部位を想定しながら、各種の用語について整理する。

表 4.1 天井構成の概要（在来工法による天井）

		在来工法による天井		
構造躯体	RCスラブ	コンクリート	鉄骨梁	
		インサート	折板	—
		—	吊り子	—
天井	斜め部材	—	—	吊り金物
		吊りボルト		
		ハンガー		
		野縁受け		
		クリップ		
	天井面	野縁		
ねじ				
天井板				

天井：吊りボルトから天井板までの部材が組み上がって構成される部位の総称。吊り金物を用いる場合は吊り金物を含む。

吊り元：RC スラブ（インサート含む）、鉄骨梁、折板用吊り子等、天井が懸垂する部位。

吊り金物：吊り材を吊り元に緊結する際に用いる部材。

接合金物：主に天井の部材同士を緊結するために用いる部材。ボルト、ハンガー、クリップ、ねじ等。

吊り材：天井を吊り元に接続する部材。吊りボルト等。

天井板：天井の面を構成する際に用いる板状の部材。せっこうボード、グラスウール板等。

天井面：天井板およびそれを支持する部材並びにそれらを緊結する部材で構成される部位の総称。在来工法による天井では、天井板+野縁+ねじ。

天井材：天井を構成する部材の総称。

下地材：天井を構成する部材の内、主に面を懸垂・支持するための線状の部材。野縁、野縁受け、吊りボルト、斜め部材、水平補剛材

天井周囲：天井面の端部に接する箇所。折り曲げ部や段差部は該当しない。

斜め部材：天井に生じる慣性力を伝達するために吊りボルト間に設けられる斜めの部材。

水平補剛材：天井に生じる慣性力を伝達するために吊りボルト間に設けられる水平の部材。

※JIS A6517 では、野縁や野縁受けは「天井下地材の構成部材」であり、吊りボルト、ナット、ハンガー、野縁ジョイント、野縁受けジョイント、クリップは「天井下地材の附属金物」として位置付けられている。

4. 2 対象とする範囲

[考え方]

- ・在来工法による天井で標準的な質量のものを主な対象と想定している。より重い天井や軽量な天井（システム天井、膜天井等）については別途検討が必要である。形状としては水平な天井を主な対象に想定している。

[仕様案]

①天井の単位面積質量は20kg/m²以下とする。

※在来工法による天井の直張りもしくは捨て張り（2枚張り）程度を想定している。実際の適用にあたって対象と想定する天井を適切に含むよう、更に部材質量等から天井質量を精査し、対象とする範囲を規定する必要がある。なお、耐久性や仕様2（フェールセーフ）については、①に限定する必要はないとも考えられる。

4. 3 耐久性

[考え方]

- ・各構成部材は、耐久性を確保する上で必要な措置を施されている（腐食等しない）こと。また、湿気等により各部位の耐力（特に天井板のとめつけ耐力）の低下が生じないようにすること。

[仕様案]

②天井を構成する天井材はさび止め及び防腐のための措置を講ずる等、環境に応じて適切な対応がとられていること。

4. 4 仕様1：長期荷重、地震荷重に対する仕様

本節は天井の耐震的な仕様について検討を行っている。仕様1にあてはまるには、③から⑯の総てを満たす必要がある。

（ここでは在来工法を中心に検討しているが★はシステム天井に関する記載）

4.4.1 吊り天井の鉛直方向の荷重の負担（長期荷重に対して）

[考え方]

- ・常時に破壊しない強度を有する（荷重に耐える強度を有する）こと。

[仕様案]

③部材はJIS A6517に規定する材を用いること。

※部材の品質を確保する観点から採用している。地震による天井脱落ではJISに規定するクリップを用いた場合でもクリップが外れており、地震力に対しては別途規定する必要がある。（★システム天井には製品JISはない。試験方法がJIS A1445「システム天井構成部材の試験方法」に規定されている。部材も各製造者で様々。）

④吊りボルトは1 m²に1本以上、軸を鉛直方向に向けて配置すること。

※ダクト等による吊りボルト間隔の開き等については別途検討が必要。

（★システム天井の吊りボルト間隔は、クロスタイプの天井で1,000mm×1,500mm、グリッドタイプの天井で1,200mm×1,200mm、など。）

⑤天井を構成する天井材は、常時の荷重に対して外れを生じないように相互に緊結し、常時の荷重を構造耐力上主要な部分に適確に伝達できるように、天井を支持すること。

※折板屋根、ALC パネルによる屋根の吊り子は、仕事の切れ目からすると RC 造スラブのインサートと同じ位置づけと考えられるので、天井に関する規定の対象としない。

4.4.2 吊り天井の鉛直方向の荷重の負担（地震荷重に対して）

[考え方]

- ・地震荷重に対して破壊しない強度を有すること。

[仕様案]

⑥天井を構成する天井材は、中地震動時の衝撃、変形等に対して、滑りを生じないように相互に緊結すること。

⑦天井を構成する天井材は、大地震動時の衝撃、変形等に対して、外れを生じないように相互に緊結すること。

※中地震動（建築基準法における稀に発生する地震動）には弾性範囲の変形を想定、大地震動（建築基準法における極めて稀に発生する地震動）には変形しても可だが脱落に至るような挙動（外れ、破断）は回避できるよう各部材及び部材間の接合強度を求める。

※クリップの外れの防止対策としては、両掛けや野縁受けへのねじ留めよりも、外れにくい耐風クリップの使用や番線による留め付けの方が効果的と考えられる。

※ハンガーについては、口が開かないようにねじで留めるのがよい。

※野縁受け同士の接合部は野縁受けジョイントを用い、溶接ではなく、ねじどめを基本とする。材が薄いために、溶接が有効に施工されない可能性がある。

⑧天井に大地震動時に生じる力を構造耐力上主要な部分に適確に伝達できるように、天井を支持すること。吊り金具等は吊り元の部材に緊結等すること。

※H 形鋼の下フランジに留め付けた金具（金物）の脱落が確認されている（2 章、建築物 E 参照）ため、梁等の部材を吊元とする場合には脱落防止に配慮するのがよい（たとえば、機械的な引っ掛かりのある金具を用いる、など）。

※吊り元を溶接とする場合、破断しないように考慮する。

4.4.3 地震時の水平方向の慣性力の負担

[考え方]

- ・水平抵抗部材の配置により地震時の変位を抑制するよう、斜め部材の必要量等について規定する。中地震動に対して滑らないようにすることを想定した仕様。

（★システム天井の天井面の剛性は在来工法よりかなり小さい。クロスタイプの天井やグリッドタイプの天井は、T バーで枠を組んで、その中にグラスウール板、ロックウール吸音板、メッシュ、照明器具、等を上からはめ込む。）

[仕様案]

⑨斜め部材は X 方向、Y 方向に釣り合いよく、V 字型で配置すること。

※例えば、C-40×20×1.6 以上の部材を使用した場合は 7.8 m²に 1 対以上設ける（算定の前提は、天井質量が 17kg/m²、吊り長さ 900mm、水平震度 2.2 で、斜め部材が座屈するまで接合部が先

に損傷・破壊しない)。斜め部材を V 字配置とすることで、吊りボルトの座屈を生じないようにする。上記の条件以外での斜め部材の必要量は、「5.2.4 座屈する場合の許容耐力」を参照。

※斜め部材の量について、天井耐震計画 WG の検討をベースに、以下の三つの階層について代表の値を設定することも考えられる。

- イ) 上層階
- ロ) 中間階 (イ) 及びハ) 以外の階
- ハ) 下層階

⑩斜め部材の接合部は、天井面に生じる慣性力を斜め部材を通して構造耐力上主要な部分に適確に伝達できるようにすること。

※溶接は不可とする。接合は“緊結”とし、引っ掛けるだけのものは不可。

※斜め部材の下端が吊りボルトに接合されるだけでは中地震動時にハンガーや周囲のクリップが滑ってしまう場合がある。[考え方]のとおり、滑りを生じないようにする。

⑪斜め部材は水平面に対して 60 度以下の角度で設置すること。

※在来工法で吊りボルトピッチ 900mm の場合は、吊り長さ 1,500mm 以下なら 60 度以下になる。

(★システム天井で吊りボルトピッチが、1,000mm×1,500mm、1,200mm×1,200mm の場合は、吊り長さ 1,500mm 以下なら 60 度以下になる。)

⑫天井の吊り長さが 1,500mm 以上の場合は、水平の振れ止めを X 方向、Y 方向に釣り合いよく配置し、水平補剛材で区切られる各段について、天井に生じる慣性力を構造耐力上主要な部分に適確に伝達できるように斜め部材を配置すること。

※力を充分伝達するために、水平振れ止めと吊りボルトとの接合部を緊結する必要がある。

⑬斜め部材と斜め部材の力を伝達する部材相互を緊結すること。

※斜め部材下部が留め付けられる吊りボルト近傍のクリップが外れないことが必要。同様に、衝撃、変位を受ける天井周辺部、段差部、設備機器周辺の接合部についても十分な耐力を持たせる必要がある。

4.4.4 天井の縁切り

[考え方]

- ・地震動を受けた天井が周辺部位と衝突することで大きく破損して人身に危害を生じるような脱落を生じないことを考える。
- ・振動特性に違いが出る部位については、天井を一体として充分剛にするか、縁を切って別々として衝突しないようにするか、明確な方針の下で設計する必要がある。

[仕様案]

⑭天井と周辺部位 (躯体、壁など)、設備は縁を切り、相互の間に隙間を設けること。中地震動では衝突を許容せず、大地震動には大きな天井被害を防ぐため、隙間は 100mm 以上とすること。

※天井と周辺部位の隙間は、「体育館の天井等の耐震設計ガイドライン」((財)日本建築センター、2005年5月)の数字を踏襲しており、ここで新たに実験等で検討を加えたものではない。天井と設備との間の必要クリアランスの算定も難しく、設備機器周辺のクリップを耐震クリップにして脱落を防止する等の方法も考えられる。

⑮エキスパンションジョイント部分等で一体的に振動しない構造躯体に天井を設ける場合、天井は縁を切って一体としないこと。

※必要な隙間寸法は、エキスパンションジョイントのクリアランス+100mm×2と算定される。

⑯天井面に段差を生じる部分、折れ曲がる部分などで地震時に天井が一体的に動かないことが想定される場合には、天井相互の間で縁を切り、一体的な構造としないこと。

※天井について、地震動で折れ曲がり部が損傷しない規模がどの程度であるか技術資料はない。このため、数字を挙げて決めることができない。

(★システム天井は、在来工法による天井ほど細かく凹凸面をつくることはない)

4. 5 仕様2：フェイルセーフの仕様

[考え方]

- ・天井を構成する部材が破壊または脱落しても人的な被害を防ぐようにする。落下する天井材を保持する時に大きな衝撃荷重が生じないようにする。

[仕様案] 以下のいずれか1つ以上の措置を講ずること。

⑰落下する天井材を保持する時に生じる力を構造耐力上主要な部分に適確に伝達できるように、天井をロープ等で吊り、天井面が外れても下まで落ちないようにすること。

⑱落下する天井材を保持するように天井面より下の位置にネットを張ること。ネットは天井面に沿って設けること。

⑲人がいる場所が守られていること。人が危険物に近接しないこと。

※人が居る場所の上に庇を設けるなどが想定されるが、体育館等では天井面全体に対するフェイルセーフにはならない。

4. 天井の耐震的な仕様の検討

5. 吊り天井の耐震性に関する計算方法の検討

(1) 背景と目的

吊り天井（ひいては応答倍率の大きい非構造部材等）の耐震性を評価する上で考慮すべき項目として、下記の(1)及び(2)が挙げられる。(1)は吊り天井の必要耐力を、(2)は他の部位との衝突を避けることを意図したクリアランスの大きさを与える。

さらに、構造躯体との関係で(1)及び(2)の増幅を評価するには、(3)を考える必要がある。

また、技術的助言における考え方、すなわちブレースとクリアランスとのセットで耐震性を確保するという考え方は、ダクト等により天井裏にブレースを設置するスペースが十分取れず適用し難い場合があるほか、ブレース周辺の損傷・破壊を起こしやすく好ましくないとの指摘もある。仮に吊り天井の壁面等への衝突を許容する代わりに衝突時の力に対して吊り天井が破壊しないことを確かめることを考えれば、壁面等に対する吊り天井の衝突時相対速度等を評価する必要があるろう。

＜吊り天井の耐震性評価で考慮すべき項目＞

- (1)吊り天井の応答絶対 $\boxed{\text{加速度}}$
- (2)吊り元（床、屋根）に対する吊り天井の相対 $\boxed{\text{変位}}$
- (3)吊り天井と構造躯体との $\boxed{\text{共振}}$

これらの評価に当たっては、次の(a)～(c)の与条件を上記(1)～(3)に反映させる方法が必要である。

＜与条件＞（ここで、【 】内は1次情報を加工した2次情報。）

- (a)入力地震動（大きさ、周波数特性、継続時間、等）【応答スペクトル】
- (b)構造躯体（周期、耐力、等）【周期、刺激関数】
- (c)吊り天井の仕様（重さ、吊り長さ、ブレース量、等）【周期、耐力】

吊り天井の「計算」とは、上記の与条件(a)～(c)を項目(1)～(3)に結び付ける方法の提供を目的としている。扱う範囲は、大きく分けて次の2つと考えている。

＜計算の構成＞

- ①天井の吊り元の揺れの評価
- ②吊り天井のモデル化・クライテリア

①は与条件(a)及び(b)を用いた構造躯体の応答に関することである。②は、①を基にして各項目（要求値）を算定するための吊り天井のモデル化と、吊り天井の仕様が十分であるか否かを判断するため、与条件(c)から吊り天井の周期や耐力（クライテリア）を評価するものである。

図 5.1 に全体のフローを示す。①では与条件(a)(b)から吊元の揺れを応答スペクトルの形で評価する方法（スペクトル法）を提示する。水平振動については刺激関数を必要としないなどの簡略化を施した簡易スペクトル法と、さらに単純化した震度法へとまとめる。詳細は 5.1 節で述べる。

②では吊り天井の周期及び耐力を評価する。例を 5.2 節で述べる。天井の絶対加速度と質量から求められる必要耐力が天井の耐力を下回ることを確認する。また、相対変位は絶対加速度から簡単に換算できるので、天井周囲のクリアランスの大きさを確認することもできる。

「計算」では、構造躯体が弾性範囲に留まることを前提とし、構造躯体が塑性化するような大きな地震動に対する検証を直接的に行うものではない。大きな地震動下での吊り天井の挙動については 5.3 節で補足的に述べる。

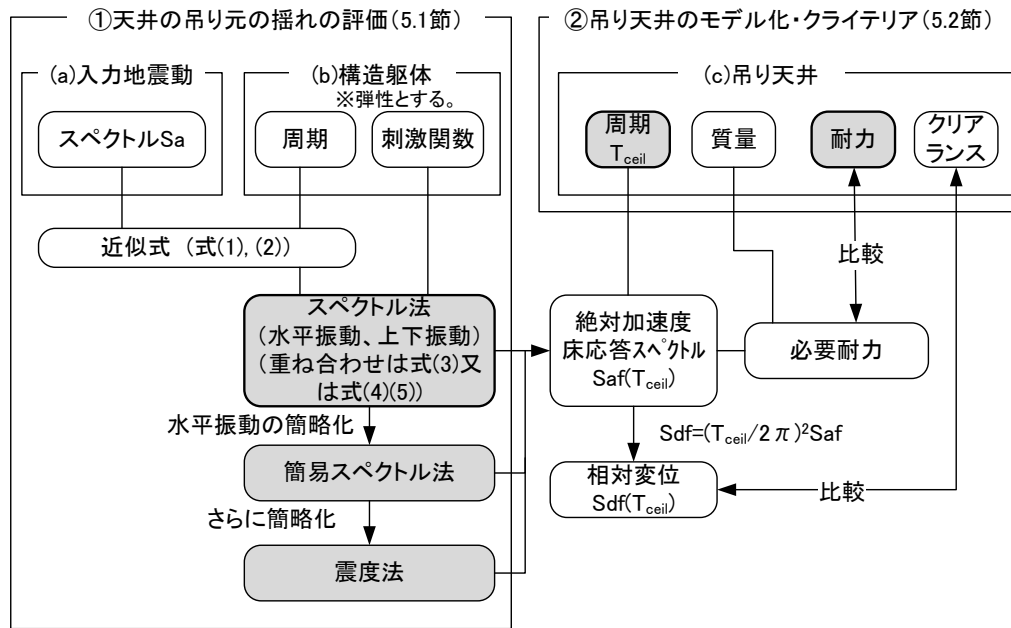


図 5.1 全体のフロー

(2) 対象とする建築物及び吊り天井

ここで提案する計算で対象とする建築物は、主に多層建築物（ビルもの）と体育館等とする。平面・立面的に不整形であるものや、長大なスパンを有するものなど、構造躯体が特殊なものは対象外とする。

対象とする吊り天井は主に在来工法天井であるが、システム天井であっても面内剛性が確保され一体として振動するものは在来工法と同様に扱える。

なお、構造躯体に関して時刻歴応答解析が実施されていれば、図 5.1 の①に関しては計算された吊り元の絶対加速度等の時刻歴を基に評価すればよく、ここでの提案方法（5.1 節参照）を用いる必要はない。

※注 超高層等で時刻歴応答解析が行われる場合には、業務方法書に基づき既往観測波の 25kine、50kine で検討される。25kine の観測波は基準法の中地震動よりも大きいので、レベル設定時には注意が必要。

5. 1 許容応力度設計を前提とした吊り元の揺れの評価方法

5.1.1 背景と前提条件

東日本大震災の被害調査でも構造躯体に特段の損傷が見られない一方で、吊り天井に被害を生じたものが多く報告されている。平成 15 年十勝沖地震による釧路空港ターミナルビル、平成 17 年宮城県沖の地震によるスポパーク松森、でも同様である。

また、構造躯体の最大加速度の評価方法については既に提案があるが、特に項目(c)の共振を評価するには最大加速度だけでは不十分である。

以上のこと等から、構造躯体が弾性範囲に留まることを条件とし、モード解析の考え方をを用いて略算的な床応答スペクトル（床や屋根の絶対加速度応答に対する応答スペクトルをいう。フロアレスポンススペクトルとも呼ばれる。）の評価方法を提案する。

前提条件をまとめておく。

- ・入力地震動は応答スペクトルで与えられる。
- ・構造躯体は弾性。
- ・免震建築物は想定していない。
- ・構造躯体、天井とも減衰定数は 5%とする。（後から減衰補正係数等による調整も可）
- ・構造躯体に比べれば天井は軽量であり、躯体の振動は天井から影響を受けない。
- ・建築物及び天井のねじれ振動や特殊な個材振動等は無視できる。
- ・スペクトル法（後述の式(3)~(5)）による場合は固有値解析により刺激関数が得られる。
- ・互いに近接した固有周期を持たない。
- ・一続きの天井面は一体として振動するものとして、1 質点系にモデル化できる。（面内剛性の小さいシステム天井や段差部を含む天井等で、一続きの天井の内部の応力・変形等を求める必要がある場合は、別途検討を必要とする。）
- ・水平 1 軸と上下との 2 次元までを対象とし、3 次元的な挙動は扱わない。
- ・吊り元の揺れが異なる範囲に渡った吊り天井が設けられている場合には揺れの大きなところで外力を代表させる。（多点入力 は 考慮していない）

※注 減衰定数を一定としたのは、時刻歴による大臣認定を除き構造種別による構造躯体の減衰定数の違いは考慮されないこと、減衰の違いを考慮することで生じる定式化の煩雑化やパラメータの増加を避けたかったこと、などによる。減衰定数の大きさを 5%としたのは、入力地震動が 5%の設計用応答スペクトルとして表現されることが多いことによる。計算方法を提案する上での仮定（前提条件）であって、構造躯体及び吊り天井の減衰定数が一般的に 5%という意味ではないことに注意されたい。

5.1.2 1自由度系の床応答スペクトル

図 5.2 に構造躯体と吊り天井のモデル化と、応答の増幅に関する概念図を示す。図 5.2 (a)では構造躯体は平屋だが、後述のモード解析の考え方によれば、多層建築物への拡張も可能である。図 5.2 (b)のように、入力地震動は構造躯体により増幅され、躯体に取り付く吊り天井はそれ自体の応答によって応答加速度を増幅させる。

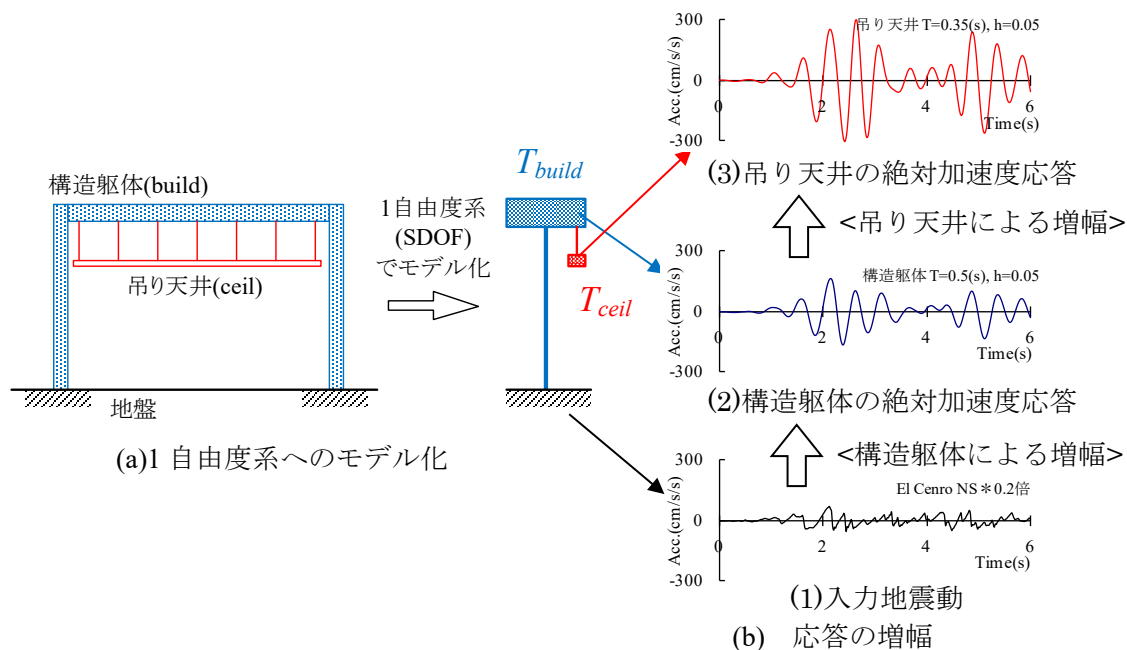


図 5.2 構造躯体及び吊り天井のモデル化と応答の増幅

図 5.3 にスペクトル法のご概念図を示す。入力地震動の加速度応答スペクトル S_a には 1 自由度系とみなした構造躯体による増幅が含まれている。構造躯体の耐震設計では S_a は既知である。吊り天井による増幅を考慮し、構造躯体との共振を表現するためには、床応答スペクトル S_{af} を求める必要がある。 S_{af} を如何に簡易に評価できるかがポイントとなる。

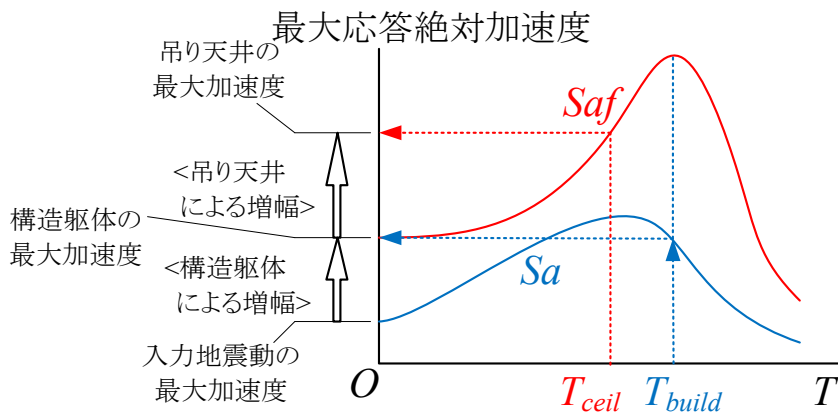


図 5.3 スペクトル法のご概念図

時刻歴応答解析を行って床応答スペクトル Saf を求めると、図 5.4~5.6 の左図となる。横軸の T_{build} は構造躯体の周期、 T_{ceil} は吊り天井の周期である。図中の実線は入力波の絶対加速度応答スペクトル Sa であり、点線等は T_{build} が凡例の数値となる場合の Saf である。当然ながら T_{build} により Saf は異なるが、右図のように横軸を T_{ceil}/T_{build} 、縦軸を $Sa(T_{build})=Saf(0)$ に対する $Saf(T_{ceil})$ の比 $R(T_{build}, T_{ceil}) \equiv Saf(T_{ceil})/Saf(0)$ とすると、 $R(T_{build}, T_{ceil})$ は図中に灰実線で示した式(1)及び(2)で概ね近似できる。

$$T_{ceil} \leq T_{build} \text{ のとき : } R(T_{build}, T_{ceil}) \equiv \frac{Saf(T_{ceil})}{Sa(T_{build})} = 1 + 5 \left(\frac{T_{ceil}}{T_{build}} \right)^3 \quad (1)$$

$$T_{build} < T_{ceil} \text{ のとき : } R(T_{build}, T_{ceil}) \equiv \frac{Saf(T_{ceil})}{Sa(T_{build})} = 6 \left(\frac{T_{build}}{T_{ceil}} \right)^3 \quad (2)$$

図 5.5 では上下動を扱っているが、水平動と同様に近似できる。また、図 5.6 の JMA 仙台 NS では2つの波群を含む時刻歴であるが、概ね式(1)及び(2)で近似できることから、東北地方太平洋沖地震についても適用可能と判断した。

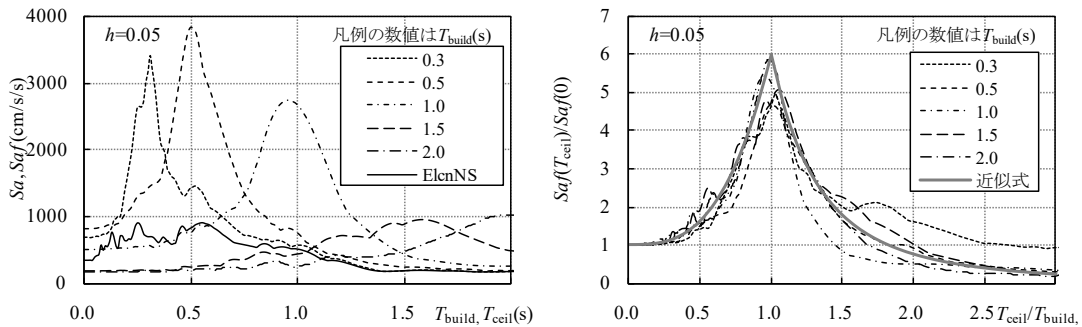


図 5.4 El Centro (水平 NS 成分。右図の近似式とは式 (1) 及び (2))

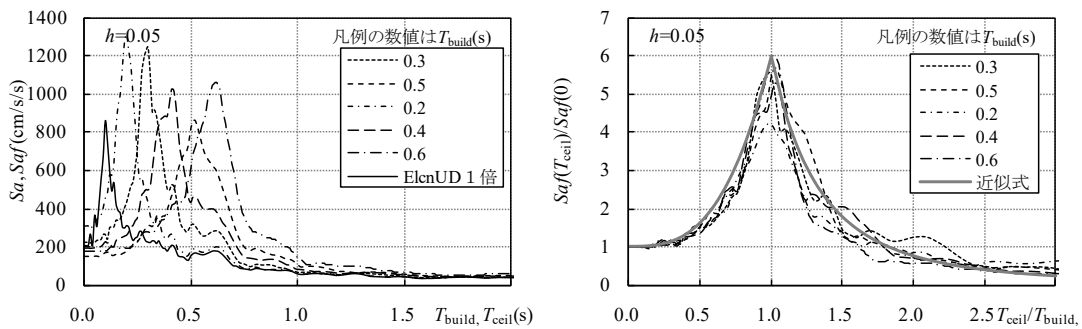


図 5.5 El Centro (上下成分。右図の近似式とは式 (1) 及び (2))

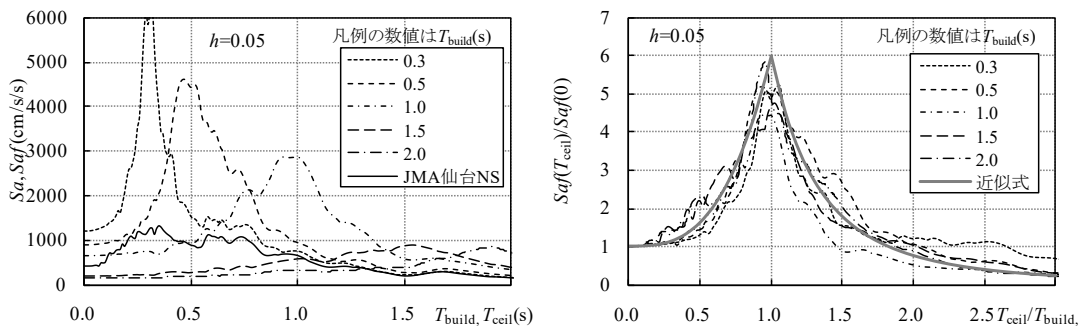


図 5.6 JMA 仙台 (水平 NS 成分。東北地方太平洋沖地震) (右図の近似式とは式 (1) 及び (2))

5.1.3 多自由度系への拡張

(1) スペクトル法

前項の1自由度系の結果を多自由度系に拡張するには、モード解析の考え方に従って、次のようにすればよい。

(A) 上下振動を無視できる建築物の場合：

$$\text{水平振動： } Saf_{Ih}(T_{ceil,h}) \approx \sqrt{\sum_j \{R(T_j, T_{ceil,h}) \cdot \beta_{hj} U_{Ihj} \cdot Sa_h(T_j)\}^2} \quad (3)$$

(B) 上下振動を無視できない建築物（体育館等の山形架構等）の場合：

$$\begin{aligned} \text{水平振動： } Saf_{Ih}(T_{ceil,h}) \\ \approx \sqrt{\sum_j \underbrace{\{R(T_j, T_{ceil,h}) \cdot \beta_{hj} U_{Ihj} \cdot Sa_h(T_j)\}^2}_{\text{①水平地震動による水平振動}} + \sum_j \underbrace{\{R(T_j, T_{ceil,h}) \cdot \beta_{vj} U_{Ihj} \cdot Sa_v(T_j)\}^2}_{\text{②上下地震動による水平振動}}} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{上下振動： } Saf_{Iv}(T_{ceil,v}) \\ \approx \sqrt{\sum_j \underbrace{\{R(T_j, T_{ceil,v}) \cdot \beta_{hj} U_{Ivj} \cdot Sa_h(T_j)\}^2}_{\text{③水平地震動による上下振動}} + \sum_j \underbrace{\{R(T_j, T_{ceil,v}) \cdot \beta_{vj} U_{Ivj} \cdot Sa_v(T_j)\}^2}_{\text{④上下地震動による上下振動}}} \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、下添え字の I は位置の番号を、 h 及び v はそれぞれ水平(horizontal)及び上下(vertical)を表し、

$\beta_{hj} U_{Ihj}$ 、 $\beta_{vj} U_{Ihj}$ 、 $\beta_{hj} U_{Ivj}$ 及び $\beta_{vj} U_{Ivj}$ ：構造躯体の j 次、位置 I での刺激関数、

β_{hj} 及び β_{vj} ：構造躯体の j 次の水平及び上下方向の刺激係数、

U_{Ihj} 及び U_{Ivj} ：吊り元の位置 I の j 次モードの水平及び上下成分、

T_j ：構造躯体の j 次モードの固有周期、

$T_{ceil,h}$ 及び $T_{ceil,v}$ ：吊り天井の水平及び上下方向の固有周期、

$R(T_j, T_{ceil,h})$ 及び $R(T_j, T_{ceil,v})$ ：式(1)及び(2)の T_{build} を T_j とした値、

Sa_h 及び Sa_v ：入力地震動の水平及び上下方向の加速度応答スペクトル、

である。(B)では上下振動を含むが、水平1軸(式(4))と上下(式(5))の2次元を対象にしている。体育館等の張間の山形架構で、スパン1/4付近(柱頭と棟との中間部)における部分的な天井脱落被害の要因として度々指摘されるのは、水平地震動による上下振動(式(5)の③)である。(A)の式(3)は、式(4)の①のみを残したものに对应する。

式(4)及び(5)で、水平地震動による成分(①、③)と上下地震動による成分(②、④)との割合がどの程度になるかは、地震動の水平・上下の割合、躯体及び天井の固有周期に加えて、吊り元の位置の刺激関数にも依存するため、1つの建築物(架構)であっても位置によって割合が異なり、一般的な値を示すことは難しい。山形架構の例については後述する(図5.8、図5.11及び図5.13参照)。

※注 式(3)~(5)はいわゆるSRSSと同じで、次数の異なるモードの固有周期(振動数)が十分に離れていることが前提である。もしそうでなければ、CQCなどの考え方が必要になると思われるが、複雑になるのでここでは扱わない。(B)で入力地震動の水平と上下について Sa_h と Sa_v をこの形に書いたのは、通常、地震動の水平動と上下動とは無相関に近い性質があり、地震動の主軸^{5.1)}の1つは上下方向になることを背景としている。

上下振動を無視できるか否かは、固有値解析を行って刺激関数を得ること、その際に上下振動が生じやすい部分（例えば、スパンが大きな梁等）に適切な分布で質量が設定された解析モデルを用いることを条件とすれば、モード形などからある程度判断できる。

しかし、通常の構造設計において、固有値解析まで行わない場合も多い。この場合には、地震力に対する変位の静的解析結果を近似的に水平の1次モード、自重と積載荷重に対する変位の静的解析結果を近似的に上下の1次モードとみなすことで、上下振動の生じやすさを判断していくことも考えられる。

(A) 上下振動を無視できる建築物

まず式(3)の検証を行う。せん断型5階建て（5自由度系）、1次モード直線型、1次周期1.0(s)、減衰は各次とも5%で一定とする。El Centro NS波を0.2倍したものを入力波とする。図5.7に結果を示す。時刻歴応答解析による床応答スペクトル S_{af} （灰太線）と、式(3)による S_{af} （黒太線）とは、比較的良好に対応していることが見て取れる。

よって、式(3)により上下振動を無視できる建築物の S_{af} は概ね評価が可能であると言える。

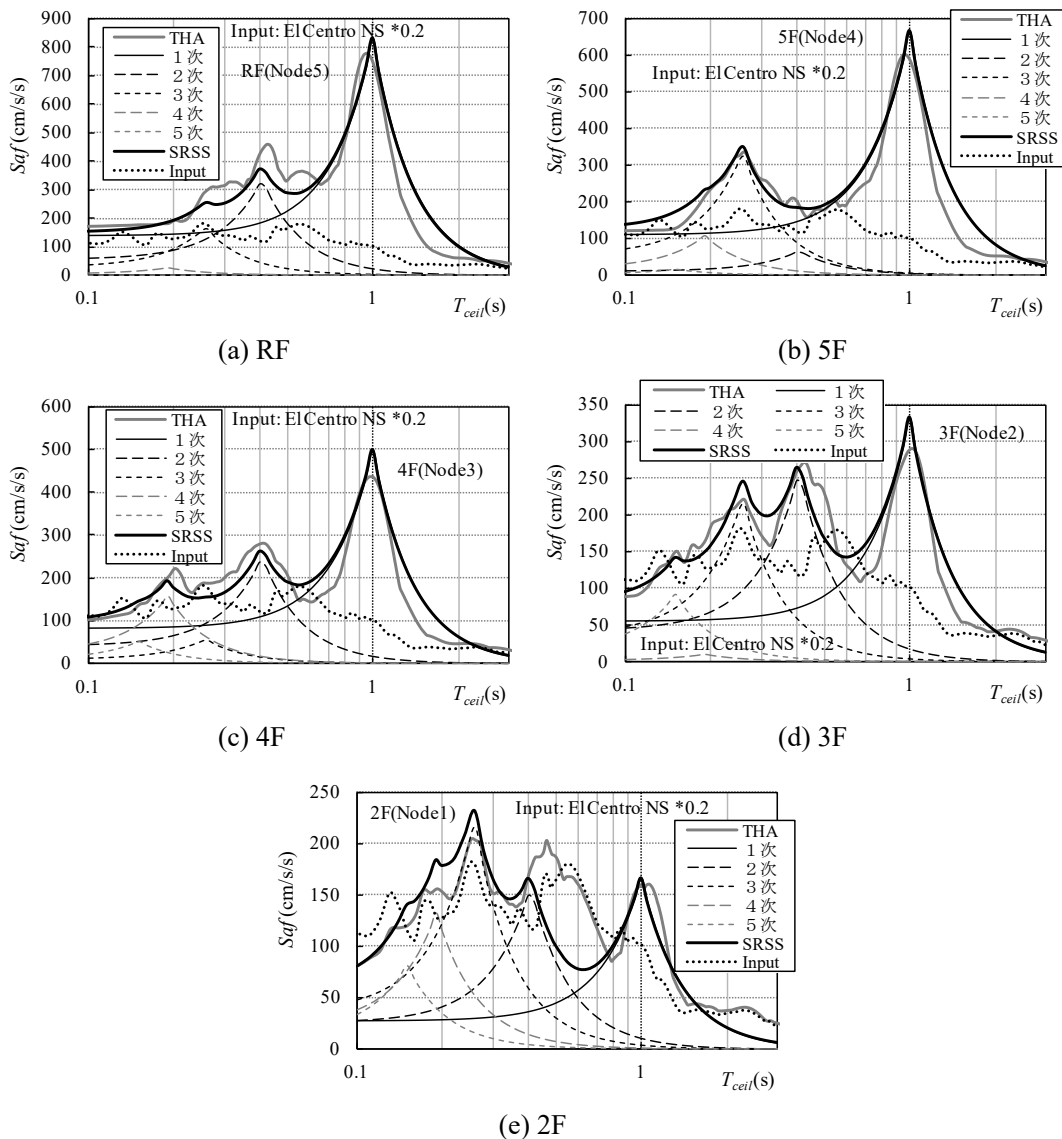


図 5.7 時刻歴 (THA) による S_{af} と式 (3) による S_{af} (SRSS) の比較

(B) 上下振動を無視できない建築物

柱梁とも均等な曲げ材からなる山形架構（図 5.8）を対象とする。柱脚部は固定とする。部材の曲げ変形が支配的になるよう、部材の断面積には十分大きな値を設定している。1 次固有周期が 0.25 秒となるように部材の曲げ剛性を調整して設定した。固有モードを図 5.9 に、有効質量比を表 5.1 に示す。上下(Y)方向の有効質量比は 10 次までの和をとっても 5 割強となっている。これは、曲げ変形が支配的で軸変形が無視できるように部材の断面積を大きくしたため、柱の軸変形が生じにくく、柱の質量の寄与がほとんどないためである。

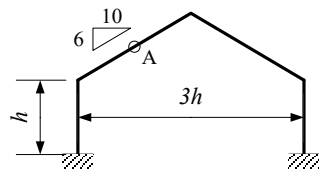


図 5.8 対象モデル（勾配 6/10）

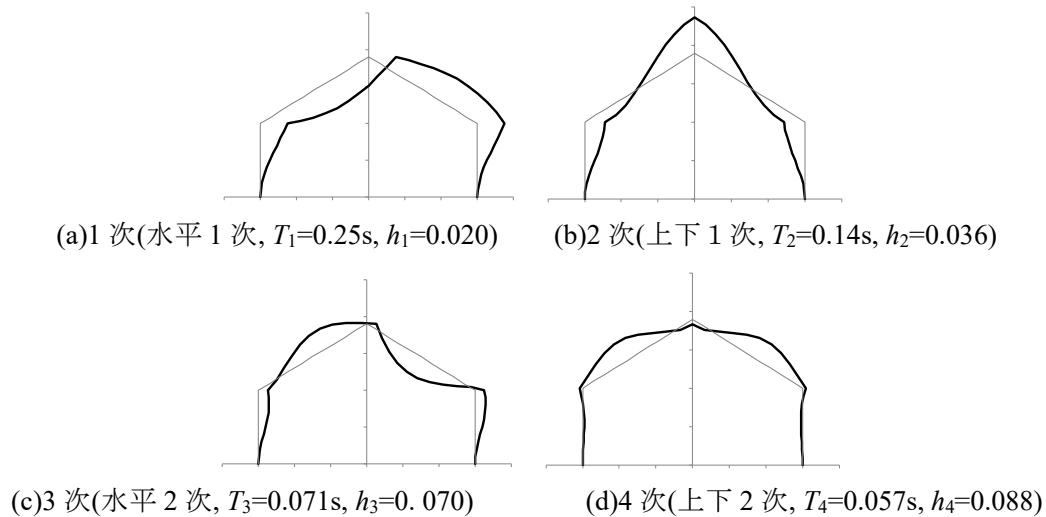


図 5.9 固有モード

表 5.1 有効質量比（X：水平、Y：上下）

Mode	X-Motion	Y-Motion
1	0.793	0.000
2	0.000	0.272
3	0.077	0.000
4	0.000	0.197
5	0.019	0.000
6	0.000	0.000
7	0.048	0.000
8	0.000	0.038
9	0.006	0.000
10	0.000	0.028
TOTAL	0.943	0.535

※注 体育館の実測結果を参考にして 1 次周期を 0.25 秒としたが、構造設計上要求される層間変形角 1/200 以内という条件を満足することを確認しておく。表 5.1 のとおり水平振動に関しては 1 次が支配的である。1 次周期 0.25 秒に対応する基準法中地震（2 種地盤）の S_a は 240gal であり、変位に直せば $S_d = S_a / \omega^2 = S_a (T1/2\pi)^2 = 240 * (0.25/2\pi)^2 = 0.38(\text{cm})$ である。中地震時の変位が S_d と同じになる位置は 1 次刺激関数が 1 になる位置で、このモデルでは柱

頭から少し上の部分に当たる。よって、例えば柱が 3.8(m)=380(cm)であれば、柱の変形角はほぼ $0.38/380=1/1000$ となる。

式(4)及び(5)の検証のため、時刻歴応答解析を行う。1 次の減衰定数を 0.02 とした剛性比例型の減衰を仮定し、時間刻みは 0.002 秒、解析時間は 20 秒間とした。地震波は水平（張間）方向が El Centro NS 成分、上下方向が同 UD 成分とし、加速度を 0.2 倍したものとする。

スパン 1/4 の点（図 5.8 の A 点）を含む屋根面の応答絶対加速度の時刻歴を図 5.10 に示す。

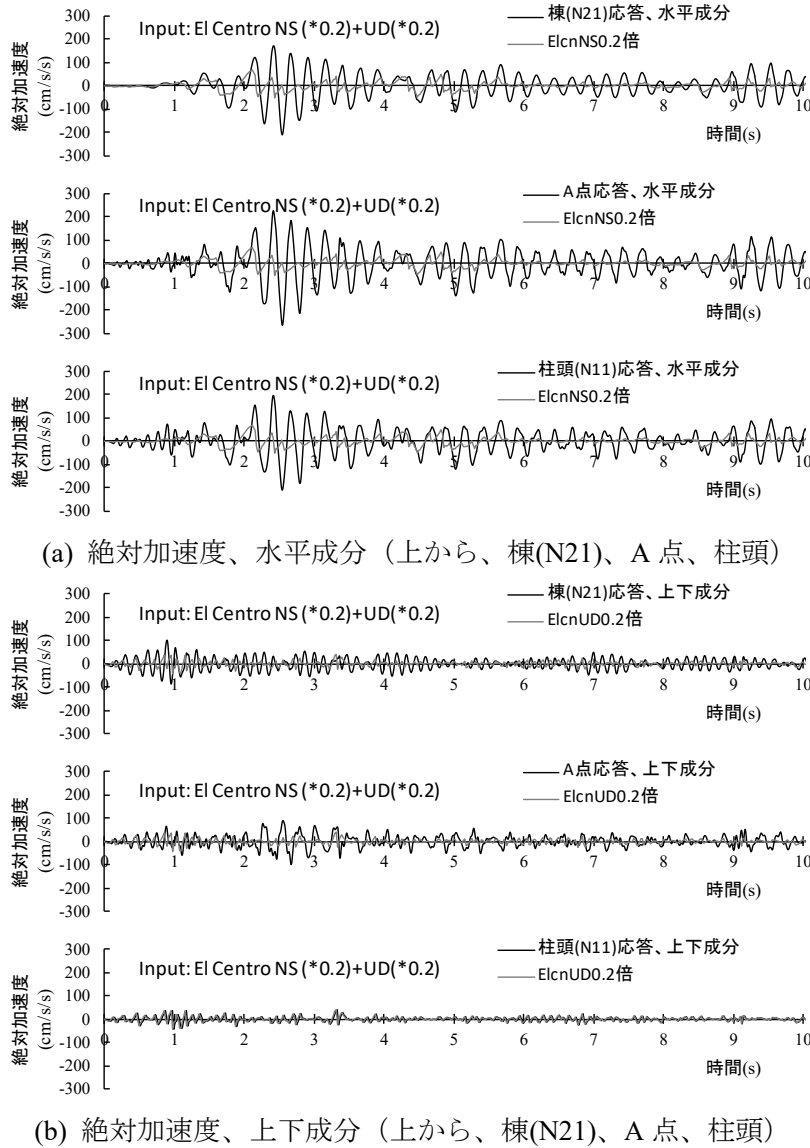
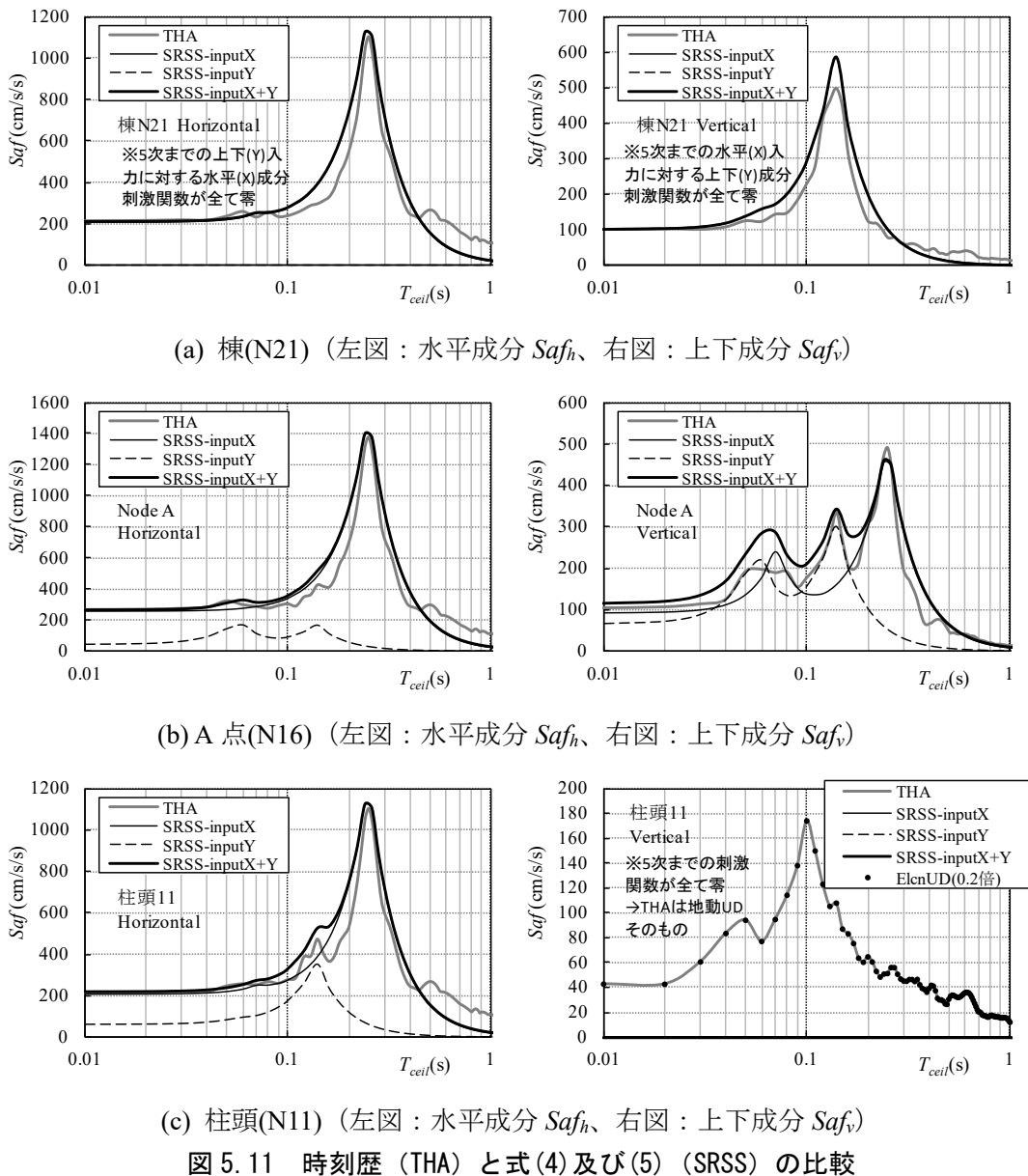


図 5.10 絶対加速度応答 時刻歴（開始から 10 秒間）

応答絶対加速度の時刻歴（図 5.10）による床応答スペクトル S_{af} と、式(4)及び(5)による S_{af} を比較したものが図 5.11 である。図で THA は時刻歴応答解析によるもの、SRSS は式(4)及び(5)によるもの（5 次まで考慮）で、細線の”inputX”は水平地震動による応答（式(4)(5)の①又は③）、”inputY”は上下地震動による応答（式(4)(5)の②又は④）である。なお、式(4)及び(5)で用いた減衰定数は THA と合わせて 1 次が 2%の剛性比例型とした。図より、両者は比較的良好に対応していることが分かり、式(4)及び(5)による評価は概ね妥当であると判断できる。



(2) 基準法中地震に対する床応答スペクトルの例

構造躯体が弾性範囲に留まるレベルの入力地震動として基準法の中地震 ($C_0=0.2$ 相当、1次設計レベル。2種地盤、図中でBSLと表記) を取り上げる。上下地震動は水平を単純に1/2倍したものと仮定した。減衰は躯体の全モード、天井とも全て5%と仮定する。

(A) 上下振動を無視できる建築物

3階建て、1次固有周期0.4秒、逆三角形1次モードの3自由度系を例にとる。図5.12に床応答スペクトル Saf を示す。図(a)が Saf で、図(b)は Saf を $Sa-Sd$ で表現したものである。吊り天井周期が0.4秒の場合、1次モードと共振し、4F (RF、最上階の吊り天井) では1.8G程度の加速度と、7cm強の相対変位を生じることが分かる。天井周期を0.2秒以下とすれば、0.6G程度の加速度に収まる。文献5.2)では例として1G程度を挙げているが、構造躯体と吊り天井との共振を考えると、基準法の中地震レベルでもその数値を上回りうる事が分かる。

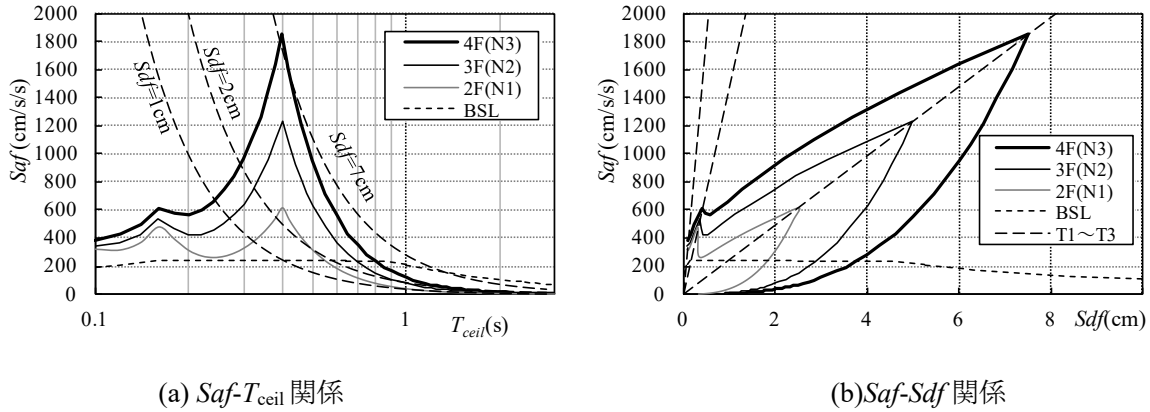


図 5.12 床応答スペクトル

(B) 上下振動を無視できない建築物

(1) と同じ山形架構 (図 5.8) を対象とする。スパン 1/4 の点 (図 5.8 の A 点) の Sa_f を評価した結果を図 5.13 に示す。(1) の El Centro 波とほぼ同じレベルになっており、水平では 1 次 ($T_1=0.25s$) で 1.4G 程度、上下では 1 次から高次にかけて 0.5G 程度の応答となる。

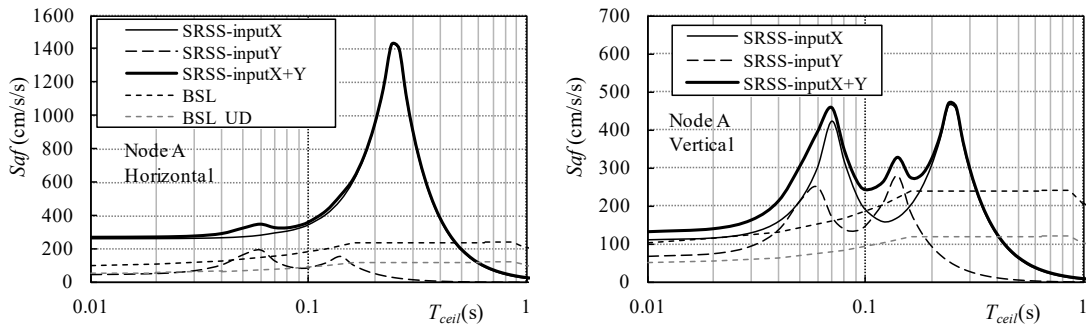


図 5.13 A 点 (N16) の床応答スペクトル

(左図：水平成分 Sa_{fh} 、右図：上下成分 Sa_{fv})

5.1.4 評価法の簡略化

実務的に簡便な形を目指すならば、前項までのスペクトル法による検討を踏まえ、設計用震度を表形式にまとめた方法 (震度法) が考えられる。ここでは次に示すような段階を踏んで震度法へとまとめることを考えていく。主に水平振動のみを取り上げ、上下振動は最後にコメントを加える。

< 第 1 段階：「簡易スペクトル法」 >

- ① 「スペクトル法」をもとに躯体の 1 次固有周期と天井の固有周期との簡単な関数として丸める。
- ② 固有周期の推定誤差等を考慮して、①の関数には周期幅を持たせた設定とし、スペクトル法によるものをほぼ包絡する形を目指す。(スペクトル法で詳細に検討した場合には外力を低減できる場合がある。)
- ③ 多層建築物 (ビルもの) の特徴を利用して、高次 (≒ 2 次) モードの影響も取り込む。

< 第 2 段階：「震度法」 >

「震度法」として表にまとめる。

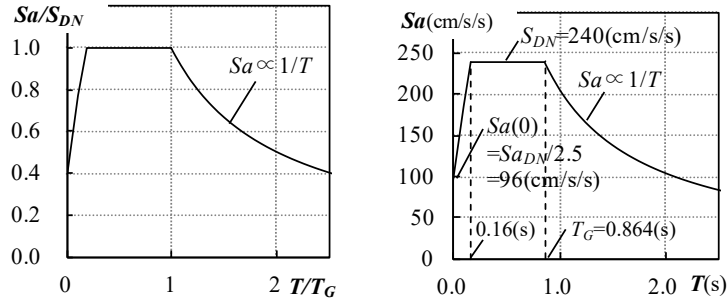
第 1 段階の「簡易スペクトル法」は、検討の途中経過としてだけでなく、設計にも利用できる

ような形でまとめておく。

入力地震動のスペクトル Sa は、図 5.14 に示すような標準的なものを考える。 S_{DN} は短周期領域での Sa の一定値、 T_G は加速度一定領域と速度一定領域との境界周期である。式で表せば、ごく短周期を除いて、

$$Sa(T) = \begin{cases} S_{DN} & (T \leq T_G) \\ \frac{T_G}{T} S_{DN} & (T_G < T) \end{cases} \quad (6)$$

なお、周期が零のときの加速度 (= 入力 の 最大 加速度) は $Sa(0) = 0.4S_{DN}$ とする。



(a) 標準的な加速度応答スペクトル (b) 建築基準法 2 種地盤 (地盤増幅略算)

図 5.14 入力地震動の加速度応答スペクトル

(1) 簡易スペクトル法

多層建築物を高さ方向に、上層階、中間階、下層階に大きく分ける。下層階は地動と同等として、残りの 2 つをスペクトル法から決定するため、刺激関数の代表値を設定する。図 5.15 及び図 5.16 は、質量が均一分布で逆三角形 1 次モードとなる離散系せん断型モデル (いわゆる串団子モデル) の刺激関数を示している。

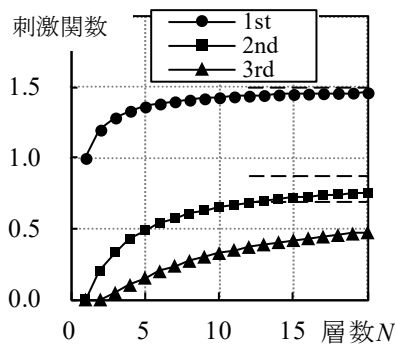


図 5.15 頂部の刺激関数

(質点系、逆三角形 1 次モードモデル。破線は連続体の場合で 1 次は $3/2=1.5$ 、2 次は $7/8=0.88$ 、3 次は $88/128=0.69$ である。)

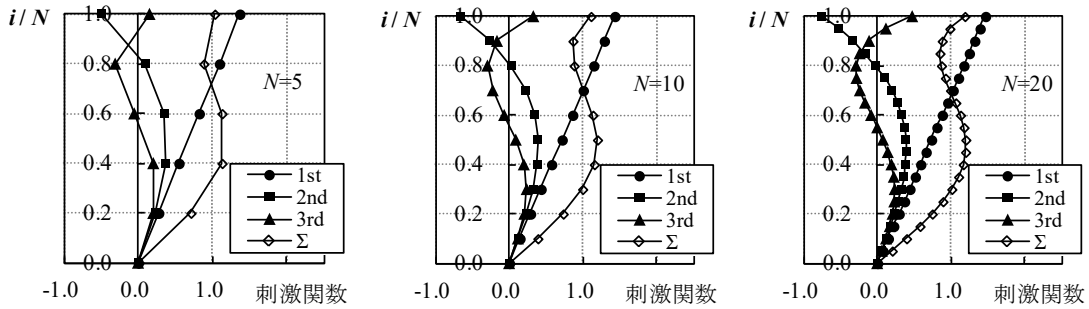


図 5.16 刺激関数の例（質点系、逆三角形 1 次モードモデル。Σは 1 次から 3 次までの和。）

構造躯体と共振する場合に Saf が大きくなるので、1 次と 2 次の共振を考え、刺激関数の代表値を表 5.2 のように設定する。

表 5.2 刺激関数の設定

	1 次刺激関数 $\beta_{h1}U_{lh1}$	2 次刺激関数 $\beta_{h2}U_{lh2}$
上層階	1.5	0.7
中間階	0.9	0.4

1 次共振 ($T_{ceil,h} = T_1$) での Saf_h は 1 次モードに支配される (図 5.7 参照) から、式(3)の近似として、

$$Saf_h(T_1) \approx R(T_1, T_1) \cdot \beta_{hj}U_{lhj} \cdot Sa_h(T_1) = 6 \cdot \beta_{hj}U_{lhj} \cdot Sa_h(T_1) \quad (7)$$

これに表 5.2 の値を入れれば、

$$\text{上層階: } Saf_h(T_1) = 9.0 \cdot Sa_h(T_1), \quad \text{中間階: } Saf_h(T_1) = 5.4 \cdot Sa_h(T_1), \quad (8)$$

さらに式(6)を代入すると、

$T_1 \leq T_G$ のとき

$$\text{上層階: } Saf_h(T_1) = 9.0 \cdot S_{DN}, \quad \text{中間階: } Saf_h(T_1) = 5.4 \cdot S_{DN} \quad (9)$$

$T_G < T_1$ のとき

$$\text{上層階: } Saf_h(T_1) = 9.0 \cdot \frac{T_G}{T_1} S_{DN}, \quad \text{中間階: } Saf_h(T_1) = 5.4 \cdot \frac{T_G}{T_1} S_{DN} \quad (10)$$

となる。

2 次共振 ($T_{ceil,h} = T_2$) での Saf_h は、式(3)から 3 次以上の高次を無視して、

$$Saf_h(T_2) \approx \sqrt{\{R(T_1, T_2) \cdot \beta_{h1}U_{lh1} \cdot Sa_h(T_1)\}^2 + \{R(T_2, T_2) \cdot \beta_{h2}U_{lh2} \cdot Sa_h(T_2)\}^2} \quad (11)$$

式(11)中の $R(T_1, T_2)$ は T_1 と T_2 の比で決まる。例えば、逆三角形 1 次モードモデル (図 5.16 参照) の場合、1 次に対する j 次の周期比は、層数 N によらず、 $T_j/T_1 = 1/\sqrt{j(2j-1)}$ となる^{5,3)}から、2 次の周期比は $T_2/T_1 = 1/\sqrt{6} = 0.41$ である。また均一せん断棒では $T_2/T_1 = 1/3 = 0.33$ である。これらの値を参考に、かつ R が安全側の近似として大きめの値をとるように、 $T_2/T_1 = 0.4$ とおけば、式(1)より、 $R(T_1, T_2) = 1 + 5 \times 0.4^3 = 1.32$ となる。

$T_1/T_G \leq 2.5$ ならば、 $T_2 \approx 0.33T_1 \sim 0.4T_1 \leq T_G$ であり、 $Sa_h(T_2) = S_{DN}$ となる。

これらの値から、

$T_1 \leq T_G$ のとき

$$\text{上層階} : Saf_h(T_2) \approx \sqrt{(1.32 \times 1.5)^2 + (6 \times 0.7)^2} \cdot S_{DN} = \sqrt{1.98^2 + 4.2^2} \cdot S_{DN} = 4.6 S_{DN} \quad (12)$$

$$\text{中間階} : Saf_h(T_2) \approx \sqrt{(1.32 \times 0.9)^2 + (6 \times 0.4)^2} \cdot S_{DN} = \sqrt{1.19^2 + 2.4^2} \cdot S_{DN} = 2.7 S_{DN} \quad (13)$$

$T_G < T_1 \leq 2.5 T_G$ のとき

$$\text{上層階} : Saf_h(T_2) \approx \sqrt{\{1.98 \cdot T_G / T_1\}^2 + (4.2)^2} \cdot S_{DN} = 4.6 S_{DN} \sim 4.3 S_{DN} \quad (14)$$

$$\text{中間階} : Saf_h(T_2) \approx \sqrt{\{1.19 \cdot T_G / T_1\}^2 + 2.4^2} \cdot S_{DN} = 2.7 S_{DN} \sim 2.4 S_{DN} \quad (15)$$

2次共振の $Saf_h(T_2)$ は $T_G < T_1$ の範囲で1次の寄与が減少して低下するが、大幅な低減とはならないことと設計上の簡便さを優先して T_1 によらず、式(12)及び(13)を採用する。

また、吊り天井が十分に剛である場合には、作用する加速度は吊り元と同じとなる。質点系の逆三角形1次モードモデル(図5.16参照)を用いて、3次まで考慮し、建築基準法の2種地盤(表層地盤の増幅は略算)の Sa を入力とする場合について、各床(屋根)の最大加速度 $Saf(0)$ をSRSSにより求めた結果を図5.17に示す。図(a)の縦軸は下から数えた層番号 i を層数 N で除した値であり、横軸は地動最大加速度に相当する $0.4 S_{DN}$ で規準化した最大加速度 $Saf(0)$ を表している。1次固有周期は $T_1 = 0.1N$ とした。全体の高さの下層部分1/3程度では3次までの刺激関数の総和が1に満たない(図5.16参照)ため、図(a)では省略している。既に指摘されている傾向だが、層数 N が9程度(1次周期が0.9秒程度)までは直線的な分布であり、層数が多く(周期が長く)なると中間部分で低減している。

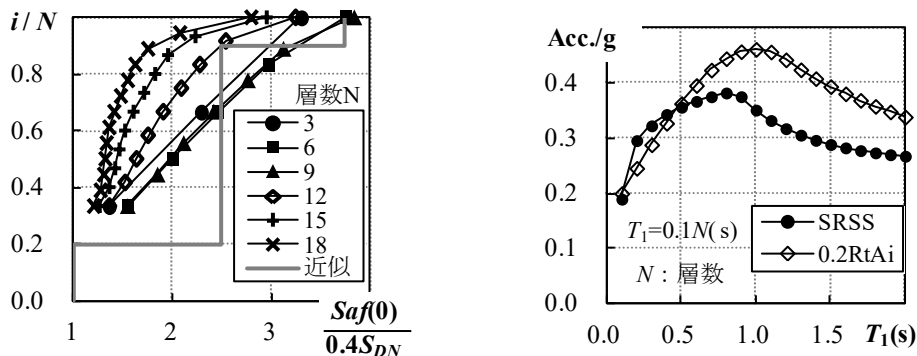
吊り天井が十分に剛な場合の「近似」として、

$$\text{上層階} : 1.5 S_{DN}、\text{中間階} : 1.0 S_{DN}、\text{下層階} : 0.4 S_{DN} \quad (16)$$

とおき、図5.17(a)に示している。

なお、上層階等が示す高さ方向の範囲については、検討の余地が残されている。

図5.17(b)には横軸に1次固有周期 T_1 を取って、SRSSによる頂部(屋根)の震度を示している。最上階では層せん断力係数と震度が等しいことから、最上階での $C_0 R t A_i$ ($C_0=0.2$ 、 A_i で $\alpha_i=1/N$) の値を比較のために示している。頂部震度と $C_0 R t A_i$ は周期の短い範囲でよく対応しているが、周期が長い範囲では前者は後者の75%程度である。なお、文献5.4)によれば、 $C_0 R t A_i$ による値は地震応答解析結果に対してかなり大きめの評価を与えるので、SRSSの値が過小であるということはない。



(a) 高さ方向の最大加速度分布 (b) 頂部震度と最上階の設計用層せん断力係数の比較

図 5.17 床(屋根)の最大加速度(3次まで考慮したSRSS)

以上をまとめると、表 5.3 のようになる。ここで、構造躯体や吊り天井の固有周期は必ずしも精度よく求められないため、1次共振や2次共振には周期に幅を持たせることとする。表 5.3 で定められていない周期帯については直線で補間する。

表 5.3 簡易スペクトル法で用いる代表的な Saf

設置階		1次共振 ^{注1)}	2次共振 ^{注2)}	剛 ^{注3)}
上層階	$T_1 \leq T_G$ ^{注4)}	$9.0S_{DN}$ ^{注5)}	$4.6S_{DN}$	$1.5S_{DN}$
	$T_G < T_1$	$9.0(T_G/T_1)S_{DN}$		
中間階	$T_1 \leq T_G$	$5.4S_{DN}$	$2.7S_{DN}$	$1.0S_{DN}$
	$T_G < T_1$	$5.4(T_G/T_1)S_{DN}$		
下層階	$T_{ceil,h} \leq T_G$	$1.0S_{DN}$ ^{注6)}		$0.4S_{DN}$ ^{注7)}
	$T_G < T_{ceil,h}$	$1.0(T_G/T_{ceil,h})S_{DN}$ ^{注6)}		

注1) 1次共振とは、 $T_1 - 0.1(s) \leq T_{ceil,h}(s) \leq T_1 + 0.1(s)$ の場合とする。

注2) 2次共振とは、 $\max(T_2 - 0.1(s), 0.1(s)) \leq T_{ceil,h}(s) \leq T_2 + 0.1(s)$ の場合とする。

注3) 剛とは、 $T_{ceil,h} \leq 0.1(s)$ の場合とする^{5.4)}。

注4) T_G は加速度一定領域と速度一定領域の境界周期。(図 5.14(b)より $T_G=0.864(s)$)

注5) 中地震動相当とすれば、図 5.14 (b)より $S_{DN}=240(\text{cm/s/s})$ 。

注6) 下層階では構造躯体の応答増幅がない(1倍)とすれば、 Saf は入力地震動の Sa に等しいため。

注7) 注6の場合で、吊り天井も剛とすれば、入力地震動の最大加速度で、図 5.14 (b)より $Sa(0)=S_{DN}/2.5=0.4S_{DN}$ 。

建築基準法の稀に発生する地震(中地震)相当として $S_{DN}=240(\text{cm/s/s})$ とおき、スペクトル法と簡易スペクトル法を比較したものが図 5.18 である。縦軸は震度である。簡易スペクトル法はスペクトル法を包含する形で概ね良好な対応関係が得られることが分かる。なお、低層の場合は刺激関数の減少度合い(頂部は図 5.15 参照)に基づいて低減することも可能と考えられる。

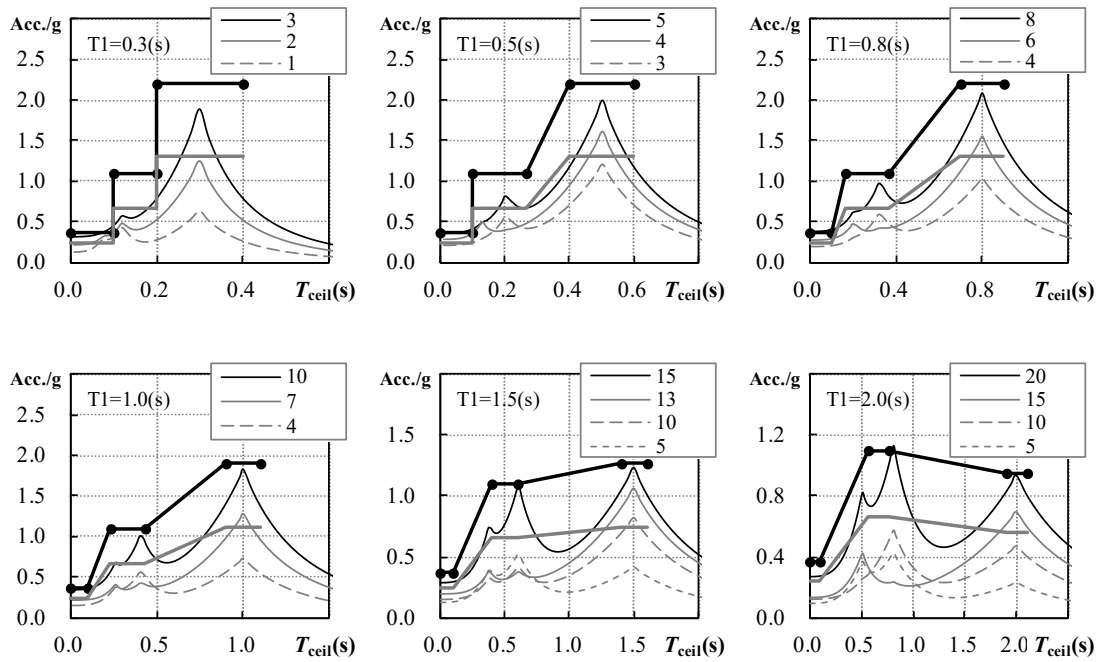


図 5.18 簡易スペクトル法（太線）とスペクトル法（細線）の比較

($T_1 = 0.1N$ 、簡易スペクトル法では $T_2 = T_1/3$ と設定。黒太線と灰太線が簡易スペクトル法の上層階と中間階。スペクトル法では 3 次まで考慮。凡例の数値は下からの層番号。)

(2) 震度法

建築基準法の中地震相当 ($S_{DN}=240(\text{cm/s/s})$) に対して、簡易スペクトル法の結果をもとにさらに単純化した震度法を考えると表 5.4 のようになる。

図 5.19 に震度法と簡易スペクトル法とを比較して示す。

表 5.4 震度法の案

設置階	共振の程度により分類		
	$T_1/3 < T_{ceil}$ 又は T_{ceil} が不明	$0.1(\text{s}) < T_{ceil} \leq T_1/3$	$T_{ceil} \leq 0.1(\text{s})$
上層階	2.2	1.1	0.37
中間階	1.3	0.66	0.24
下層階	0.24		0.10

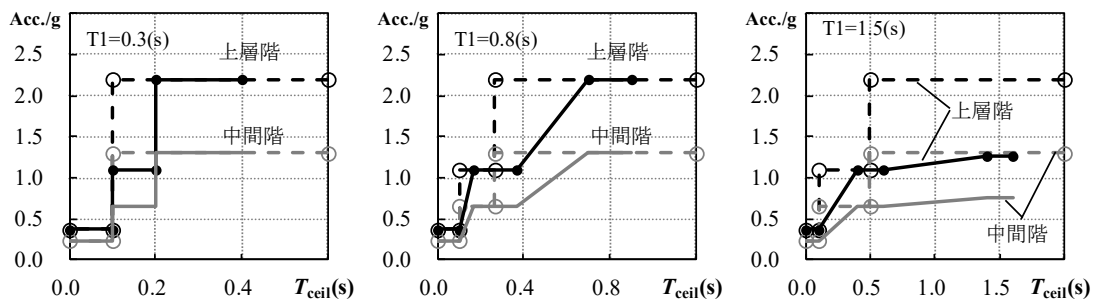


図 5.19 震度法（破線）と簡易スペクトル法（実線）との比較

(3) 上下振動を無視できない場合

水平振動については、上下振動を無視できない建築物であっても、簡易スペクトル法や震度法をそのまま用いて差し支えないと考えられる。しかし、上下振動については、多層建築物に対する串団子モデルのような典型的かつ単純なモデルを設定しにくいため、簡易スペクトル法や震度法としてまとめることは難しい。山形架構の例から 0.5G 程度の上下振動を仮定することや、水平の震度の 1/2 程度^{5.4)}とすることなどが考えられるが、いくつかのモデルを用いた検証も必要である。

5. 2 吊り天井の固有周期及び許容耐力

様々な吊り天井を想定すると、その固有周期と許容耐力は実験的に求める必要があると考えられる。ここでは、水平な在来工法天井の固有周期と許容耐力を算定してみる。

5.2.1 在来工法天井の野縁方向

(1) 固有周期

固有周期については、

[a] ブレースの下側が取り付く吊りボルト

[b] [a]以外の吊りボルト

に分けて剛性を評価する。[a]は文献 5.5)より、ブレース下端とハンガー上端との距離 $L_b=5\text{cm}$ と仮定してその水平剛性を 20kN/m とする。[b]は文献 5.2)と同様に振子としての剛性と吊りボルトの曲げ剛性（上端固定、下端ピンとした片持ち梁）との和として評価する。天井の質量は $M=17\text{kg/m}^2$ を基本とする。吊りボルトの総本数に対する[a]の割合を pb としてパラメータとする。

図 5.20 に縦軸を吊り長さ L として計算した固有周期を示す。[a]の剛性は L によらないため、吊り長さが長い領域では周期の変化はあまりない。ブレース量の増大と、質量の軽減は、短周期化に対して同じ効果を持つ。 $pb=0.07\sim 0.50$ の範囲では周期は概ね $0.2\sim 0.6$ 秒の範囲にある。ブレースなしの場合には、吊り長さ L が 0.4m 程度でも周期は 0.5 秒程度である（左右の図で横軸の範囲が違うことに注意）。図中の○印は文献 5.2)で紹介されている天井 1（在来、 $L=1.5\text{m}$ ）の固有周期（実験値）であり、ブレースありの場合は $pb=0.07$ 程度であるから、ここでの計算は概ね妥当と考えられる。

図 5.21 にはブレースの割合 pb に対する固有周期の変化を示す。

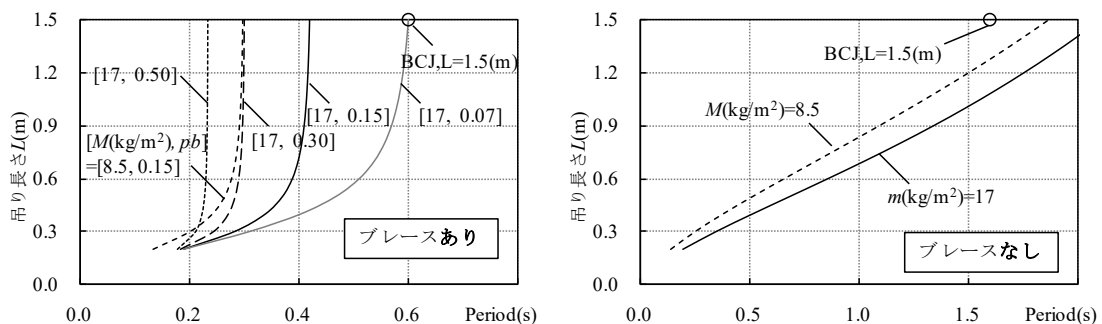


図 5.20 在来工法天井の固有周期

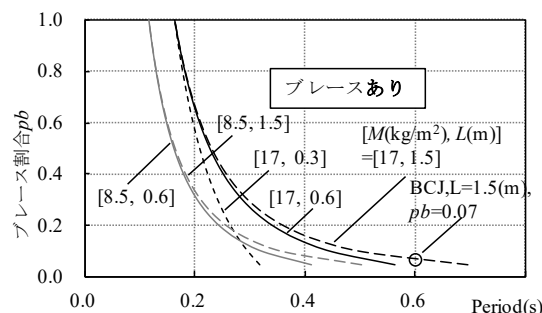


図 5.21 在来工法天井の固有周期

(2) 許容耐力

ブレースありの場合を考えると、(1)で示した[a]の吊りボルトの両脇にある2つのクリップが滑り出して、その後外れることが天井破壊へのきっかけとなる。そこで[a]の吊りボルトが負担で

きる許容耐力をクリップ2個の滑り耐力で評価することとし、文献 5.5)及び 5.6)などから1本当たりで $Fa=300(N)$ と仮定する。天井面の慣性力は剛性比に応じて[a][b]の吊りボルトに分担されると考えた。前節の Saf との対応付けを容易にするため、許容加速度で表すと図 5.22 のようになる。ブレースをかなり密に入れて $pb=0.5$ としても $1G (=980cm/s/s)$ を若干上回る程度までしか許容できない。前節のような共振まで考え、かつ、クリップの滑りや外れを防止するためには、クリップを強化するような金具等を使うか、ブレースの下側を天井面等に取り付ける工夫が必要になる。

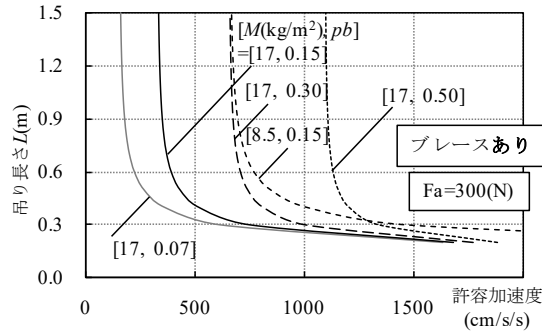


図 5.22 在来工法天井の許容加速度

図 5.23 に許容加速度と周期との関係を示す。質量や吊り長さによらず1つの曲線を描いている。これは、 Fa を剛性で除した変位すなわち $300(N)/20(kN/m)=1.5(cm)$ に対応する関係 $Sa=\omega^2 Sd=(2\pi/T)^2 * 1.5(cm/s/s)$ に対応している。

このように、ブレースやその接合部が許容応力度に達することで天井の許容耐力が決定される時、ブレースの量によって周期や許容耐力は変化するが、許容変位量は一定となるため、図 5.23 のような1つの曲線上を移動するだけである。この曲線と、前節のスペクトル法等による Saf を重ね合わせることで、設計の見通しがよくなるように思われる。

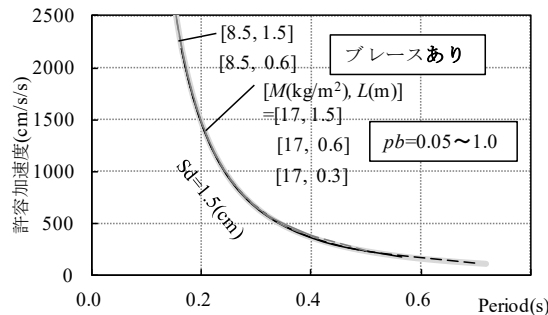


図 5.23 在来工法天井の周期と許容加速度の関係

5.2.2 在来工法天井の野縁受け方向

(1) 固有周期

野縁方法の剛性を求める場合には、ブレースが取り付けられた吊りボルトの水平剛性はブレースの断面には依存せず決定することができた。これは、ブレースと吊りボルトにより構成される構面の剛性に比しハンガー部の剛性が極めて小さいためであった。これと同様の考え方が野縁受け方向の剛性を考える場合にも適用できるかを検証する。そこで、ブレースと吊りボルトから成る1構面を取り出した実験（図 5.24）、およびハンガー単体を抽出した実験（図 5.25）を実施した。

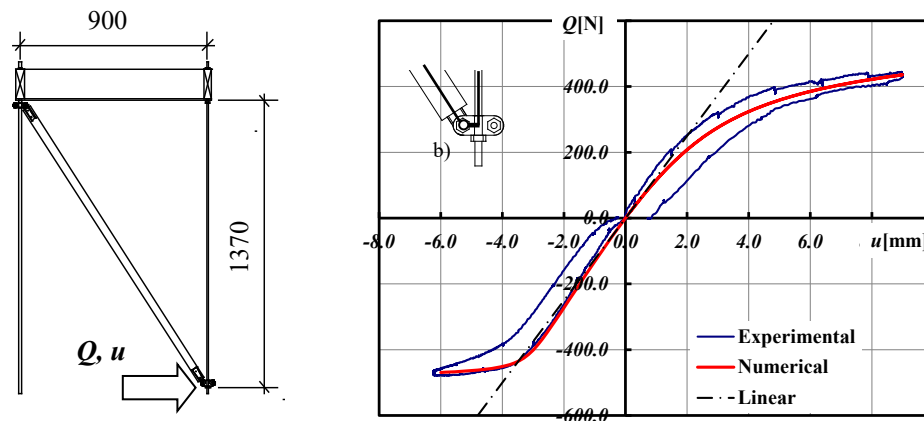


図 5.24 ブレースと吊りボルトから成る構面単体試験

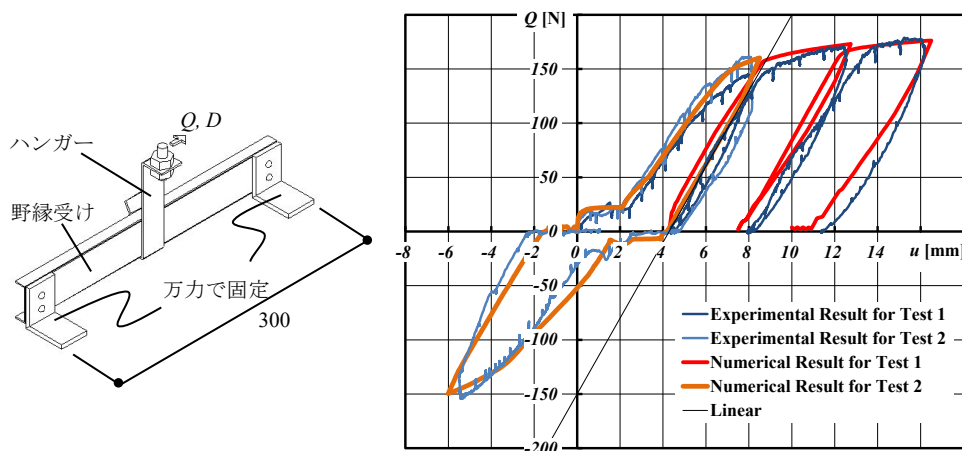


図 5.25 ハンガー単体試験

ブレース構面の実験によれば、その水平剛性は、単純な理論値に比べるとブレース近傍の不可避的な偏心によって 1/4 程度とかなり小さくなるものの、値としてはおよそ 0.125kN/mm であること、これに対して、ハンガー部の水平剛性は、ハンガー単体実験から、0.035kN/mm 程度であることが解る。ハンガー単体の剛性はブレース構面の剛性と比してかなり小さく、そのために、直列バネとして見たときの剛性は、

$$K_{total} = \frac{1}{\frac{1}{K_{Brace}} + \frac{1}{K_{Hanger}}} = \frac{1}{\frac{1}{0.125} + \frac{1}{0.035}} = 0.0273 \text{ kN/mm}$$

となる。この結果、および、ここで取り上げたブレース構面は剛性が小さい形式のものであるこ

とを考慮すると、野縁方向同様、ハンガー単体の剛性でブレースが取り付く吊りボルトの水平剛性を評価することが可能であると判断される。ただし、ブレースが取り付く位置はハンガー直上の場合であり、野縁方向同様、ブレースの取り付け位置は野縁受け方向の剛性にも大きな影響を及ぼすが、ここでは省略する。

上記では、ブレース構面部分とハンガー部分との大局的な影響度合いを検討するために、それぞれを抽出した実験ならびに解析の結果を用いたが、実際には両者は剛に緊結されていることから、ブレース構面部分ならびにハンガー部分ともに剛性は単体のときよりも大きくなっているはずである。このことを確認するため天井部分試験体による静的載荷実験を行った（図 5.26）。図 5.26 のグラフはひとつのブレース構面が負担する水平力と水平変位の関係を示す。なお、青線は実験結果、赤線は解析結果である。

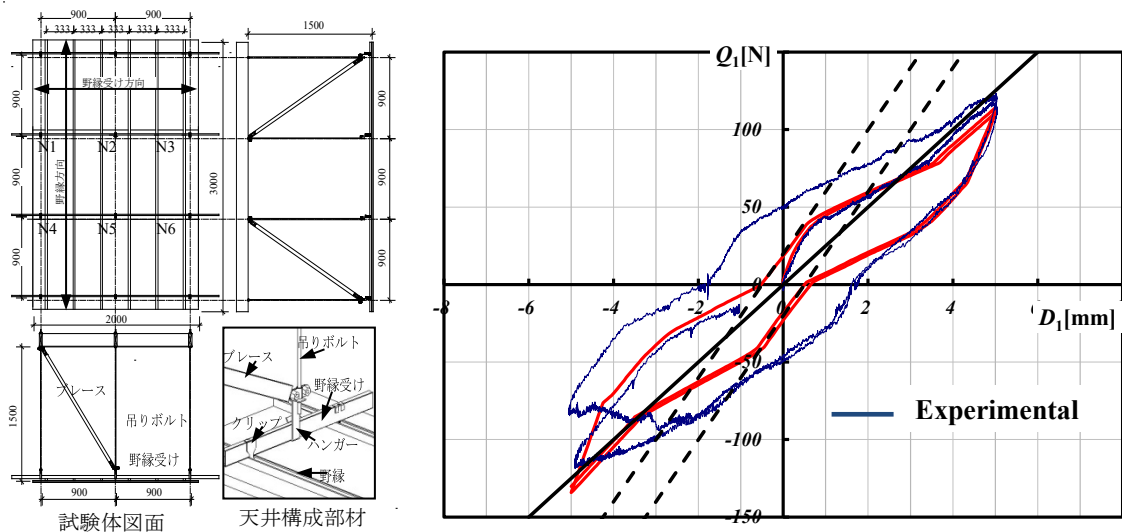


図 5.26 部分試験体による静的載荷実験

この結果から、以下のことが解る。

- ・ ブレース構面の剛性は処女載荷のとき最も高く、上述したような緊結したことによる剛性上昇が確認され、その値は 0.08kN/mm となる。
- ・ 変位がおよそ 0.5mm を超えた段階で、剛性が低下する様子が見られ、水平変位 5mm のときの割線係数はおよそ 0.025kN/mm （図中の黒実線）となる。
- ・ 繰返載荷再負荷時において、変位の小さい段階ではブレース構面の剛性は 0.040kN/mm （図中の破線）と大きい。

したがって、野縁受け方向の剛性は変位振幅および履歴の有無によって変化する。

次に、上記試験体を用いた自由振動による固有周期（固有振動数）を計測した結果について述べる。まず、上記で得られた剛性を用いて固有周期ならびに固有振動数を計算する。本試験体にはブレース構面が2構面配置されていることから、本試験体の剛性は上記で得られた剛性を2倍することで求められ、さらに天井面質量（ 103kg ）であるから、本試験体の野縁受け方向の固有周期などは、

処女時かつ微小振幅の場合：

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K_{\text{Ceiling}}}} = 2\pi \sqrt{\frac{103}{80 \times 10^3 \times 2 \text{ 構面}}} = 0.16 \text{ sec}$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0.16} = 6.3 \text{ Hz}$$

比較的大きな振幅の場合：

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K_{\text{Ceiling}}}} = 2\pi \sqrt{\frac{103}{25 \times 10^3 \times 2 \text{ 構面}}} = 0.28 \text{ sec}$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0.28} = 3.5 \text{ Hz}$$

となる。一方、強制変位を初期変位として与えた自由振動実験の結果を図 5.27 に示す。上記で示したように固有振動数は初期変位の大きさにより変化し、固有振動数の振幅依存性が確認される。ただし、比較的大きな振幅を設定した場合の実験結果は予測値と対応していない。これは、上述のとおり履歴の有無によって剛性が変化するためである。このことを勘案して、履歴を受けた後の微小振幅時の剛性を用いて固有周期などを再計算すると、

履歴有かつ微小振幅の場合：

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K_{\text{Ceiling}}}} = 2\pi \sqrt{\frac{103}{40 \times 10^3 \times 2 \text{ 構面}}} = 0.23 \text{ sec}$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0.23} = 4.3 \text{ Hz}$$

となり、実験結果と対応する結果が得られる。

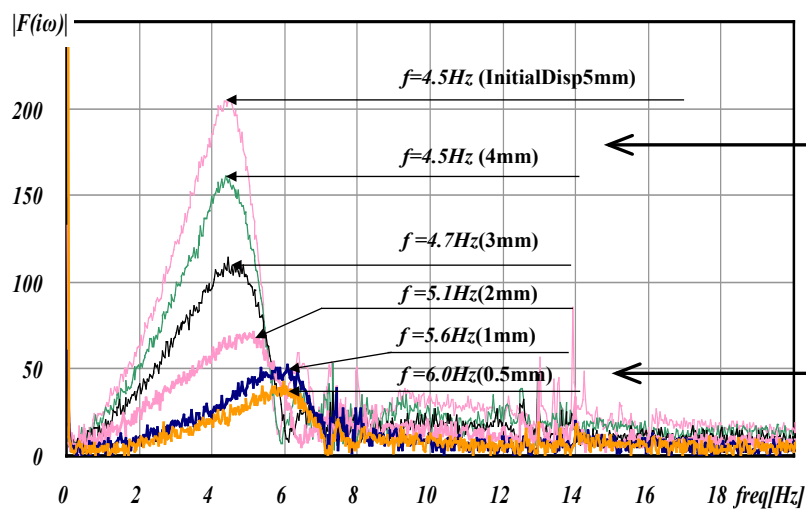


図 5.27 初期変位を与えた場合の自由振動結果

以上のことから、本節で示した野縁受け方向のブレース構面の剛性は妥当であると考えられる。なお、地震時の応答評価の際に用いる剛性としては、比較的振幅が大きい場合の剛性値および周期値を用いるべきと思われる。

(2) 許容耐力

野縁受け方向加力時の耐力は、ハンガー部あるいはクリップ部のいずれかのすべり耐力にて規定される。図 5.28 は先の試験体を用いてさらに大きな強制変位を静的に与えた場合の結果である。図 5.28 左は天井全体の水平力-水平変位関係を、図 5.28 右はブレースに取り付けたひずみゲージをもとに、縦軸をひとつのブレース構面が負担する水平力としたものである。

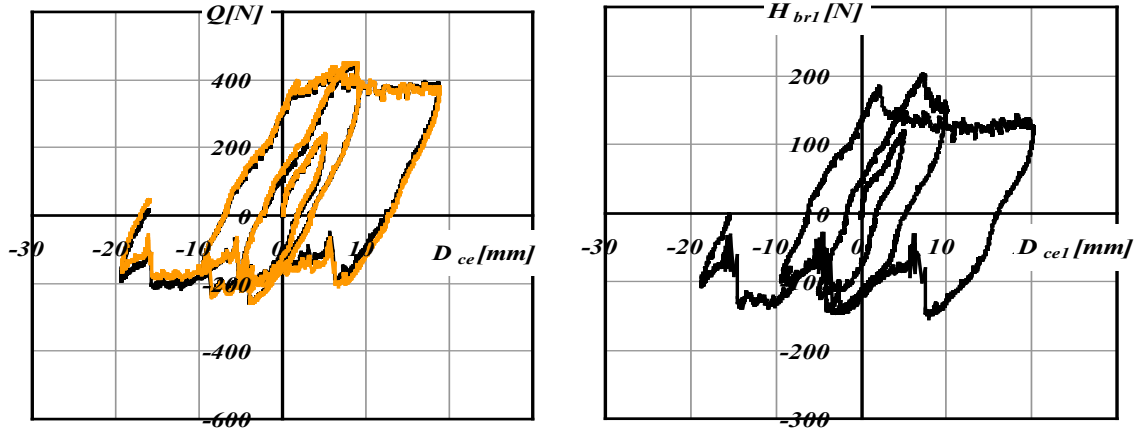


図 5.28 野縁受け方向静的加力実験（振幅が大きい場合）

1 ブレースあたりの最大耐力は、本実験結果によると、加力方向で異なった値、すなわち、正方向荷荷の場合には 200N、負方向荷荷の場合には 150N となっている。これは耐力を規定している部位が異なるためである。図 5.29 に示すように野縁受け方向荷荷の場合には、すべりが発生する部位として「クリップと野縁受け間」および「ハンガーと野縁受け間」の 2 箇所が想定され、今回の実験では、正方向荷荷の場合のすべり発生部位はクリップと野縁受け間、負方向荷荷時の同部位はハンガーと野縁受け間と異なっていたためである。正負間においてすべりが発生する部位が異なる理由は、ハンガーに塑性変形が発生することによってハンガーに傾きが残留し、その結果として異方性が発現するためと考えられる。

ただし、安全性評価を行う上では、ハンガーと野縁受け間のすべり発生時の平均耐力である 100N を採用することが安全側の評価と言える。

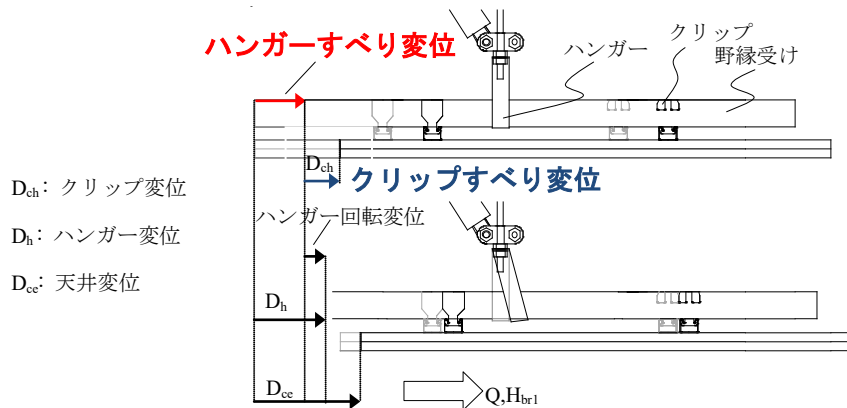


図 5.29 ハンガー近傍の変位

5.2.3 耐震性に配慮した仕様の静的加力実験

前項までに示したように、吊りボルト間にブレースを設ける場合にはクリップやハンガーのすべりが先行するため、構造躯体との共振まで考えると十分な許容耐力を付与できない場合が想定される。ここでは、より大きな水平耐力を有するようにブレース下端を野縁受けに取り付けた仕様の例について述べる。

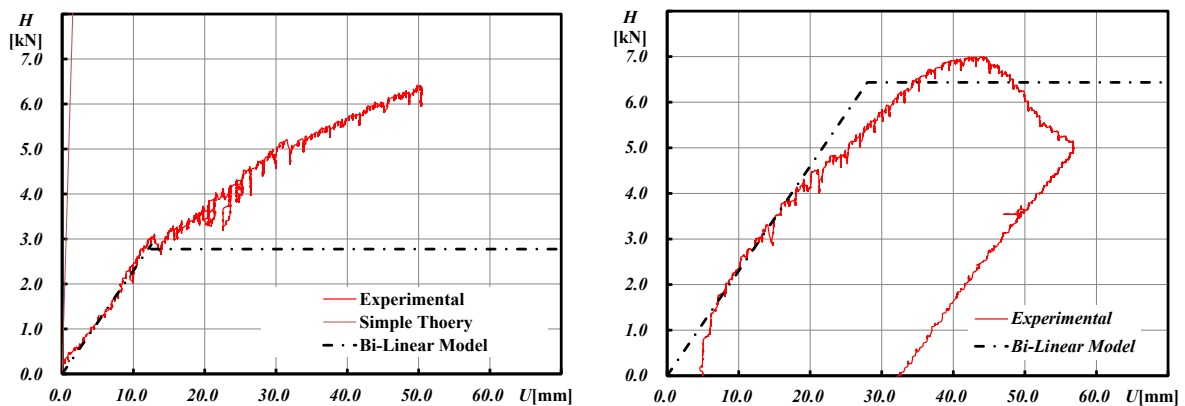
(1) 実験概要および実験結果

吊りボルトにブレースを取り付けるのではなく特別な金物を用いて野縁受けに取り付ける仕様とした天井試験体の静的加力実験を行った。使用した部材断面などを以下に示す。

下地材	野 縁：	耐風仕様
	野縁受け：	C-38x12x1.2
	ブレース：	C-40x20x1.6 $A_c=122\text{mm}^2, I_{\text{minor}}=4730\text{mm}^4$
	クリップ：	耐震用クリップ（耐風圧仕様に準拠）
	ハンガー：	ボルト止めによる脱落防止

なお、天井面の大きさは2m×3mであり、吊りボルト間隔：0.9m、天井懐：1.5mである。ブレースはV字形のもの2対配置した。ブレースの角度 θ は $\theta=\arctan(0.9/1.5)\div 60^\circ$ である。加力は、加力方向に関わらず、2m方向に強制変位を静的に与えている。

実験によって得られた荷重変位関係を図5.30に示す。本実験によって確認される剛性は変位が小さい場合にはかなり変動し、変位が進むにつれ剛性が低下している様子が確認される。ただし、変位がある段階に達すると比較的安定した剛性が確認され、その値 K_h は両方向ともに0.24kN/mm（一对あたり0.12kN/mm）となっている。この値は、図5.30左中の細線によって示している部材の偏心などを無視した単純なモデルにより求めた剛性と比べるとかなり低い値となっている。理論値に比し剛性がかなり小さくなる理由は局部的な偏心などによる曲げ変形によるためと判断され、このような偏心による影響は仕様によって異なることが推測されることから、剛性は仕様ごとに実験的に確認する必要があるものと思われる。



(a) 野縁方向加力

(b) 野縁受け方向加力

図 5.30 水平荷重-水平変位関係

写真 5.1 に最終変形状態を示す。野縁方向加力では野縁受けが曲げ降伏し、野縁受け方向加力では圧縮ブレースが座屈した。

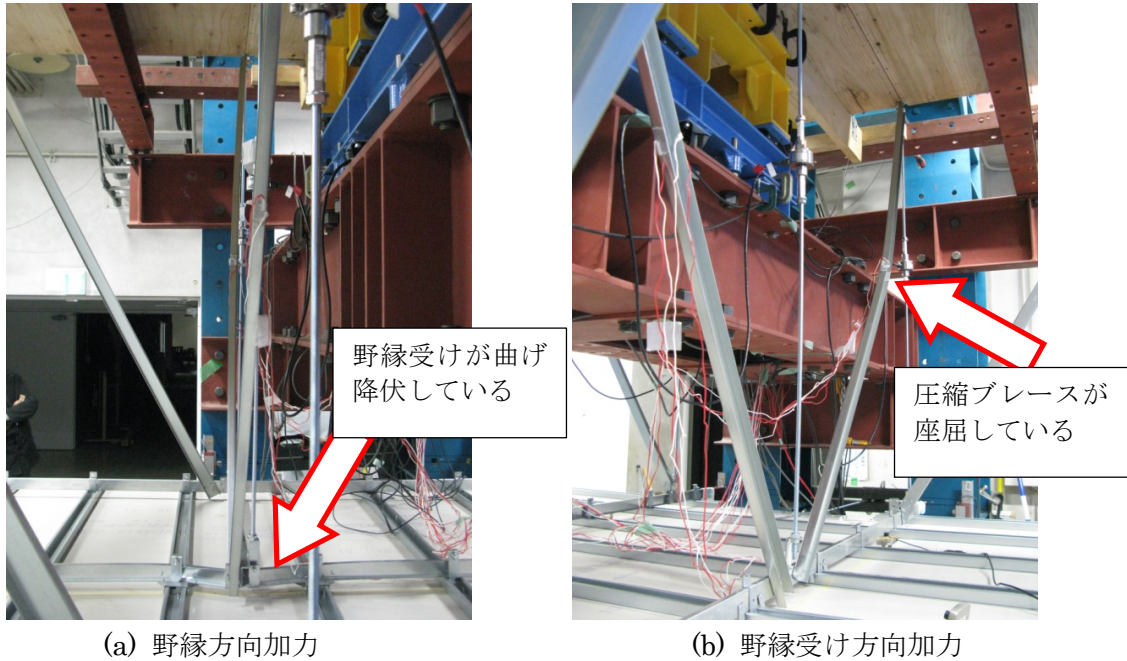


写真 5.1 最終変形状態

(2) 試験体の耐力評価

野縁方向加力時： この場合にはブレースが取り付く野縁受けの曲げ降伏によって非弾性挙動へと移行する。したがって、V字一對あたりの全塑性耐力 P_{max} は、図 5.31 のような野縁受けの崩壊機構を考えることで求められる。

$$P_{max} = 8M_p / L_c \quad M_p : \text{野縁受けの弱軸回りの全塑性曲げモーメント}$$

$$L_c : \text{野縁受けの支点間距離 (クリップ間距離)}$$

ここで、 $M_p = 53 \text{ kNm}$ ($\sigma_y = 315 \text{ N/mm}^2$; 素材試験より), $L_c = 300 \text{ mm}$ を用いて上式を計算すると、

$$P_{max} = 8 \times 53 / 300 = 1.4 \text{ [kN/対]}$$

となる。今回の実験ではV字型ブレースが2対設置されていることから、試験体としての終局耐力 H_p は、

$$H_p = P_{max} \times 2 \text{ 対} = 1.4 \times 2 = 2.8 \text{ [kN]}$$

となる。

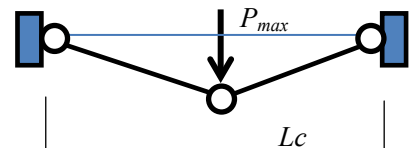


図 5.31 野縁受けの崩壊機構

野縁受け方向加力時： この場合にはブレース自体の座屈により試験体の耐力が決定される。今回使用したブレースの細長比を両端ピン支持として求めると、 $\lambda = l_k / i = 1750 / 6.2 = 280$ となり、ブレースは弾性座屈することが解る。そこで、両端ピン支持状態のブレースの弾性座屈荷重を求めて、これから試験体としての最大耐力 H_p を求める。

$$P_{cr} = \pi^2 EI / l_k^2 = \pi^2 \times 205 \times 4730 / 1750^2 = 3.2 \text{ [kN/本]}$$

$$H_{cr} = 2P_{cr} \times \cos 60^\circ = 2 \times 3.2 \times 1/2 = 3.2 \text{ [kN/対]}$$

$$H_p = H_{cr} \times 2 \text{ 対} = 3.2 \times 2 = 6.4 \text{ [kN]}$$

以上のようにして求めた野縁方向および野縁受け方向の H_p を示したものが図 5.30 中の一点鎖線である。両者ともに実験結果とよく対応するものとなっており、耐力を適切に評価していることが解る。

(3) 本仕様におけるブレースの必要本数の算定

次に、損傷形式に応じた安全率を考慮して実際の設計に用いるべき短期許容耐力； Q_{allow} を仮に設定した上で、本仕様におけるブレースの必要本数を試算してみる。

野縁方向については非弾性以降も安定した履歴となることから安全率 ν を1とし、野縁受け方向についてはブレースの弾性座屈によって耐力が規定されることから長期の安全率 ν を2.17として、先ほどの耐力値からそれぞれの方向に対するブレース一対あたりの短期許容耐力を次のように設定する。

$$\text{野縁方向：} \quad Q_{allow} = P_{max} = 1.4 \text{ [kN/対]}$$

$$\text{野縁受け方向：} \quad Q_{allow} = (H_{cr}/\nu) \times 1.5 = (3.2/2.17) \times 1.5 = 2.2 \text{ [kN/対]}$$

震度係数 $k=2.2$ に対して、本仕様の V 字型のブレースをどの程度の面積に 1 か所設置するべきかを求める。この面積を負担可能面積 A とすれば、これは以下のように計算することができる。それぞれの方向について具体的に計算してみると、

$$\text{天井の平米重量：} W \quad W = 170 \text{ N/m}^2$$

$$\text{天井面に作用する地震力：} H \quad H_{act} = k \times W = 2.2 \times 170 \text{ [N/m}^2] = 374 \text{ [N/m}^2]$$

これから、

野縁方向

$$\text{一対あたりの負担可能面積：} \quad A = Q_{allow}/H_{act} = 1400 \text{ [N/対]} / 374 \text{ [N/m}^2] = 3.7 \text{ [m}^2/\text{対]}$$

野縁受け方向

$$\text{一対あたりの負担可能面積：} \quad A = Q_{allow}/H_{act} = 2200 \text{ [N/対]} / 374 \text{ [N/m}^2] = 5.9 \text{ [m}^2/\text{対]}$$

となり、野縁方向ではほぼ $2\text{m} \times 2\text{m}$ 、野縁受け方向で $2\text{m} \times 3\text{m}$ に一対の V 字型斜め振れ止めが必要となる。

ちなみに、ここで実験にて確認された剛性 $K_h = 0.12 \times 10^6 \text{ [N/m/対]}$ を用いて、震度 $k=2.2$ に耐えるように $Q_{allow} = kWA$ としてブレースが設置された場合の固有周期 T を確認してみると、

野縁方向

$$T = 2\pi \sqrt{WA/(gK_h)} = 2\pi \sqrt{Q_{allow}/(kgK_h)} = 2\pi \sqrt{1.4 \times 10^3 / (2.2 \times 9.8 \times 0.12 \times 10^6)} = 0.15 \text{ [sec.]}$$

野縁受け方向

$$T = 2\pi \sqrt{WA/(gK_h)} = 2\pi \sqrt{Q_{allow}/(kgK_h)} = 2\pi \sqrt{2.2 \times 10^3 / (2.2 \times 9.8 \times 0.12 \times 10^6)} = 0.18 \text{ [sec.]}$$

となる。

5.2.4 座屈する場合の許容耐力

前項の仕様の野縁受け方向は、ブレースの座屈で決まる比較的大きな耐力が得られた。本項では、特定の仕様に限定することなく、ブレース又は吊りボルトの座屈で決まる許容耐力について、ブレース断面や吊り長さの影響を検討する。

水平震度のみが作用して座屈する場合を考える。図 5.32(a)又は(b)を基本としてブレース 1 本当たりの耐力を考える。図 (a)と(b)が混在する場合（逆ハの字配置など）は、いずれか小さい方の耐力に達した時点を経許耐力と考える（座屈後の耐力上昇は見込まない）。図(c)に示す V 字配置では吊りボルトの座屈が起こらないので、2 本のブレースとも図(b)の座屈耐力を取れる。

(図(c)は水平震度のみときは対称性から静定で考えられる。上下震度を同時に作用させると、不静定となる。)

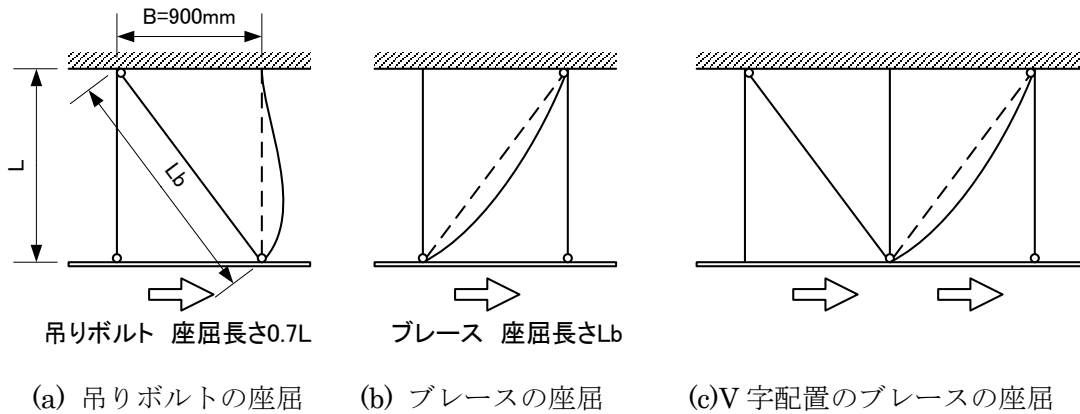


図 5.32 吊りボルト又はブレースの座屈

計算上の仮定を述べる。吊りボルト間隔は 900mm で固定する。吊りボルトの有効直径は 7.8mm とする ($I=0.0182\text{cm}^4$)。ブレースは野縁受けと同じ $\text{C}38\text{x}12\text{x}1.2$ ($I=0.0848\text{cm}^4$) 及び $\text{C}38\text{x}12\text{x}1.6$ ($I=0.108\text{cm}^4$)、野縁受けより大きな断面の材として $\text{C}40\text{x}20\text{x}1.6$ ($I=0.471\text{cm}^4$) の計 3 種類とする。細長比が大きいとして座屈耐力は短期の許容耐力として $(1.5/2.17) \times$ (オイラー座屈荷重) で求める。ここで、 2.17 は長期の安全率である。吊りボルトやブレースは引張降伏しないとする。また、ブレースや吊りボルトが座屈する前に接合部（金物）等に損傷は生じないとする。

ブレース 1 本当たりの負担できる水平力 H は、

$$\text{図 5.32 (a)} : H_{(a)} = \frac{1.5}{2.17} \cdot \left(mg + \frac{\pi^2 EI}{(0.7L)^2} \right) \cdot \frac{B}{L} \quad (17)$$

$$\text{図 5.32 (b)} : H_{(b)} = \frac{1.5}{2.17} \cdot \frac{\pi^2 EI}{L_b^2} \cdot \frac{B}{L_b} \quad (18)$$

ここで、 m は吊りボルト 1 本当たりの負担質量で、天井面の質量を $M(\text{kg}/\text{m}^2)$ とすれば $m=MB^2(\text{kg})$ 、 g は重力加速度、である。施工手順を考えればブレースにも初期軸力が生じるが、ここでは単純化して、自重は全て吊りボルトが負担し、ブレースの初期軸力は零としている。

図 5.33 に $L=0.6\sim 1.5(\text{m})$ として、水平力 H を示す。吊り長さが長くなるほど、水平力 H は単調に減少する。吊りボルトが座屈する場合については $M=17(\text{kg}/\text{m}^2)$ と $M=8.5(\text{kg}/\text{m}^2)$ の場合を示しているが、大きな差は見られない。野縁受けと同じ $\text{C}38\text{x}12\text{x}1.2$ では $200\sim 850(\text{N})$ 程度、 $\text{C}38\text{x}12\text{x}1.6$ では $250\sim 1100(\text{N})$ 程度までしか負担できない。吊りボルトの座屈が先行するのは

C38x12x1.2 で吊り長さ L が 1.2~1.4m 程度以上、C38x12x1.6 で L が 1.0m 程度以上の範囲となる。

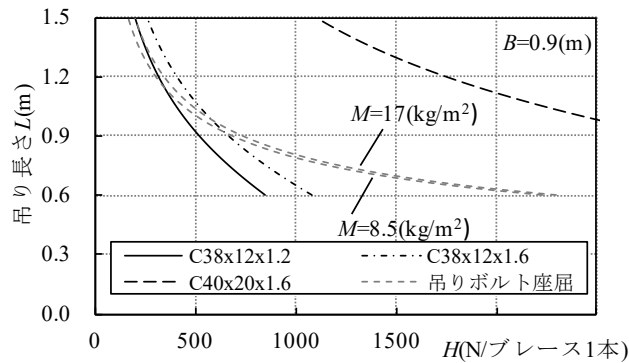
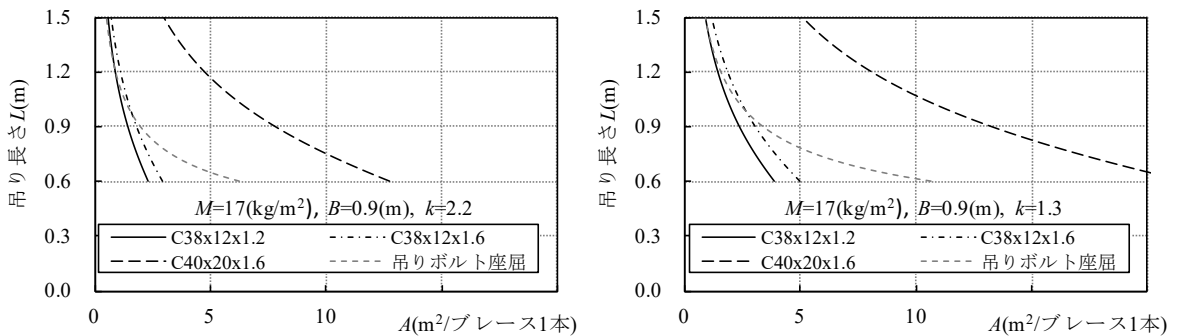


図 5.33 座屈時の水平力 H (ブレース 1 本当たり)

水平震度 k に対して、ブレース 1 本当たりが負担できる天井面積 $A(\text{m}^2)$ を次式で算定する。

$$A = \frac{H}{kMg} \quad (9)$$

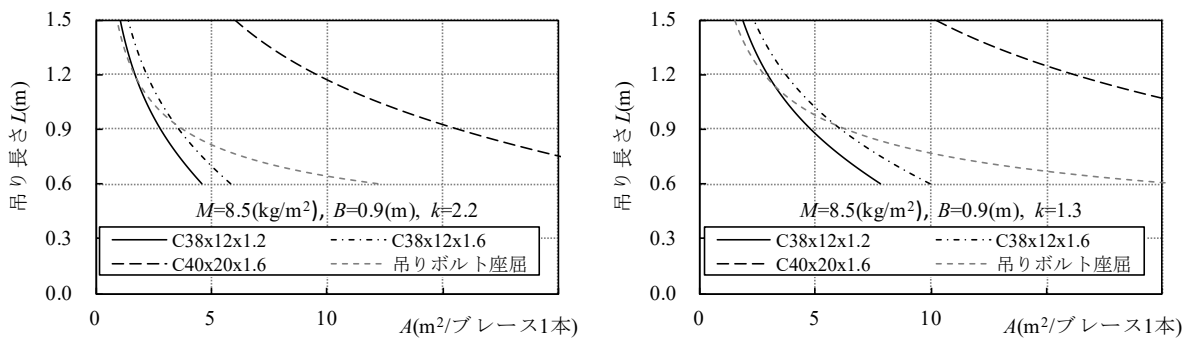
図 5.34、図 5.35 及び表 5.5 に $M=17$ 及び $8.5(\text{kg}/\text{m}^2)$ の場合の天井面積 $A(\text{m}^2)$ を示す。 $M=17(\text{kg}/\text{m}^2)$ で $k=2.2$ のとき、野縁受けと同じブレース材では A は $0.5\sim 3 \text{ m}^2$ 程度 (V 字に入れて 2 本 1 対で $1\sim 6 \text{ m}^2$ 程度) であり、かなり密にブレースを入れる必要がある。



(a) 水平震度 $k=2.2$

(b) 水平震度 $k=1.3$

図 5.34 ブレース 1 本当たりが負担できる天井面積 $A(\text{m}^2)$ ($M=17(\text{kg}/\text{m}^2)$)



(a) 水平震度 $k=2.2$

(b) 水平震度 $k=1.3$

図 5.35 ブレース 1 本当たりが負担できる天井面積 $A(\text{m}^2)$ ($M=8.5(\text{kg}/\text{m}^2)$)

表 5.5 ブレース 1 本当たりが負担できる天井面積 $A(\text{m}^2)$

(a-1) 天井質量 $17\text{kg}/\text{m}^2$ 、水平震度2.2					(b-1) 天井質量 $8.5\text{kg}/\text{m}^2$ 、水平震度2.2				
吊り長さL(m)	CC-19	CC-25		吊りボルト座屈	吊り長さL(m)	CC-19	CC-25		吊りボルト座屈
	C38x12x1.2	C38x12x1.6	C40x20x1.6			C38x12x1.2	C38x12x1.6	C40x20x1.6	
0.6	2.3	2.9	12.8	6.3	0.6	4.6	5.9	25.6	12.2
0.9	1.4	1.8	7.8	2.0	0.9	2.8	3.6	15.7	3.7
1.2	0.9	1.1	4.8	0.9	1.2	1.7	2.2	9.6	1.7
1.5	0.5	0.7	3.0	0.5	1.5	1.1	1.4	6.0	0.9

(a-2) 天井質量 $17\text{kg}/\text{m}^2$ 、水平震度1.3					(b-2) 天井質量 $8.5\text{kg}/\text{m}^2$ 、水平震度1.3				
吊り長さL(m)	CC-19	CC-25		吊りボルト座屈	吊り長さL(m)	CC-19	CC-25		吊りボルト座屈
	C38x12x1.2	C38x12x1.6	C40x20x1.6			C38x12x1.2	C38x12x1.6	C40x20x1.6	
0.6	3.9	5.0	21.6	10.6	0.6	7.8	9.9	43.3	20.6
0.9	2.4	3.0	13.3	3.4	0.9	4.8	6.1	26.6	6.3
1.2	1.5	1.9	8.1	1.6	1.2	2.9	3.7	16.2	2.8
1.5	0.9	1.2	5.1	0.9	1.5	1.8	2.3	10.2	1.5

5.2.5 その他の吊り天井の固有周期と許容耐力

斜め勾配の屋根に平行な在来工法天井であれば、水平な場合と同様に固有周期と許容耐力を算定することができる。ただし、勾配に対して吊りボルトが垂直に設けられる場合には、勾配と平行・垂直な方向で考えるなど、工夫が必要となる。

システム天井については、面内剛性が確保されれば在来工法天井と同様であるが、面内剛性が小さい場合が多く、内部の応力・変形等を考慮する必要があるが生じるので、在来工法天井のように単純な形で周期や耐力を求めることは難しく、詳細な計算や実験的検証が必要と考えられる。

5. 3 吊り天井の地震時挙動に関する検討

5. 1節で提案した計算方法は、構造躯体が弾性範囲にあるものとして、天井の許容応力度設計を行うものであり、中地震動を超えるような大きな地震動（典型的には建築基準法の大地震動（極めて稀に発生する地震動））に対する検証を直接的に行うものではない。これは、大地震動レベルに至らない場合でも天井脱落被害が生じていることや構造躯体の被害がほとんどない場合も多いことなどの地震被害の経験に加え、構造躯体の大地震時の挙動（揺れ方）を一般的かつ簡易に表現することが難しいこと、吊り天井の構成部材・接合部にすべりや座屈を生じた後の挙動と脱落するか否かの判断基準に関する技術的知見が乏しいこと、などの技術的な限界による。

本節では数値計算と既往の実験結果を通じ、許容耐力を超える吊り天井の地震時挙動について検討することにより、5. 1節に基づく許容応力度設計により大きな地震動に対しても一定の安全性が期待できるか否かを考察する。

5.3.1 実験による吊り天井の地震時挙動の例 ^{5.7)5.8)5.9)}

(1) 実験概要

独立行政法人防災科学技術研究所 兵庫耐震工学研究センター所有の震動台 E-defense による実大5層鉄骨構造の実験が平成21年3月～4月に行われた（免震制振実験WG、主査：東工大笠井和彦教授）。本プロジェクトの一部として制振デバイスを取り除いた非制振状態における加振実験を行った。この非制振状態での実験では天井の耐震性能を確認するために最も揺れが大きくなる最上階に天井を設置した。写真5.2にE-defenseに設置された実大5層鉄骨造試験体を示す。図中赤枠で囲ったところが天井を設置した箇所である。5階平面図を図5.36に示す。天井を設置した部屋の大きさは5m×7mである。2つの部屋に異なる形式の鋼製下地在来工法天井を設置した。



写真 5.2 実大5層鉄骨造試験体

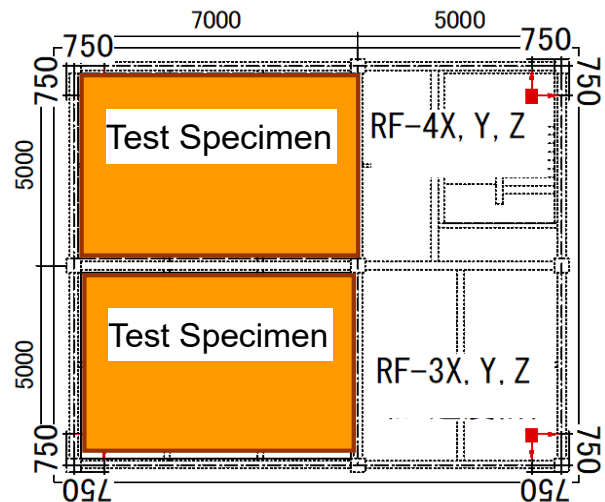


図 5.36 5階平面図

天井試験体①は写真5.3に示すようにクリアランスを設けた上でブレースを設置した形式（図5.37参照）、天井試験体②はクリアランスを設けずに周辺の壁に接するように天井面を配置した形式である。試験体①のブレース設置箇所数は、野縁方向に6箇所、野縁受け方向に8箇所である。なお、ここでは天井試験体②については説明を省略する。

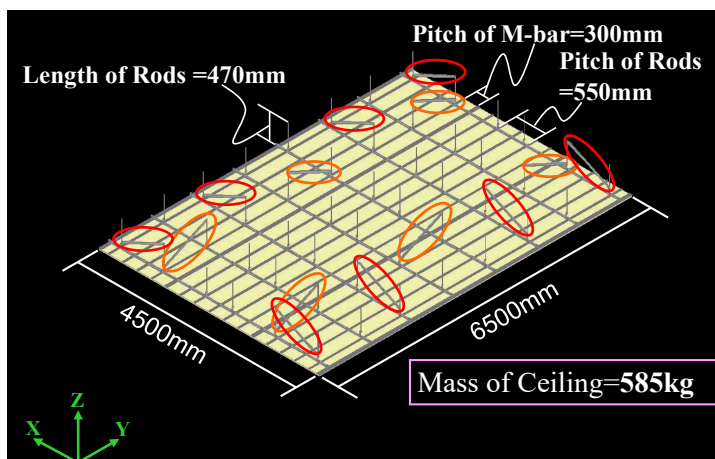


図 5.37 天井試験体①

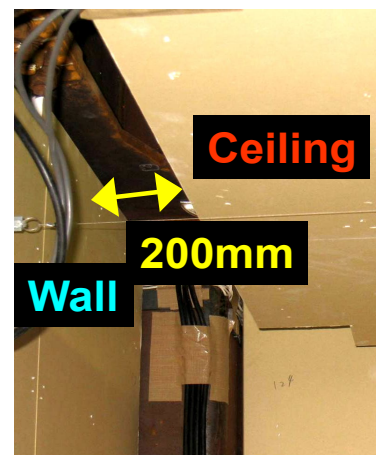


写真 5.3 クリアランス状況

(2) 実験結果

実験に用いた入力加速度は、鷹取波として、その最大加速度を 5%,20%,30%,40%・・・70%にスケールした加速度波形としている。ただし、天井試験体①は 40%鷹取波にて全面落下したことから、以下は 40%鷹取波までについて実験結果を示す。計測された加速度の一覧を表 5.6 に示す。

まず、建物の屋根において計測された加速度についてみると、30%鷹取波までは入力値に対してほぼ 2 倍の増幅率となっているが、40%鷹取波の場合には 3.5 倍にまで増幅している。これは比較的小さい入力の場合には内外装の壁などにより剛性が高くなるためと思われる。

屋根スラブにおける加速度に対する天井面における加速度の比率をみると、およそ 2 倍程度となっている。処女時における天井の固有周期は 0.307sec であることを予備実験で確認しており、また、既往の研究から減衰定数は 3%程度ということが解っている。そこで、図 5.38 のように応答スペクトルを用いて天井面の加速度を推定してみると、5%鷹取波の実験結果と推定値は高い精度で対応しているが、20%鷹取波以降、特に 30%鷹取波および 40%鷹取波ではズレが大きくなる。これは天井システムが線形システムではなくなっていることを示している。

表 5.6 各部位の絶対応答加速度 (単位 ; cm/s/s)

Unit ; gal					
Input Wave	①Ground (Table)	②Building (Roof Slab)	③Ceiling	Ratio 1 ②/①	Ratio 2 ③/②
5%	36	68	120	1.9	1.8
20%	151	293	578	1.9	2.0
30%	234	527	1149	2.2	2.2
40%	248	863	1477	3.5	1.7

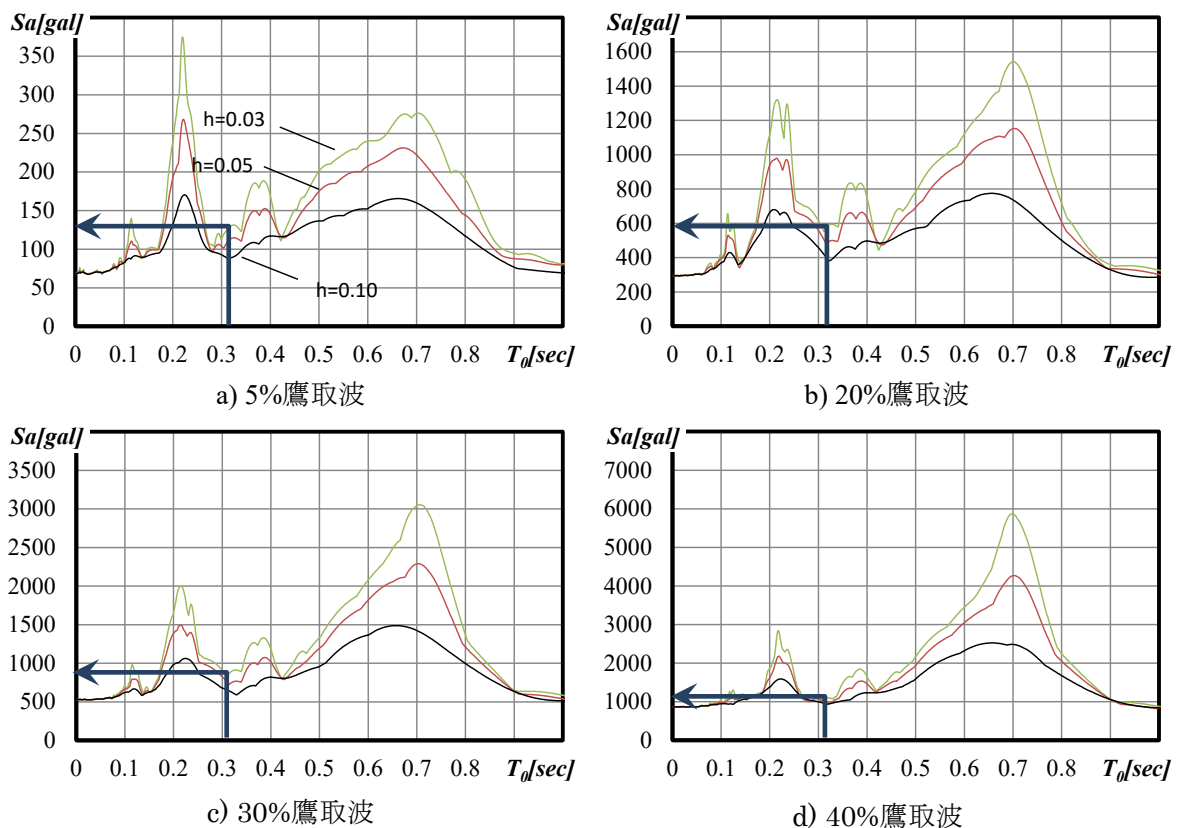


図 5.38 屋根における床応答スペクトル

そこで、天井の履歴特性を検討するために野縁方向の慣性力-変位関係を図化したものが図 5.39 である。減衰の影響を無視できるとすれば、慣性力は復元力とみなすことができる。図中の青線と黒線は計測値であり、後者には 10Hz でローパスフィルターをかけている。橙線は処女時の剛性を示す。これらの図から 5% 鷹取波の場合には天井システムはほぼ線形とみなせること、20% 鷹取波以降徐々に非線形性を帯びてくることが理解される。非線形性が見られ始める 20% 鷹取波のときの耐力は 2.24kN であり、この値およびブレースが 6 箇所配置されていることからブレース 1 箇所あたりの負担水平力は $2240\text{N}/6 \text{ 箇所}=373\text{N}$ となる。5.2.1 項でブレース下端近傍のクリップのすべり耐力を 1 個あたり 300N としたが、本例からもほぼ妥当であると判断される。20% 鷹取波以降非線形性は顕著なものとなり、40% 鷹取波の途中で最大水平耐力 8kN（ブレース 1 箇所あたり 1,300N）程度に達した。弾性限を超えても即座に落下しないこと、最大耐力は弾性限耐力（許容耐力）に比べてかなり大きくなること、ある程度の非線形繰返し挙動には耐えうることが分かる。

本例の結果によれば、許容耐力を超えるレベルの揺れに対しても、一定の安全性は期待しうると考えられる。

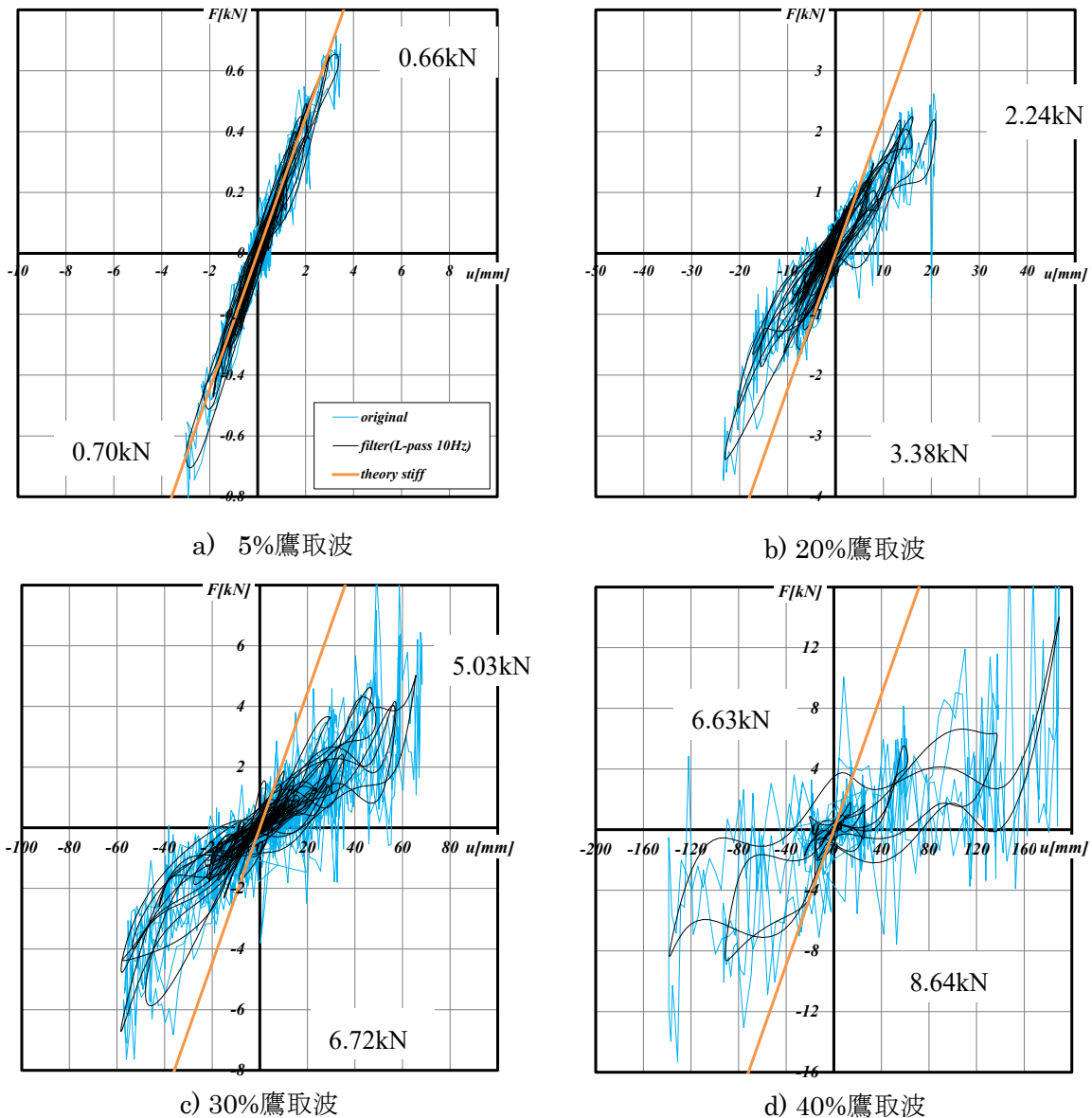


図 5.39 慣性力-変位関係

5.3.2 数値解析による検討

(1) はじめに

本項では5. 1節に基づいて耐力が設定された吊り天井が、構造躯体が塑性化するレベルの地震動に対しても落下しないと考えるか否かを判断する上での技術的な資料を提供することを目的として、時刻歴応答解析による試計算を行う。なお、上下振動は扱わず、水平振動のみを取り上げる。

(2) 落下しないと考える技術的根拠の設定

落下のクライテリアが明確になっていない現状では、実験によらず何らかの計算で落下しないことを直接確かめることは技術的に困難と考えられるため、天井に大きな損傷を生じないことをもって一定の安全性が担保されると考えることにする。大きな損傷か否かの判断は、天井の塑性率と相対変位で判断する。

(3) 1自由度系の構造躯体による検討

(a) 構造躯体の設定と応答解析

弾性の固有周期を T_{build} とし、減衰は初期剛性比例の5%とする。履歴はノーマルバイリニアとし、弾性剛性に対する2次剛性の比は0.01、降伏加速度（単位質量当たりの降伏耐力）は、

$$A_{y\text{build}} = D_s \cdot S_a(T_{\text{build}})$$

として設定する。ここで、 D_s ^{注1)} は弾性応答の最大値に対する降伏耐力の比、 $S_a(T_{\text{build}})$ は入力地震動（1倍）に対する弾性絶対加速度応答（減衰を含む。）の最大値である。

入力波は観測地震波の El Centro NS 波（図 5.40 参照）を用いる。加速度の倍率で0.2倍が中地震動、1倍が大地震動に対応するとみなす。

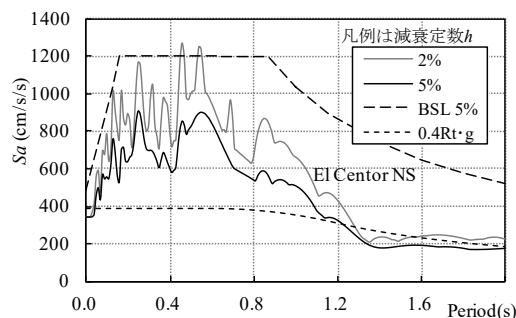


図 5.40 加速度応答スペクトル (El Centro NS)

弾塑性応答解析を行い、大地震動下での弾塑性応答加速度時刻歴を得る。これを天井への入力とする。

(b) 天井の設定と応答解析

1自由度系とする。弾性の固有周期を T_{ceil} とし、減衰は初期剛性比例の5%とする。骨格曲線はバイリニア型とし、弾性剛性に対する2次剛性の比は0.01、履歴則はノーマル^{注2)}及びスリップとする。降伏加速度は、

$$A_y = R \cdot C_c \cdot S_a(T_{\text{build}})$$

として設定する。ここで、 $R=R(T_{\text{build}}, T_{\text{ceil}})$ は吊り元の最大加速度に対する応答倍率（5.1節の式(1)及び(2)）、 C_c は耐力設定のための係数である。 $C_c=0.2$ の場合が、(中地震動)/(大地震動)=0.2に対応する。合わせて $C_c=0.3\sim 0.6$ とした場合も参考として応答解析を行う。

設定した天井の降伏加速度 A_y 及び降伏変位 u_y の例を図 5.41 に示す。

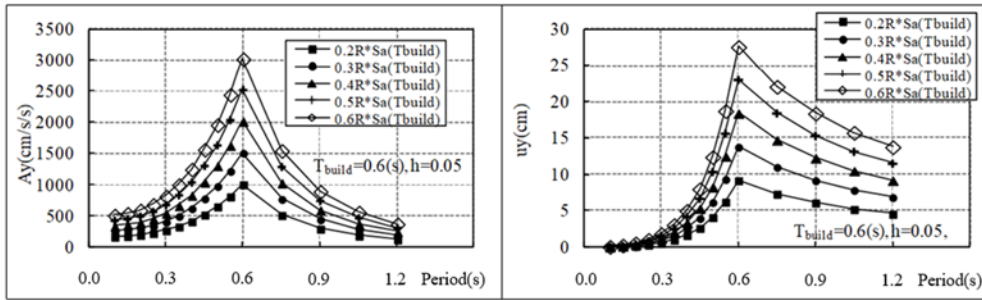
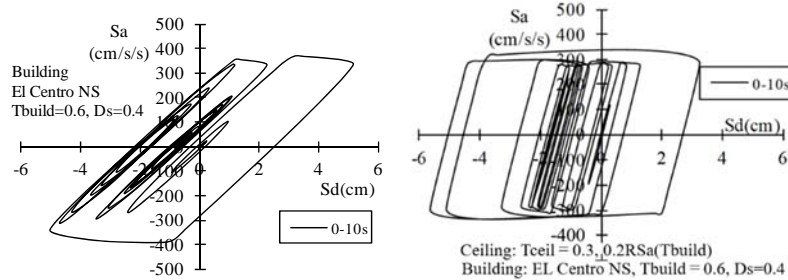


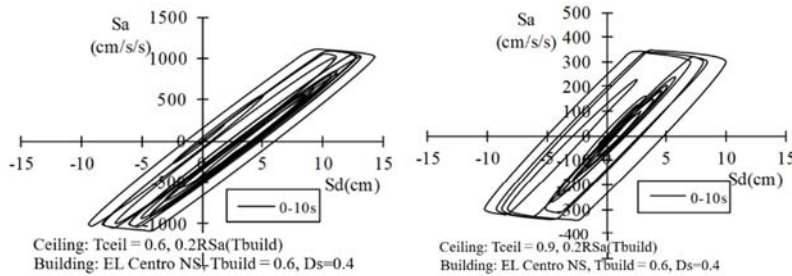
図 5.41 天井の降伏加速度 A_y (左図) と降伏変位 (右図) ($T_{build}=0.6(s)$)。横軸は T_{ceil}

(c)応答解析結果

図 5.42 に例として $T_{build}=0.6(s)$, $D_s=0.4$ の場合の構造躯体とそれに取り付く天井 ($C_c=0.2$ 、履歴ノーマル) の荷重変位関係 (S_a - S_d 関係) を示す。



(a) 構造躯体 ($T_{build}=0.6(s)$, $D_s=0.4$) (b-1) 天井 ($T_{ceil}=0.3(s)$, $C_c=0.2$)



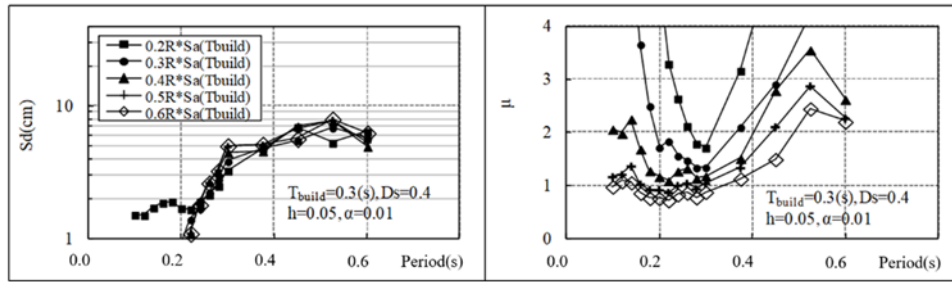
(b-2) 天井 ($T_{ceil}=0.6(s)$, $C_c=0.2$) (b-3) 天井 ($T_{ceil}=0.9(s)$, $C_c=0.2$)

図 5.42 荷重変位関係 (S_a - S_d 関係、初めの 10 秒間、天井の履歴はノーマル)

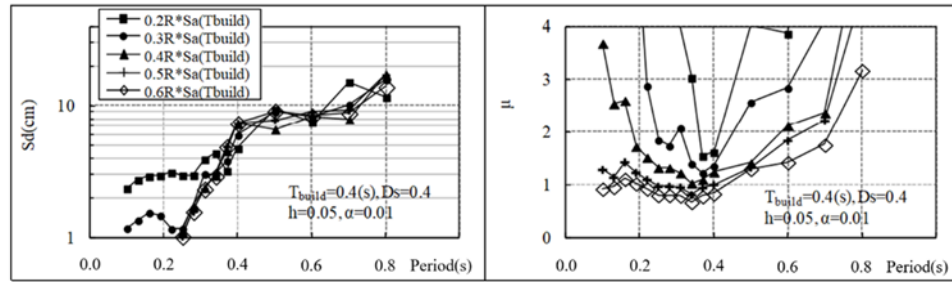
図 5.43 (次ページ) には天井の最大相対変位 S_d と塑性率 μ を示している。図 5.43 より、次のことが指摘できる。

- (1) $T_{build} < T_{ceil}$ の場合、最大相対変位は弾性応答変位が最大とみなせる (いわゆる変位一定則に対応すると考えられる)
- (2) $T_{ceil} < T_{build}$ の場合、最大相対変位は弾性応答変位を上回る (いわゆるエネルギー一定則に対応すると考えられる)
- (3) $T_{build} \approx T_{ceil}$ の場合、中地震動に基づく耐力設定 ($C_c=0.2$) で塑性率はあまり大きくならない
- (4) 中地震動は大地震動の 0.2 倍として天井の耐力を設定したが、構造躯体の保有水平耐力相当として C_c を本稿の D_s 注1)相当に上げておけば、広い周期帯で塑性率はあまり大きくならない
- (5) 在来工法のブレース付きの天井として $T_{ceil}=0.2\sim 0.4(s)$ 程度 (5.2 節参照) を考えると、図の範囲では大地震時の変位は 10cm 未満である (履歴がノーマルの計算であることに注意)

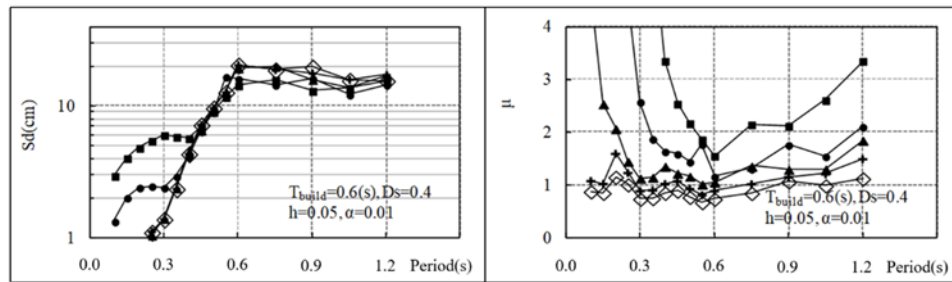
5. 吊り天井の耐震性に関する計算方法の検討



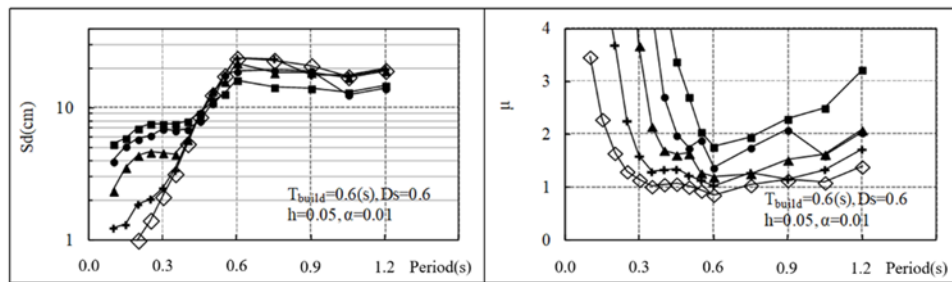
(a) $T_{\text{build}}=0.3(\text{s}), D_s=0.4$



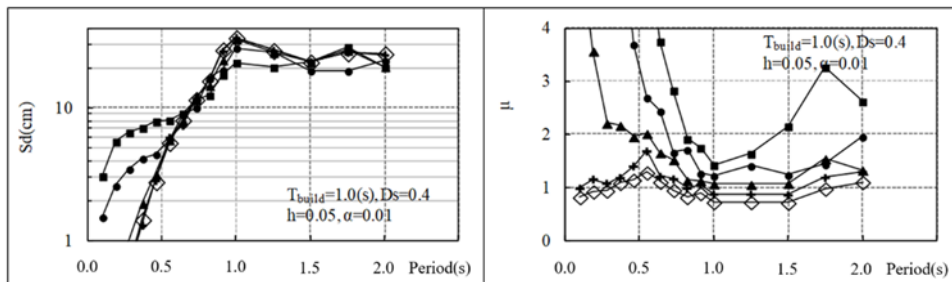
(b) $T_{\text{build}}=0.4(\text{s}), D_s=0.4$



(c-1) $T_{\text{build}}=0.6(\text{s}), D_s=0.4$



(c-2) $T_{\text{build}}=0.6(\text{s}), D_s=0.6$



(d) $T_{\text{build}}=1.0(\text{s}), D_s=0.4$

図 5.43 天井の最大相対変位 S_d (左図) と塑性率 μ (右図)
(横軸は T_{ceilo} 。天井の履歴はノーナル)

図 5.44 は、天井の履歴をスリップとした場合の結果である。対応する履歴ノーマルの結果（図 5.43 (c-1)）と比較すれば、特に躯体よりも短い周期を持つ天井（ $T_{ceil} < T_{build}$ ）の相対変位が大きくなり、在来工法のブレース付き天井として $T_{ceil} = 0.2 \sim 0.4(s)$ 程度で $C_c = 0.2$ では $10cm$ を超える。

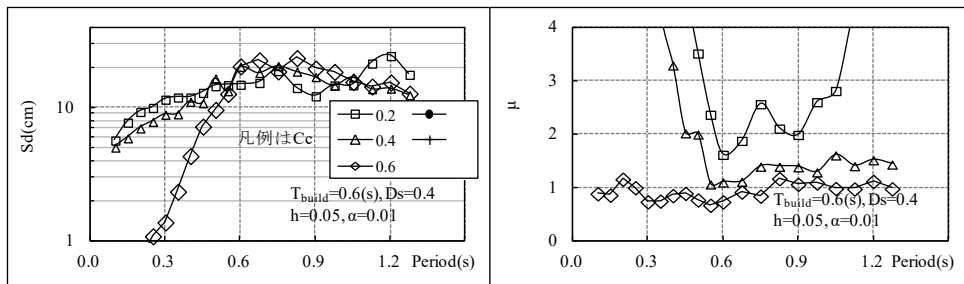


図 5.44 天井の最大相対変位 S_d (左図) と塑性率 μ (右図)
(横軸は T_{ceil} 。 $T_{build} = 0.6(s)$, $D_s = 0.4$ 。天井の履歴はスリップ)

図 5.45 は天井の周期によらず水平震度 1.0 相当の耐力を有する場合を参考として示したものである。全体的には塑性率が著しく大きくなることはないものの、 $T_{build} = 0.6(s)$ よりも若干短い周期の $T_{ceil} = 0.45 \sim 0.5(s)$ で履歴がスリップの場合には塑性率が 2~3 程度になっている。

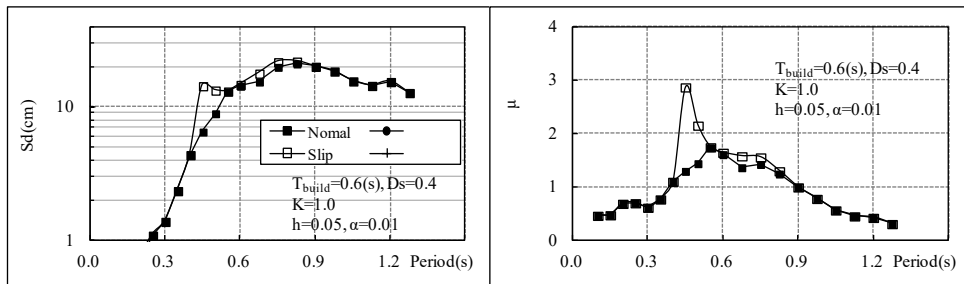


図 5.45 天井の最大相対変位 S_d (左図) と塑性率 μ (右図)
(横軸は T_{ceil} 。 $T_{build} = 0.6(s)$, $D_s = 0.4$ 。)

(4) 多自由度系の構造躯体による検討

(a) 構造躯体の設定と応答解析

多自由度系では、層数を N として、 $N = 4, 8, 16$ の 3 種のモデルを設定する。各層の履歴はノーマルバイリニアとし、弾性剛性に対する 2 次剛性の比は 0.01 とする。弾性 1 次固有周期は $T_1 = 0.1N$ とし、1 次モードが逆三角形となるような剛性分布を設定した。i 層の降伏耐力 Q_{yi} は、

$$Q_{yi} = C_{yi} \cdot W_i$$

とする。ここで、 C_{yi} は i 層の降伏せん断力係数で $C_{yi} = 0.4R_t \cdot A_i$ 、 W_i は i 層が支える重量であり、 $D_s = 0.4$ 相当の耐力を与えている。 R_t は振動特性係数、 A_i は層せん断力係数の高さ方向分布である。減衰は各次モードに対して一律に 2% とする。

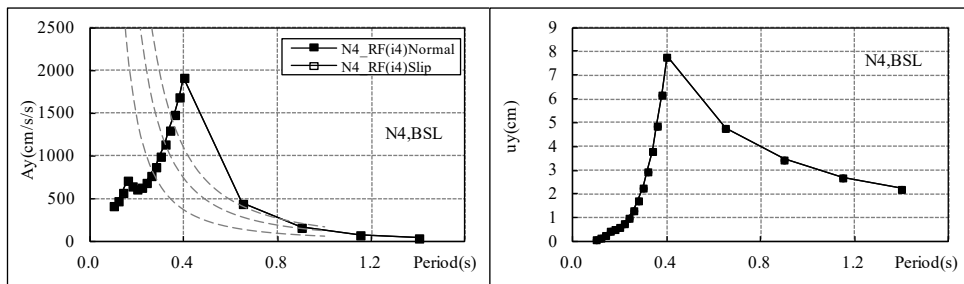
入力波は観測地震波の El Centro NS 波を用いる。加速度の倍率で 0.2 倍、0.6 倍、1.0 倍、1.5 倍の 4 レベルについて計算する。

(b) 天井の設定と応答解析

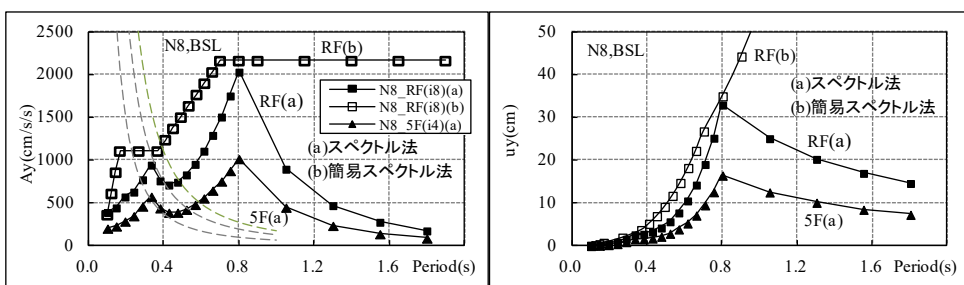
(3) と同様の 1 自由度系とする。ただし、耐力（降伏加速度）は建築基準法の稀地震の加速度応答スペクトル（2 種地盤、表層地盤の増幅は略算）に対して 5.1 節のスペクトル法又は簡易スペクトル法を適用した場合に要求される耐力を設定する。

設定した天井の降伏加速度 A_y 及び降伏変位 u_y の例を図 5.46 に示す。簡易スペクトル法の長周

期側は 1 次共振レベルと同じとして降伏加速度を設定している。8 層 (N=8) での設定では降伏変位が非現実的なほど大きいものを含んでおり、結果を見る上で注意する。



(a) N=4 (スペクトル法)



(b) N=8 (スペクトル法及び簡易スペクトル法)

図 5.46 天井の降伏加速度 A_y (左図) と降伏変位 (右図)

(横軸は T_{ceiling} 。左図の右下がりの破線は左から $S_d=1.5, 3.0, 4.5(\text{cm})$)

(c) 応答解析結果

図 5.47 及び 5.48 に構造躯体の塑性率と床最大加速度を示す。図 5.47 より、N=16 ではほぼ弾性に留まっているが、N=4 及び 8 では入力倍率 1 倍で塑性率は 2 前後である。図 5.48 より、床の最大加速度は 1G 未満である。

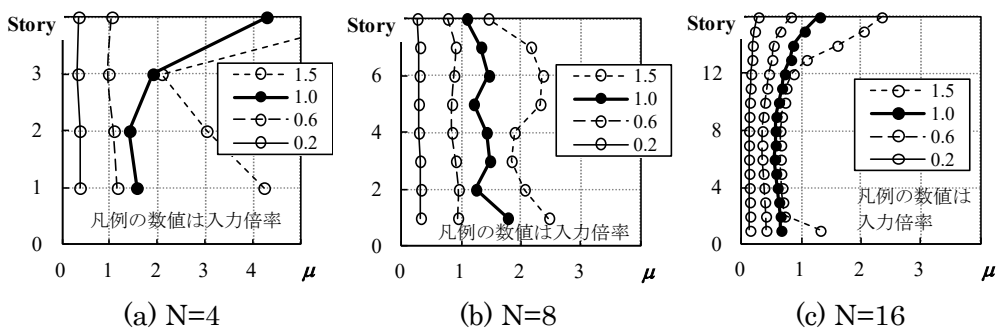


図 5.47 塑性率

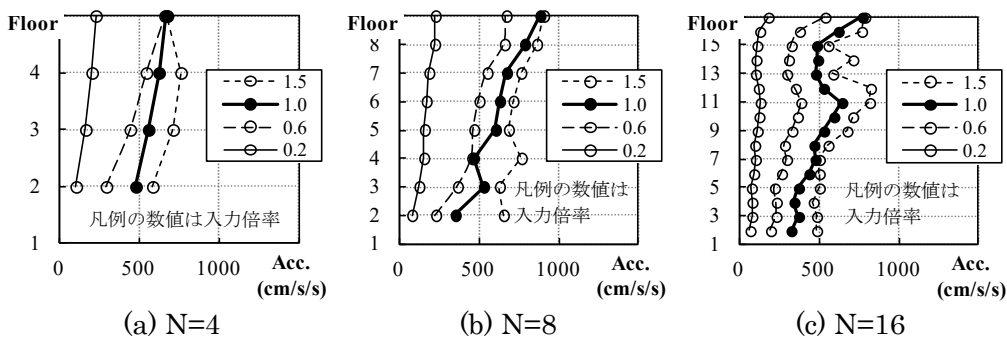


図 5.48 床最大応答加速度

図 5.49～5.51 に床応答スペクトル S_{af} を示す。構造躯体が塑性化し、床最大加速度 (= $S_{af}(0)$) が 1G 未満であっても、共振する場合 (N=16 では 2 次共振) には弾性応答の最大で 4～5G (4000～5000cm/s/s) 程度に達することが分かる。

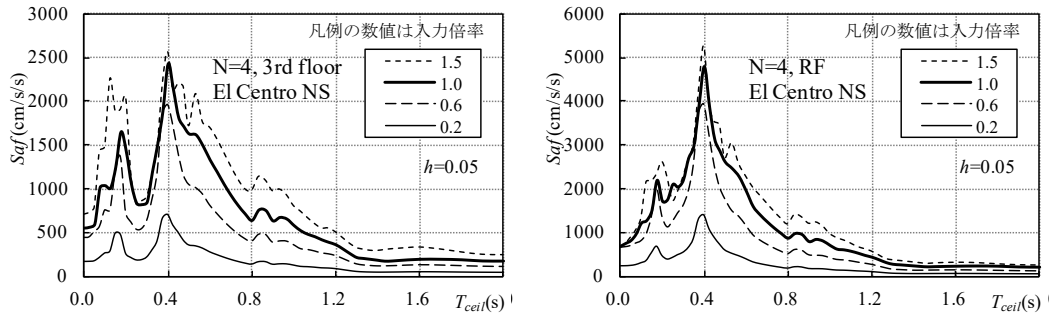


図 5.49 床応答スペクトル S_{af} (N=4。3 階床 (左図) と屋根 (右図))

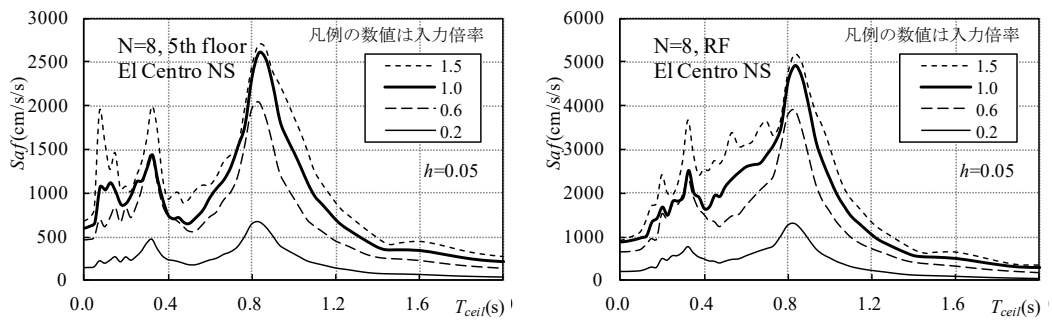


図 5.50 床応答スペクトル S_{af} (N=8。5 階床 (左図) と屋根 (右図))

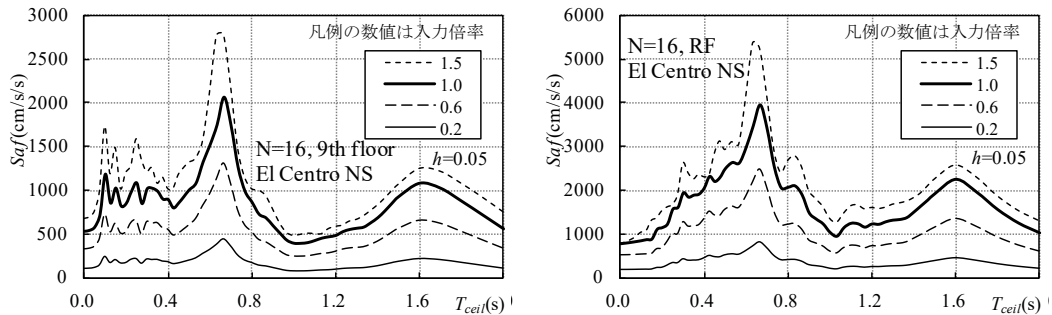
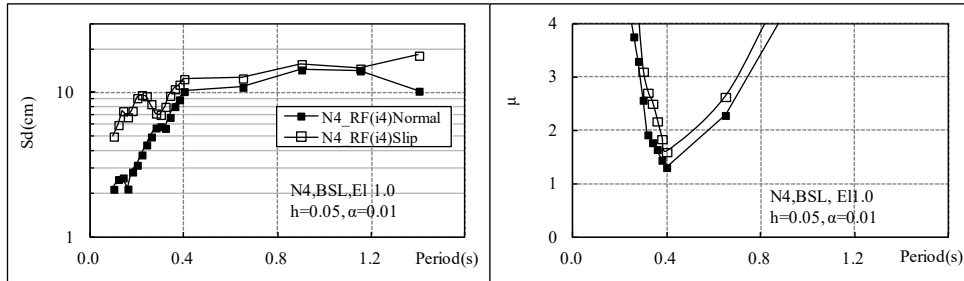
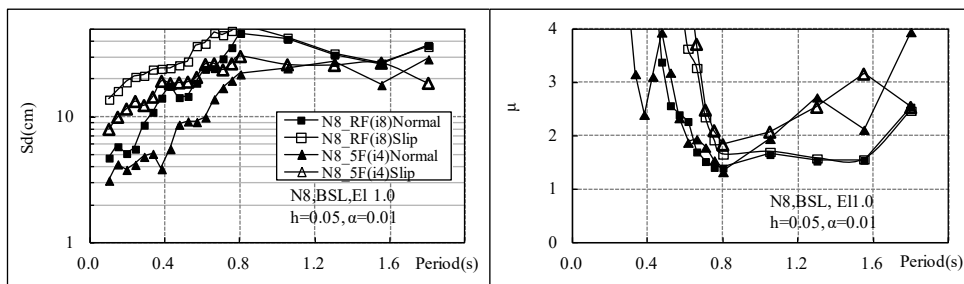


図 5.51 床応答スペクトル S_{af} (N=16。9 階床 (左図) と屋根 (右図))

図 5.52 に入力倍率 1.0 倍の構造躯体の応答に対する天井の応答解析結果を示す。4 層 (N=4) では 1 次共振で耐力が大きめに設定される $T_{ceil}=0.4(s)$ 付近の周期帯を除き、塑性率が非常に大きくなっている。8 層 (N=8) では 4 層 (N=4) に比べて相対変位が全体的に大きく、最上階の天井 (RF) では、ブレース付き在来工法で 0.2~0.4(s) 程度としても変位は 10~20cm 程度となる。



(a)N=4, RF



(b)N=8, RF と 5F

図 5.52 天井の最大相対変位 S_d (左図) と塑性率 μ (右図)
(入力倍率 1 倍。スペクトル法による耐力設定。横軸は T_{ceil})

図 5.53 は 8 層の最上階の天井として、周期によらず水平震度 1.0 又は 2.2 相当の耐力を有する場合を参考として示したものである。水平震度 1.0 の場合、履歴がノーマル (■印) かスリップ (□印) かによって変位に大きな違いがある。前者であれば一部を除き塑性率は 3 程度以下に収まっている。水平震度を一律に 2.2 とした場合には、1 次共振より若干短めの $T_{ceil}=0.6\sim 0.8$ 程度の範囲で塑性率が 2 程度に達する場合もあるが、全般的に塑性率は小さく弾性範囲に留まるものも多い。

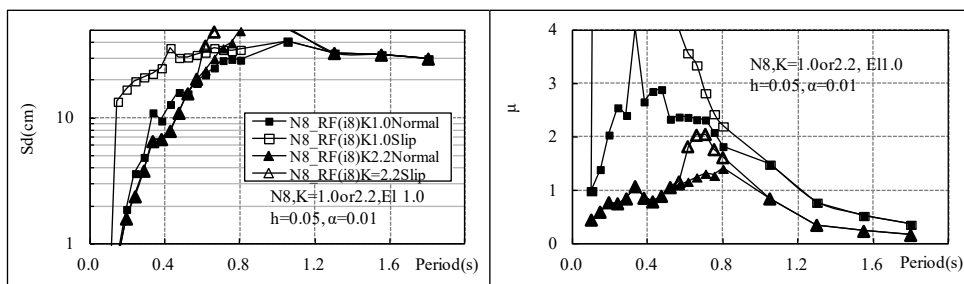


図 5.53 天井の最大相対変位 S_d (左図) と塑性率 μ (右図) (横軸は T_{ceil})
(入力倍率 1 倍。N=8, RF。K=1.0 又は 2.2 相当の耐力)

(5) まとめ

限られた範囲の検討であるが、次のことが指摘できる。

- 大きな地震動を受けて構造躯体が塑性化することにより床の最大加速度が 1G 未満となる場合であっても、床応答スペクトルでは構造躯体の 1 次や 2 次の周期帯で 1G を優に超える。大きな地震動下でも吊り天井に損傷を生じさせないことを目指すのであれば、構造躯体との共振を避けて十分に剛な天井とした上で、床の最大加速度による慣性力に耐えうる耐力を持たせることが有効と考えられる。
- 大きな地震動の下で吊り天井の著しい損傷を防ぐためには、5.1 節に基づき要求される耐力よりもやや大きめ耐力を付与すべきである。特に構造躯体の 1 次固有周期よりも短い周期を持つ場合で、要求される耐力が比較的小さい場合に注意が必要と考えられる。

注

注 1) 本稿では構造躯体の保有水平耐力を設定するために記号 D_s を用いており、必要保有水平耐力を意味していないことに注意する。

注 2) プレースの座屈を生じる場合などは必ずしも適切な履歴の設定とは言えないが、代表的かつ単純な弾塑性の履歴則として取り上げている。

5章 参考文献

- 5.1) Penzien, J. and M. Watabe: Characteristics of 3-dimensional earthquake ground motion, Earthq. Eng.&Strct. Dyn., Vol.3, pp.365-373, 1975
- 5.2) 体育館等の天井の耐震設計ガイドライン、(財)日本建築センター、2002.3
- 5.3) 例えば、滝澤春男：線形のエクリチュール 構造物振動論教程、p.142～143、鹿島出版会、2010.2
- 5.4) 非構造部材の耐震設計施工指針・同解説および耐震設計施工要領、pp.4-6, pp.31-35、日本建築学会、2003.1
- 5.5) 国土交通省 国土技術政策総合研究所：高強度鋼等の革新的構造材料を用いた新構造建築物の性能評価手法の開発、国総研プロジェクト研究報告、第 32 号、pp.199-202、2010.2
<http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryoku/kpr/prn0032.htm>
- 5.6) 川西拓人、元結正次郎、ほか：鋼製下地在来工法天井に対する部分試験体による振動台実験、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.885-886、2009.8
- 5.7) 清水雄一郎、元結正次郎、笠井和彦、水谷国男、佐藤恭章、川西拓人、引野剛：鋼製下地在来工法天井の剛性評価と応答予測に関する検討 E-ディフェンス鋼構造建物実験研究 その 71、日本建築学会大会梗概集 2010 年、C-1 分冊、p.831
- 5.8) 川西拓人、元結正次郎、笠井和彦、水谷国男、佐藤恭章、引野剛：安定状態における天井の動的性状に関する検討 E-ディフェンス鋼構造建物実験研究 その 72、日本建築学会大会梗概集 2010 年、C-1 分冊、p.833
- 5.9) 佐藤恭章、元結正次郎、笠井和彦、水谷国男、川西拓人、引野剛：損傷を受けた天井およびスプリンクラーの動的性状に関する検討 E-ディフェンス鋼構造建物実験研究 その 73、日本建築学会大会梗概集 2010 年、C-1 分冊、p.835

5章 付録

A5. 1 吊り元の揺れのエネルギースペクトル

A5.1.1 はじめに

東北地方太平洋沖地震による地震動は、継続時間が極めて長かったため、繰返し回数の多い応答により天井等の非構造部材の被害が拡大した可能性が指摘されている。天井の周期や耐力などの特性に対する繰返し回数の影響は、実験的に検証されていないため不明であるが、吊り元の揺れについて継続時間の長さや繰返し回数を表現する方法として、エネルギースペクトルを用いることが考えられる。

本稿はエネルギースペクトルを比較的簡易に算定するための第1歩として、最大応答を表す応答スペクトルの場合と同様に、応答倍率を表す経験的な関数が得られるか否かを検討したものである。

A5.1.2 仮定と手順

構造躯体と天井はともに1自由度系とする（5章の図5.2参照）。構造躯体の応答絶対加速度を入力として、エネルギースペクトルを求め、応答スペクトル（最大応答）の場合の関数 R （同、式(1)(2)）と同様の関係が得られるかを検討する。

A5.1.3 結果

図A5.1.1及び図A5.1.2に、El Centro NS波とJMA仙台NS（東北地方太平洋沖地震、300秒間）による結果を示す。実線が入力地震動の、破線等が構造躯体の揺れのエネルギースペクトルである。前者を VE 、後者を VEf としている。右図のように基準化すれば、概ね次の式(A5.1.1)及び(A5.1.2)で近似できる。

$$T_{ceil} \leq T_{build} \text{のとき} : R_{VE}(T_{build}, T_{ceil}) \equiv \frac{VEf(T_{ceil})}{VE(T_{build})} = 7 \left(\frac{T_{ceil}}{T_{build}} \right)^4 \quad (\text{A5.1.1})$$

$$T_{build} < T_{ceil} \text{のとき} : R_{VE}(T_{build}, T_{ceil}) \equiv \frac{VEf(T_{ceil})}{VE(T_{build})} = 1 + 6 \left(\frac{T_{build}}{T_{ceil}} \right)^4 \quad (\text{A5.1.2})$$

ここで、 T_{build} ：構造躯体の周期、 T_{ceil} ：吊り天井の周期である。

継続時間はJMA仙台の方がはるかに長い、右図の比で見れば、El Centroと大差ない。また、応答スペクトルの比（5章の図5.4～5.6）よりも、ばらつきが少ないように見受けられる。

A5.1.4 おわりに

吊り元の揺れに関しては、応答スペクトルと同様に、式(A5.1.1)(A5.1.2)を利用した多自由度系への展開が考えられる。設計に役立てるためには、周期・耐力に対する繰返し応答の影響について、実験的な検討が進むことを期待したい。

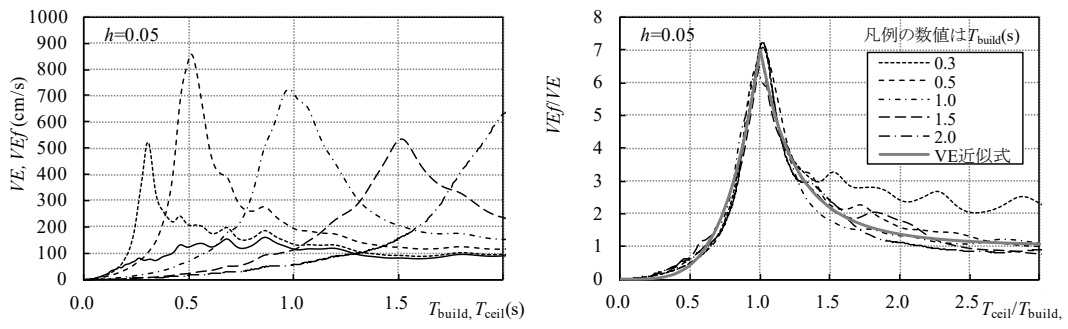


図 A5.1.1 El Centro NS

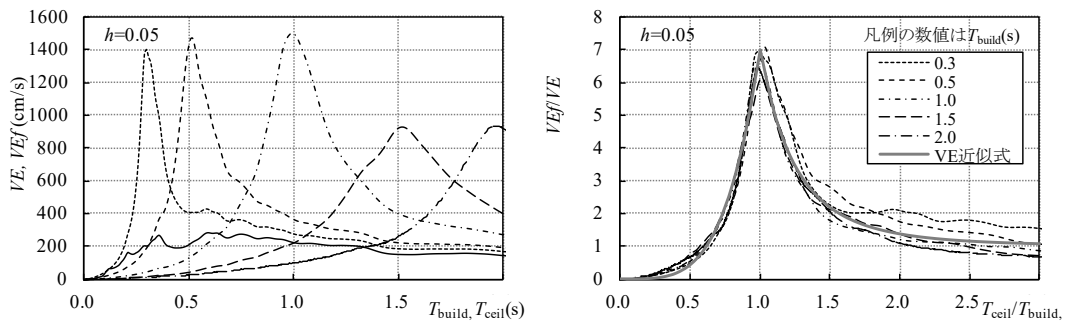


図 A5.1.2 JMA 仙台 NS (東北地方太平洋沖地震)

A5.2 構造種別ごとに固有周期を仮定した場合の水平震度

A5.2.1 はじめに

構造種別ごとに固有周期が設定される場合に、5.1節で提案した方法で要求される水平震度の具体的な数値を参考として示しておく。

A5.2.2 周期の設定

構造躯体の1次固有周期 $T_1(s)$ を次のようにおく。層数を N 、設計用1次固有周期算定のための建築物の高さを $h(m)$ 、階高を $3.5(m)$ とする。

<S造> 周期1^{A5.1)} : $T_1=0.2N(N \leq 5)$ 、 $T_1=0.55+0.085N(6 \leq N \leq 11)$
 (体育館は実測値^{A5.2)A5.3)}を参考に、 $T_1=0.27(s)$ とする。)

周期2 : $T_1=0.03h=0.03*3.5*N$
 (体育館は $h=10(m)$ として、 $T_1=0.30(s)$ とする。)

<RC造> $T_1=0.02h=0.02*3.5*N$

吊り天井の固有周期 $T_{ceil}(s)$ は、在来工法でブレースの粗密に応じて、0.3秒及び0.55秒の2種を仮定する。また、耐震的な仕様の例として0.16秒(6Hz)も示す。

A5.2.3 水平震度

表A5.2.1~A5.2.3には震度法による水平震度を、表A5.2.4には逆三角形1次モードの刺激関数を仮定したスペクトル法による水平震度を示す。表A5.2.1~A5.2.3の水平震度の数値は、上から、上層階、中間階、下層階の順に並べてあり、最も大きな震度が要求される場合を網掛けで示している。体育館の場合、震度法では上層階の値を、スペクトル法では1層の屋根(RF)の値を示す。

表 A5.2.1 震度法、S造、周期1

階数	$T_1(s)$	設置階	$T_{ceil}(s)$		
			在来Br粗	在来Br密	耐震仕様例
			0.550	0.300	0.167
3	0.6	上層階	2.2	2.2	1.1
		中間階	1.3	1.3	0.66
		下層階	0.24	0.24	0.24
6	1.06	上層階	2.2	1.1	1.1
		中間階	1.3	0.66	0.66
		下層階	0.24	0.24	0.24
9	1.315	上層階	2.2	1.1	1.1
		中間階	1.3	0.66	0.66
		下層階	0.24	0.24	0.24
体育館	0.27	上層階	2.2	2.2	2.2

表 A5.2.2 震度法、S造、周期2

階数	$T_1(s)$	設置階	$T_{ceil}(s)$		
			在来Br粗	在来Br密	耐震仕様例
			0.550	0.300	0.167
3	0.315	上層階	2.2	2.2	2.2
		中間階	1.3	1.3	1.3
		下層階	0.24	0.24	0.24
6	0.63	上層階	2.2	2.2	1.1
		中間階	1.3	1.3	0.66
		下層階	0.24	0.24	0.24
9	0.945	上層階	2.2	1.1	1.1
		中間階	1.3	0.66	0.66
		下層階	0.24	0.24	0.24
体育館	0.3	上層階	2.2	2.2	2.2

表 A5.2.3 震度法、RC造

階数	$T_1(s)$	設置階	$T_{ceil}(s)$		
			在来Br粗	在来Br密	耐震仕様例
			0.550	0.300	0.167
3	0.21	上層階	2.2	2.2	2.2
		中間階	1.3	1.3	1.3
		下層階	0.24	0.24	0.24
6	0.42	上層階	2.2	2.2	2.2
		中間階	1.3	1.3	1.3
		下層階	0.24	0.24	0.24
9	0.63	上層階	2.2	2.2	1.1
		中間階	1.3	1.3	0.66
		下層階	0.24	0.24	0.24

表 A5.2.4 スペクトル法、S造、周期1

階数	$T_1(s)$	設置階	$T_{ceil}(s)$		
			在来Br粗	在来Br密	耐震仕様例
			0.550	0.300	0.167
3	0.6	RF	1.53	0.58	0.41
		3F	1.02	0.43	0.38
		2F	0.51	0.32	0.37
6	1.06	RF	0.61	0.52	0.34
		5F	0.38	0.33	0.23
		3F	0.29	0.36	0.19
9	1.315	RF	0.92	0.50	0.31
		7F	0.43	0.28	0.18
		4F	0.49	0.31	0.15
体育館	0.27	RF(1層)	0.17	1.07	0.53

A5.3 天井面の安定性および圧縮耐力

A5.3.1 はじめに

国土交通省は平成13年の芸予地震の被害報告を受け、技術的助言として、天井面と周囲の壁との間にクリアランスを設けること、吊りボルト相互を振れ止めで連結させることを推奨している^{A5.4)}。この主旨は、クリアランスおよび振れ止めの設置によって周囲の壁との衝突を回避することを意図していると考えられる。しかし、クリアランスを設けることによってブレース近傍のクリップおよびハンガーが損傷・脱落し、結果として天井面が大きく揺さぶられて落下したと考えられる被害事例も確認されている。一方、クリアランスがない天井は、元々天井面は壁と接触しているために、本来、天井面と壁との衝突は発生しないとも考えることもできる。ただしこの場合には、天井面自身が天井面に作用する地震力を周囲の壁に伝達する必要があるが、天井面の圧縮力伝達能力についてはこれまで明らかにされていない。そこでここでは、クリアランスのない天井の耐震設計法を検討する上で必要となる天井面内の応力伝達能力を定量的に把握していく。なかでも接触時において重要な圧縮耐力について報告する。

A5.3.2 天井システムの数値解析モデル化

数値解析モデルの妥当性を検証するために用いた既往の実験^{A5.5)}について概要を説明する。試験体は図A5.3.1および図A5.3.2に示すように一般的な平天井に倣って組み立てられている。試験体全体の寸法は $3,640 \times 3,640\text{mm}$ で $910 \times 910\text{mm}$ のボードを基本として天井面を構成している。ダブル野縁は 910mm ピッチでボードの継ぎ目に接続され、シングル野縁がその間に等間隔で2本配置されている。野縁受けは $803 \sim 850\text{mm}$ ピッチで配置され、野縁方向における吊りボルトのピッチとなっている。吊りボルトの長さは $1,500\text{mm}$ であり、野縁受けとの接合部ではハンガーが、吊り元では折板インサート金物を使用されている。載荷方法は天井面の一端を拘束し他端にてボード断面を一様に圧縮する形式となっている。

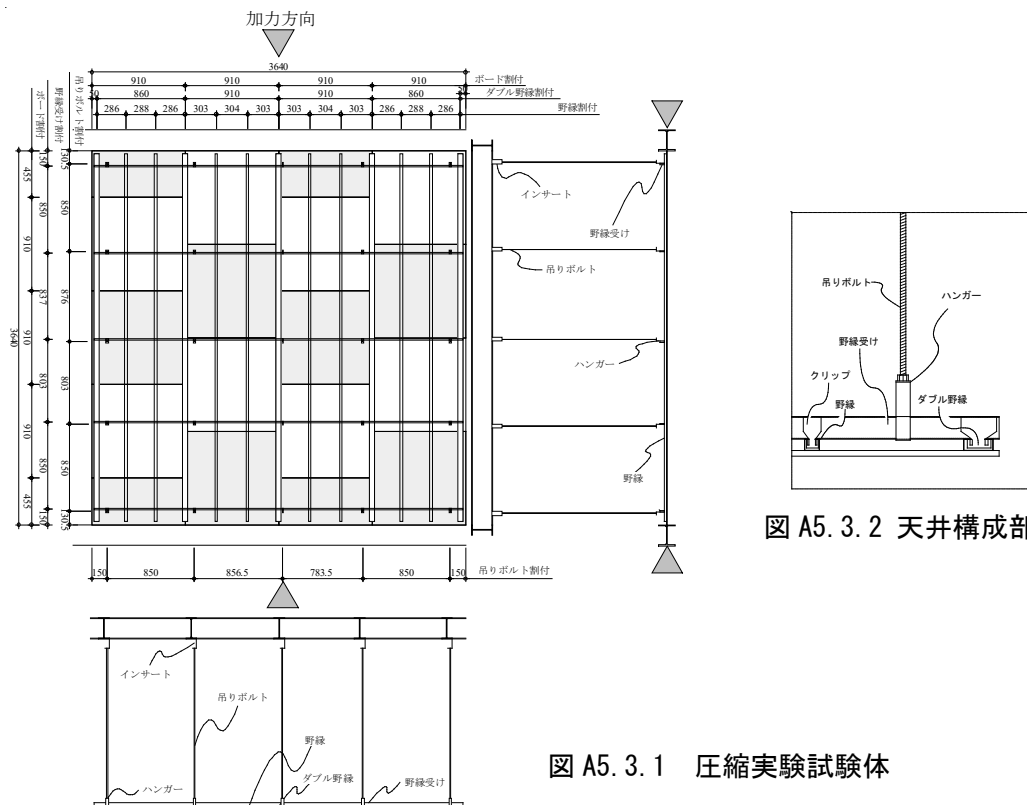


図 A5.3.1 圧縮実験試験体

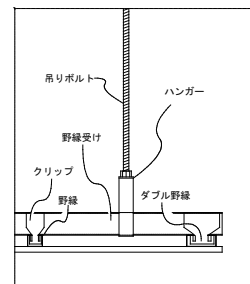


図 A5.3.2 天井構成部材

この静的圧縮実験の再現解析を行うことで解析モデルの妥当性を検証する。図 A5.3.3 に解析モデル全体図を、図 A5.3.4 に吊りボルト部の解析モデルを示す。その際ハンガーやインサート金物による、吊りボルト端部での偏心を考慮してモデルを作成した。なお、ハンガー、インサート金物ともに表 A5.3.1 に示す断面の梁要素を使用し、ハンガーは野縁受けと吊りボルトを、インサート金物は吊りボルトと吊り元を連結させることにより、ハンガー、インサート金物による接合部の偏心を表現している。なお、天井ボードを含むすべての部材は弾性状態にあるものとしている。

実験および数値解析で得られた荷重変位関係を比較したものを図 A5.3.5 に示す。また、実験における最終変形状態を写真 A5.3.1 に、解析によるものを図 A5.3.6 に示す。荷重変位関係、天井面の面外変形および吊りボルトの屈曲状態のいずれも数値解析結果は実験結果をよく表している。

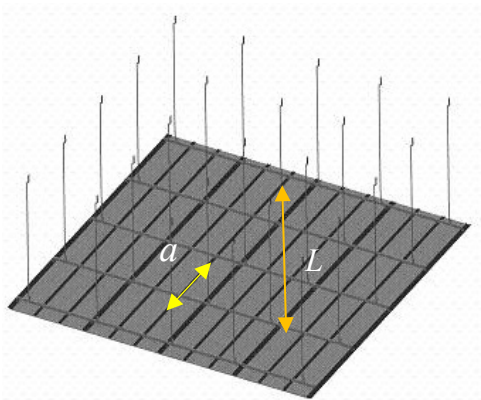


図 A5. 3.3 解析モデル

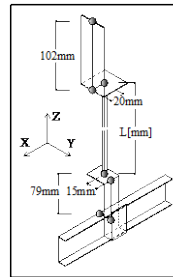


図 A5. 3.4 吊りボルト部詳細

表 A5. 3. 1 部材諸元

インサート	25×2.0	野縁(S)	25×19×0.4
吊りボルト	9φ	野縁(W)	50×19×0.4
ハンガー	24×2.0	クリップ(S)	23×0.6
野縁受け	38×12×1.2	クリップ(W)	46×0.6
ブレース	38×12×1.2	石膏ボード	t=9.5

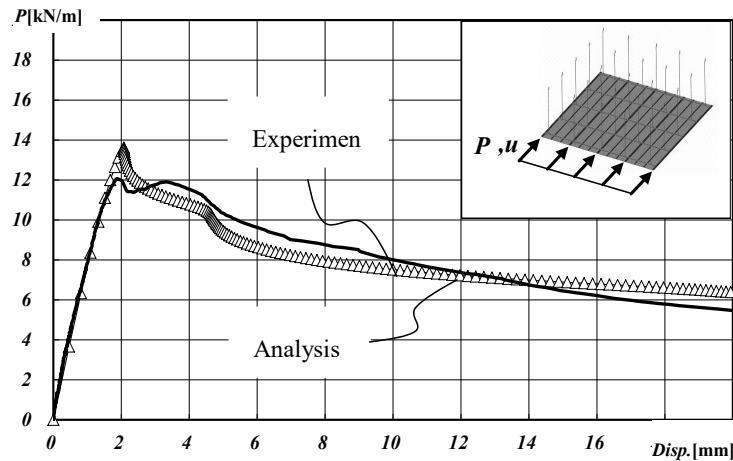


図 A5. 3. 5 荷重変位関係

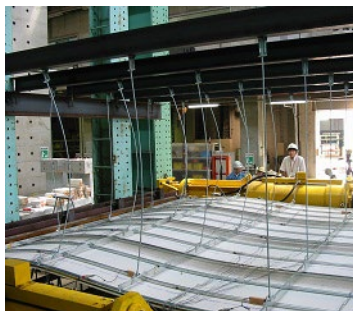


写真 A5. 3. 1 実験での崩壊性状



図 A5. 3. 6 解析による崩壊性状

A5.3.3 圧縮を受ける場合の天井の基本的性状

前項の結果で注目すべき点は、i) 吊りボルトは何故屈曲するのか、また、ii) 弾性要素で解析を行ったにもかかわらず、耐力劣化まで再現されているのか、という点である。i) は、天井面を圧縮しているにも関わらず、すなわち、天井面と直交する吊りボルトにはほとんど軸力は発生しないと想定されるにも関わらず、固有値解析による座屈モードが図 A5.3.9 のような天井面の面外変形ではなく、図 A5.3.8 に示す吊りボルトが屈曲するモードが最低次のモードとして算定される理由が曖昧であることを意味する。ii) は、通常のエイラー座屈のような対称安定分岐座屈の場合には弾性座屈後耐力低下することではなく、本座屈形式も同座屈形式であるにも関わらず、実験結果ならびに解析結果において耐力低下が観られる理由が曖昧であることを意味している。これらは以下のように説明することができる。

- 実験、再現解析ともに天井ボード断面の図心に一様に圧縮力を作用させているが、天井ボードに取り付く野縁の影響により、天井ボード断面の図心と野縁の影響を加味した断面における図心との間にずれが生じる。このため、ボード断面の図心に圧縮力を作用させると、図 A5.3.10 のように偏心圧縮が作用することとなり、天井ボードには曲げ変形が発生する。
- 天井ボードが曲げ変形することで吊りボルトには圧縮力が発生し、圧縮力が限界に達すると吊りボルトが座屈する。
- 吊りボルトが座屈することで元々吊りボルトが有していた天井面に対する補剛効果が低下し、天井ボードは容易に曲げ変形しやすくなる。このために、天井面は圧縮力を保持できなくなり耐力劣化現象が発生する。

上記のような偏心の影響を検討するために行った解析結果を図 A5.3.11 に示す。偏心がない場合の最大耐力は 25kN/m 程度となっており、この値は後述する天井面の座屈荷重（式(A5.3.2)および図 A5.3.17 中の実線）と対応する。このことは天井面における不可避的偏心が吊りボルトに圧縮力を発生させるとともに吊りボルトが座屈する原因となっていることを示している。

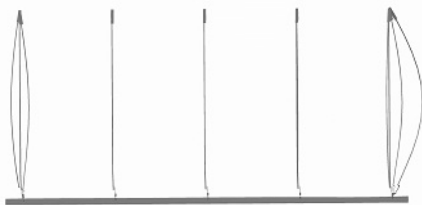


図 A5.3.8 実際に計算された座屈 1 次モード

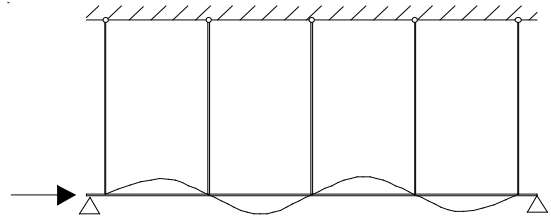


図 A5.3.9 想定される座屈モード

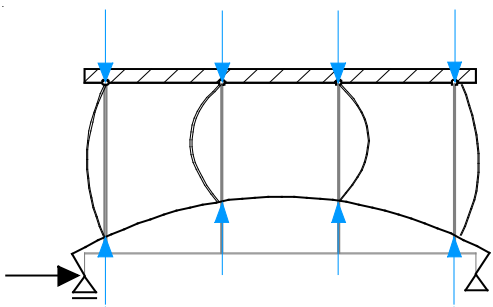


図 A5.3.10 吊りボルトに圧縮力が発生するメカニズム

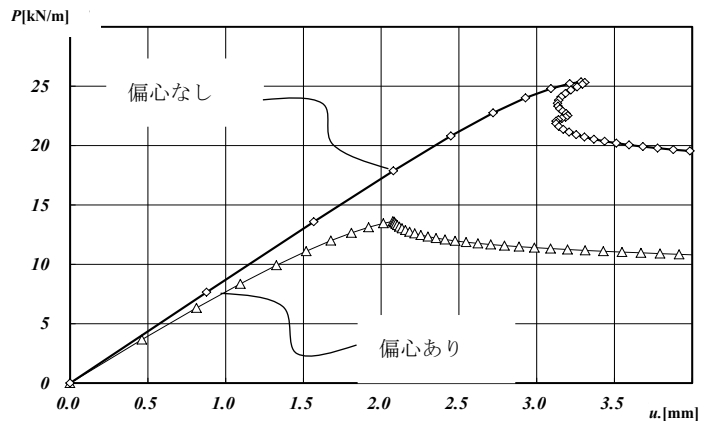


図 A5.3.11 偏心の影響

A5.3.4 天井面の圧縮性能

(1) 吊りボルト長さの影響

吊りボルトの長さをパラメータとして行った解析結果を図 A5.3.12 および A5.3.13 に示す。図 A5.3.12 は荷重変位関係、図 A5.3.13 に天井面の最大耐力と吊りボルト長さ関係を示す。吊りボルトの長さが短くなるほど天井面の耐力が上昇しており、吊りボルトが天井面の圧縮耐力に及ぼす影響が大きいことが理解される。

また、図 A5.3.14 に吊りボルトに発生した軸力の推移を示す。図 A5.3.12 と合わせてみることで、吊りボルトが最大耐力に達した変位段階で、天井面の耐力が最大となっていることがわかる。図 A5.3.15 に吊りボルトの最大耐力とインサート金物とハンガーを含めた吊りボルト部の全長との関係を示す。解析で得られた最大耐力は弾性座屈荷重の理論値であるオイラー座屈荷重；

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 E_R I_R}{L^2} \quad (E_R = 205,000 \text{ [N/mm}^2\text{]}, \quad I_R = 321 \text{ [mm}^4\text{)}) \quad (\text{A5.3.1})$$

とよく対応している。以上のことから、吊りボルトの弾性座屈により天井面の最大耐力が決定されていることが推測される。

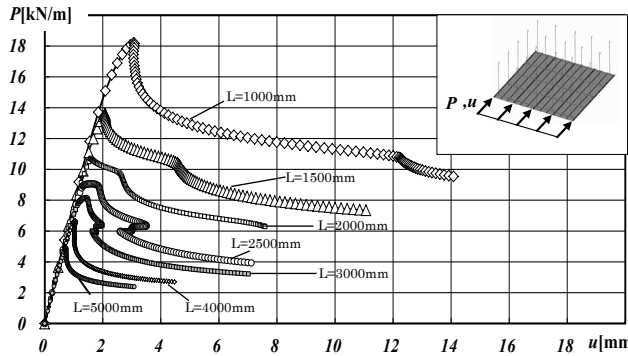


図 A5. 3. 12 荷重変位関係

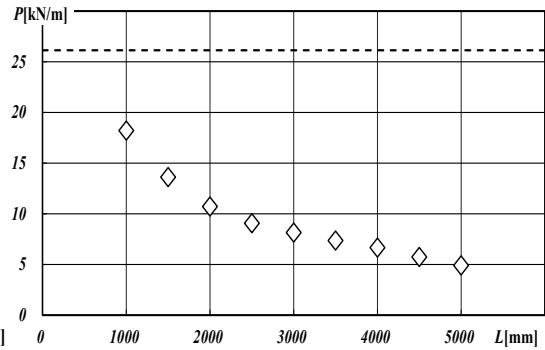


図 A5. 3. 13 最大耐力-吊りボルト長さ関係

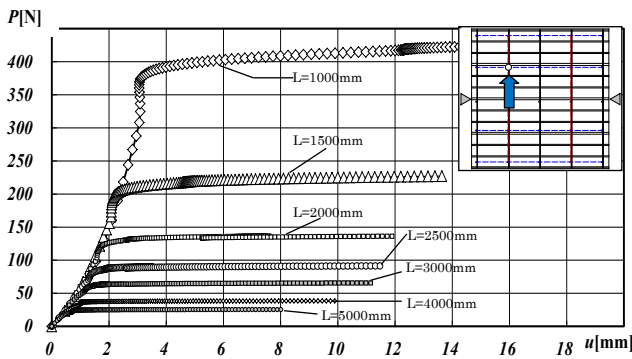


図 A5. 3. 14 吊りボルト軸力-変位関係

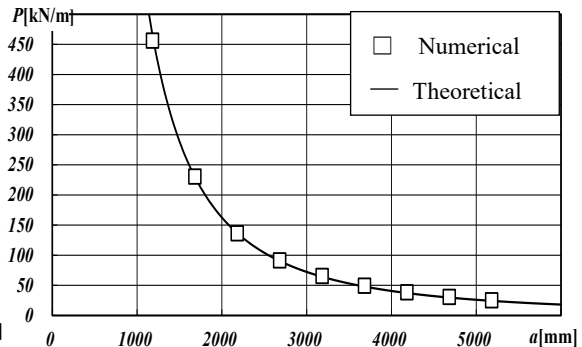


図 A5. 3. 15 吊りボルト軸力-吊りボルト長さ関係

(2) 吊りボルト間隔の影響

野縁方向における吊りボルトの間隔の違いが天井面の耐力に与える影響について考察する。図 A5.3.16 に吊りボルト間隔をパラメータとしたときの荷重変位関係を示す。吊りボルト間隔が短いモデルでは最大耐力到達後の荷重の低下が見られるのに対し、ピッチが長いモデルでは最大耐力時以降、荷重が一定のまま変位が進んでいる。また、図 A5.3.17 は天井面の最大圧縮耐力と吊りボルト間隔の関係を示したものである。図中には、次式にて表される天井ボードに対するオイラー座屈荷重曲線を実線にて併せて示している。

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 E_B I_B}{a^2} \quad (E_B = 28,820 [\text{N/mm}^2], I_B = 26.0 [\text{mm}^4]) \quad (\text{A5.3.2})$$

吊りボルト間隔が長い場合にはプロットで示す解析結果は実線と概ね対応しているが、吊りボルト間隔が短い場合には実線で示す天井面のオイラー座屈荷重を下回っている。これは、吊りボルト間隔が短い場合には、前節で述べたように天井ボードの弾性座屈耐力に達する前に吊りボルトの座屈により耐力が決定されるためである。したがって、天井面の最大耐力は、吊りボルト間隔によって天井ボードの座屈耐力で決まる場合と吊りボルトの座屈耐力で決まる場合があるということが明らかとなった。

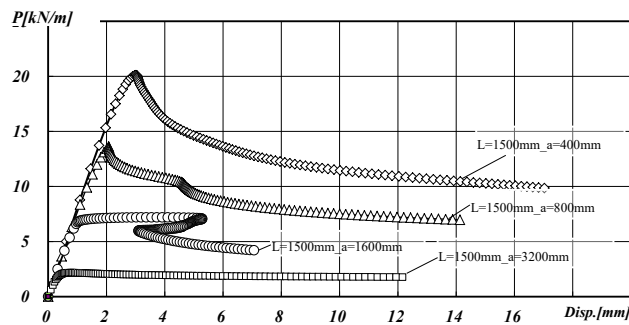


図 A5.3.16 荷重変位関係

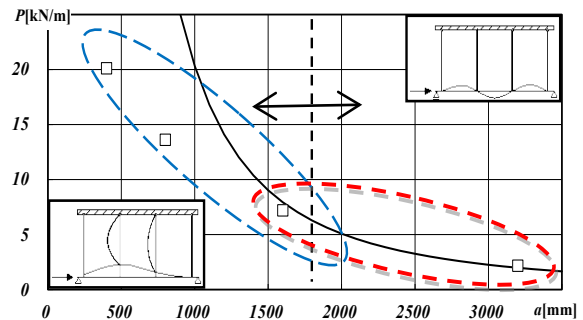


図 A5.3.17 天井面の圧縮耐力と吊りボルト間隔の関係

(3) 振れ止めが天井面の最大耐力に与える影響

吊りボルトの長さおよび吊りボルト間隔をパラメータとした解析を行い、吊りボルトの耐力が天井面の最大耐力を決定づける要因になりうるということが明らかとなった。しかし、天井面の最大耐力に影響を及ぼす要素が吊りボルトの軸剛性か座屈荷重なのかは定かではない。そこで、ブレースと水平振れ止めを設置した天井について解析を行うことで、吊りボルトの軸剛性と座屈耐力のどちらが影響を与えるのか検証していく。ブレースや水平振れ止めを設置することによって、吊りボルトの軸剛性は変化しないが、吊りボルトの座屈長さが変化する。図 A5.3.18 にブレース、水平振れ止めの設置位置を示す。破線がブレース、水平振れ止めを設置した構面である。端部からそれぞれ2列目の吊りボルトが、天井面の最大耐力に達する際に座屈するため、この列を重点的に補剛することを考えた。図 A5.3.19 に荷重変位関係を示す。ブレースと水平振れ止めが設置されたことにより天井面の最大耐力が向上し、吊りボルトの長さが半分の 1500mm の最大耐力に相当する耐力にまで向上している。図 A5.3.20 に天井面軸方向変位と吊りボルトの軸力との関係を示す。天井面が最大耐力に達した時に吊りボルトの荷重が最大となり、座屈が発生していることがわかる。また、座屈耐力がブレース、水平振れ止めがないモデルの耐力の約 4 倍となっていることから、ブレースや水平振れ止めによる座屈補剛により、吊りボルトの座屈波長が 1/2 になっていることを示している。次に、図 A5.3.18 に示す点 A,B の面外変位と水平変位との関係を図

A5.3.21 に示す。天井面の耐力が最大値に達した時 A 点、B 点の面外変形が急激に生じていることがわかる。これは図 A5.3.20 の吊りボルトの軸力と照合すると、天井面の面外変形により吊りボルトに軸力が生じ、吊りボルトが座屈しているためである。したがって、天井面の最大耐力は吊りボルトの座屈耐力によるものであることが再確認された。

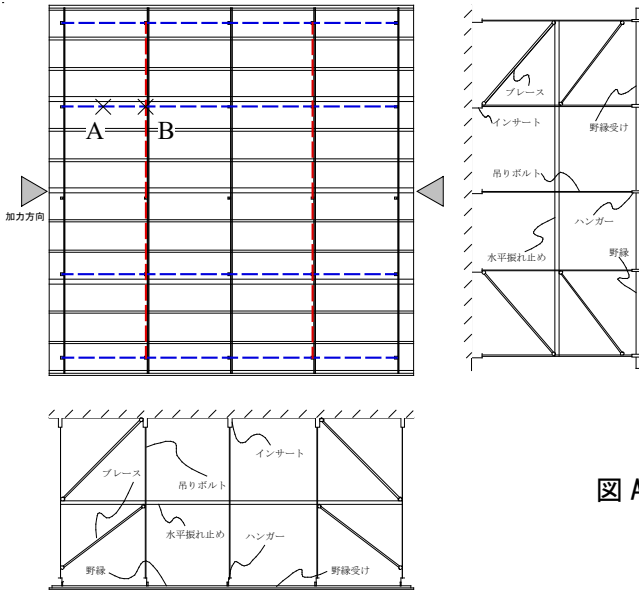


図 A5.3.18 振れ止めの配置

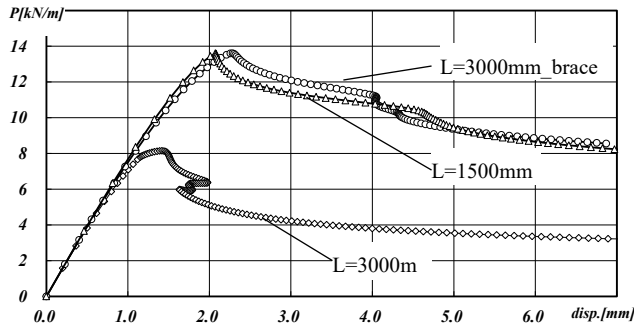


図 A5.3.19 荷重変位関係

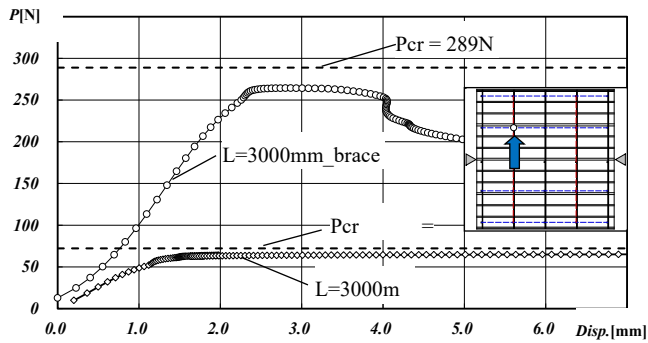


図 A5.3.20 吊りボルト軸力-変位関係

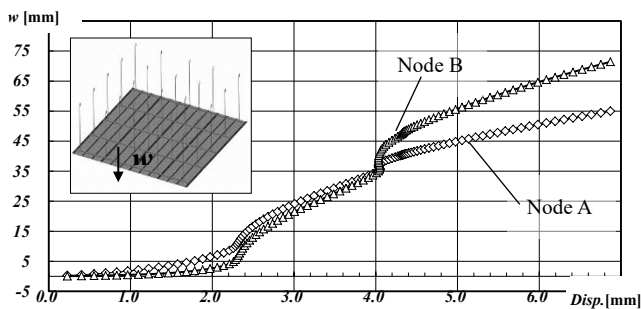


図 A5.3.21 面外変位-変位関係

5章 付録 参考文献

- A5.1) (社)鋼材倶楽部 中低層鋼構造骨組耐震性研究委員会編：中低層鉄骨建物の耐震設計法、pp.477-478、技報堂出版、昭和 58 年
- A5.2) 脇山善夫、ほか：学校体育館の振動特性調査、日本建築学会技術報告集、第 16 巻、第 32 号、pp.91-96、平成 22 年 2 月
- A5.3) 岩田善裕、ほか：つくば市にある体育館の振動特性調査（その 1）～（その 3）、日本地震工学会大会－2011 梗概集、pp.314-319、平成 23 年 11 月
- A5.4) 国土交通省：芸予地震被害調査報告の送付について（技術的助言）、平成 13 年 6 月
- A5.5) 船積宏彰、元結正次郎、仁科雄太郎、中本康、豊嶋学、吉川昇、相原正史：在来工法による鋼製下地天井の力学的特性に関する研究 その 1：天井各構成部位の力学的特性、その 2：天井システムの力学的特性、日本建築学会大会梗概集, B-1 分冊, p.911-912、p.913-914、平成 17 年 9 月

6. まとめと今後の課題

6. 1 まとめ

各章において検討した内容について、それぞれ以下にまとめる。

- (1) 2章では、東日本大震災と過去の地震における天井の脱落被害について、アンケート調査、文献調査、現地被害調査により検討した。現地調査を行った事例の被害状況等を踏まえて、耐震対策を考える上で着目すべき項目として以下を抽出した。

天井の形状：山形架構の屋根に平行な天井

天井の箇所：端部、段差部・折れ曲がり部、エキスパンションジョイント部

下地の構成・配置：斜め部材の配置のバランスと量、接合部（金物、溶接）の外れ、ダクト等による吊りボルトの不足

部材単体：クリップの外れ、ハンガーの開き

なお、アンケート調査では無被害のものまで調査していないため技術的助言の効果を十分に確認できていないことと、現地調査では対象数が限られ統計的に意味のある結果は得られないことから、調査範囲では技術的助言への対応と地震被害との明確な関係は確認されなかった。

- (2) 3章では、天井の耐震対策の適用範囲について検討した。検討にあたっては、脱落した天井が人身に与える危害を重視し、天井単位質量、面積（室面積、天井面積）、天井高さ、の3つの指標を用いた。また、室面積と天井高さを指標として用い、空間の具体的な利用のイメージも含めて適用範囲の閾値を検討した。閾値の設定方法として4つの方法を検討した中で、天井高さ、室面積について単一の閾値を設定する方法が設計活動の中で適用する際の容易さという点でも最も実用的な適用範囲の設定方法である。室面積については200 m²以上から500 m²以上の間、天井高さについては6m以上から10m以上の間でそれぞれ閾値を設けるのが適当と考えられる。

- (3) 4章では、天井の耐震的な仕様について在来工法による天井（天井単位面積質量が20kg/m²以下のもの）を対象に、耐久性に関する仕様、長期荷重、地震荷重に対する仕様（鉛直方向の荷重の負担、水平方向の慣性力の負担、天井の縁切り）、フェイルセーフの仕様について検討した。基準に反映するにあたっては今後検討すべき点が残っており、それらを整理して次節で示す。

(4) 5章では、吊り天井の耐震性に関する計算方法を検討した。5.1節では多層建築物（ビルもの）や体育館等を対象に、吊り元の揺れを比較的簡易に評価する方法を提案した。5.2節では許容応力度設計を想定して、在来工法天井の固有周期や許容耐力を検討した。これらの検討は大きな地震動下における吊り天井の安全性を直接的に保証するものではないが、許容耐力を超えた後の地震時挙動を5.3節で補足的に検討した。成果をまとめると次のようになる。

1) 吊り天井の許容応力度設計を前提とし、構造躯体が弾性に留まることを条件として、特に躯体と吊り天井との共振に配慮した吊り元の揺れ（床応答スペクトル）の評価方法として次の(a)～(c)を提案した。

(a)スペクトル法：固有値解析の利用を前提として、構造躯体の形状等によらず、上下応答を含む揺れを評価できる方法

(b)簡易スペクトル法：多層建築物の代表的な振動特性を予め設定することにより、(a)の水平の揺れを簡易に評価できる方法

(c)震度法：(b)をさらに簡略化した水平震度による方法

建築基準法の稀に発生する地震動（稀地震動）を入力としてこれらの方法を適用すると、構造躯体との共振が起こりうる場合には、吊り天井の水平震度は最大で2.2程度となることを示した。

2) 在来工法天井を対象として、計算に用いる周期と耐力について検討した。吊りボルト間にブレースを設ける場合には、周期は0.2～0.6秒程度となり、クリップの滑りで決定される許容耐力は水平震度で1前後が上限になることを示した。1)による吊り元の揺れを考慮すれば、構造躯体との共振のおそれがある場合には、ブレース周辺のクリップを強化するような金具等を使うか、ブレースの下側を天井面等に取り付ける工夫が必要になることを指摘した。

3) 構造躯体が塑性化しうるような大きな地震動レベルの下で、許容耐力を超える吊り天井の地震時挙動を補足的に検討した。数値解析結果によれば、構造躯体の1次固有周期よりも短い周期を持つ吊り天井について、著しい損傷を防ぐためには、稀地震動を基に(1)により要求される耐力よりもやや大きめ耐力を付与すべきであることが示唆された。また、既往の吊り天井の実験結果によれば、許容耐力に比べ最大耐力はかなり大きくなることや、一定の非線形繰り返し挙動には耐えられることから、稀地震動を超えるレベルの地震動に対して弾性限を超えても即座に落下するわけではなく、一定の安全性は担保されうると考えられた。

今後の課題については、次節に示す。

6. 2 今後の課題^{註)}

4章で検討した天井の耐震的な仕様に関しては、次の表に示すような課題が残されている。

表 6-1 天井の耐震的な仕様に関する今後の課題

	基準化に向けて必要なこと (行政判断を含む、さらなる整理や微修正を必要とするもの)	基準の運用に向けて必要なこと (技術的検討を要するもの)	今後の研究課題として取り組むべきもの (相当の技術的検討を要するもの)
①対象とする範囲	<ul style="list-style-type: none"> システム天井の扱い 対象とする範囲より重い天井の扱い 		
②耐久性			
③吊り天井の仕様 (仕様1)	吊り天井の鉛直方向の荷重の負担(長期荷重に対して)	<ul style="list-style-type: none"> JIS A6517に規定する材料以外の材料の扱い 在来工法による天井以外の吊りボルト設置間隔 	<ul style="list-style-type: none"> 水平な天井以外の仕様の検討 ダクト等で吊りボルトを設置できない場合の補剛
	吊り天井の鉛直方向の荷重の負担(地震荷重に対して)		<ul style="list-style-type: none"> 水平な天井以外の仕様の検討 実験による耐力確認方法の検討 上下振動が無視できない場合の仕様の考え方
	地震時の水平方向の慣性力の負担	<ul style="list-style-type: none"> 建物の高さ方向の中での位置(何階か)により異なる仕様の設定の有無と程度 	<ul style="list-style-type: none"> 水平な天井以外の仕様の検討 斜め部材について例示する仕様の追加 斜め部材接合部の耐力の確認 耐力要素としての水平振れ止めの仕様の検討
天井の縁切り	<ul style="list-style-type: none"> 設備機器と取り合う箇所耐震に関する考え方の整理(例:許容される損傷の整理) 	<ul style="list-style-type: none"> 水平な天井以外の仕様の検討 天井周辺部、段差部、設備機器周辺等の衝撃、変位を受ける箇所の剛性の確認方法の検討 	<ul style="list-style-type: none"> 大きな天井等を切り分ける面積(質量)の閾値の検討
④フェイルセーフ (仕様2)		<ul style="list-style-type: none"> 仕様の例示 	<ul style="list-style-type: none"> 実験による耐力確認方法の検討
その他	<ul style="list-style-type: none"> 周囲との衝突・損傷 	<ul style="list-style-type: none"> 壁に慣性力を負担させる場合の検討 	

註)本項「今後の課題」は平成23年度時点で抽出された課題である。その後の技術的検討・行政判断等については「6. 3 追補」を参照されたい。

5章で検討した計算方法に関しては、次の表に示すような課題が残されている。

表 6.2 計算に関する今後の課題

		基準化に向けて必要なこと（行政的判断を含む、さらなる整理や微修正を必要とするもの）	基準の運用に向けて必要なこと（技術的検討を要するもの）	今後の研究課題として取り組むべきもの（相当の技術的検討を要するもの）
① 吊り元の揺れの評価	(a) スペクトル法	<ul style="list-style-type: none"> 関数 R のピーク付近に周期幅（±0.1 秒）を設定 	<ul style="list-style-type: none"> 経験式として得た関数 R の理論的補足説明（共振曲線との比較等） 	
	(b) 簡易スペクトル法	<ul style="list-style-type: none"> 長周期側の設定 「上層階」等の区分の明確化（吹き抜けの場合を含む。） 低層（短周期）の場合の周期帯及び低減係数設定 		<ul style="list-style-type: none"> 上下応答
	(c) 震度法			<ul style="list-style-type: none"> 上下応答
	(d) その他全般	<ul style="list-style-type: none"> 外力の小さい短周期側や下層階の判断（下限値の設定など） 躯体（構造種別等）や天井の周期の計算精度を考えた調整 上下振動が無視できない場合の計算方法等の指定 他の基規準との外力の比較（BCJ ガイドライン、AIJ 非構造、設備耐震、懸垂物指針、海外の関連基規準、など） 躯体の構造計算とのバランス検討（構造計算と(a)~(c)の組合せ） 	<ul style="list-style-type: none"> 上下振動が無視できない場合の判断基準 クリアランス・衝突関係の考え方の整理 告示免震（AIJ 指針を参照） 	<ul style="list-style-type: none"> 仕様規定で求めるクリアランスとの対応（計算方法の検討） クリアランス・衝突関係の計算方法 地震動の継続時間と多数繰返し応答
② 天井の周期・耐力	<ul style="list-style-type: none"> 許容耐力の位置付けの整理（実験的検討の余地） 	<ul style="list-style-type: none"> 斜め勾配屋根に平行な吊り天井でブレースや吊りボルトの座屈で決まる耐力の評価 不静定となる組み方や施工手順に対応した初期軸力の影響 吊り長さが長い場合の周期や耐力 クリアランス、衝突関係の考え方の整理 	<ul style="list-style-type: none"> 許容耐力を決定するための試験法の整備 吊り元の上下応答に対する周期や耐力 地震動の継続時間と多数繰返し応答に対する耐力 システム天井（面内剛性のない吊り天井）のモデル化及びクライテリアの設定 クリアランス・衝突関係の許容耐力の設定 	
③ 全体のまとめ	<ul style="list-style-type: none"> 常時（長期）荷重の位置付け 計算の前提条件を満足するために必要な規定の整理 例題（事例）の作成（設計手順が分かるように。Sd=一定としての設計を含む。） システム天井の考え方の整理 時刻歴の大臣認定、告示免震、エネルギー法での要求内容 	<ul style="list-style-type: none"> 被害例との対応 既往の実験結果等による妥当性の検証 	<ul style="list-style-type: none"> 剛性率・偏心率等による構造躯体（及び天井）の不整形の考慮 多点入力 	

4章で行った天井の耐震的な仕様の検討と5章で行った吊り天井の耐震性に関する計算方法を踏まえて天井の耐震対策の検討を行うことを考えた場合、共通の課題として以下のようなものも挙げられる。

- ・現在使われている仕様、設計・施工・製造等の関係主体の役割分担や実務の実態、関係団体等の意見等を把握し、それらを踏まえて今回検討した内容をレビューし、必要に応じて内容を追記する必要がある。
- ・吊り天井の耐震性の検討において、特殊検証ルート的位置付け等を明確にする必要がある。
- ・今後新たに開発・提案される仕様に対しては、必要に応じて技術的検討を行い、適宜内容を追加する必要がある。また、新たな仕様を基準の中でどのように扱うか（基準改正で取り込む、ただし書きで運用する、計算・特殊検証ルートで扱う等）について考え方を整理する必要もある。

6. 3 追補

本資料を踏まえた技術検討等の展開と成果

本資料は、平成 23 年度建築基準整備促進事業での検討¹⁾の内容を記録として残して共有するため、当該事業の報告書を基にまとめたものである。報告書はこれまでも国土交通省等で技術的資料として活用されてきたほか、平成 24 年以降にも基準化に向けた様々な検討が実施され、本資料 6 章で記載されていた平成 23 年度末時点での課題の多くは技術的・行政的な追加検討を経て²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾⁸⁾⁹⁾、対処がなされた¹⁰⁾¹¹⁾。

本資料が上記基準等の策定の背景を理解する一助になると共に、今後の天井の耐震性を検討する上での参考資料となることを期待する。

参考文献・URL（平成 30 年度時点での関係基準等）

- 1) 平成 23 年度建築基準整備促進事業 成果概要一覧 41 地震被害を踏まえた非構造部材の基準の整備に資する検討、平成 24 年 4 月
http://www.mlit.go.jp/jutakukentiku/build/jutakukentiku_house_fr_000047.html
- 2) 建築構造基準委員会 第 4 回、第 5 回、第 6 回
<http://www.nilim.go.jp/lab/hbg/iinkai/iinkai.htm>
- 3) 国土交通省住宅局建築指導課、ほか：「建築物における天井脱落対策試案」に関するご意見募集について、平成 24 年 7 月
http://www.mlit.go.jp/report/press/house05_hh_000332.html
- 4) 国土交通省住宅局建築指導課：建築基準法施行令及び関連省令並びに関連告示の制定・一部改正案に関するご意見募集について、平成 25 年 2 月
http://www.mlit.go.jp/report/press/house05_hh_000387.html
- 5) 建築基準法施行令及び関係省令の一部改正案に関するパブリックコメントの募集の結果について（e-Gov ウェブサイト (<https://www.e-gov.go.jp/>))、平成 25 年 7 月
<http://search.e-gov.go.jp/servlet/Public?CLASSNAME=PCMMSTDETAIL&id=155130705&Mode=2>
（平成 31 年 3 月 26 日に閲覧）
- 6) 安全上重要である天井及び天井の構造耐力上安全な構造方法を定める件等を制定・一部改正する告示案に関するパブリックコメントの募集の結果について（e-Gov ウェブサイト (<https://www.e-gov.go.jp/>))、平成 25 年 8 月
<http://search.e-gov.go.jp/servlet/Public?CLASSNAME=PCMMSTDETAIL&id=155130706&Mode=2>
（平成 31 年 3 月 26 日に閲覧）
- 7) 国土交通省住宅局建築指導課：建築基準法施行令の一部を改正する政令について、平成 25 年 7 月
http://www.mlit.go.jp/report/press/house05_hh_000414.html
- 8) 特定天井及び特定天井の構造耐力上安全な構造方法を定める件の一部を改正する告示案に関する意見募集について（e-Gov ウェブサイト (<https://www.e-gov.go.jp/>))、平成 28 年 3 月
<https://search.e-gov.go.jp/servlet/Public?CLASSNAME=PCMMSTDETAIL&id=155160714&Mode=0&fromPCMMSTDETAIL=true>（平成 31 年 3 月 26 日に閲覧）
- 9) 特定天井及び特定天井の構造耐力上安全な構造方法を定める件の一部を改正する告示案に関するパブリックコメントの募集の結果について（e-Gov ウェブサイト (<https://www.e-gov.go.jp/>))、

平成 28 年 5 月

<https://search.e-gov.go.jp/servlet/Public?CLASSNAME=PCMMSTDETAIL&id=155160714&Mode=2>

(平成 31 年 3 月 26 日に閲覧)

- 10) 平成 25 年国土交通省告示第 771 号：特定天井及び特定天井の構造耐力上安全な構造方法等を定める件、平成 25 年 8 月（制定）、平成 28 年 5 月（一部改正）
- 11) 国土交通省国土技術政策総合研究所、ほか：建築物における天井脱落対策に係る技術基準の解説、平成 25 年 10 月、平成 28 年 7 月（追加）

<https://www.seinokyo.jp/tenjou/mokuji/>

6. まとめと今後の課題

© 建築研究資料 第 193 号

平成 31 年 3 月 印刷・発行
編集・発行 国立研究開発法人建築研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは下記まで
国立研究開発法人建築研究所企画部企画調査課
〒305-0802 茨城県つくば市立原 1 番地
電話 (029) 864-2151(代)