

第3章 免震建築物の地震応答特性の検討

3-1 目的と検討方法

(1) 目的

告示 2009 号第 6 は、免震建築物の構造計算を規定している。条件によっては、告示 2009 号第 6 により算出した設計用地震層せん断力係数は、時刻歴応答解析結果から求めた最大層せん断力係数との間に乖離が見られることも指摘されている。

ここでは、2-3 節での免震建築物実情調査結果を踏まえ、上部構造および免震部材の解析モデルとその諸元・パラメータを設定し、地震応答解析を実施する。この結果と告示 2009 号第 6 による計算結果を比較することにより、入力地震動特性と対応する上部構造の設計用地震層せん断力係数算出法の検討を行う。

(2) 検討方法

免震建築物の設計用地震層せん断力係数の提案を行うために、まず建物の振動モデルを設定して地震応答解析を行い、現行法の告示 2009 号による方法との比較を行う。さらにこの結果を分析して、層せん断力係数の合理的設定法の提案につなげる。また、建物全体としての転倒モーメントについても検討する。

検討用の振動モデルとしては、高さ 60m までの免震建築物の諸特性をほぼカバーできるように上部構造として 7 階建てと 14 階建ての 2 種類を基本モデルとして設定し、それぞれ剛性のパラメータを 3 種類設定する。免震層の特性はバイリニア型の復元力特性を有するものとし、この特性値パラメータを変えたモデルを設定する。いずれも建物各層の質量を集約化した質点をせん断型ばねでつないだ形のモデルとする。検討用の入力地震動は、平成 12 年建設省告示第 1461 号（以下、1461 号）により規定されたスペクトル特性を有する地震動（第四号イに示す「極めて稀に発生する地震動」の解放工学的基盤における減衰定数 5%の加速度応答スペクトルに適合し、かつ表層地盤の増幅特性を考慮して作成された模擬地震動）として複数設定する。

上記モデルでの応答解析結果を基に、解析パラメータと応答値との対応関係を分析する。また、免震層に粘性減衰が加わった場合の応答解析も実施し、粘性減衰の影響も考察する。

これに加えて、建物モデルとして 3 層、5 層、20 層のモデル、および入力地震動として実観測波も加えて条件の幅を広げ、告示 1461 号の地震動における地震応答解析結果の比較を行う。

さらに、建物全体としての転倒モーメントの最大値について、各層の最大層せん断力から算出した転倒モーメントと比較考察する。

3-2 解析パラメータの設定

(1) 解析モデル

ここでは、免震建築物の解析モデルを作成する。上部構造には7層と14層のモデルを検討用の基本モデルとして設定した。上部構造7層モデルを例にして、概要を図3.2-1に示す。各階の階高は3.5mとし、基礎固定時の周期は $T_0=\eta H$ ($H(=3.5\text{m}\times\text{階数})$ は建物高さ、 $\eta=0.02, 0.03, 0.04$)となるように各層の剛性を設定した。なお、各層の質量は一定とし、剛性分布は最上層で0.4、最下層で1.0となる台形分布を仮定した。また、基礎固定時の1次固有周期に対して、減衰定数 $h=0.02$ (または、 $h=0.03$)となる粘性減衰を剛性比例型で設定した。免震層には、図3.2-2に示す線形弾性要素と完全弾塑性要素を並列に設定し、質量は上部構造の各階と同一とした。線形弾性要素については、上部構造剛体時の弾性接線周期が T_2 となるように剛性 k_0 を設定した。また、完全弾塑性要素については、降伏せん断力係数 $\alpha_y=F_y/W$ (F_y :降伏せん断力、 W :地上部建物総重量)を4ケース(0.03、0.05、0.07、0.10)設定した。なお、各降伏せん断力係数に対して、それぞれ降伏変位 d_c を0.1cm、1cm、3cmの3ケース設定している。

作成した解析モデルのパラメータをまとめて表3.2-1に示す。各パラメータの組み合わせにより、作成した解析モデルは $2\times 3\times 2\times 3\times 4\times 3=432$ ケースである。

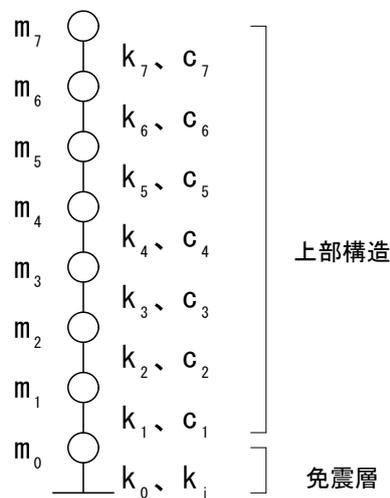


図 3.2-1 解析モデルの概要 (上部構造7層モデルの例)

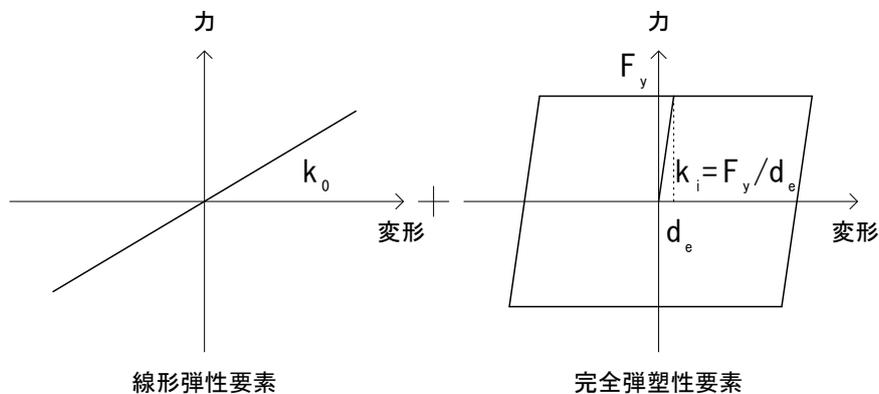


図 3.2-2 免震層の復元力モデル

表 3.2-1 解析パラメーター一覧

上部構造に関するパラメータ	
上部構造の階数 n	7層、14層 の2ケース
基礎固定時の上部構造の1次固有周期 $T_0 = \eta H$ (H : 建物高さ)	$\eta = 0.02, 0.03, 0.04$ の3ケース
基礎固定時の上部構造の1次モード減衰定数 h	2%、3% の2ケース
免震層に関するパラメータ	
線形弾性要素	
上部構造剛体時の弾性接線周期 T_2	2.5秒、4.0秒、6.0秒 の3ケース
完全弾塑性要素	
降伏せん断力係数 $\alpha_y = F_y / W$ (F_y : 降伏せん断力、 W : 地上部建物総重量)	$\alpha_y = 0.03, 0.05, 0.70, 0.10$ の4ケース
降伏変位 d_e	0.1cm、1cm、3cm の3ケース

(2) 入力地震動

入力地震動は、告示 1461 号で設定された解放工学的基盤での地震動に表層地盤の増幅特性を考慮して作成された模擬地震動とした。表層地盤の増幅特性は、限界耐力計算にて算出する表層地盤による加速度の増幅率 G_s として算出する。地震動の作成方法は正弦波合成法であり、目標とするスペクトルは上述の解放工学的基盤の加速度応答スペクトルに G_s を乗じた加速度応答スペクトルである。

表層地盤の増幅特性 G_s は以下の 3 ケースとした。

- ①：周期によらず $G_s=1.23$ 一定
- ②：第 2 種地盤の実地盤の PS 検層結果から算出した G_s
- ③：②と異なる第 2 種地盤の実地盤の PS 検層結果から算出した G_s

上記②及び③の表層地盤モデルと G_s の計算結果を表 3.2-2 に示す。上記②および③の表層地盤に対する G_s の算出は、平成 12 年建設省告示第 1457 号（以下、告示 1457 号）第 10 第 2 項（平成 19 年の改正版）に則る。上記告示 1457 号に基づく手法では、表層地盤のせん断ひずみを求める必要がある。ここでは表に示す物性値より多層表層地盤を多質点系に置換し、1 次モード分布から各層のせん断ひずみを求め、せん断ひずみによる剛性及び減衰定数の変化を質点系モデルへ反映し、1 次固有周期が収斂するまで繰り返すことにより算出している。地盤のせん断ひずみに対する非線形特性は、HD モデルで表せることとし、HD モデルのパラメータを規定する $\gamma_{0.5}$ ($G/Go=0.5$ でのせん断ひずみ) と最大減衰定数 h_{max} は東京、神奈川、大阪エリアを総合した全試験結果にもとづいた値⁹⁾を採用している。また各ケースとも G_s の最小値は平成 19 年の告示 1457 号に準じ 1.23 としており、地盤①のケースにおける G_s の一定値 1.23 はこれに基づくものである。

各表層地盤の G_s を図 3.2-3 に示す。表層地盤②の G_s は 0.5 秒にピークを有し、表層地盤③の G_s は 1.2 秒にピークを有する。②および③の表層地盤は、いずれも第 2 種地盤であるが、②は比較的短周期側、③は比較的長周期側に卓越周期を有する地盤である。

上記の 3 種類の表層地盤に対して得られる目標加速度応答スペクトルに対して、それぞれ入力地震動を作成した。目標加速度応答スペクトル G_sSa を図 3.2-4 に示す。それぞれのスペクトルに対して 3 波作成し、得られた波形は計 9 波である。波形作成におけるフィッティングの周期範囲は 0.02~10 秒とし、継続時間は 120 秒、位相特性は一様乱数、包絡特性は「日本建築センター指針（案）レベル 2 120 秒」に依った。

作成した入力地震動の加速度応答スペクトルおよび加速度時刻歴波形を図 3.2-5~図 3.2-7 に示す。また入力地震動の加速度、速度、変位の最大値を表 3.2-3 に示す。

表 3.2-2 PS 検層結果に基づいた地盤モデルと Gs 算出結果

(a) 地盤例②の場合

表層地盤					工学的基盤		
層i	層厚 [m]	土質	湿潤密度 ρ [t/m ³]	S波速度 V_s [m/s]	ρ	V_s	
1	6.5	砂質土	1.65	160	1.9	420	[t/m ³] [m/s]
2	5.5	粘性土	1.65	160	ポアソン比	0.469	
3	3.65	粘性土	1.7	250	卓越周期T1,T2 増幅率Gs1,Gs2		
4	5	砂質土	1.8	340	損傷	安全	
					T1	0.409	0.510 [sec]
					T2	0.136	0.170 [sec]
					Gs1	1.972	1.908
					Gs2	1.506	1.131

(b) 地盤例③の場合

表層地盤					工学的基盤		
層i	層厚 [m]	土質	湿潤密度 ρ [t/m ³]	S波速度 V_s [m/s]	ρ	V_s	
1	1.6	粘性土	1.8	130	1.9	550	[t/m ³] [m/s]
2	1.1	砂質土	1.6	130	ポアソン比	0.447	
3	1.9	粘性土	1.8	160	卓越周期T1,T2 増幅率Gs1,Gs2		
4	8.4	砂質土	1.6	120	損傷	安全	
5	1	粘性土	1.8	120	T1	0.954	1.211 [sec]
6	8.8	砂質土	1.6	135	T2	0.318	0.404 [sec]
					Gs1	2.916	2.449
					Gs2	1.372	1.011

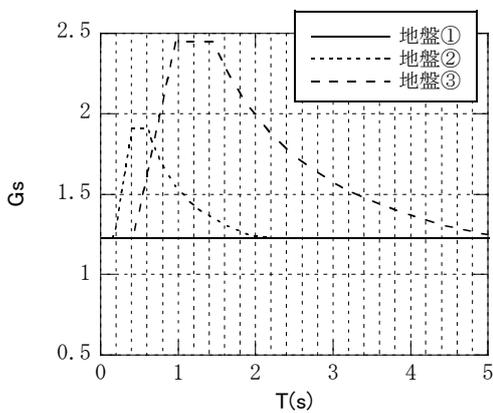


図 3.2-3 表層地盤の増幅率 Gs

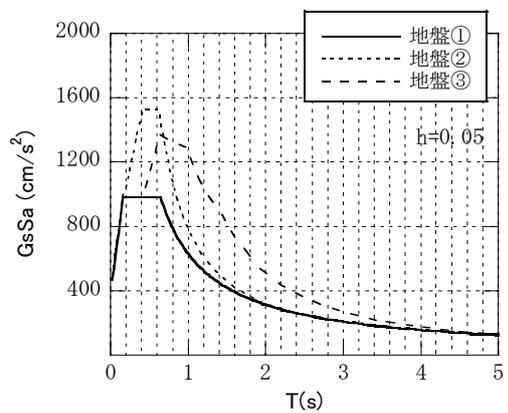
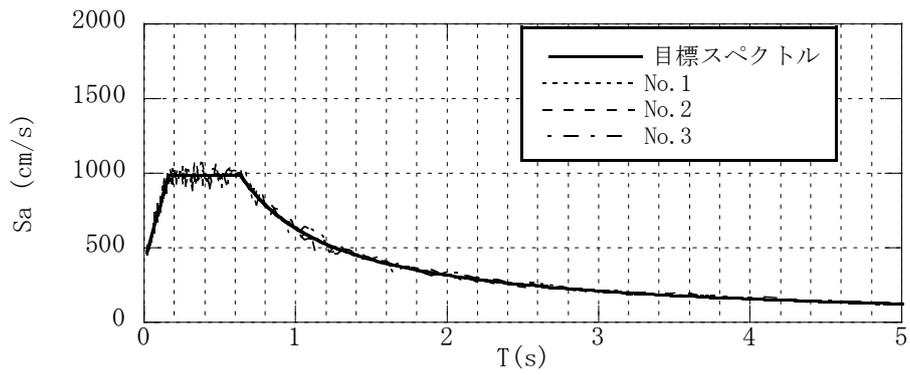
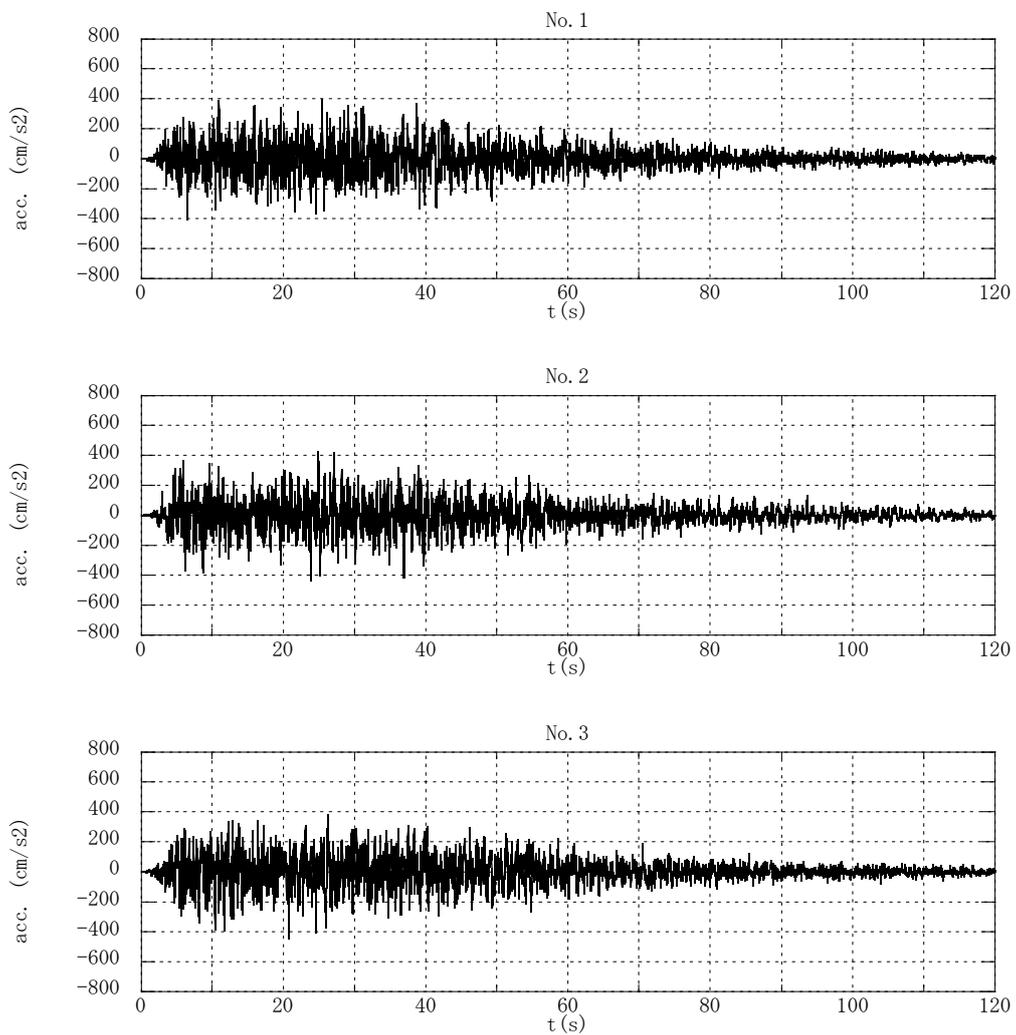


図 3.2-4 目標加速度応答スペクトル GsSa

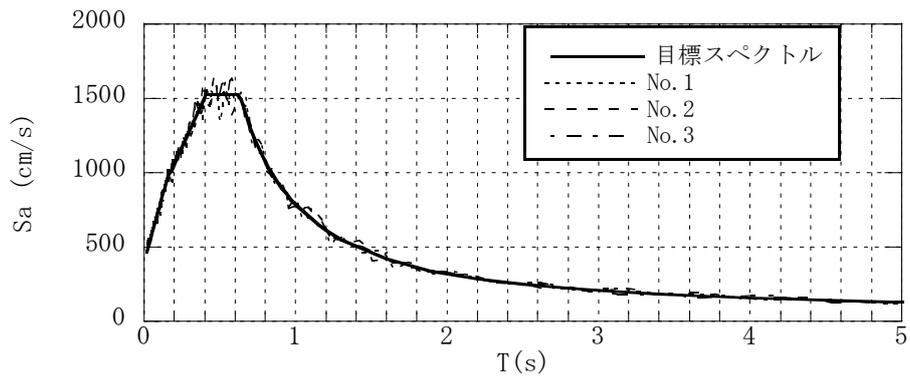


(a) 加速度応答スペクトル($h=0.05$)

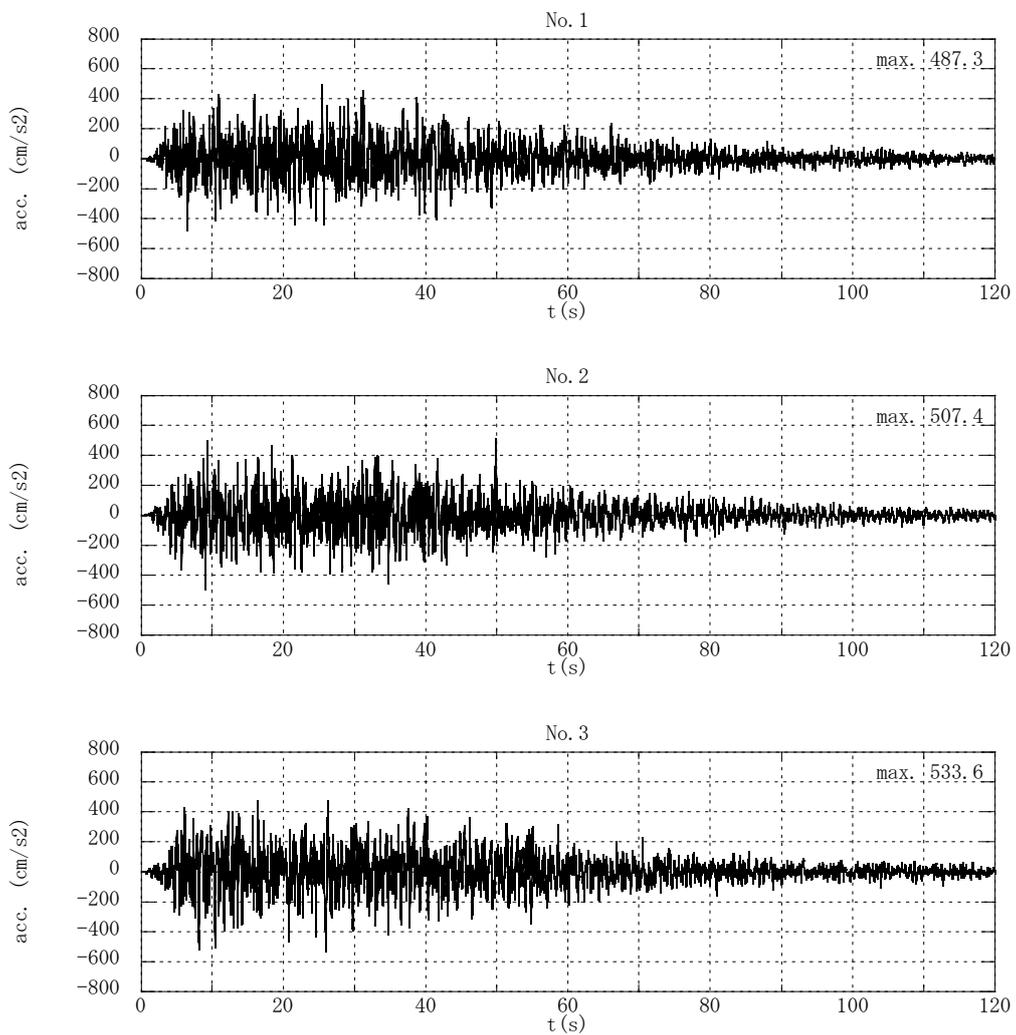


(b) 加速度時刻歴波形

図 3.2-5 地盤① ($G_s=1.23$ 一定) の特性を基に作成した模擬地震動

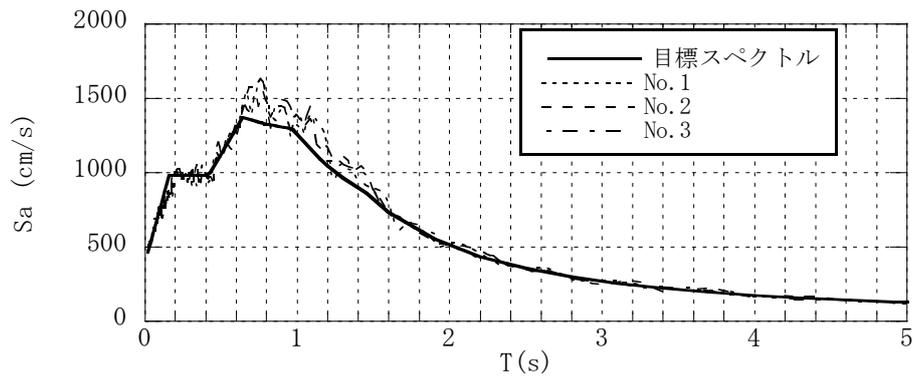


(a) 加速度応答スペクトル($h=0.05$)

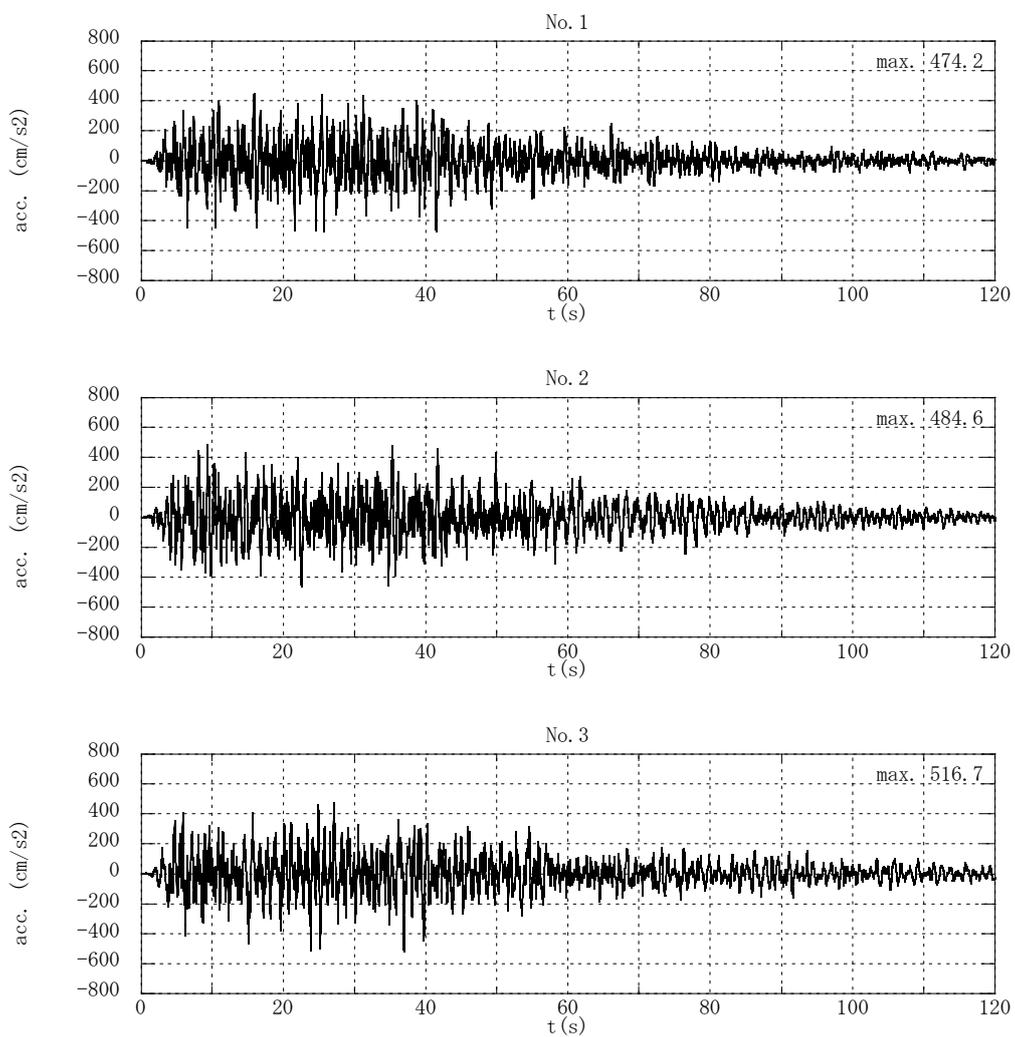


(b) 加速度時刻歴波形

図 3.2-6 地盤② (2種地盤卓越周期 (短)) の特性を基に作成した模擬地震動



(a) 加速度応答スペクトル($h=0.05$)



(b) 加速度時刻歴波形

図 3.2-7 地盤③ (2種地盤卓越周期:長) の特性を基に作成した模擬地震動

表 3.2-3 入力地震動の最大値

表層地盤	波形 No.	最大加速度 (cm/s ²)	最大速度 (cm/s)	最大変位 (cm)
地盤① (Gs=1.23)	1	403.8	49.8	37.5
	2	440.7	60.6	33.8
	3	443.5	54.5	34.3
地盤② (第2種地盤 卓越周期(短))	1	487.3	59.3	38.6
	2	507.4	65.4	26.0
	3	533.6	68.3	35.1
地盤③ (第2種地盤 卓越周期(長))	1	474.2	73.5	39.8
	2	484.6	82.1	28.1
	3	516.7	81.1	37.2

(3) 告示 2009 号による計算について

告示 2009 号第 6 による上部構造の設計用地震層せん断力係数は、免震層の応答値から計算する。同告示の免震層の応答評価は、図 3.2-8 に示すように等価線形化手法による応答スペクトルを用いるもので、一般建築物の限界耐力計算で用いる手法と同一である。免震建築物の場合は上部構造を剛体 1 質点と仮定し、免震層の特性をばねとダッシュポットからなる等価 1 自由度系にモデル化した耐力曲線を用いる。免震層の耐力曲線上において、設計限界変位 δ_s の点を通る等価剛性による固有周期 T とその時の減衰定数 h_d にて低減された応答スペクトルの交点が、応答値 δ (基準変位) である。ここでは、最初に仮定した設計限界変位 δ_s が応答値である基準変位 δ と一致するように収束計算を実施し、免震層の応答を評価している。ここでの検討では、免震層の応答変位を算出するにあたり、不測の偏心などを念頭においた免震層外縁部の免震材料の応答変位を評価するために乗じる係数 1.1 は考慮するが、変形増大率 α (材料の剛性や減衰の変動による応答の変動を考慮する係数) は 1.0 とし、これを考慮しない。また、上部構造の設計用地震層せん断力算出にあたり、免震材料のばらつき、環境温度変化および経年変化の影響を考慮する係数 γ は、1.0 としている。表層地盤の増幅特性 G_s は、「3-2(2) 入力地震動」において地震動を作成した際に用いた G_s と同一の値とした。告示 2009 号第 6 に基づいた上部構造の設計用地震層せん断力より求めた、免震層がバイリニア特性を有する場合の設計用地震層せん断力係数の例を図 3.2-9 に示す。告示 2009 号の設計用地震層せん断力係数の分布は、免震層に作用する層せん断力のうち、支承材 (弾塑性系の減衰材と同等の減衰特性を有する部分を除く) 及び復元力のせん断力には高さ方向の増幅を考えず、減衰材およびこれと同等の減衰特性を有する支承材の部分のせん断力に A_i 分布 (固有周期は免震層固定時の上部構造 1 次固有周期を用いる。) による増幅を考える。

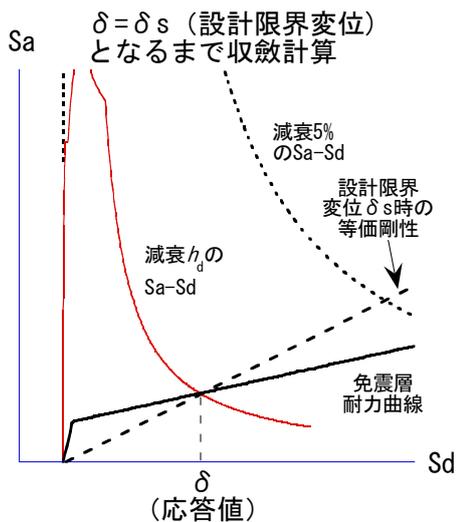


図 3.2-8 免震層の応答評価

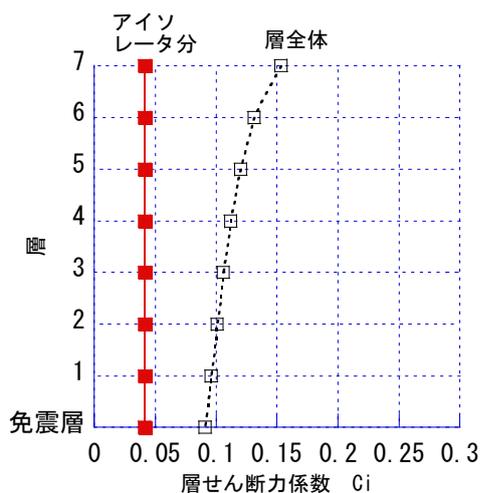


図 3.2-9 設計用地震層せん断力係数の例

3-3 地震応答解析

3-3-1 代表モデルの結果

「3-2(2) 入力地震動」で作成した模擬地震動を入力として、応答解析を実施した。まず、計算例のうち2ケースについて応答波形を含めた応答結果を示す。

ここで示す代表モデルは、上部構造が7層、周期 $T_0=0.03H$ 、減衰定数 $h=2\%$ とし、上部構造剛体時の弾性接線周期 $T_2=4.0s$ のケースとする。ケース1は降伏せん断力係数0.03で降伏変位が3cm、ケース2は降伏せん断力係数0.05で降伏変位が0.1cmのモデルとした。完全弾塑性要素の特性のみ異なる2ケースの応答解析結果の違いについて比較する。なお、入力は「3-2(2) 入力地震動」で作成した②の波で、第2種地盤で卓越周期(短)の実際の地盤例におけるPS検層結果を基に算出したGsを用いて作成した模擬地震動の3波のうちのNo.1である。ここからは「2種地盤卓越周期(短)の特性を基に作成した模擬地震波」と呼称する。

図3.3-1～図3.3-3および図3.3-8～図3.3-10に上部構造最上層7F・中間層4F・最下層1Fの変位・絶対加速度・層せん断力の応答波形をそれぞれ示す。なお、時刻歴の波形は全時間120秒の入力に対する0秒～40秒の範囲を拡大して示したものである。変位に関しては、上部構造では両ケースともほぼ同位相で挙動している。絶対加速度や層せん断力は、時刻歴波形だけを見ても、降伏せん断力係数の高いケース2では高振動数成分が多くなっていることが分かる。また、ケース1では、上部構造においても絶対加速度は200Gal以下であるのに対して、ケース2では400Galを超えている。図3.3-4および図3.3-11は層せん断力のフーリエスペクトル(120秒間の応答波形より算定)であり、ケース1とケース2では傾向が大きく異なっている。ケース2では、上部構造位置において2Hz以上の振動数成分が多く含まれており、これらは完全弾塑性要素の1次剛性が高いことが影響しているものと推察される。

図3.3-5および図3.3-12に転倒モーメントの時刻歴を示す。ケース2の転倒モーメントは、ケース1と比べて3～4割程度大きくなっている。このことから両ケースの層せん断力は大きく異なっていることが確認できる。

免震層の層せん断力-変形関係を図3.3-6および図3.3-13に、層せん断力係数を図3.3-7および図3.3-14に示す。層せん断力係数の図における縦軸の0は、免震層位置を示している。また、実線は地震応答解析による結果、点線は告示計算による結果である。免震層での層せん断力係数は両ケースとも約0.1である。上部構造の頂部と免震層での層せん断力係数を比較すると、ケース1では約2倍、ケース2では4倍以上に増幅しているといえる。上部構造頂部での増幅でみると、両者には倍以上の差が生じていることが分かる。上部構造での増幅の大きいケース2では、地震応答解析結果と告示計算結果との差も大きくなっている。

免震層の完全弾塑性要素の降伏せん断力係数及び降伏変位の設定により、上部構造の増幅傾向が大きく異なることを確認した。

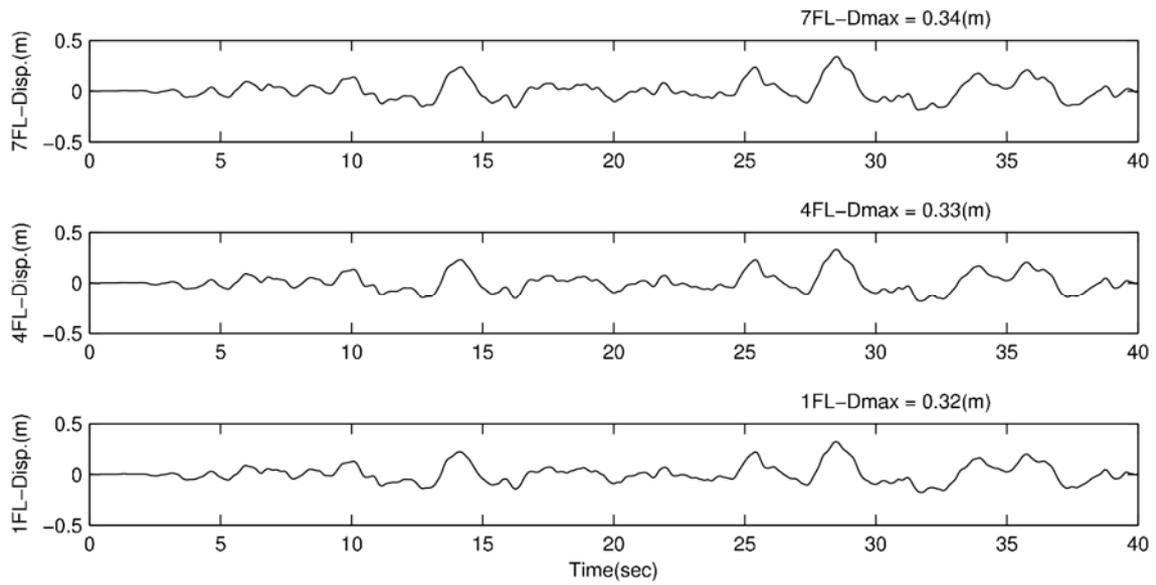


図 3.3-1 ケース 1 (降伏せん断力係数 0.03、降伏変位 3cm) の応答解析結果
変位の時刻歴波形

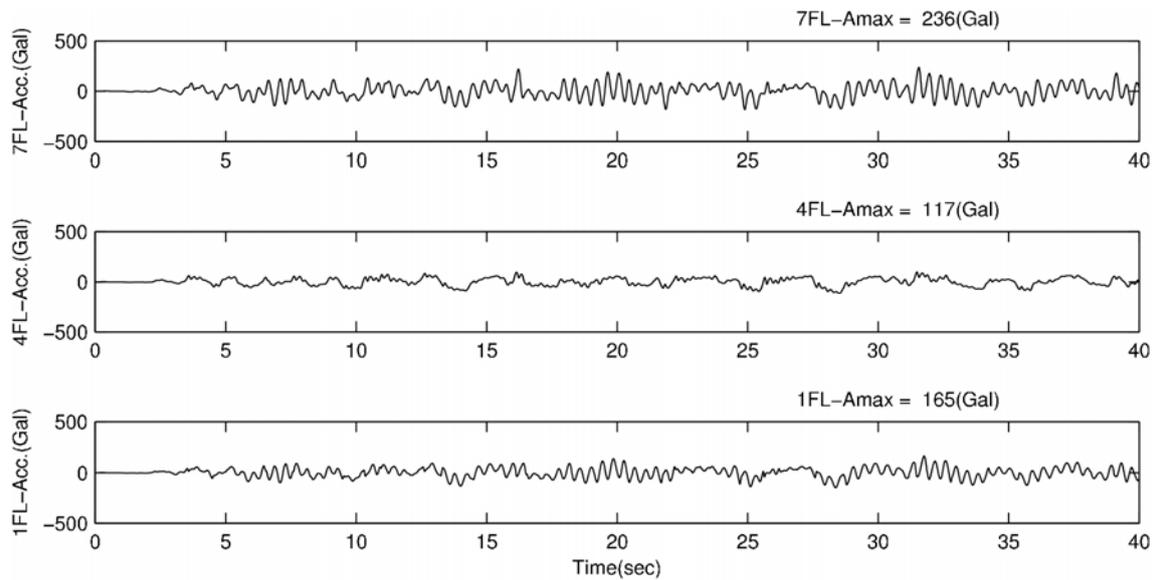


図 3.3-2 ケース 1 (降伏せん断力係数 0.03、降伏変位 3cm) の応答解析結果
絶対加速度の時刻歴波形

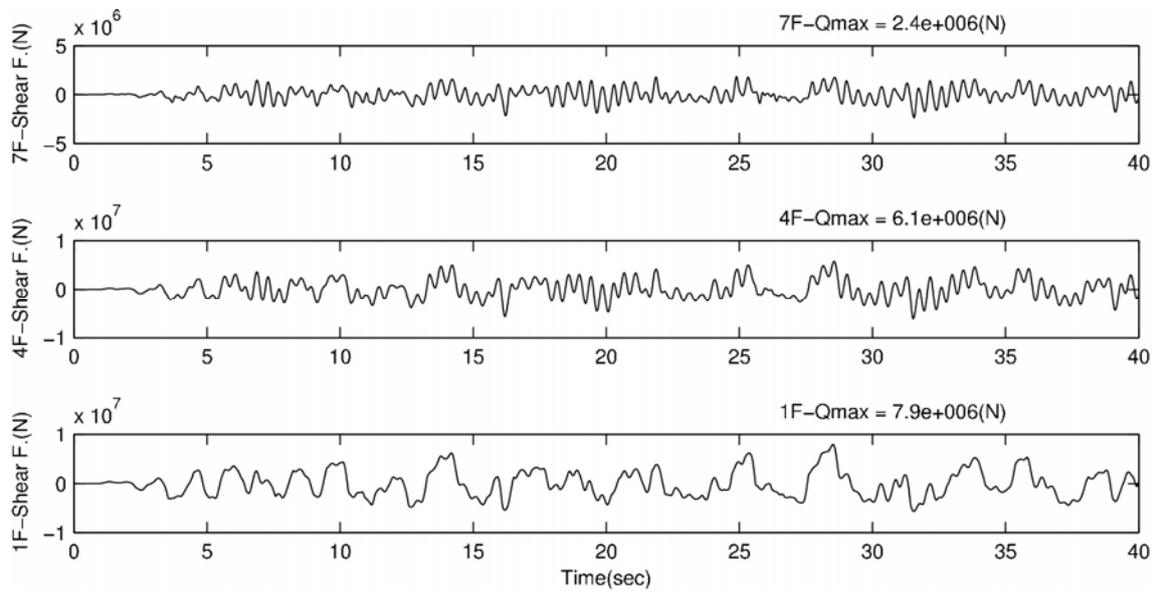


図 3.3-3 ケース 1 (降伏せん断力係数 0.03、降伏変位 3cm) の応答解析結果
層せん断力の時刻歴波形

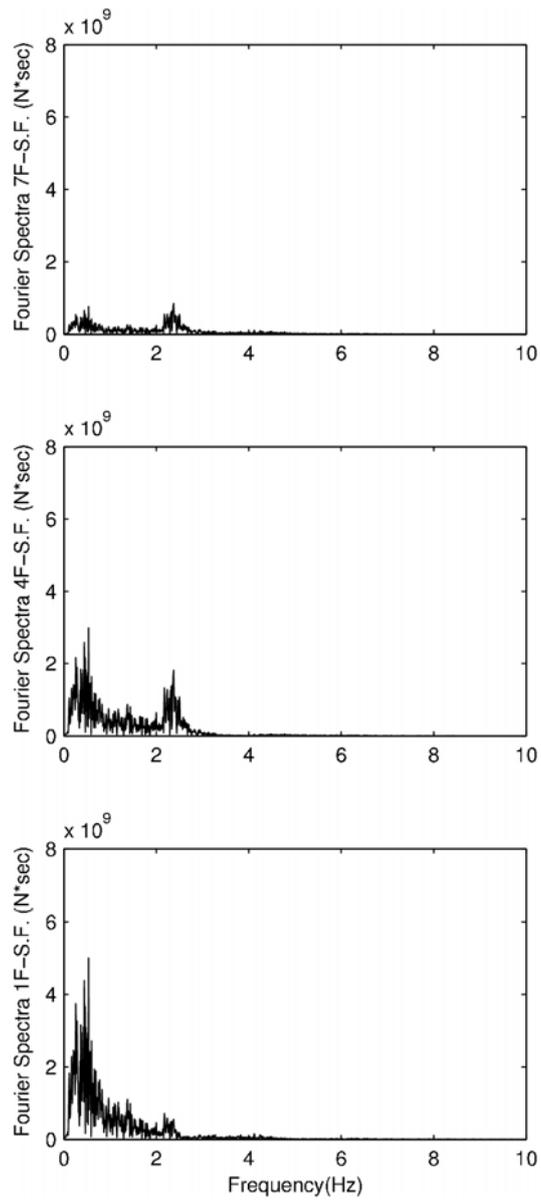


図 3.3-4 ケース 1（降伏せん断力係数 0.03、降伏変位 3cm）の応答解析結果
層せん断力のフーリエスペクトル

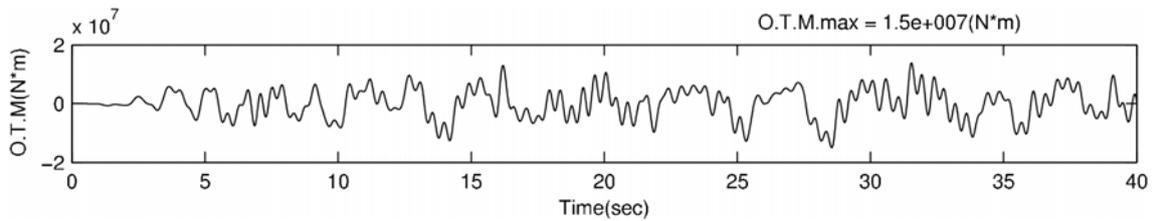


図 3.3-5 ケース 1（降伏せん断力係数 0.03、降伏変位 3cm）の応答解析結果
転倒モーメントの時刻歴波形

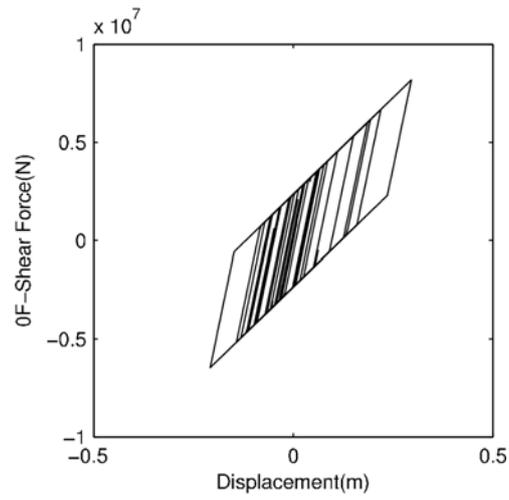


図 3.3-6 ケース 1（降伏せん断力係数 0.03、降伏変位 3cm）の応答解析結果
免震層の荷重—変形関係

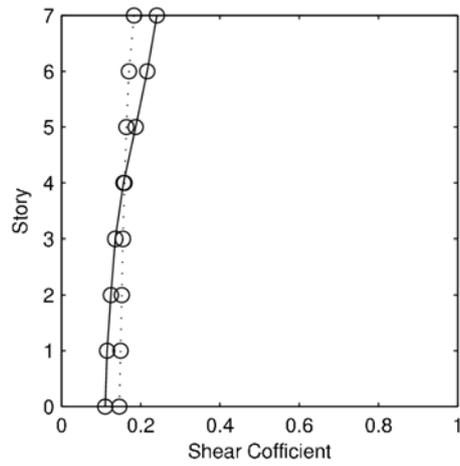


図 3.3-7 ケース 1（降伏せん断力係数 0.03、降伏変位 3cm）の応答解析結果
層せん断力係数（実線が応答解析結果、点線が告示計算結果）

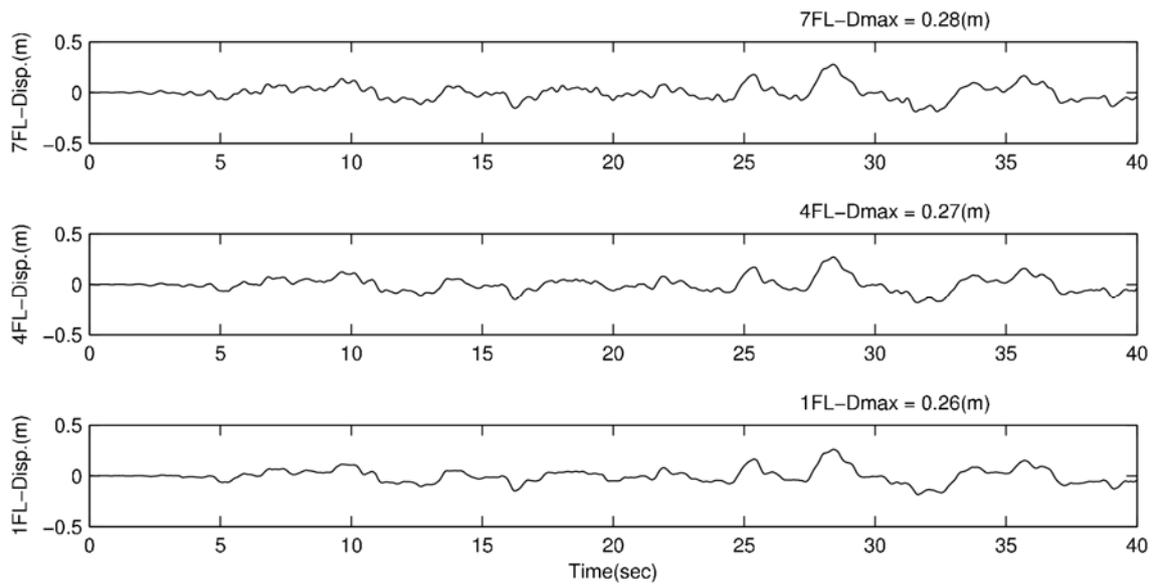


図 3.3-8 ケース 2 (降伏せん断力係数 0.05、降伏変位 0.1cm) の応答解析結果
変位の時刻歴波形

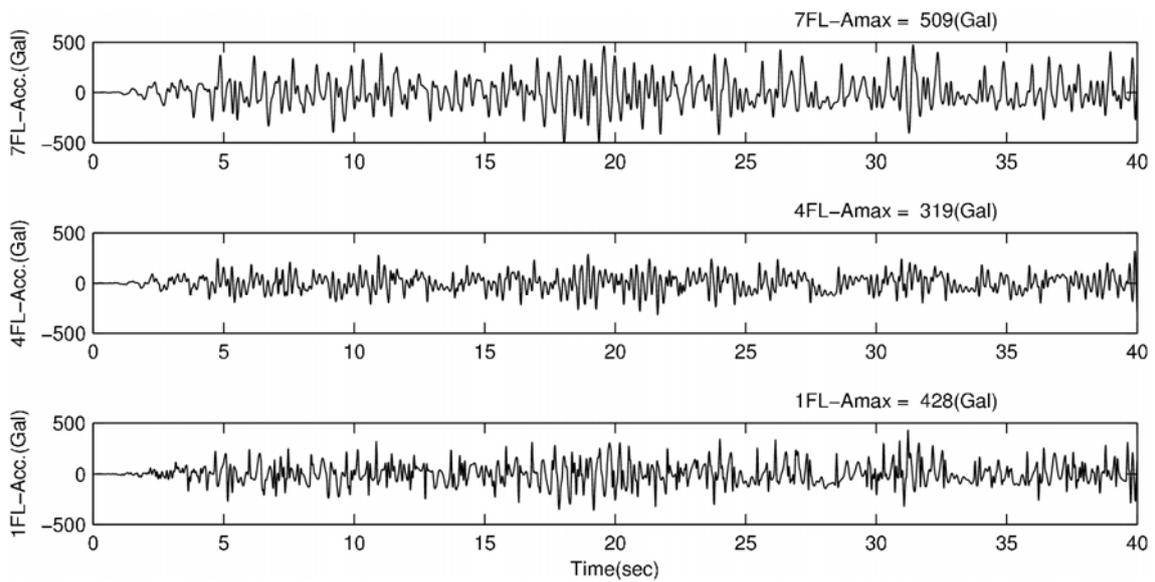


図 3.3-9 ケース 2 (降伏せん断力係数 0.05、降伏変位 0.1cm) の応答解析結果
絶対加速度の時刻歴波形

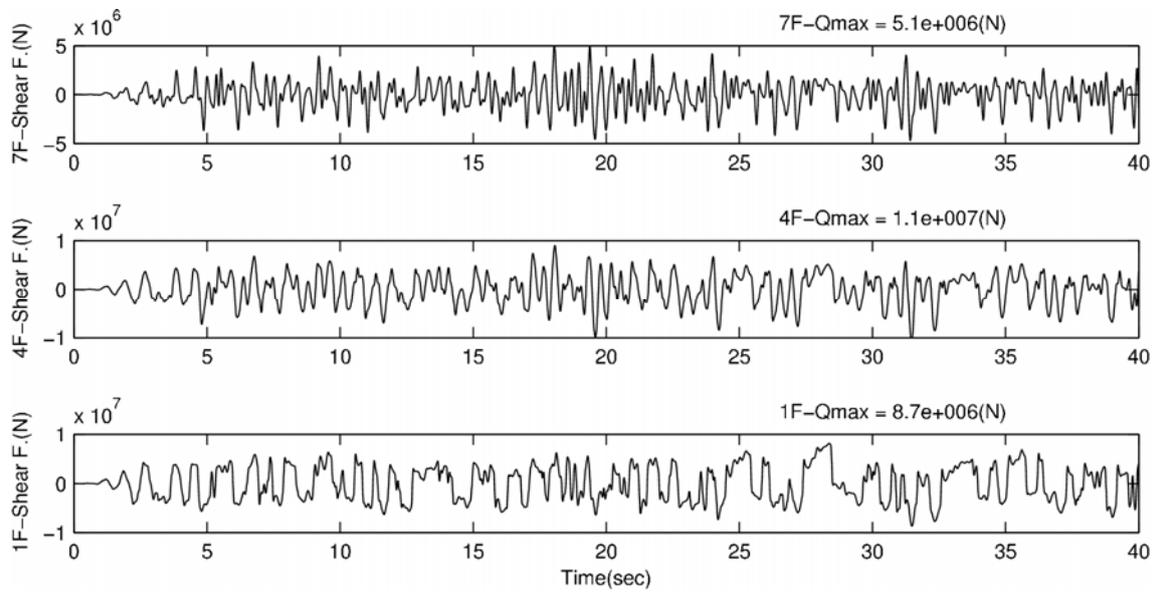


図 3.3-10 ケース 2 (降伏せん断力係数 0.05、降伏変位 0.1cm) の応答解析結果
層せん断力の時刻歴波形

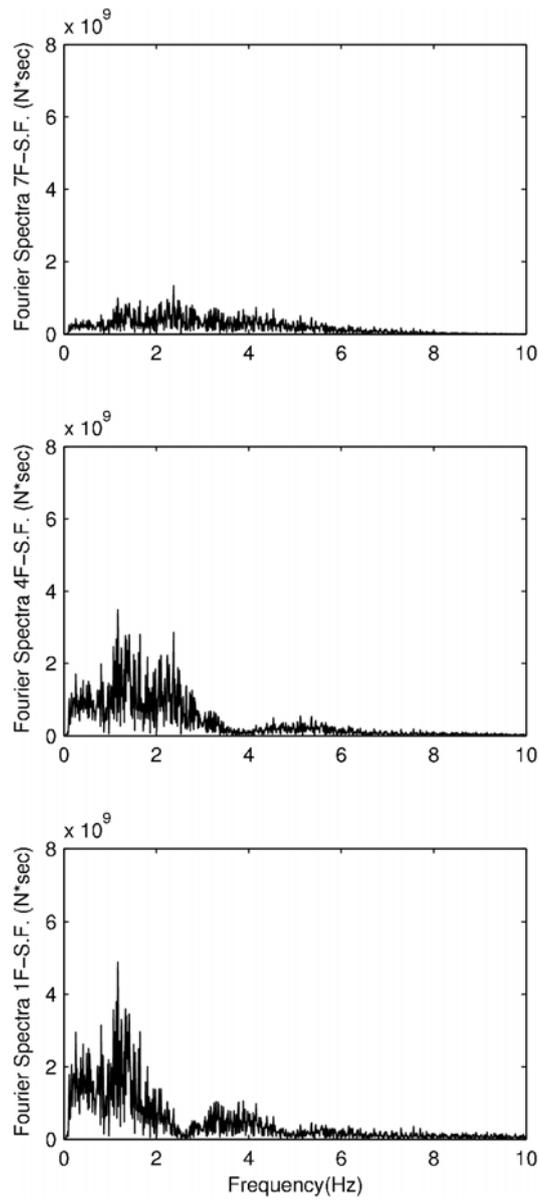


図 3.3-11 ケース 2 (降伏せん断力係数 0.05、降伏変位 0.1cm) の応答解析結果
層せん断力のフーリエスペクトル

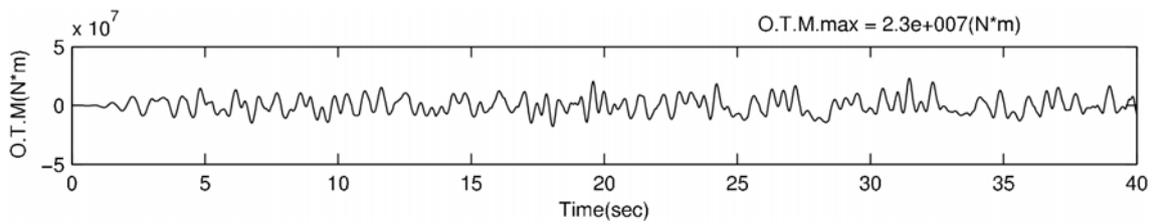


図 3.3-12 ケース 2 (降伏せん断力係数 0.05、降伏変位 0.1cm) の応答解析結果
転倒モーメントの時刻歴波形

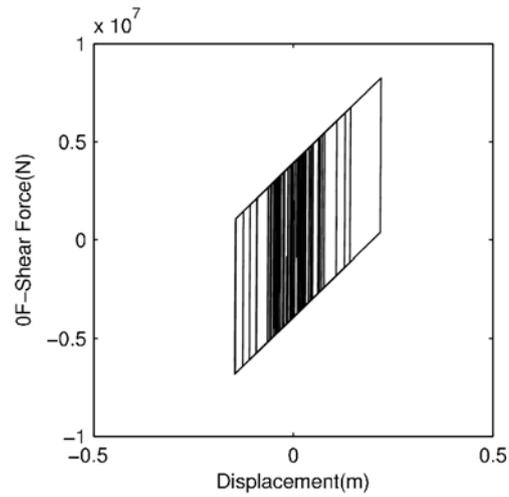


図 3.3-13 ケース 2 (降伏せん断力係数 0.05、降伏変位 0.1cm) の応答解析結果
免震層の層せん断力-変形関係

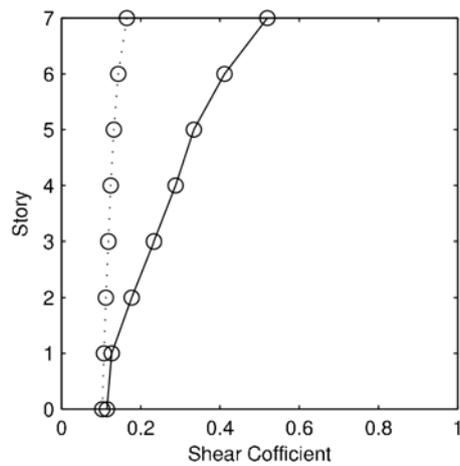


図 3.3-14 ケース 2 (降伏せん断力係数 0.05、降伏変位 0.1cm) の応答解析結果
層せん断力係数 (実線は応答解析結果、点線は告示計算結果)

3-3-2 解析パラメータを変えた結果

ここではパラメータを種々かえた場合の結果について示す。各モデルの免震層の変位と層せん断力係数及び層せん断力係数比を図 3.3-15～図 3.3-36 に示す。免震層の変位と層せん断力の図では、告示計算による結果を点線で示し、応答解析結果との比較を行っている。層せん断力係数比とは、時刻歴応答解析結果を告示 2009 号に従って計算した結果で除した値である。上部構造の減衰は、2%と 3%の場合で傾向は大きくは変わらなかったため、ここでは 2%の結果のみを示している。

各図上部のタイトルは解析モデルのパラメータを示す。「t25」は、上部構造剛体時の弾性接線周期 T_2 が 2.5 秒であり、「t40」は 4.0 秒、「t60」は 6.0 秒である。「d0」は免震層の降伏変位が 0.1cm であることを示し、「d1」は 1cm、「d3」は 3cm である。また「a03」は免震層の降伏せん断力係数が 0.03 であることを示し、「a05」は 0.05、「a07」は 0.07、「a10」は 0.10 である。

図 3.3-15～図 3.3-28 の入力地震動は、2 種地盤卓越周期（短）の特性を基に作成した模擬地震波である。2 種地盤卓越周期（短）の解析結果から以下のことがわかる。

免震層の変位

時刻歴応答解析の最大変位は 0.1～0.4m である。免震層の降伏せん断力係数が小さいほど、その変位は大きくなる。降伏せん断力係数の小さい時には告示計算結果との差が大きいケースが多く、告示 2009 号による変位は応答解析結果よりも大きくなっている。線形弾性要素として上部構造剛体時の弾性接線周期を 2.5 秒や 4.0 秒としたケースでは、倍程度異なっている場合もある。免震層の降伏せん断力係数が 0.07 あるいは 0.10 の場合は、応答解析結果と告示 2009 号による結果との差は小さい。

層せん断力係数

時刻歴応答解析の最上階層せん断力係数は 0.2～0.8 である。最上階層せん断力係数が 0.8 となる解析ケースは、免震層の降伏せん断力係数が 0.10、降伏変位が 0.1cm の場合である。完全弾塑性要素の降伏せん断力係数が大きく降伏変位が小さいケースほど、上部構造での増幅が大きくなっている傾向があり、応答解析結果は告示 2009 号による結果より大きくなる。その差は上階ほど大きくなる。また、上部構造での増幅が大きいケースほど、告示 2009 号による結果との差は大きくなっている。

上部構造の固有周期 T_0 が一番短いモデル（上部構造 7 層モデルで $T_0=0.02 \times 7 \times 3.5=0.49$ 秒の設定）のみ、上部構造での増幅が他のケースと比べて小さい場合が多い（各図で重ね書きしている 3 ケースでの比較）。その傾向は、降伏変位が大きいほど顕著である。 $T_0=0.49$ 秒のモデル以外では、明瞭な傾向の差は見られない。

層せん断力係数比

層せん断力係数の傾向と同様である。完全弾塑性要素の降伏せん断力係数が大きく降伏変位が大きいケースほど、層せん断力係数比は大きくなっており、比率として 3 を超えるような場合も見られる。なお、線形弾性要素として上部構造剛体時の弾性接線周期を 2.5 秒や 4.0 秒としたケースでは、降伏せん断力係数比は下層部分で 1.0 を下回っている場合もある。（図 3.3-18 および図 3.3-20 上段の図参照）これは、告示計算で求めた免震層の変位と時刻歴応答解析結果との差が大きいことに起因している（図 3.3-15 や図 3.3-16 上段中段図参照）。

また、図 3.3-29～図 3.3-36 の入力地震動は、2 種地盤卓越周期（長）の特性を基に作成した模擬地震波である。2 種地盤卓越周期（長）の解析結果から以下のことがわかる。

免震層の変位

時刻歴応答解析の最大変位は 0.2～0.5m である。上部構造剛体時の免震層弾性接線周期を 2.5 秒とした場合（図 3.3-29 および図 3.3-30 上段）、免震層の降伏せん断力係数の値によらず、告示 2009 号による変位は時刻歴応答解析結果よりも大きい。この場合、免震層の降伏せん断力係数が小さいほど、その差は大きくなる。一方、上部構造剛体時の免震層弾性接線周期が 4.0 秒あるいは 6.0 秒（図 3.3-29 および図 3.3-30 の中段、下段）では、免震層の降伏せん断力係数が小さければ告示 2009 号による変位は時刻歴応答解析結果より大きくなるが、降伏せん断力係数が大きい場合は、告示 2009 号の結果は時刻歴解析結果より小さくなり、大小関係が降伏せん断力係数により逆転する。

層せん断力係数

時刻歴応答解析の最上階層せん断力係数は 0.1～0.8 である。最上階層せん断力係数が 0.8 となる解析ケースは、免震層の降伏せん断力係数が 0.10、降伏変位が 0.1cm および 1cm の場合である。

上部構造 7 層モデルにおいて免震層の線形弾性要素周期が 2.5 秒、降伏せん断力係数が 0.03 の場合（図 3.3-31 の上段）では、いずれの階においても告示 2009 号による結果が時刻歴応答解析結果より大きくなる。他の解析ケースでは、少なくともいずれかの階にて告示 2009 号による結果が時刻歴応答解析結果を下回る。完全弾塑性要素の降伏せん断力係数が大きく降伏変位が小さいケースほど、上部構造での増幅が大きくなっている傾向があり、応答解析結果は告示 2009 号による結果より大きくなる。

上部構造の固有周期 T_0 が一番短いモデル（上部構造 7 層モデルで $T_0=0.02 \times 7 \times 3.5=0.49$ 秒の設定）のみ、上部構造での増幅が他のケースと比べて小さい場合が多い（各図で重ね書きしている 3 ケースでの比較）。その傾向は、降伏変位が大きいほど顕著である。 $T_0=0.49$ 秒のモデル以外では、明瞭な傾向の差は見られない。

免震層弾性接線周期が 2.5 秒の場合、告示 2009 号による免震層変位において入力地震動による違いが大きく、2 種地盤卓越周期（長）では 2 種地盤卓越周期（短）の約 2 倍の変位となる。2 種地盤卓越周期（長）では、免震層の線形弾性要素周期が 2.5 秒で降伏せん断力係数が 0.03 の場合において、告示 2009 号による層せん断力係数がいずれの階においても時刻歴応答解析結果より大きくなる。ただし、これ以外の解析ケースでは、少なくともいずれかの階にて告示 2009 号による結果が時刻歴応答解析結果を下回る。2 種地盤卓越周期（長）および 2 種地盤卓越周期（短）のどちらの入力においても、完全弾塑性要素の降伏せん断力係数が大きく降伏変位が小さいケースほど、上部構造での増幅が大きくなることわかる。また、上部構造での増幅が大きいケースほど、告示 2009 号による結果との差は大きくなる傾向が見られる。

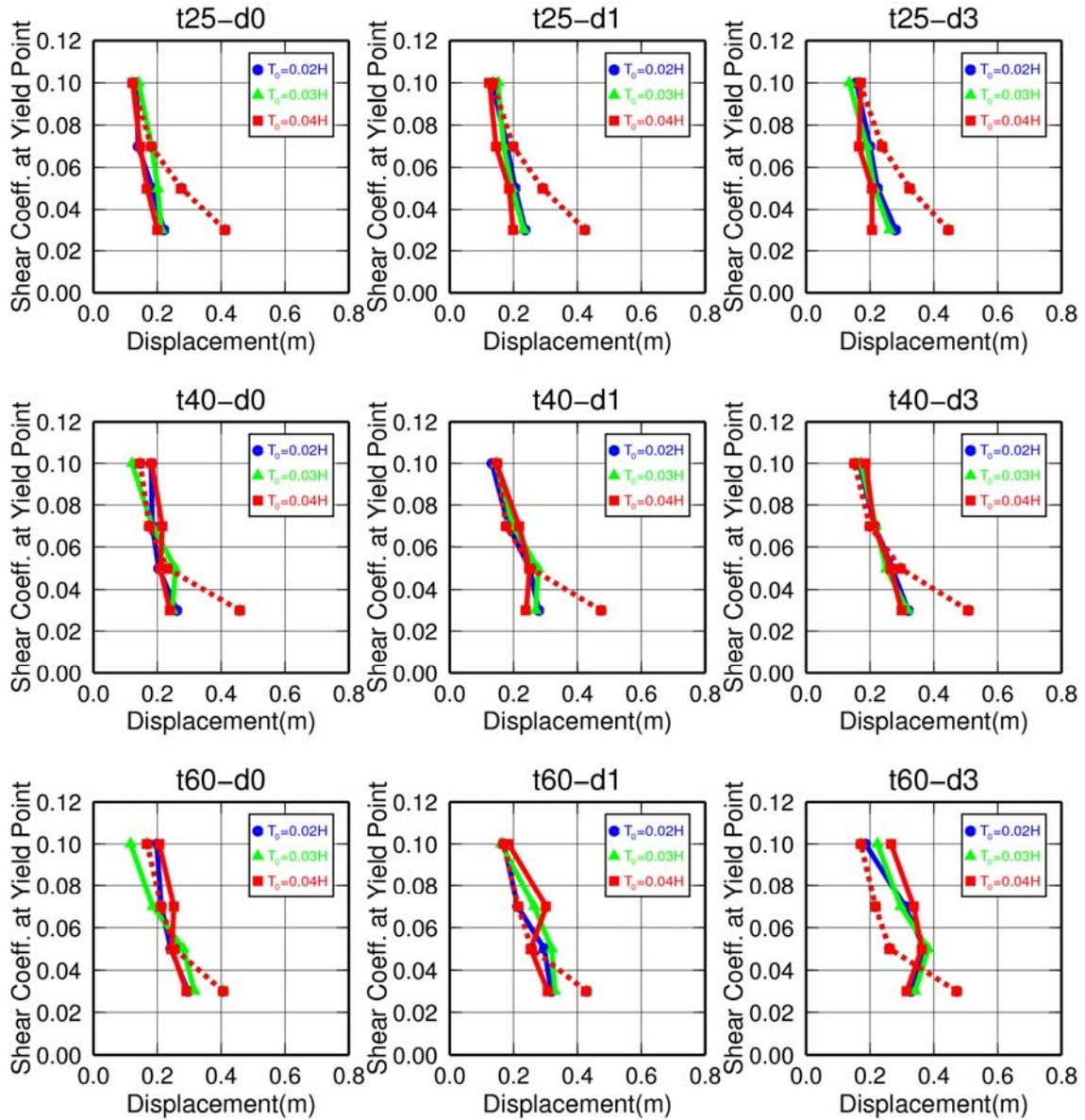


図 3.3-15 上部構造 7 層モデル (減衰定数 2%) の免震層変位 (実線は時刻歴応答解析結果、点線は告示計算結果)、入力波: 2 種地盤卓越周期 (短)

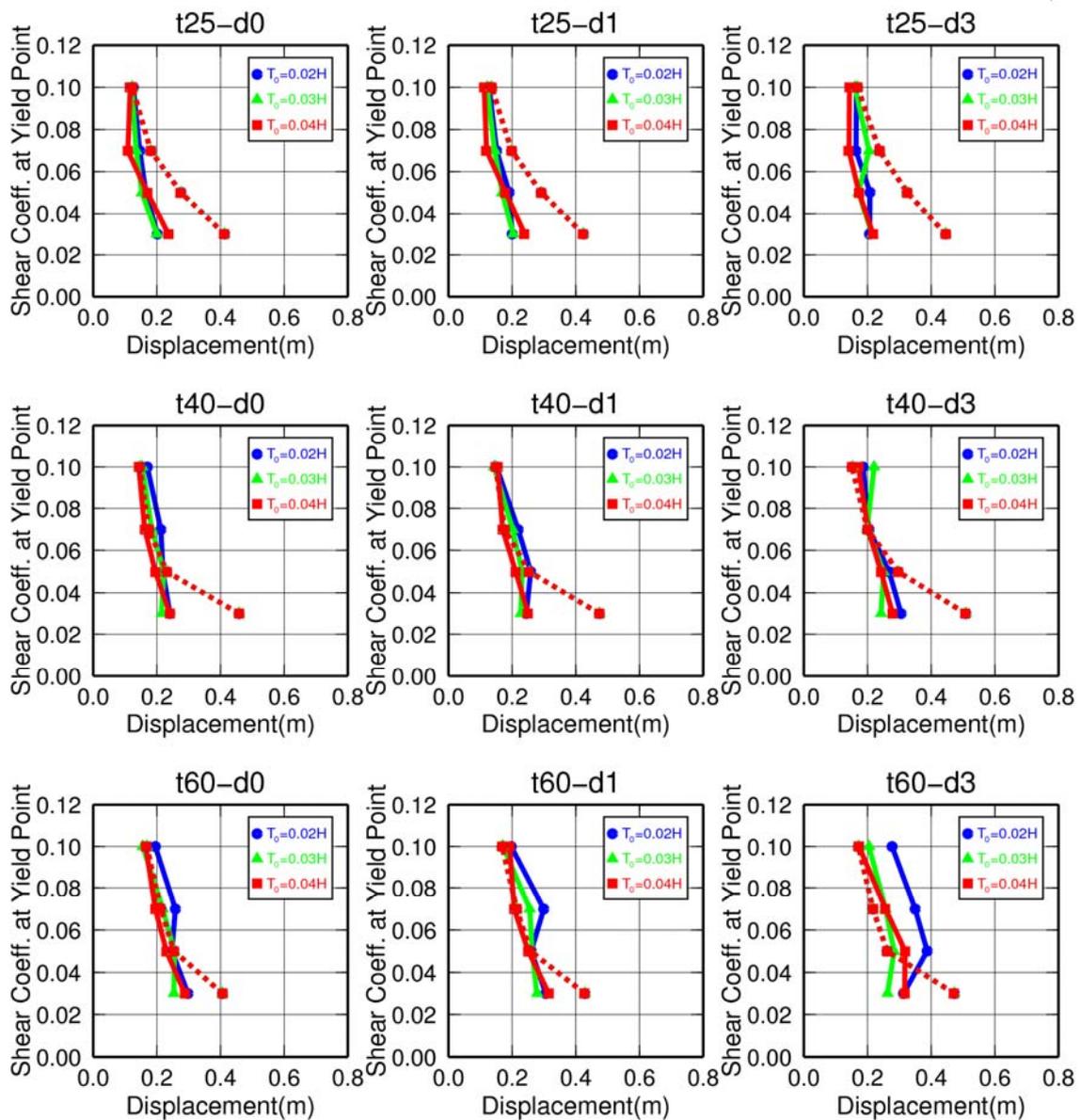


図 3.3-16 上部構造 14 層モデル (減衰定数 2%) の免震層変位 (実線は時刻歴応答解析結果、点線は告示計算結果)、入力波: 2 種地盤卓越周期 (短)

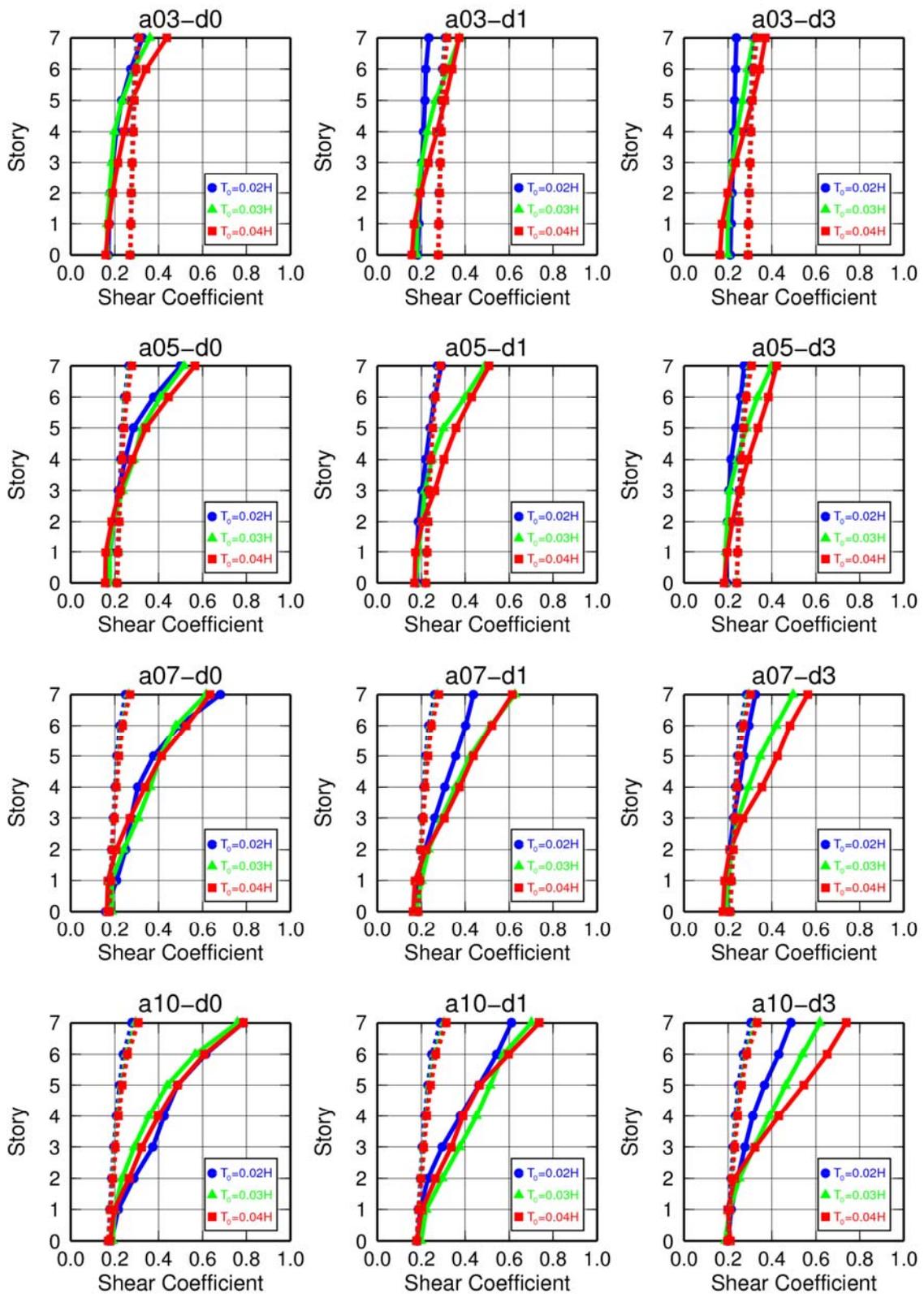


図 3.3-17 上部構造 7 層モデル (減衰定数 2%、免震層線形弾性要素周期 2.5 秒) の層せん断力係数 (実線は時刻歴応答解析結果、点線は告示計算結果)、入力波：2 種地盤卓越周期 (短)

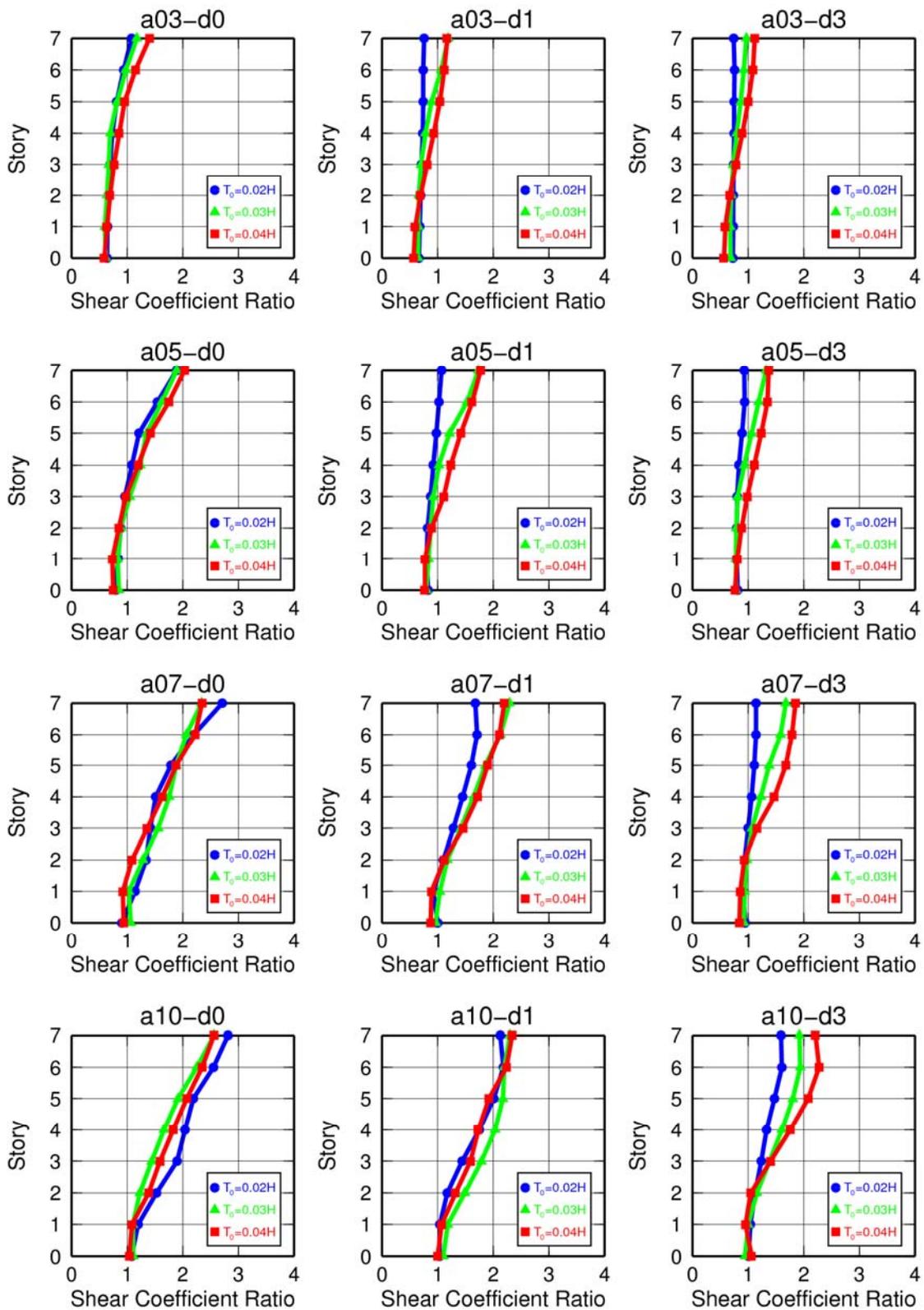


図 3.3-18 上部構造 7 層モデル (減衰定数 2%、免震層線形弾性要素周期 2.5 秒) の層せん断力係数比 (時刻歴応答解析結果/告示計算結果)、入力波: 2 種地盤卓越周期 (短)

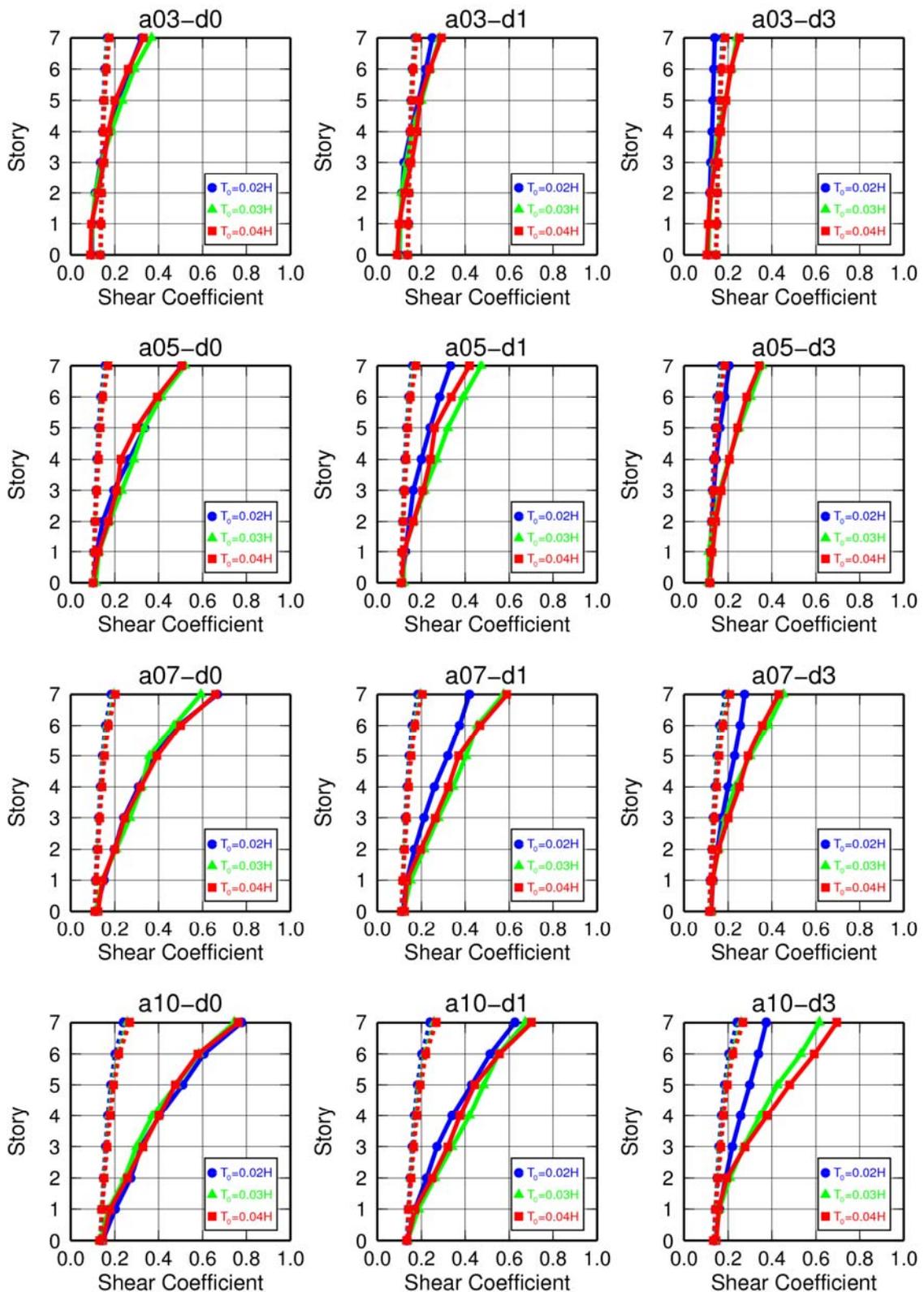


図 3.3-19 上部構造 7 層モデル (減衰定数 2%、免震層線形弾性要素周期 4.0 秒) の層せん断力係数 (実線は時刻歴応答解析結果、点線は告示計算結果)、入力波：2 種地盤卓越周期 (短)

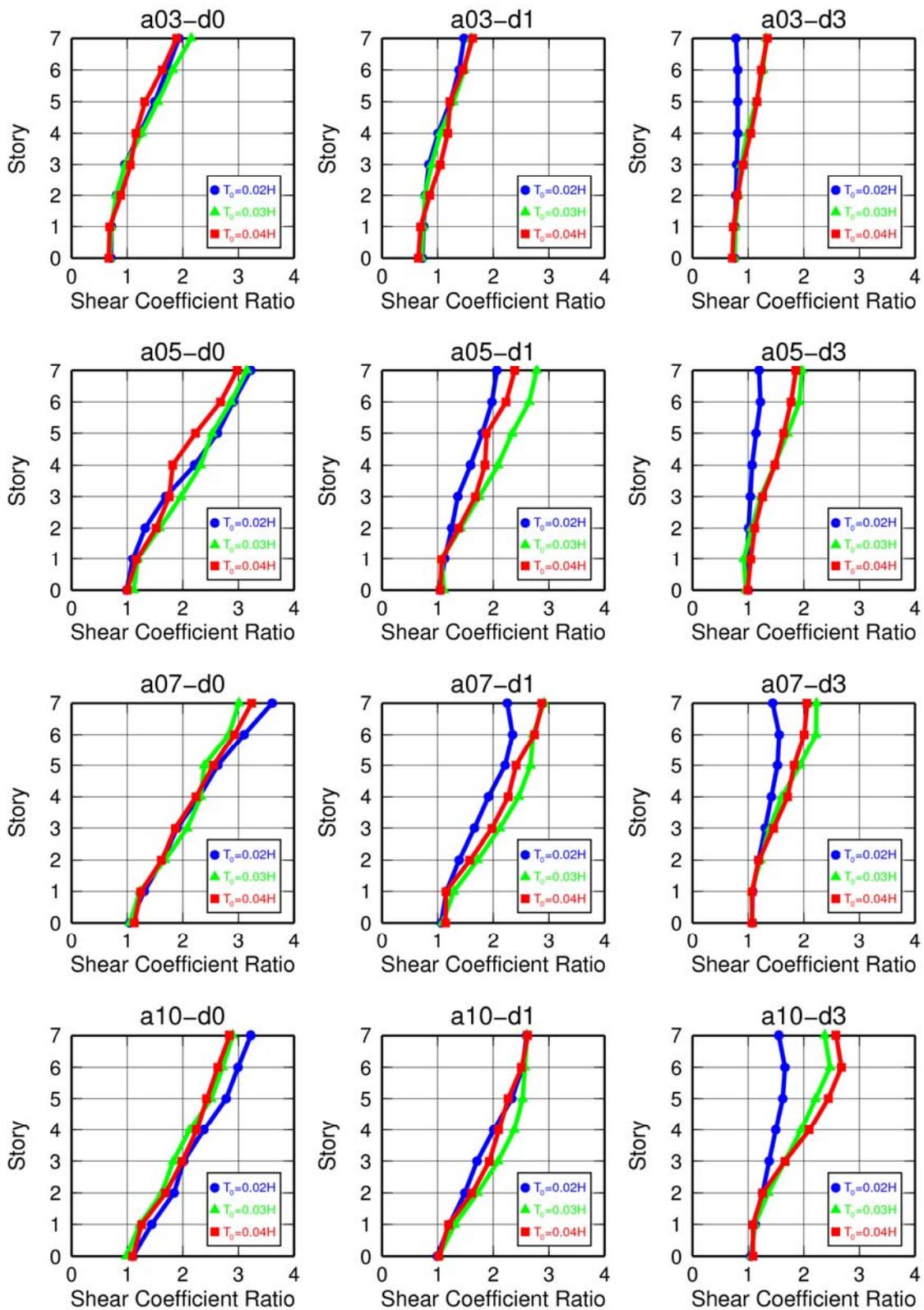


図 3.3-20 上部構造 7 層モデル (減衰定数 2%、免震層線形弾性要素周期 4.0 秒) の層せん断力係数比 (時刻歴応答解析結果/告示計算結果)、入力波: 2 種地盤卓越周期 (短)

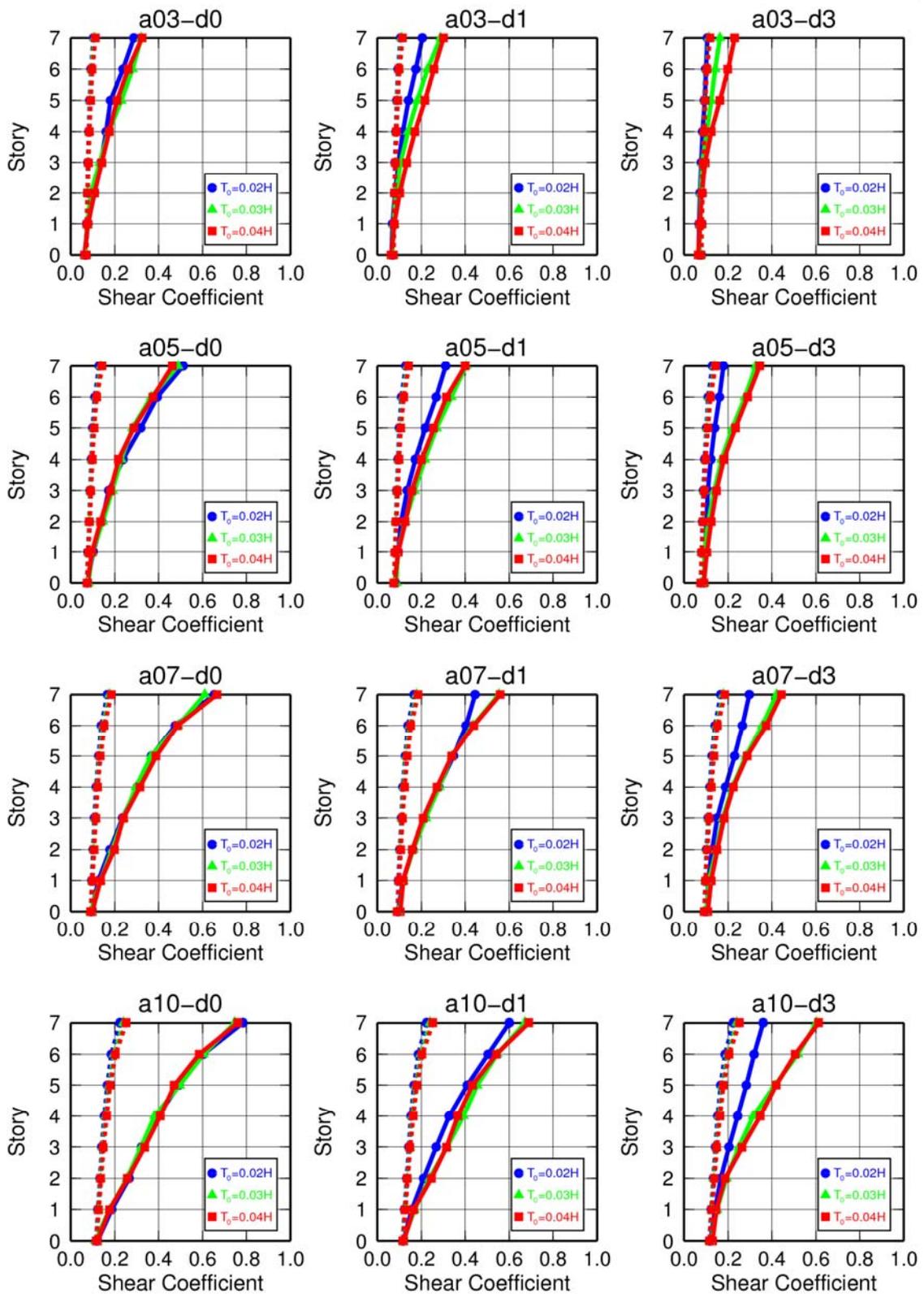


図 3.3-21 上部構造 7 層モデル (減衰定数 2%、免震層線形弾性要素周期 6.0 秒) の層せん断力係数 (実線は時刻歴応答解析結果、点線は告示計算結果)、入力波：2 種地盤卓越周期 (短)

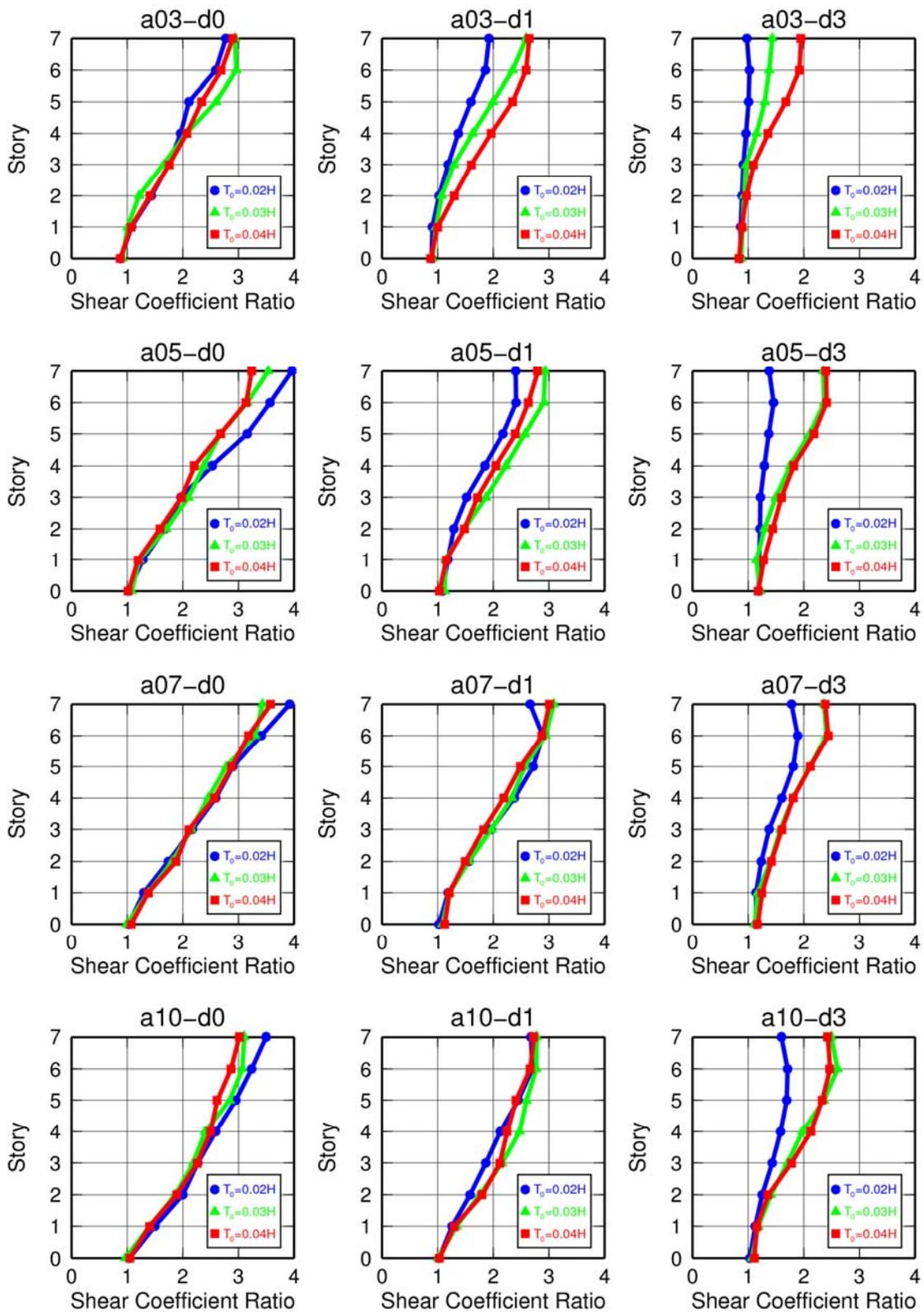


図 3.3-22 上部構造 7 層モデル (減衰定数 2%、免震層線形弾性要素周期 6.0 秒) の層せん断力係数比 (時刻歴応答解析結果/告示計算結果)、入力波: 2 種地盤卓越周期 (短)

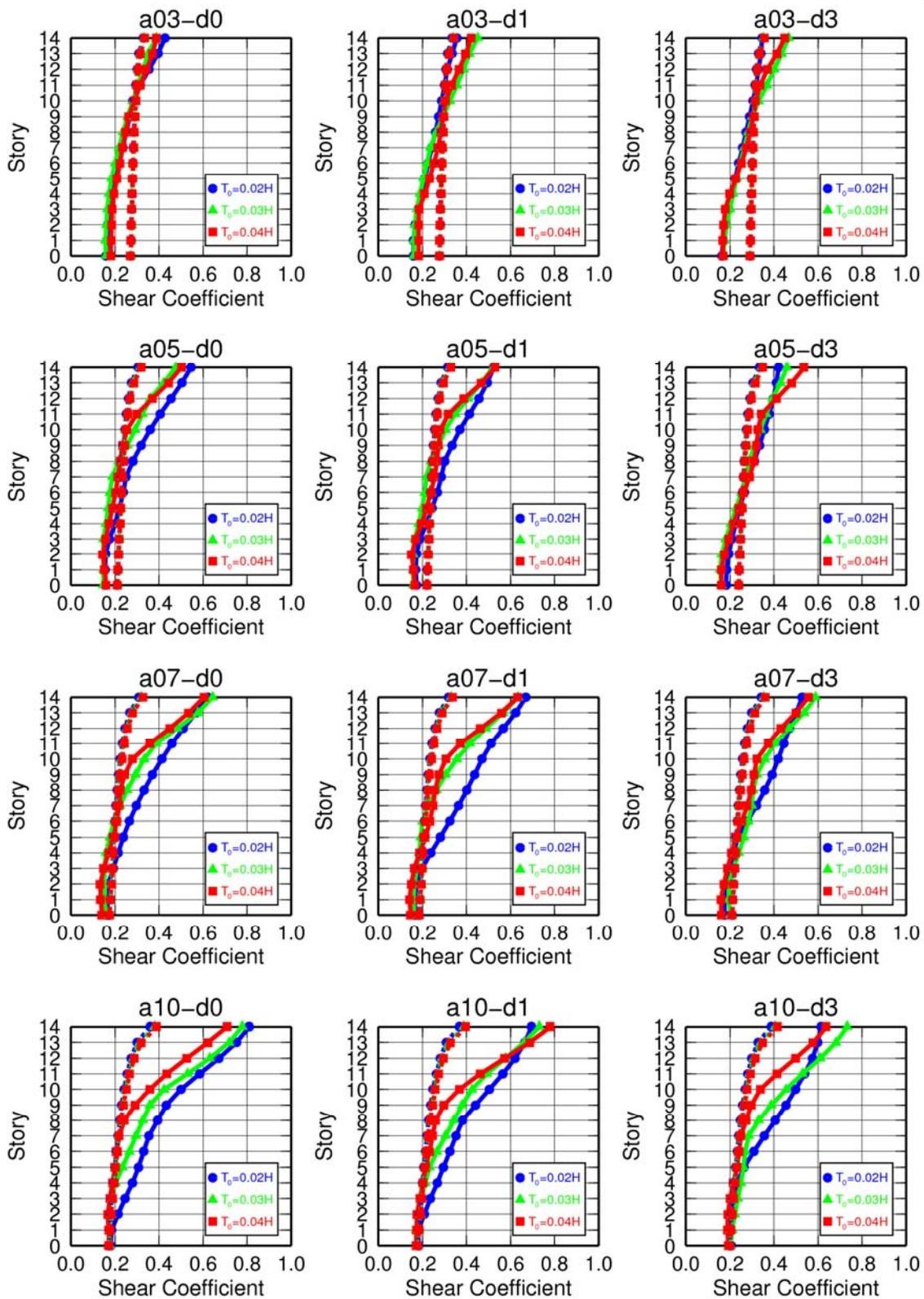


図 3.3-23 上部構造 14 層モデル (減衰定数 2%、免震層線形弾性要素周期 2.5 秒) の層せん断力係数 (実線は時刻歴応答解析結果、点線は告示計算結果)、入力波：2 種地盤卓越周期 (短)

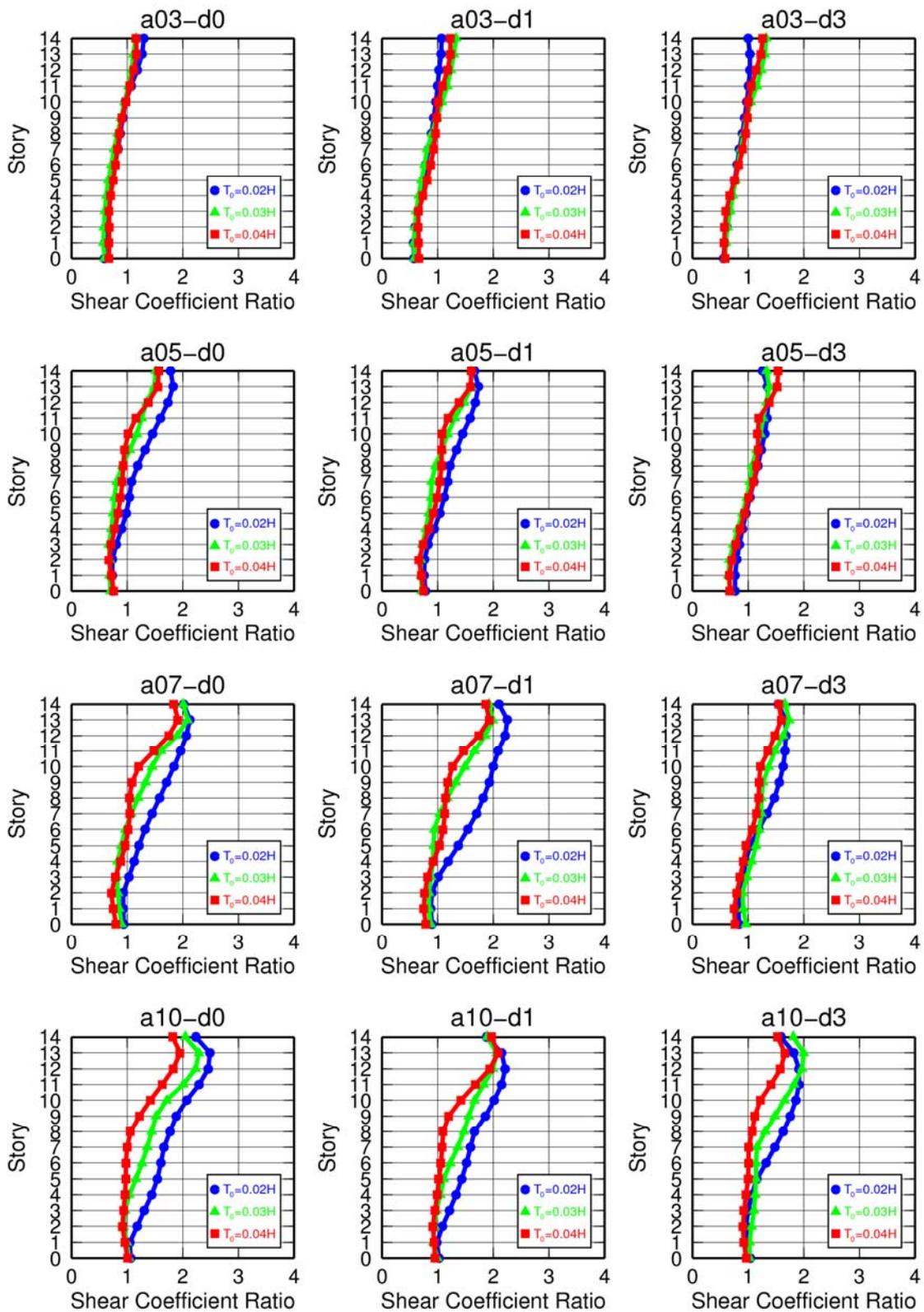


図 3.3-24 上部構造 14 層モデル (減衰定数 2%、免震層線形弾性要素周期 2.5 秒) の層せん断力係数比 (時刻歴応答解析結果/告示計算結果)、入力波: 2 種地盤卓越周期 (短)

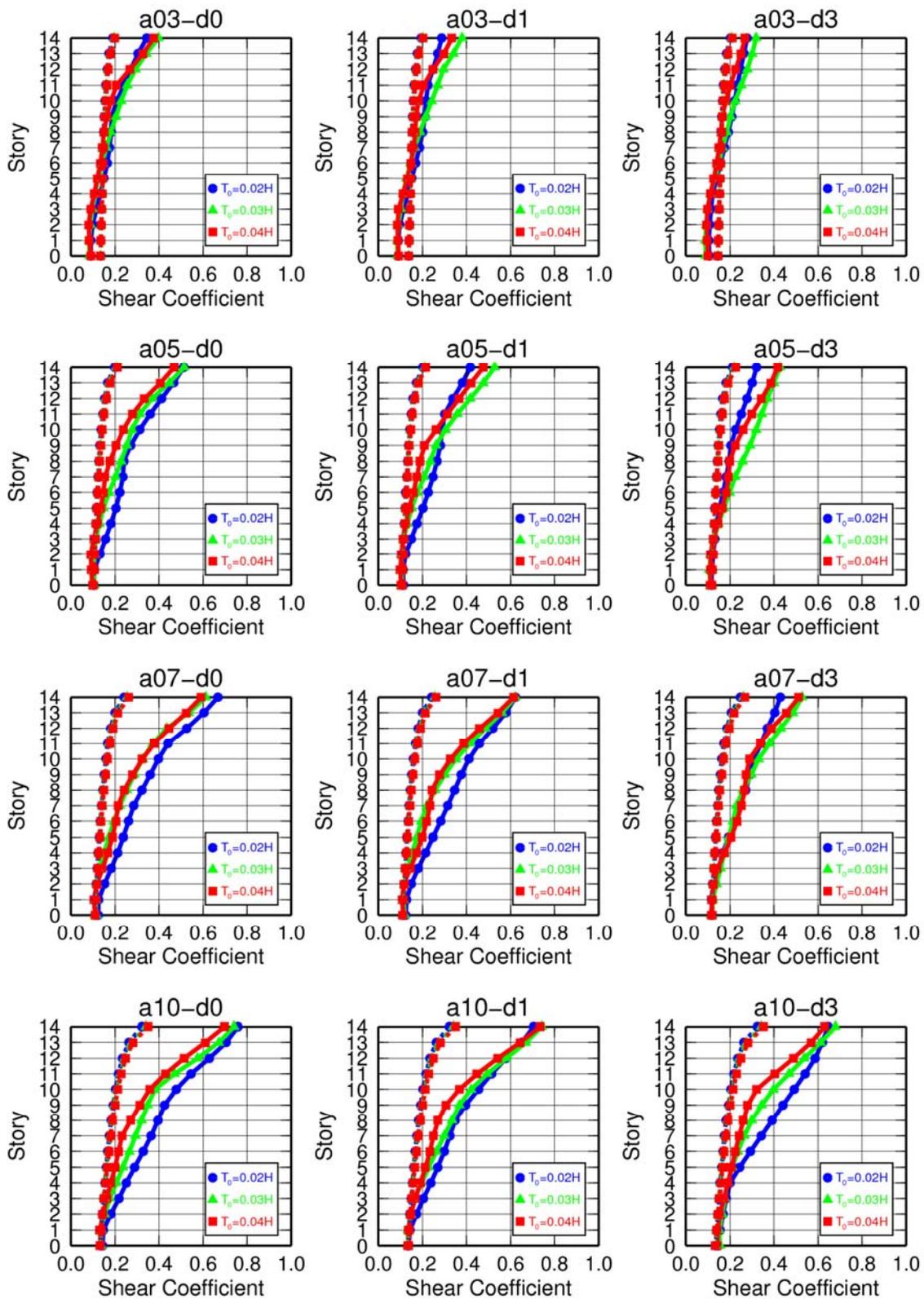


図 3.3-25 上部構造 14 層モデル (減衰定数 2%、免震層線形弾性要素周期 4.0 秒) の層せん断力係数 (実線は時刻歴応答解析結果、点線は告示計算結果)、入力波：2 種地盤卓越周期 (短)

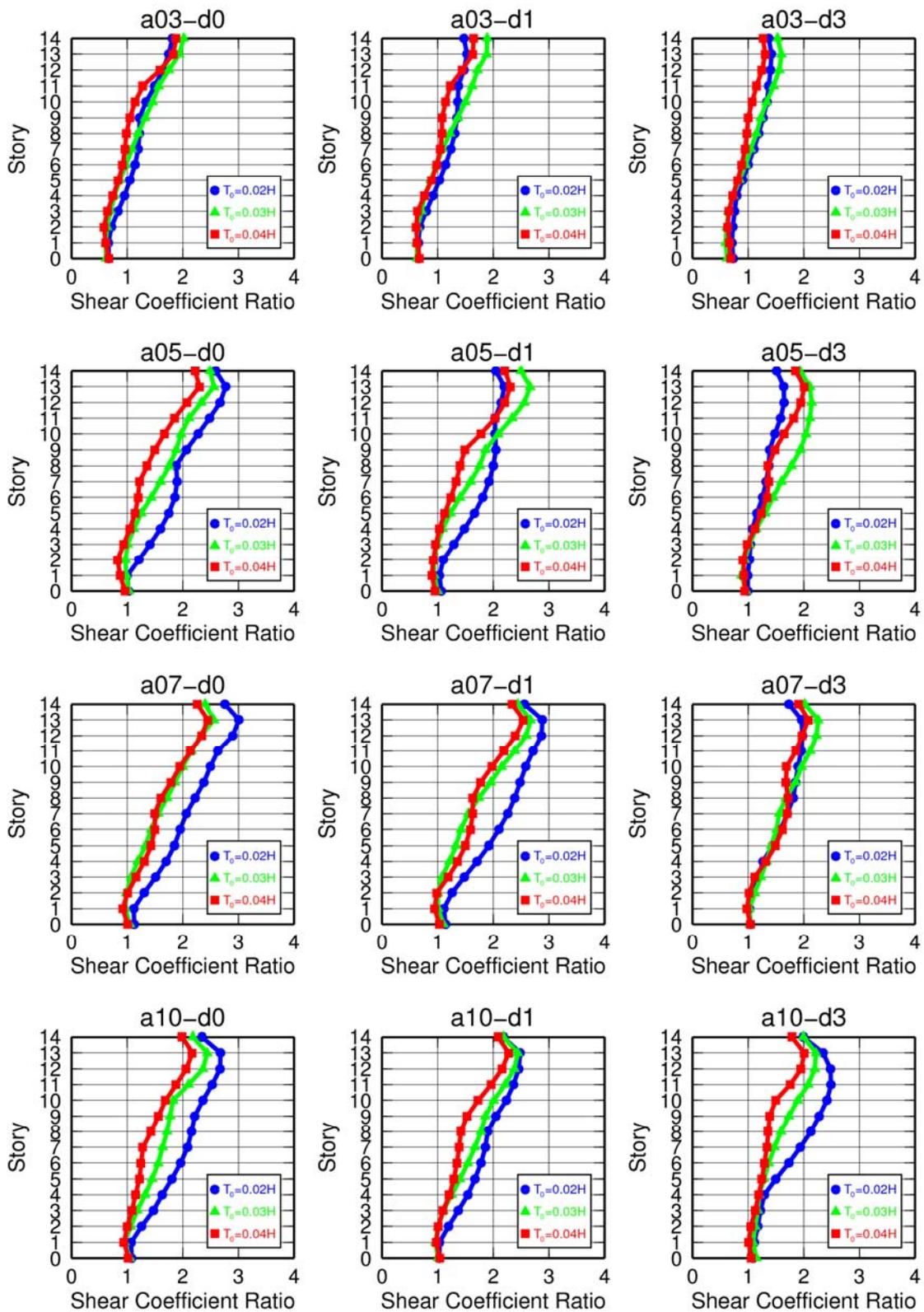


図 3.3-26 上部構造 14 層モデル (減衰定数 2%、免震層線形弾性要素周期 4.0 秒) の層せん断力係数比 (時刻歴応答解析結果/告示計算結果)、入力波 : 2 種地盤卓越周期 (短)

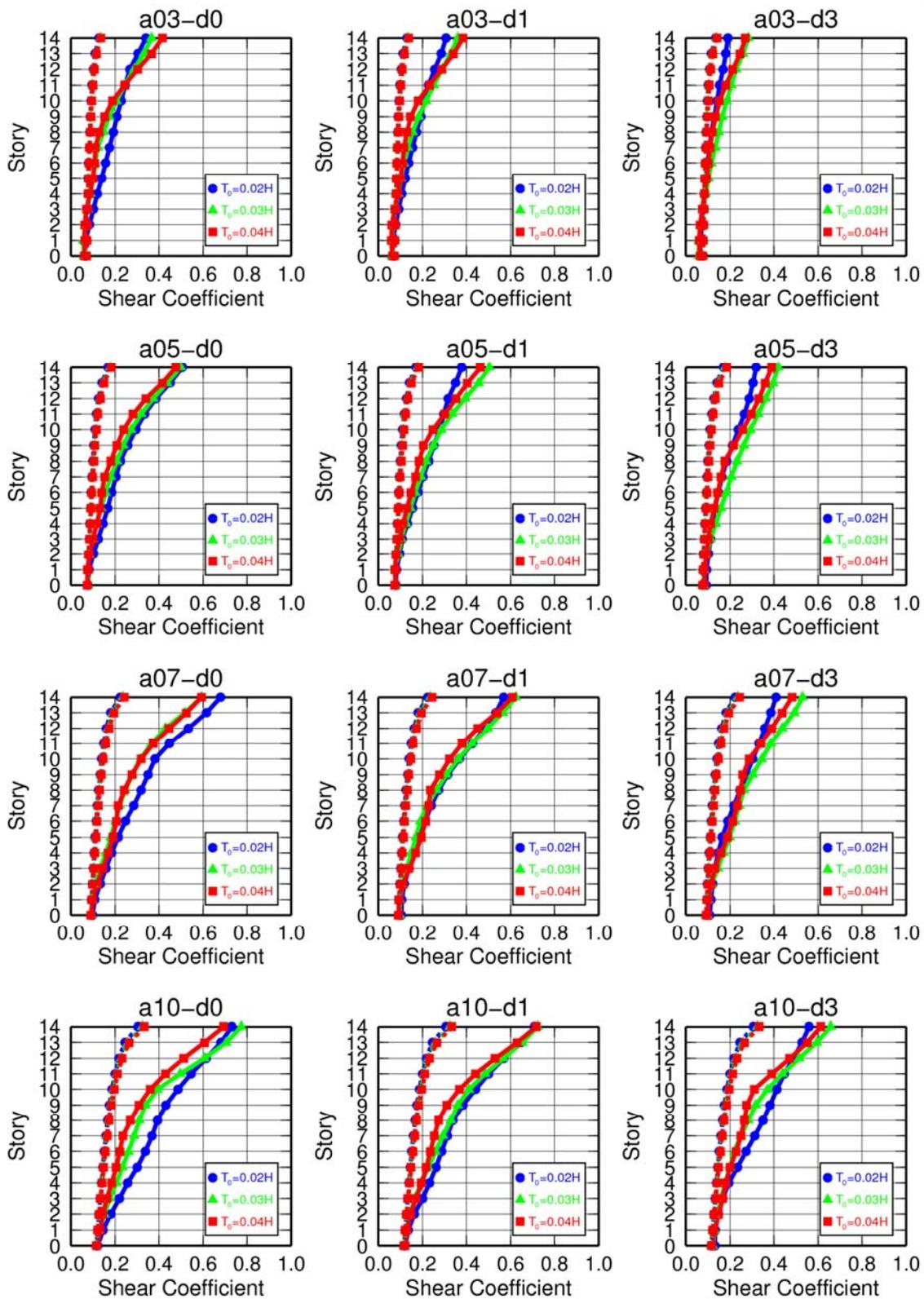


図 3.3-27 上部構造 14 層モデル (減衰定数 2%、免震層線形弾性要素周期 6.0 秒) の層せん断力係数 (実線は時刻歴応答解析結果、点線は告示計算結果)、入力波：2 種地盤卓越周期 (短)

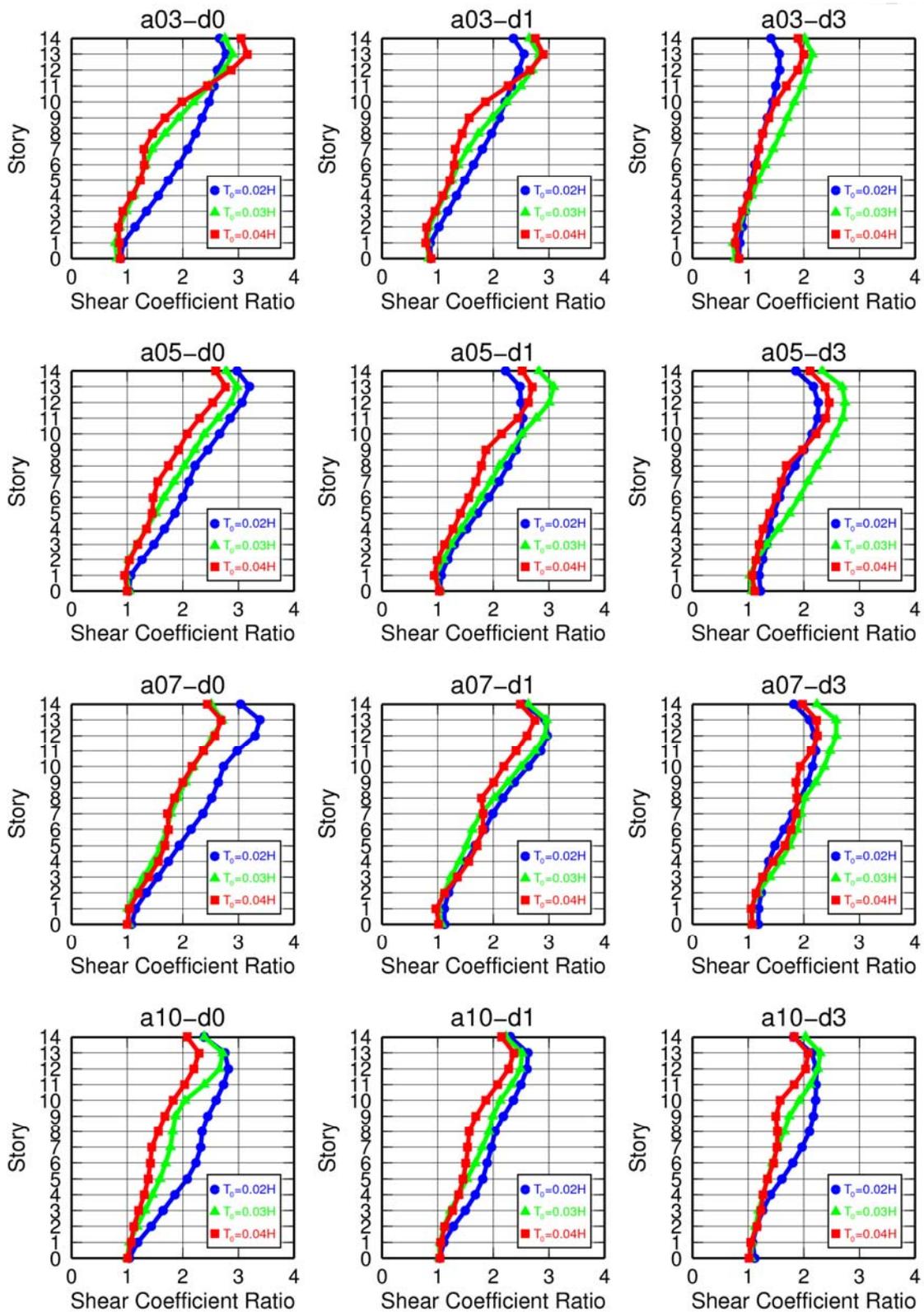


図 3.3-28 上部構造 14 層モデル (減衰定数 2%、免震層線形弾性要素周期 6.0 秒) の層せん断力係数比 (時刻歴応答解析結果/告示計算結果)、入力波: 2 種地盤卓越周期 (短)

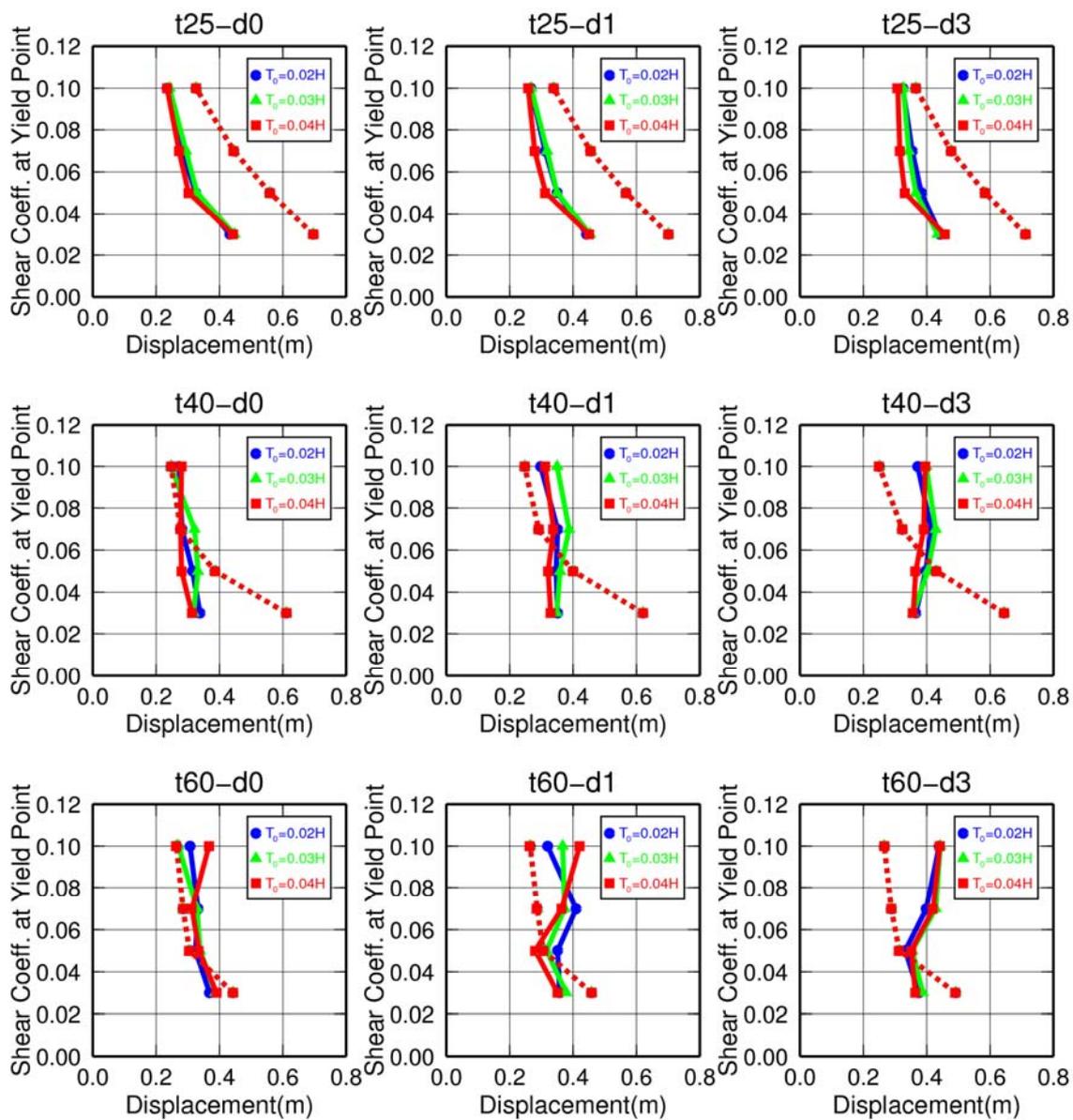


図 3.3-29 上部構造 7 層モデル (減衰定数 2%) の免震層変位 (実線は時刻歴応答解析結果、点線は告示計算結果)、入力波：2 種地盤卓越周期 (長)

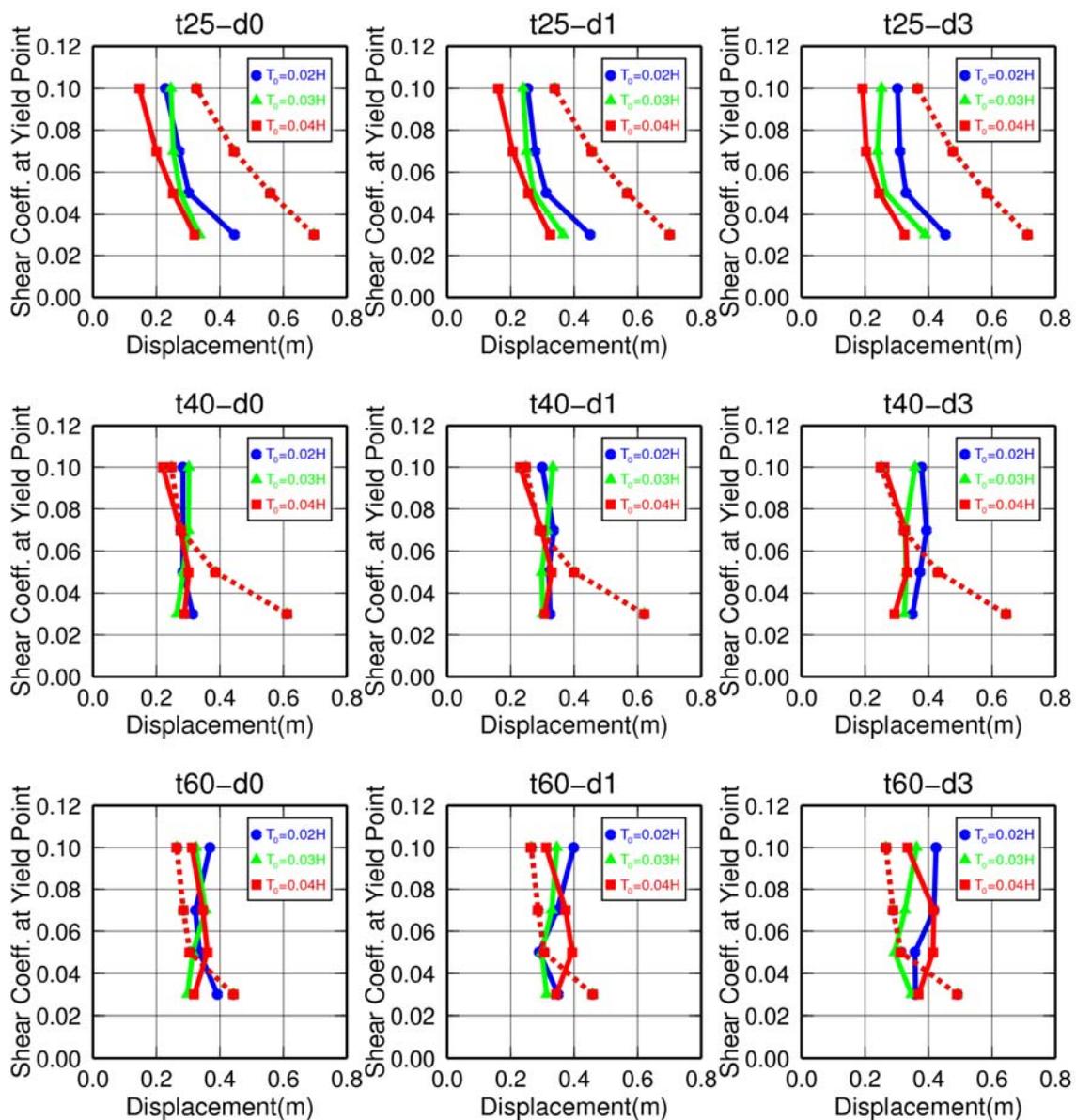


図 3.3-30 上部構造 14 層モデル (減衰定数 2%) の免震層変位 (実線は時刻歴応答解析結果、点線は告示計算結果)、入力波: 2 種地盤卓越周期 (長)

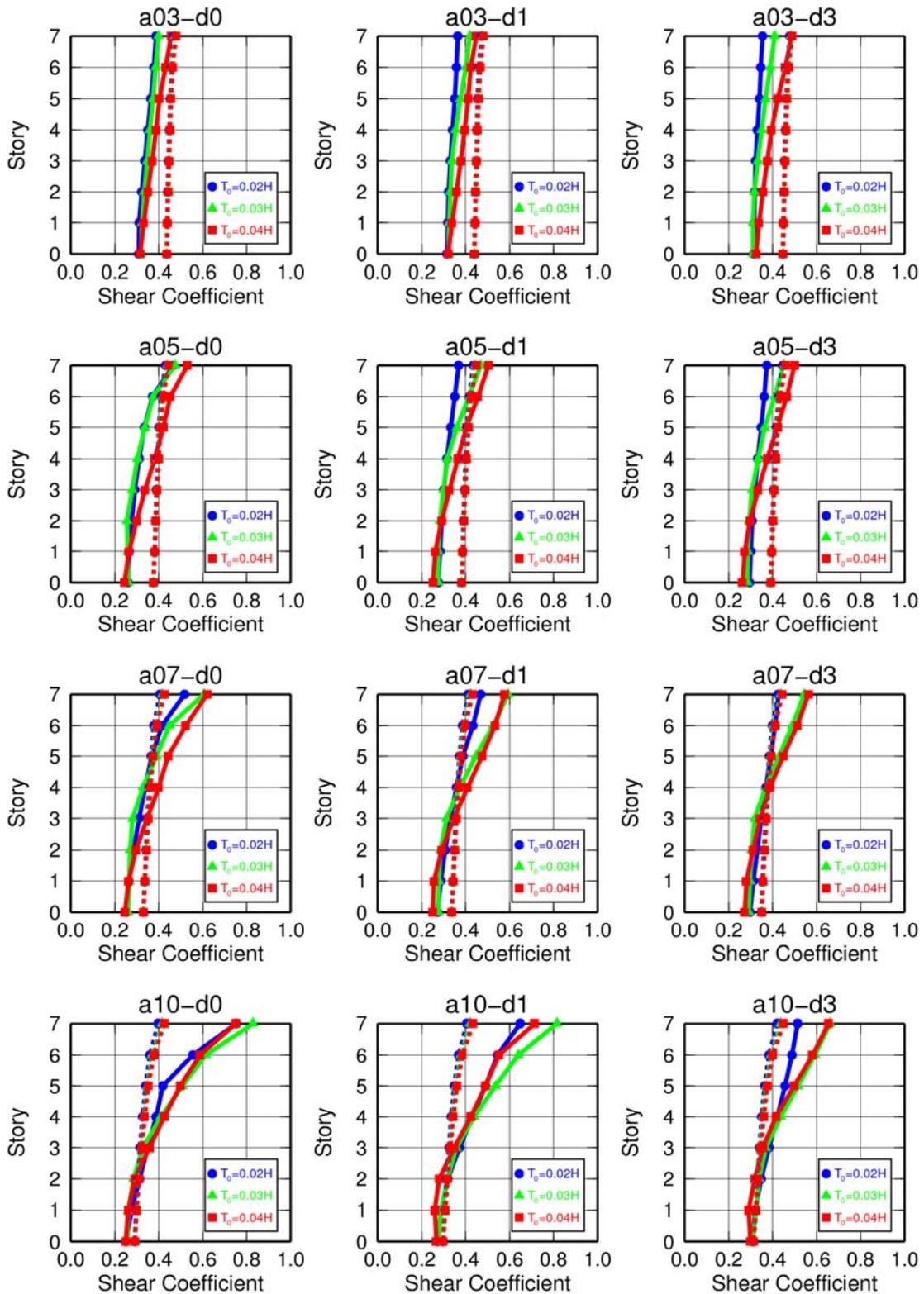


図 3.3-31 上部構造 7 層モデル (減衰定数 2%、免震層線形弾性要素周期 2.5 秒) の層せん断力係数 (実線は時刻歴応答解析結果、点線は告示計算結果)、入力波：2 種地盤卓越周期 (長)

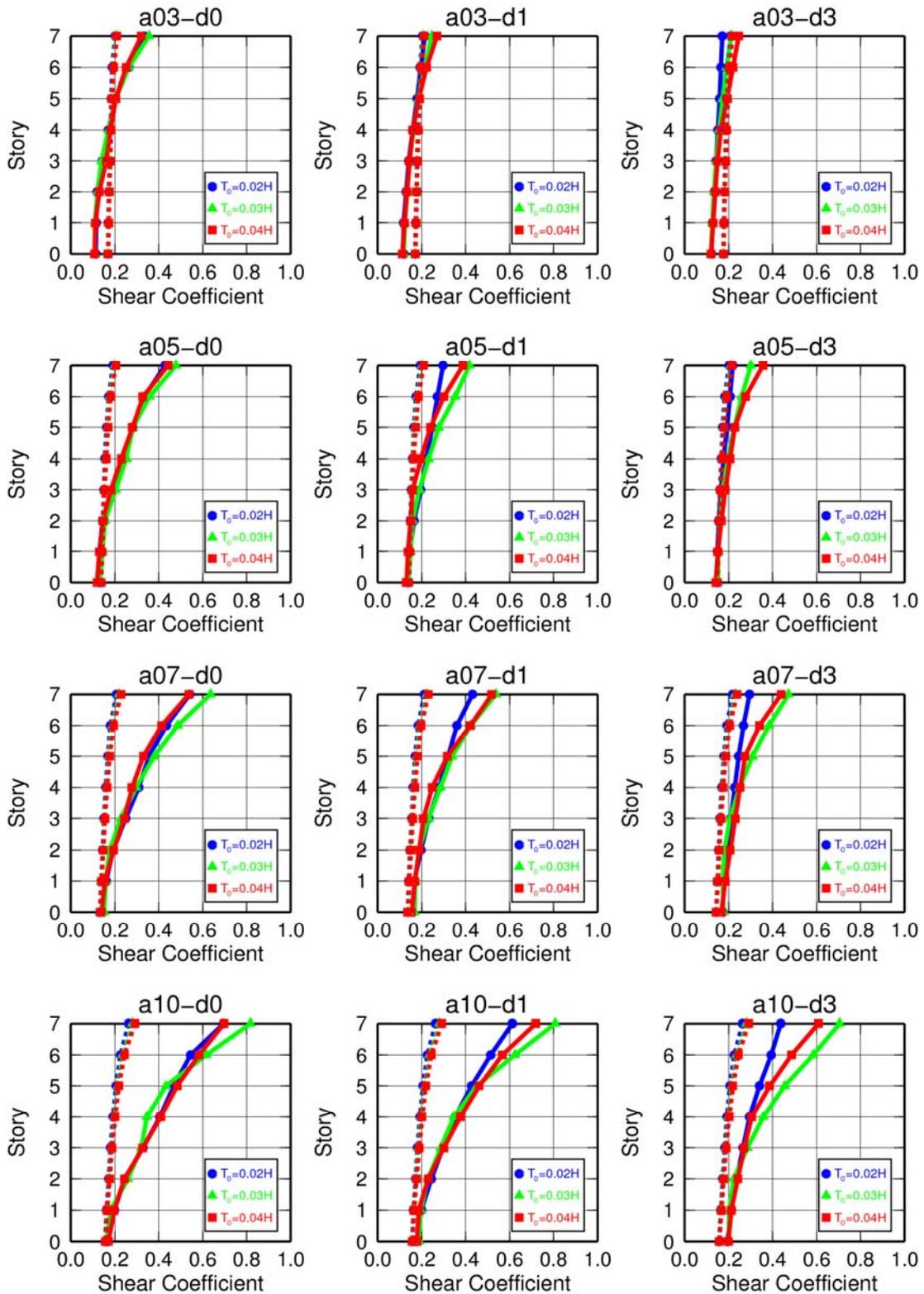


図 3.3-32 上部構造 7 層モデル (減衰定数 2%、免震層線形弾性要素周期 4.0 秒) の層せん断力係数 (実線は時刻歴応答解析結果、点線は告示計算結果)、入力波：2 種地盤卓越周期 (長)

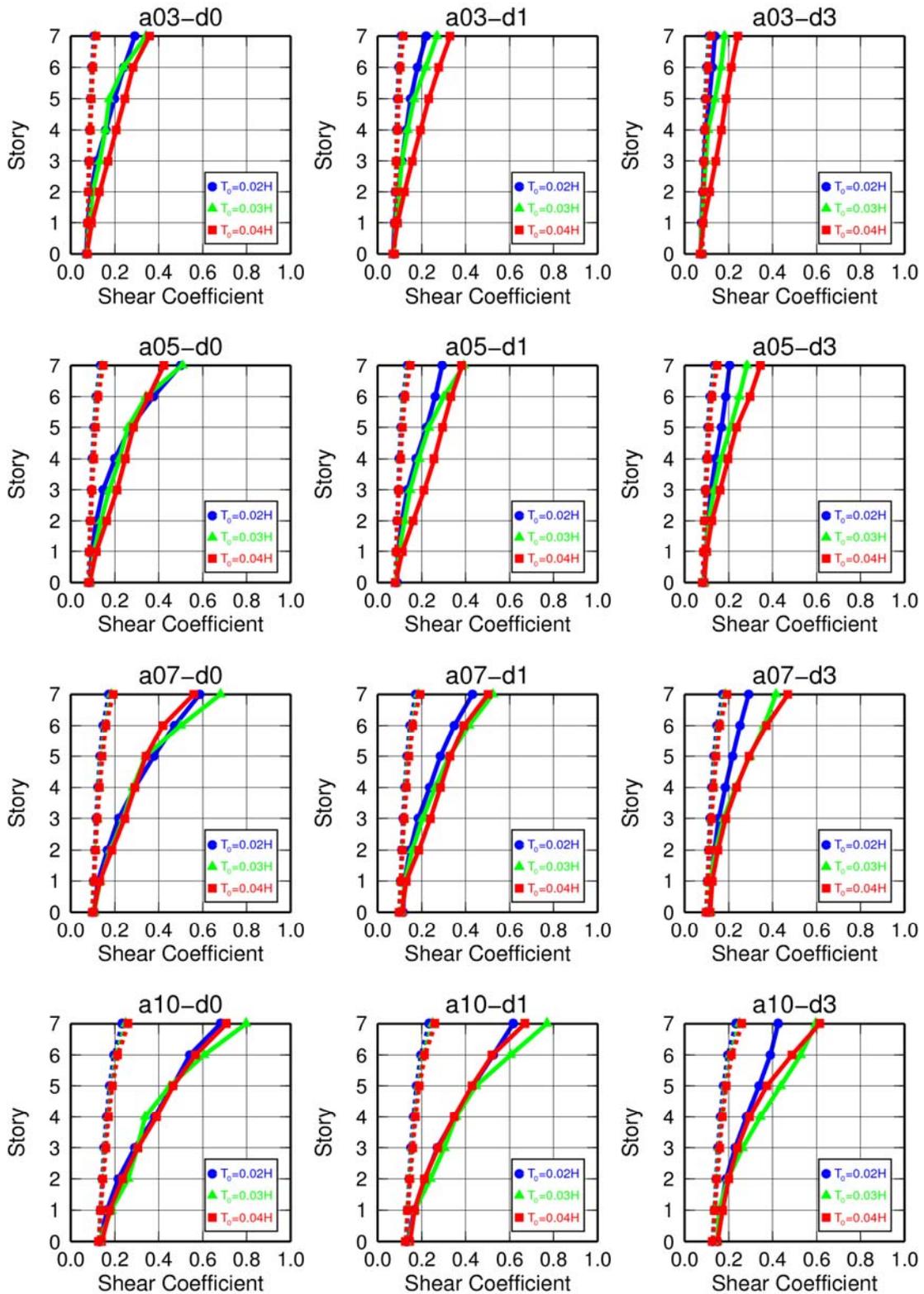


図 3.3-33 上部構造 7 層モデル (減衰定数 2%、免震層線形弾性要素周期 6.0 秒) の層せん断力係数 (実線は時刻歴応答解析結果、点線は告示計算結果)、入力波：2 種地盤卓越周期 (長)

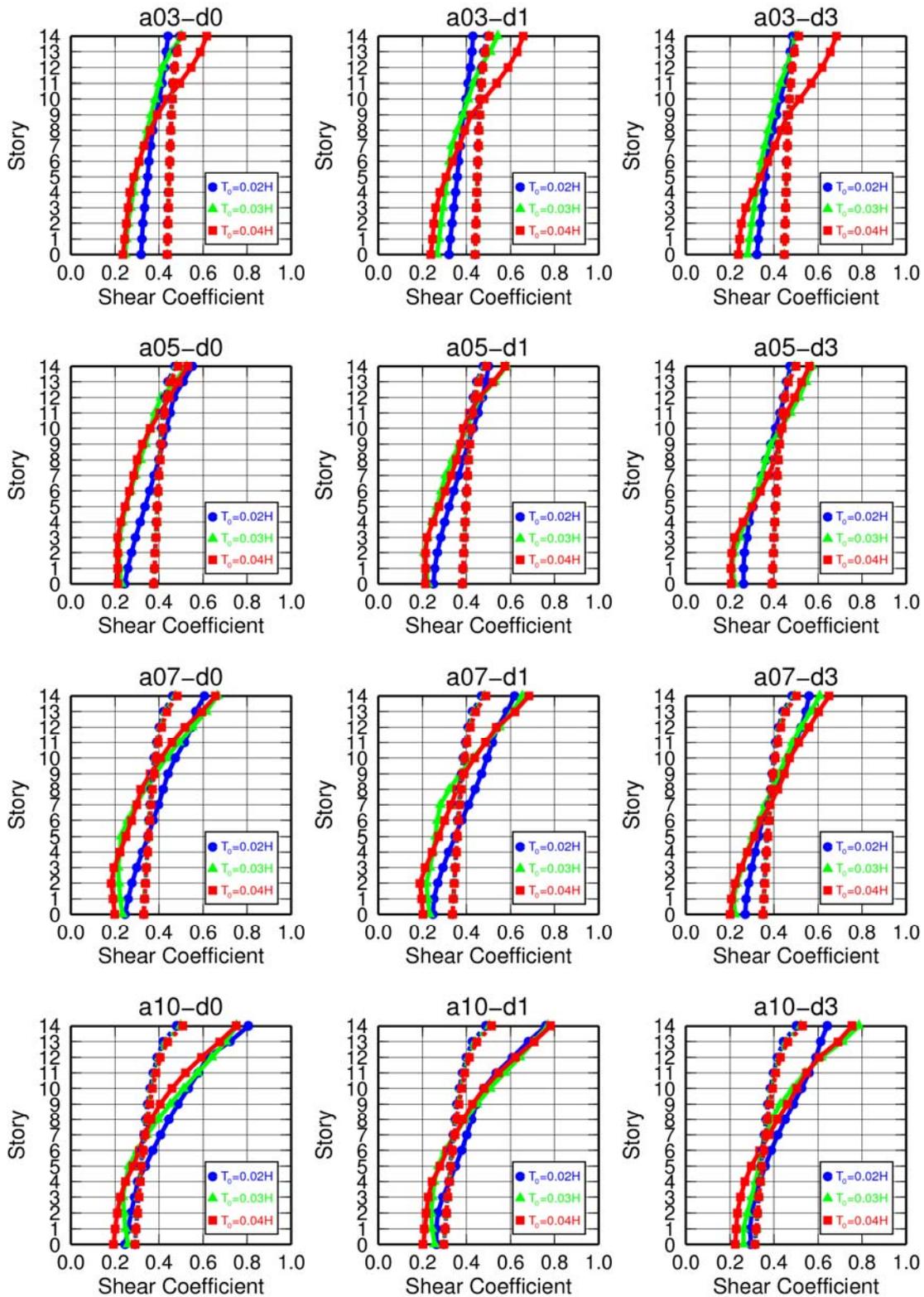


図 3.3-34 上部構造 14 層モデル (減衰定数 2%、免震層線形弾性要素周期 2.5 秒) の層せん断力係数 (実線は時刻歴応答解析結果、点線は告示計算結果)、入力波：2 種地盤卓越周期 (長)

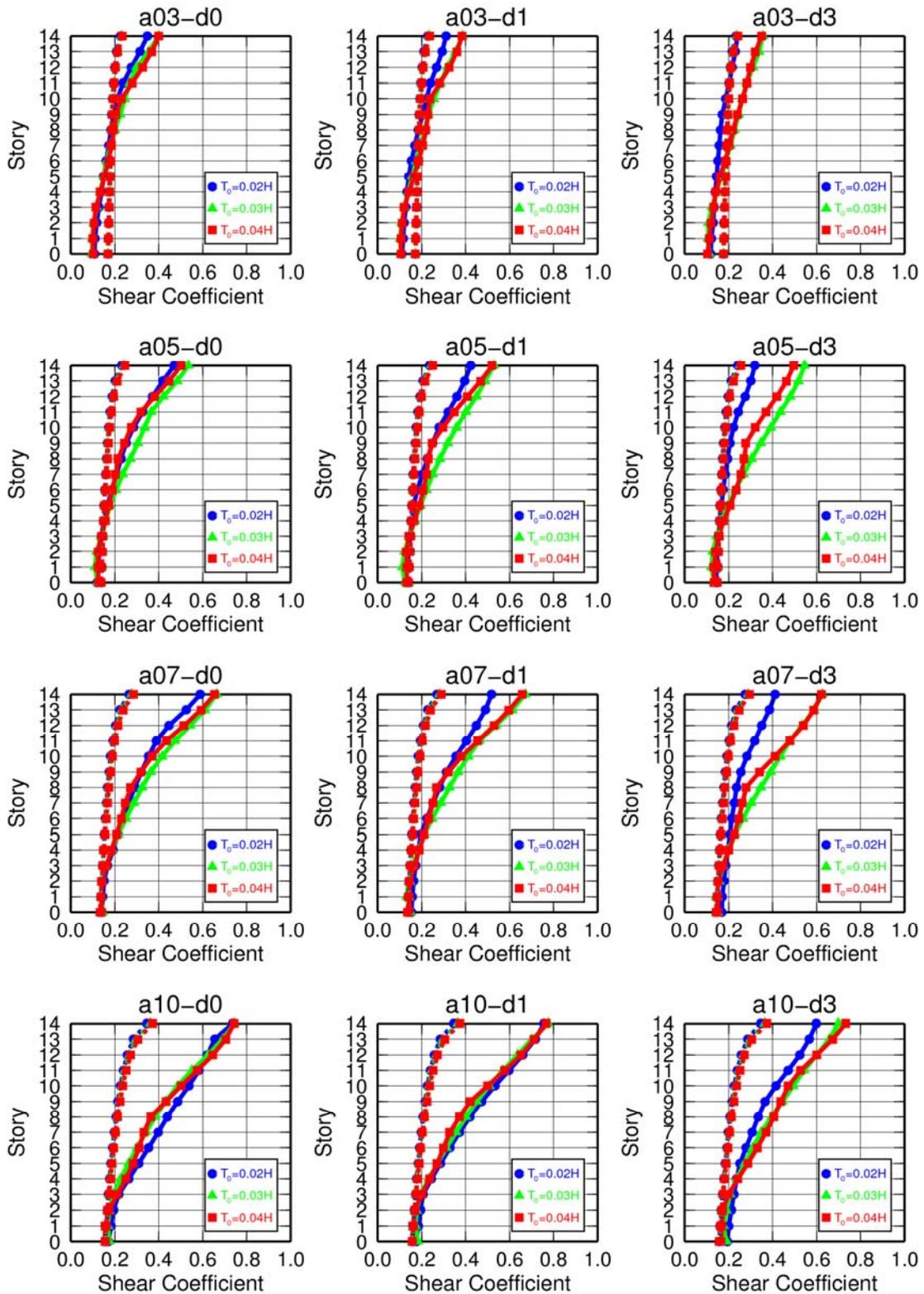


図 3.3-35 上部構造 14 層モデル (減衰定数 2%、免震層線形弾性要素周期 4.0 秒) の層せん断力係数 (実線は時刻歴応答解析結果、点線は告示計算結果)、入力波：2 種地盤卓越周期 (長)

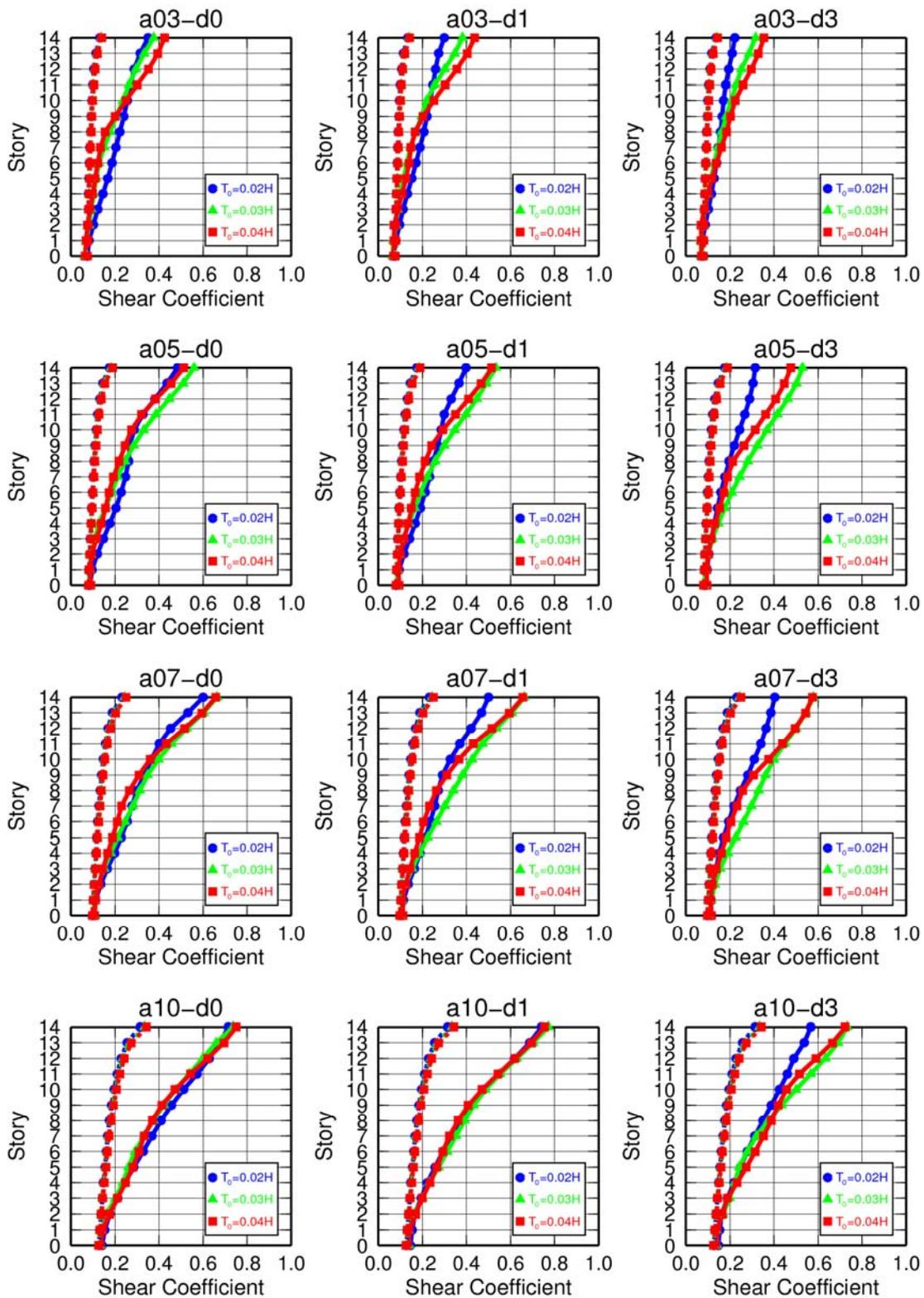


図 3.3-36 上部構造 14 層モデル (減衰定数 2%、免震層線形弾性要素周期 6.0 秒) の層せん断力係数 (実線は時刻歴応答解析結果、点線は告示計算結果)、入力波：2 種地盤卓越周期 (長)

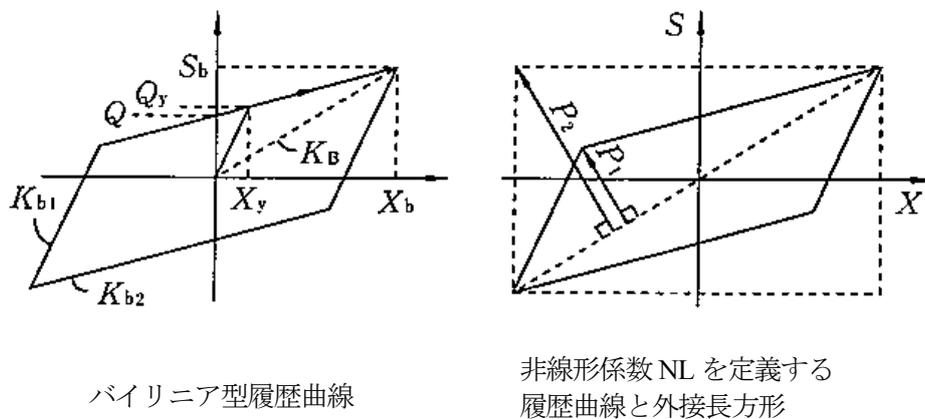
3-4 解析結果の分析

3-4-1 パラメータと応答値との対応

(1) 免震層のバイリニア型復元力特性の影響

免震層のバイリニア型復元力特性のパラメータが、上部構造の層せん断力分布に及ぼす影響について検討する。

ここで用いるパラメータとしては、免震層の応答最大変形に基づく等価周期 T_{eq} 、初期剛性に対応する周期（上部構造が剛体時） T_1 、免震層の応答最大変形に対応する非線形係数 NL 、上部構造の基礎固定時 1 次固有周期 T_0 の 4 つを考える。



$$NL = A_h / (4S_b X_b) = Q_y / S_b - X_y / X_b$$

A_h : 履歴曲線の面積

図 3.4-1 Skinner による非線形係数 NL ⁶⁾

パラメータと応答値に基づく増幅率あるいは告示 2009 号による方法との比率などについて 3-2 節で示した 3 つの入力地震動に対する応答解析結果を用いて検討する。第 2 種地盤（短）の告示 1461 号に基づく地震動（以下、告示波）を用いた結果を図 3.4-2～図 3.4-7 に、第 1 種地盤の告示波を用いた結果を図 3.4-8～図 3.4-13 に、第 2 種地盤（長）の告示波を用いた結果を図 3.4-14～図 3.4-19 に、それぞれ示す。各図中には、それぞれのパラメータ範囲で線形回帰した結果を示している。図中の R は線形回帰式の相関係数である。

なお、非線形係数 NL は Skinner⁶⁾ により提案された係数であり、免震層がバイリニア形履歴曲線を有する場合の、履歴曲線を囲む長方形の面積に対する履歴曲線の描く面積の比に等しくなる（図 3.4-1）。従って等価減衰定数 h_{eq} とは $h_{eq} = (2/\pi) \cdot NL$ の関係がある。

i) 第 2 種地盤（短）の告示波に対する結果について

図 3.4-2 は、横軸に T_{eq}/T_0 をとり、縦軸に免震層に対する層せん断力係数比（増幅率と呼ぶ）をとつ

ており、 T_1/T_0 のランク別に記号を変えてプロットしている。同図(a)は最上層の増幅率を、同図(b)は中間層の増幅率をそれぞれ示している。これより全体としては、 T_{eq}/T_0 が大きくなるにつれて増幅率がやや大きくなる傾向が見られ、 T_1/T_0 が小さいほど大きな増幅率になっている。また、中間層は最上層の1/2程度あるいはそれ以下の増幅率になっている。ただし、全体としてはばらつきが大きい。

図3.4-3は、横軸にNLをとり、縦軸に増幅率をとっており、 T_1/T_0 のランク別に記号を変えてプロットしている。これより、NLの増大につれ増幅率が大きくなる傾向がある。

図3.4-4は、同様に横軸にNLをとり、縦軸に増幅率をとっているが、 T_0 を大きく3グループに分けてプロットしている。これよりNLが大きいほど、 T_0 が長いほど大きな増幅率になっている。 T_0 の影響はそれほど小さくなく、NLの影響の方が大きくなっている。全体としてのばらつきは見られるものの、NLと T_0 だけでも概略の評価は可能と思われる。

図3.4-5～図3.4-7は、図3.4-2～図3.4-4と同じパラメータに対するものであるが、応答解析結果による層せん断力係数と免震層のせん断力係数の比を告示2009号による層せん断力係数と免震層せん断力係数の比で除した値（割増率）を縦軸としている。

図3.4-5は、 T_{eq}/T_0 および T_1/T_0 をパラメータとして表現したものであるが、これらパラメータと割増率との間にはよい対応が見られる。

図3.4-6、図3.4-7は、全体としてNLとの対応が見られるが、 T_1/T_0 あるいは T_0 との対応はそれほど明確にはなっていない。

ii) 第1種地盤の告示波に対する結果について

図3.4-8～図3.4-13に、図3.4-2～図3.4-7と対応させた図を示した。

図3.4-8～図3.4-13は、図3.4-2～図3.4-7とほぼ同様の傾向を示している。

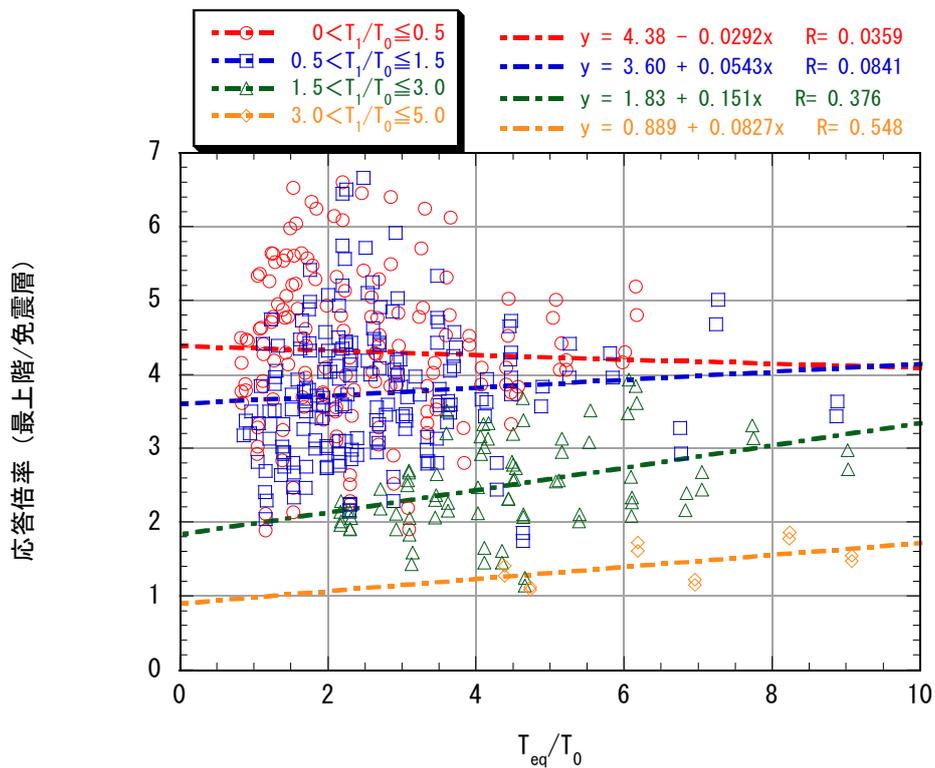
iii) 第2種地盤（長）の告示波に対する結果について

図3.4-14～図3.4-19に、図3.4-2～図3.4-7と対応させた図を示した。

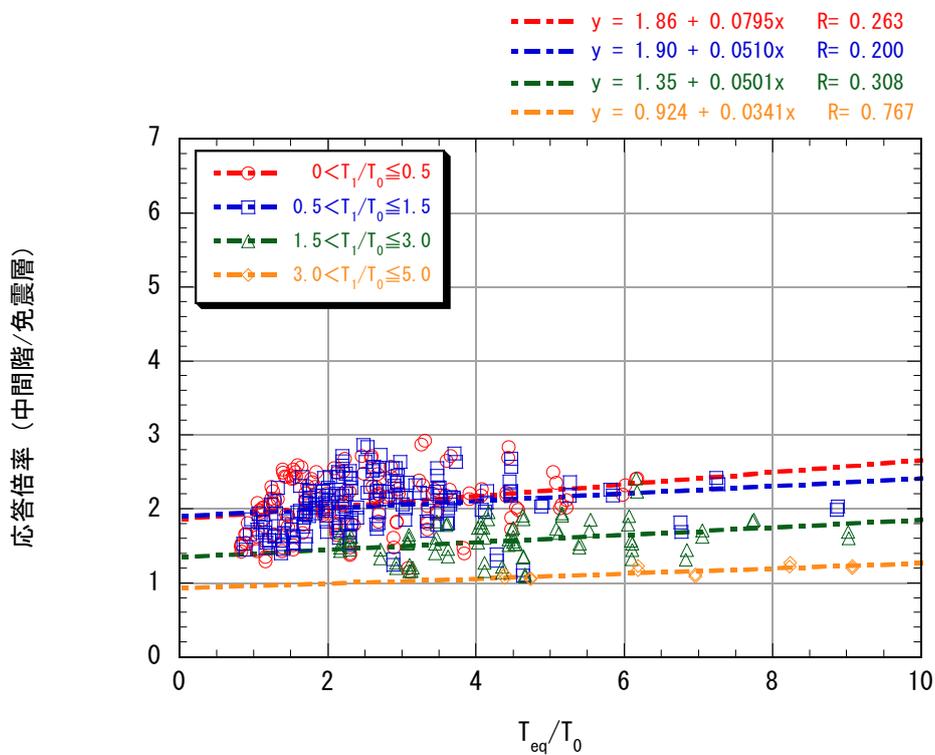
図3.4-14～図3.4-19は、図3.4-2～図3.4-7とほぼ同様の傾向を示している。

以上3種類の地震応答解析結果より、免震建築物のパラメータと応答増幅率（あるいは割増率）との対応関係がよいのは以下の3ケースであることがわかった。

- i) (NL、 T_1/T_0) と応答増幅率（免震層に対する上部構造の層せん断力係数の比）
- ii) (NL、 T_0) と応答増幅率（同上）
- iii) (T_{eq}/T_0 、 T_1/T_0) と応答割増率（告示2009号により求めた層せん断力係数に対する比）

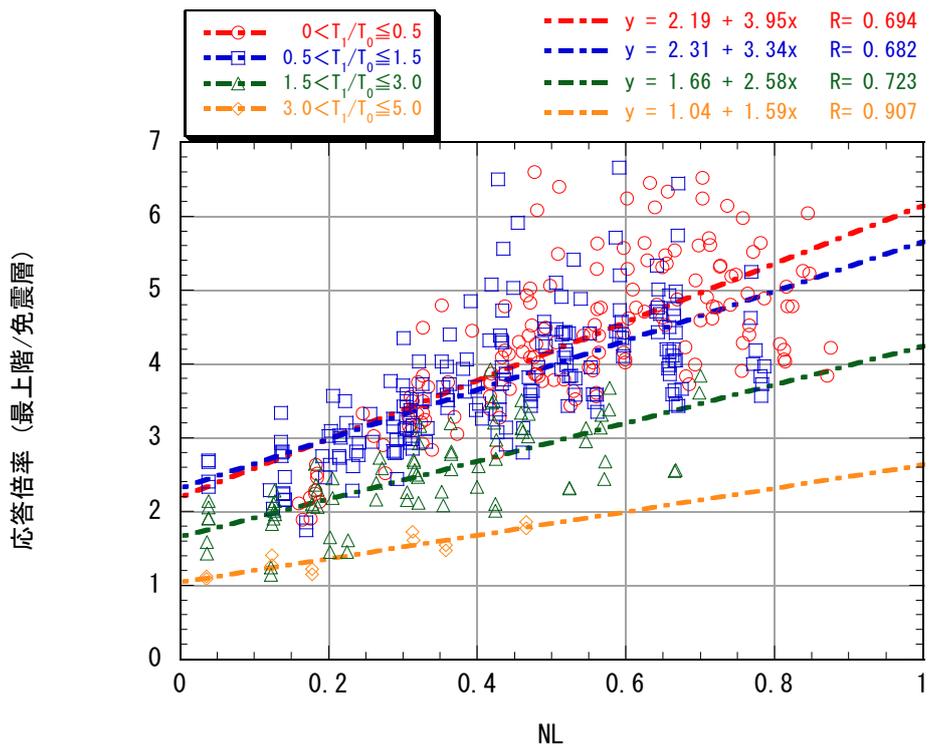


(a) 層せん断力比 (最上階/免震階)

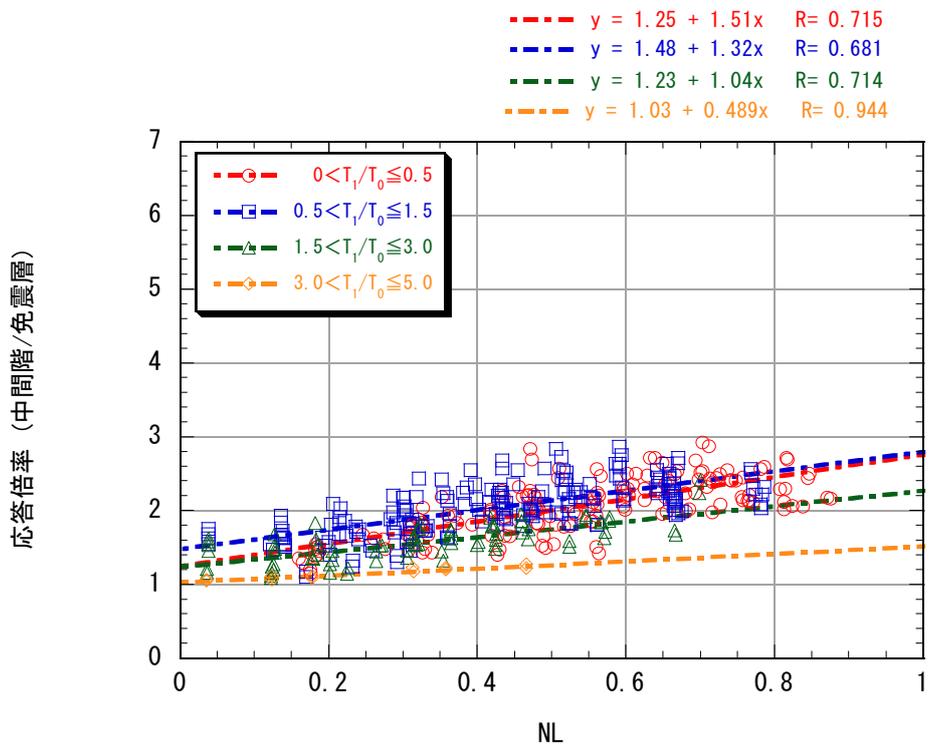


(b) 層せん断力比 (中間階/免震階)

図 3.4-2 $T_{eq}/T_0 \sim$ 免震層に対する層せん断力係数比<第 2 種地盤(短)>

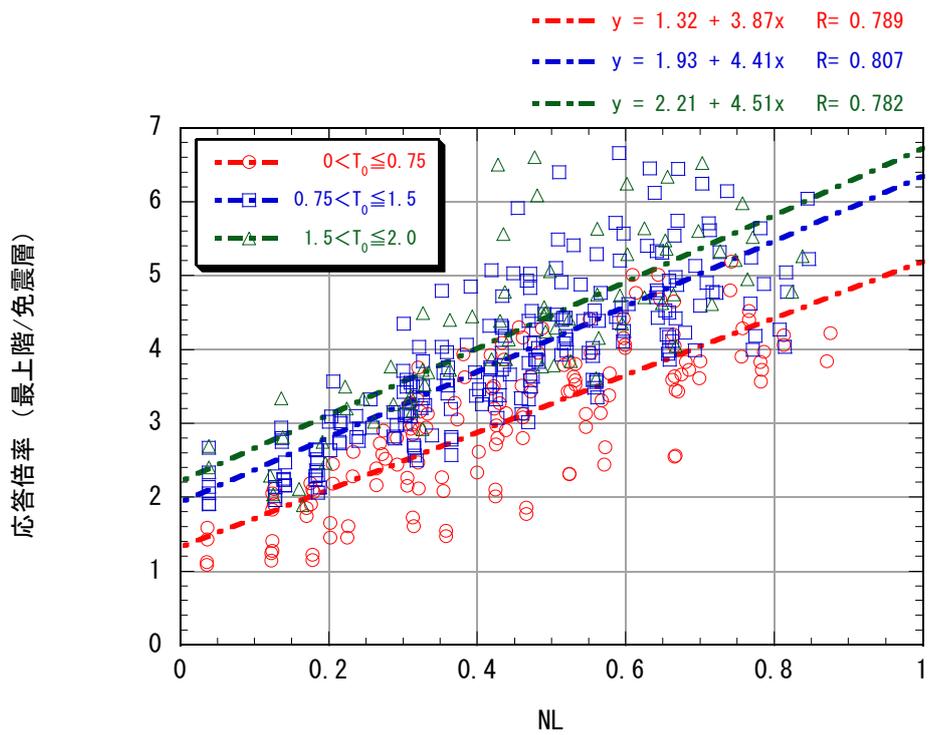


(a) 層せん断力比 (最上階/免震階)

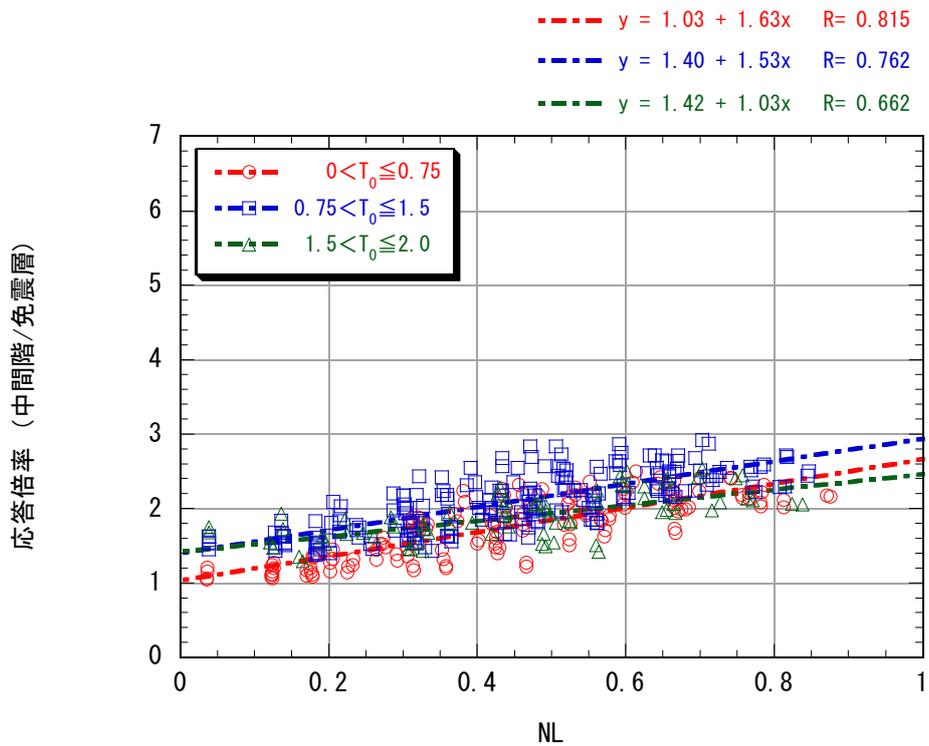


(b) 層せん断力比 (中間階/免震階)

図 3.4-3 NL～免震層に対する層せん断力係数比<第2種地盤(短)>

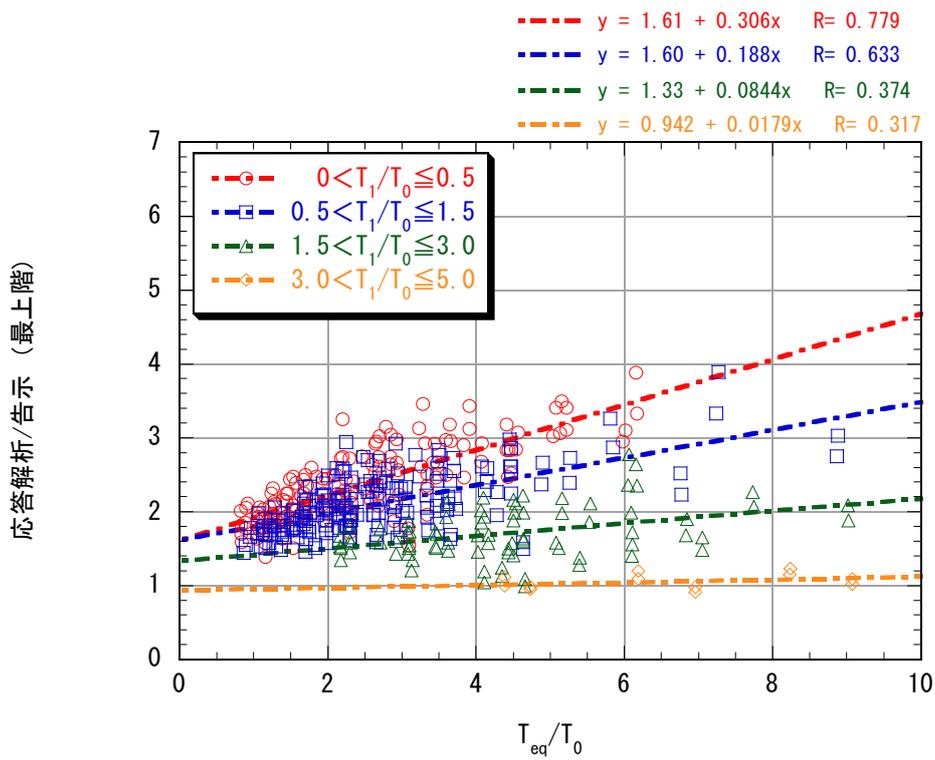


(a) 層せん断力比 (最上階/免震階)

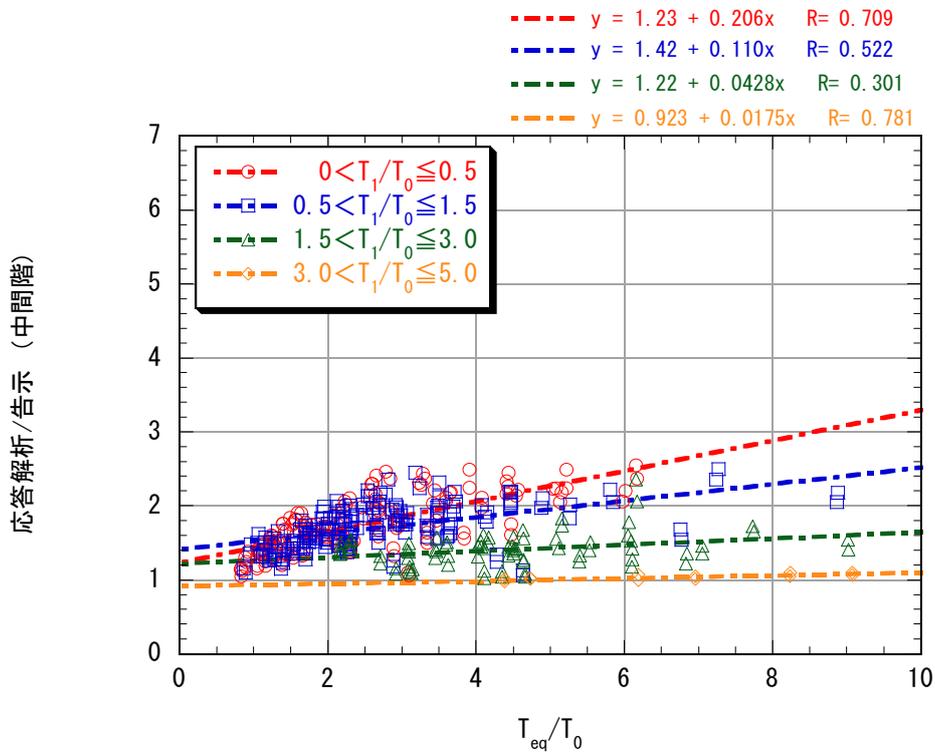


(b) 層せん断力比 (中間階/免震階)

図 3.4.4 NL～免震層に対する層せん断力係数比<第2種地盤(短)>

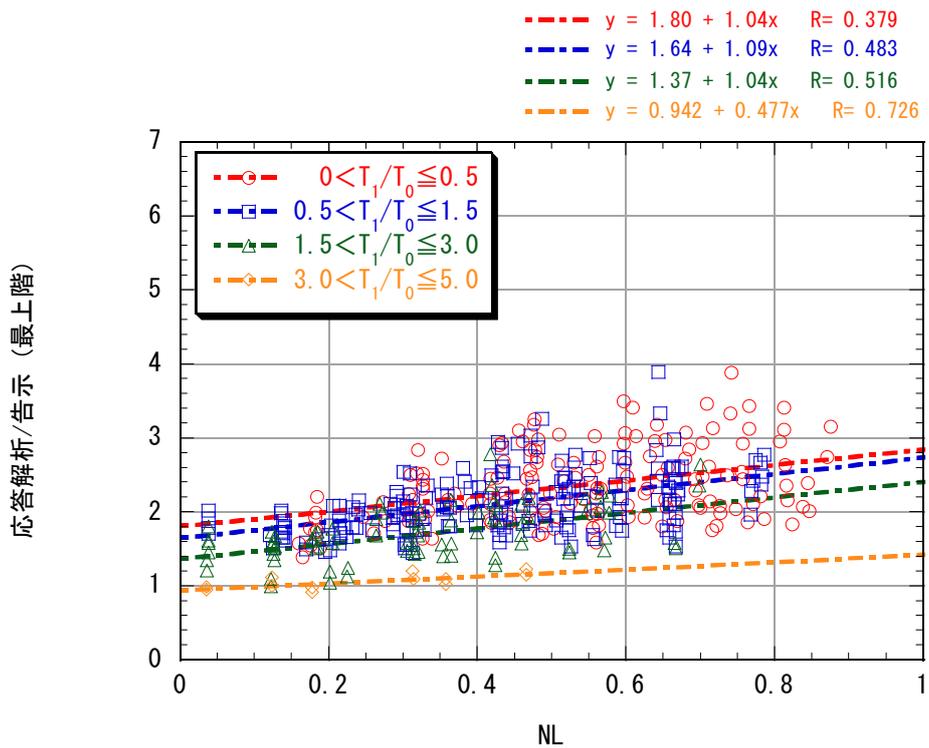


(a) 最上階の層せん断力比 (応答解析/告示 2009 号)

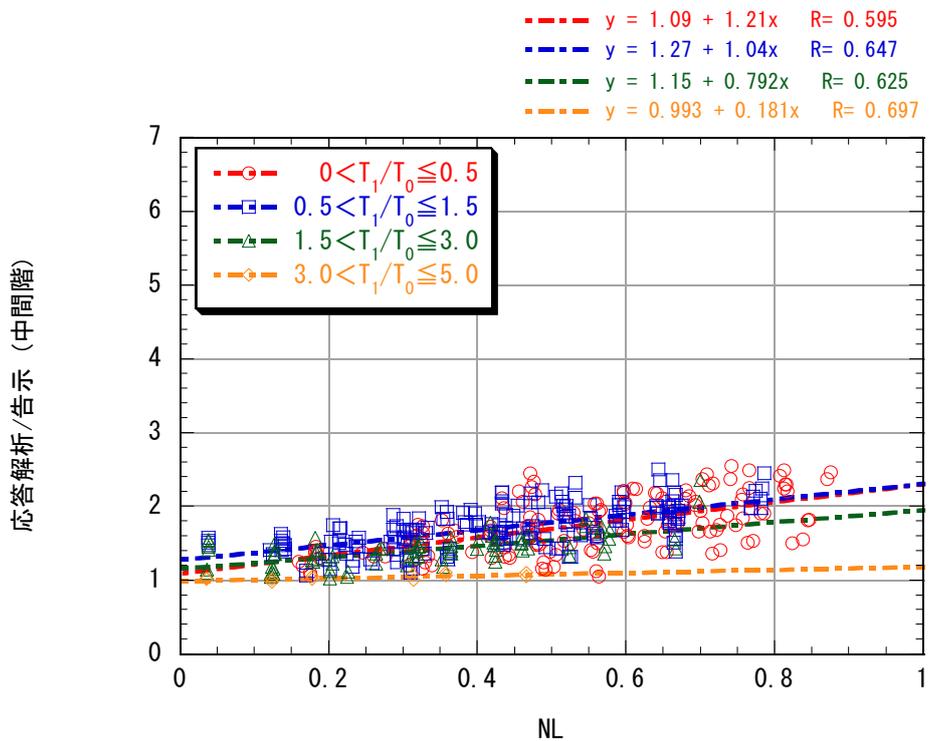


(b) 中間階の層せん断力比 (応答解析/告示 2009 号)

図 3.4-5 $T_{eq}/T_0 \sim$ 告示 2009 号による層せん断力係数に対する応答解析結果の比率<第 2 種地盤(短)>

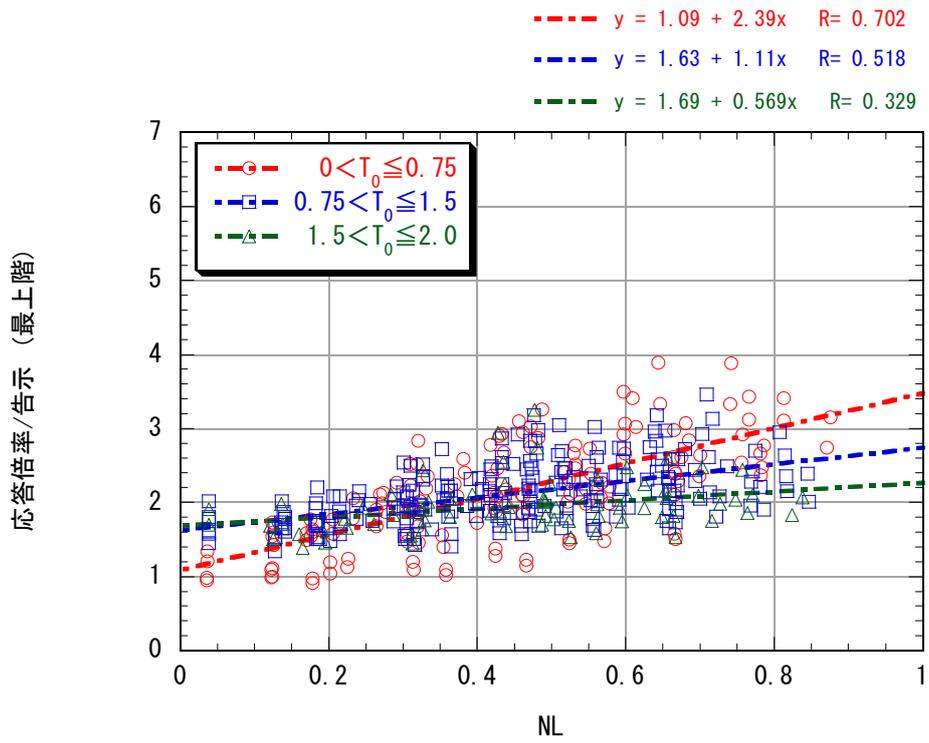


(a) 最上階の層せん断力比 (応答解析/告示 2009 号)

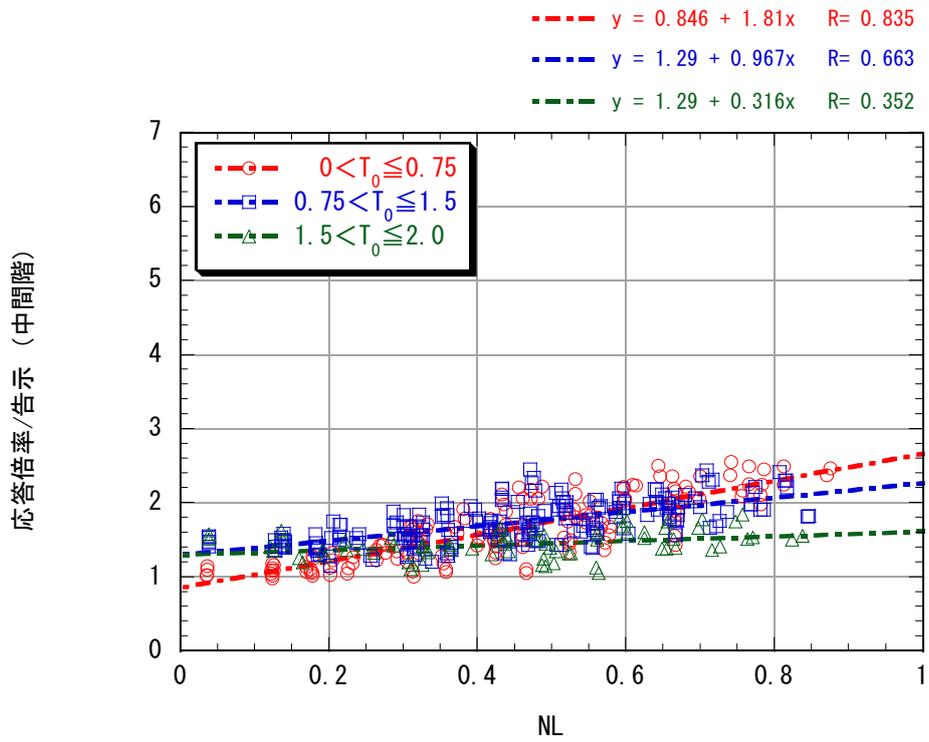


(b) 中間階の層せん断力比 (応答解析/告示 2009 号)

図 3.4-6 NL～告示 2009 号による層せん断力係数に対する応答解析結果の比率<第 2 種地盤(短)>

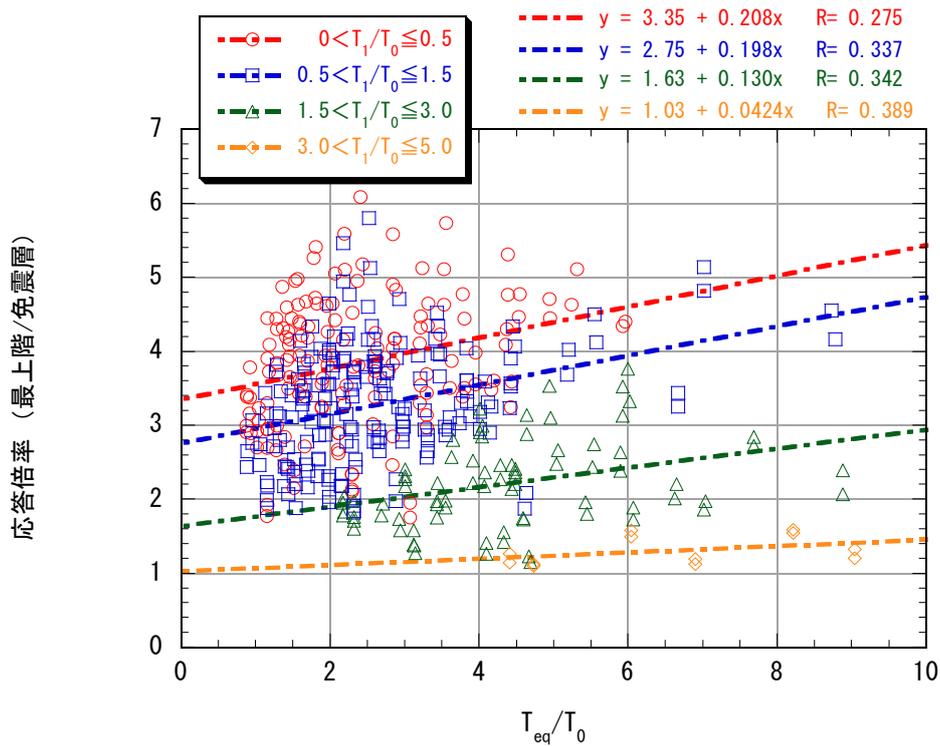


(a) 最上階の層せん断力比 (応答解析/告示 2009 号)

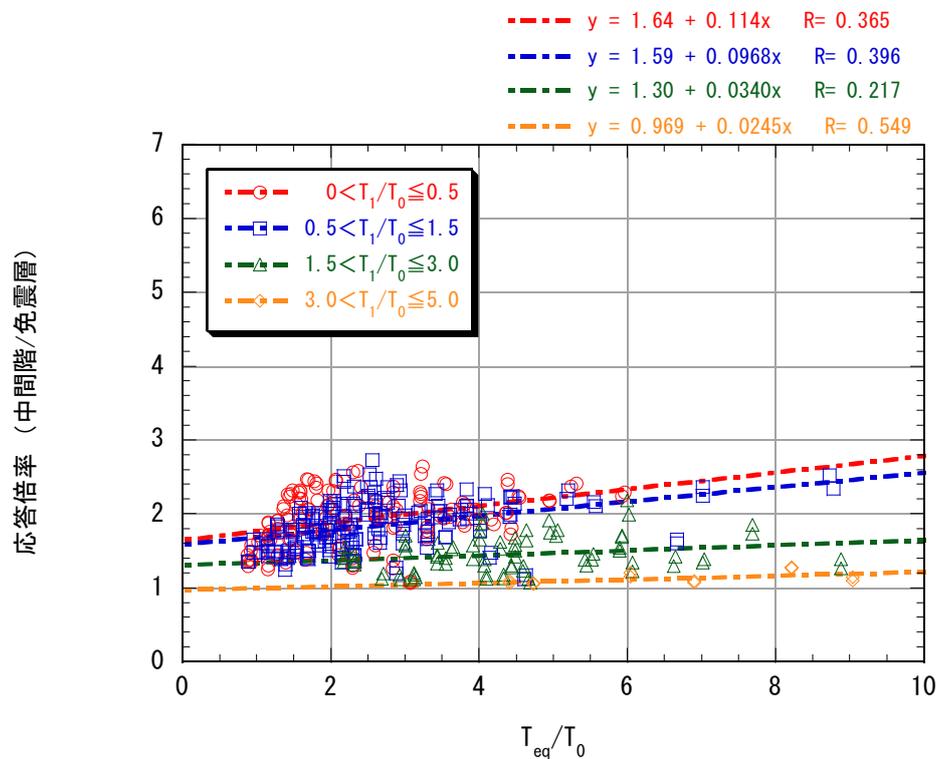


(b) 中間階の層せん断力比 (応答解析/告示 2009 号)

図 3.4-7 NL～告示 2009 号による層せん断力係数に対する応答解析結果の比率<第 2 種地盤(短)>

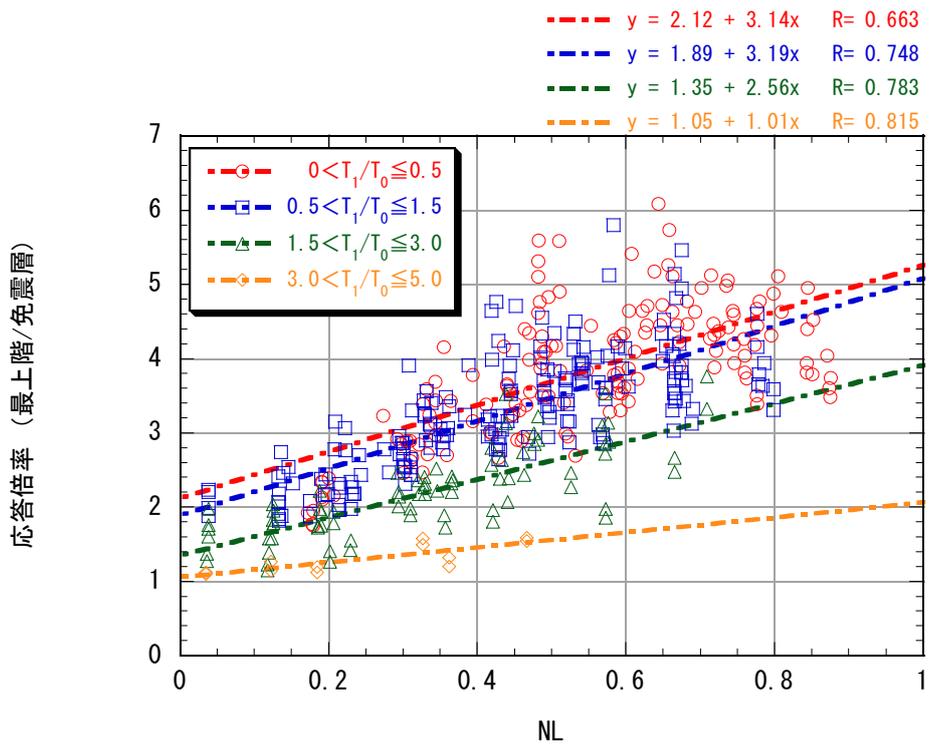


(a) 最上階の層せん断力比 (応答解析/告示 2009 号)

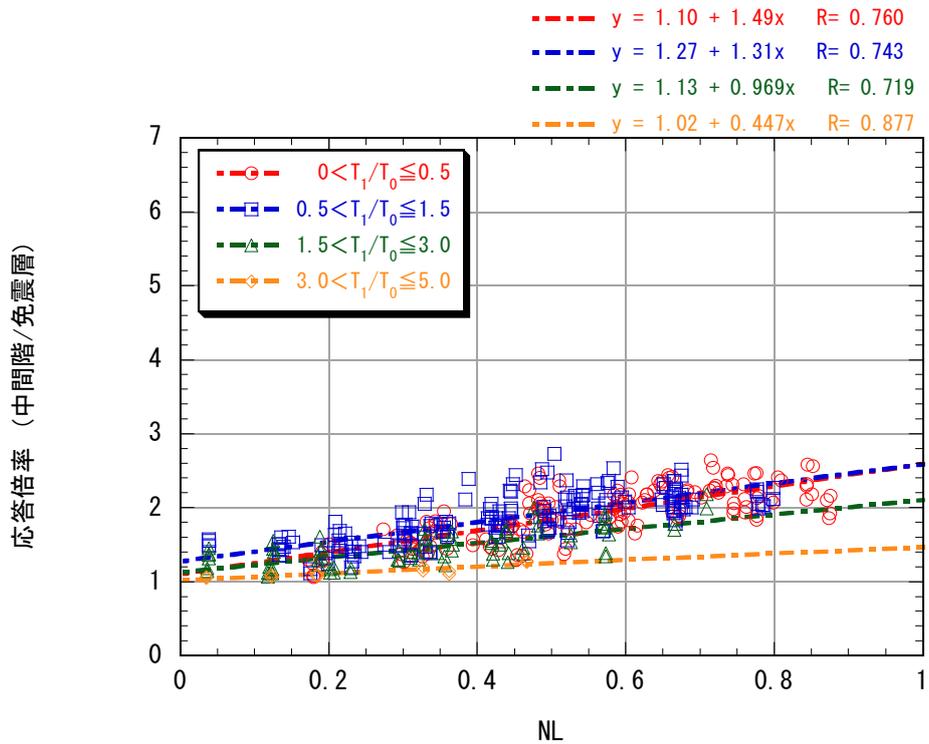


(b) 中間階の層せん断力比 (応答解析/告示 2009 号)

図 3.4-8 T_{eq}/T_0 ～免震層に対する層せん断力係数比<第 1 種地盤>

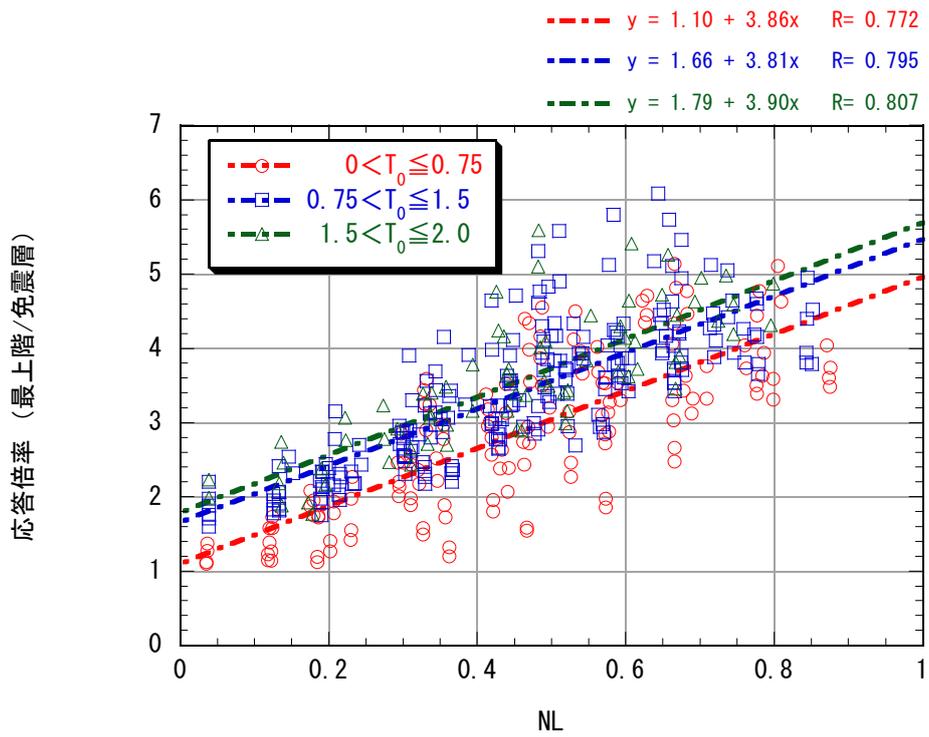


(a) 層せん断力比 (最上階/免震階)

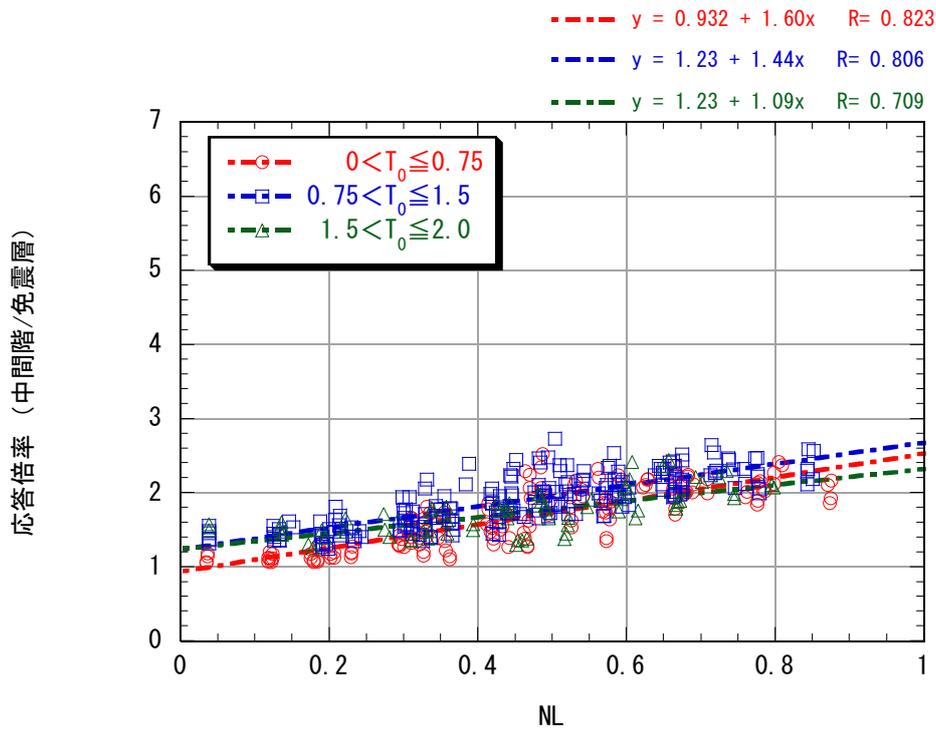


(b) 層せん断力比 (中間階/免震階)

図 3.4-9 NL～免震層に対する層せん断力係数比<第1種地盤>

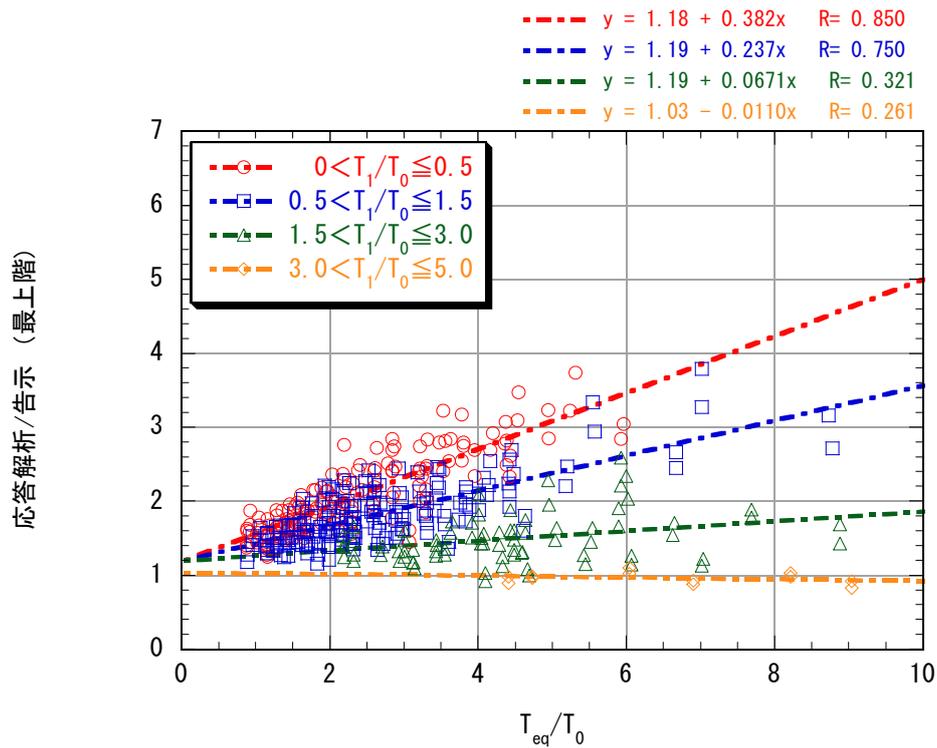


(a) 層せん断力比 (最上階/免震階)

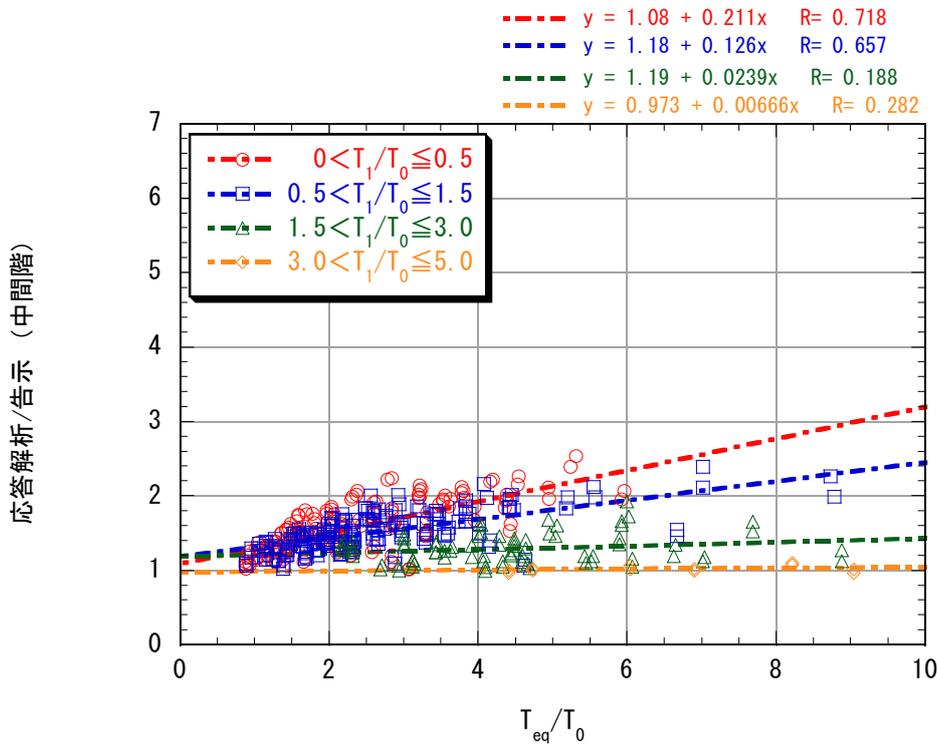


(b) 層せん断力比 (中間階/免震階)

図 3.4-10 NL～免震層に対する層せん断力係数比<第1種地盤>

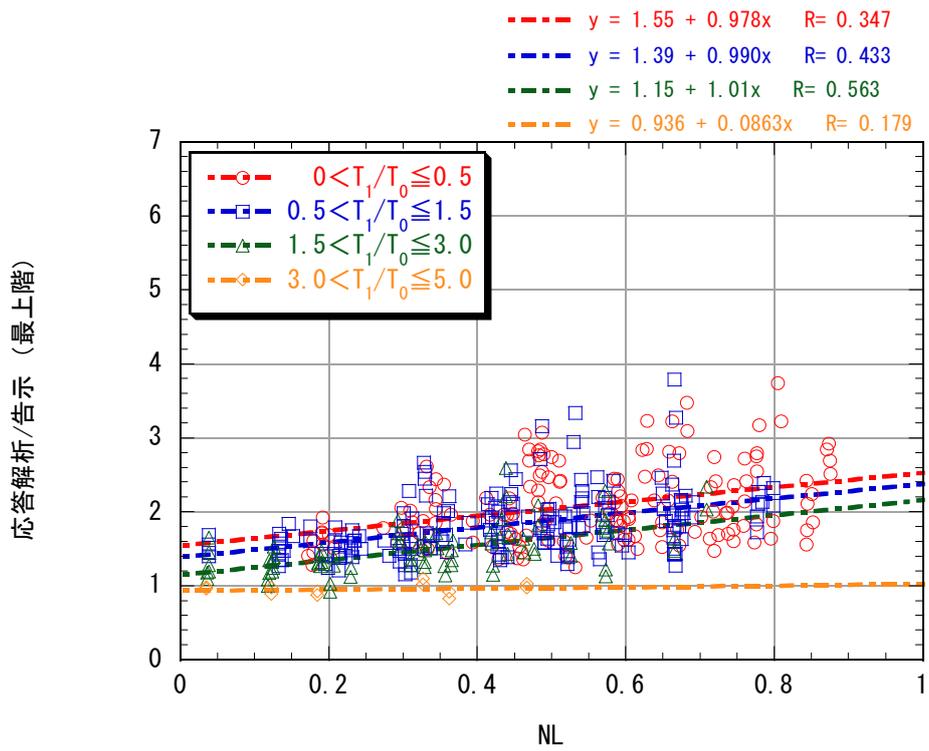


(a) 最上階の層せん断力比 (応答解析/告示 2009 号)

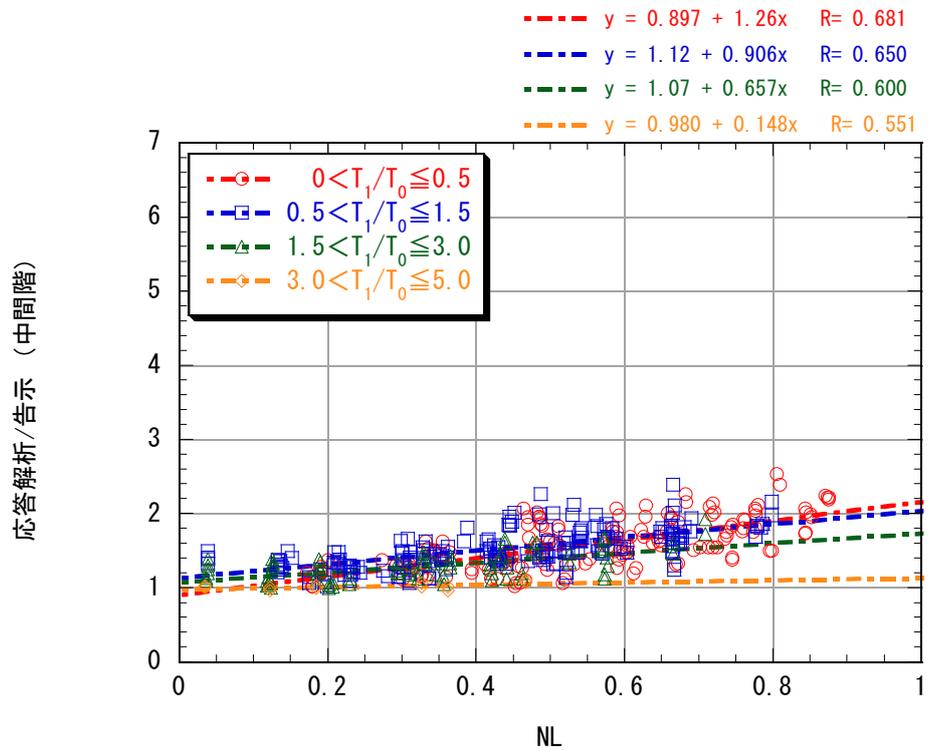


(b) 中間階の層せん断力比 (応答解析/告示 2009 号)

図 3.4-11 $T_{eq}/T_0 \sim$ 告示 2009 号による層せん断力係数に対する応答解析結果の比率<第 1 種地盤>

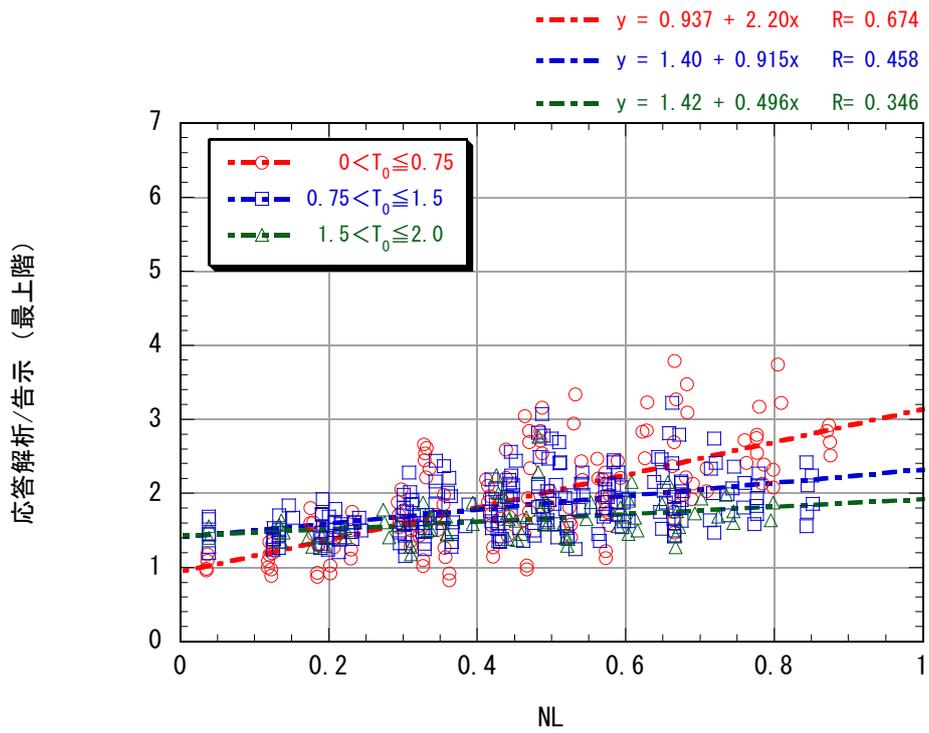


(a) 最上階の層せん断力比 (応答解析/告示 2009 号)

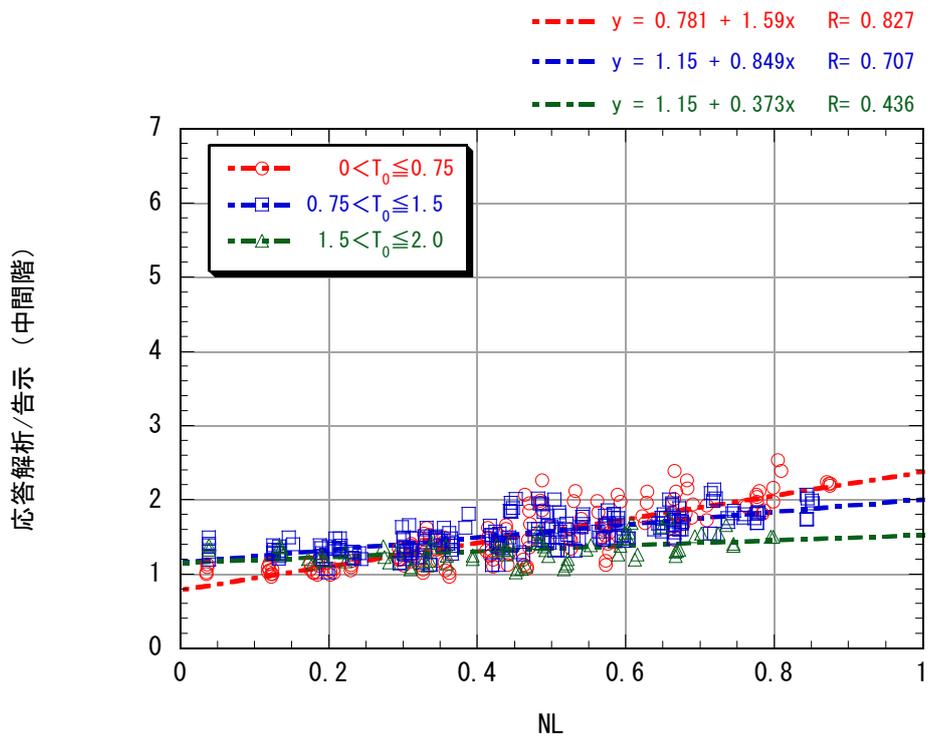


(b) 中間階の層せん断力比 (応答解析/告示 2009 号)

図 3.4-12 NL～告示 2009 号による層せん断力係数に対する応答解析結果の比率<第 1 種地盤>

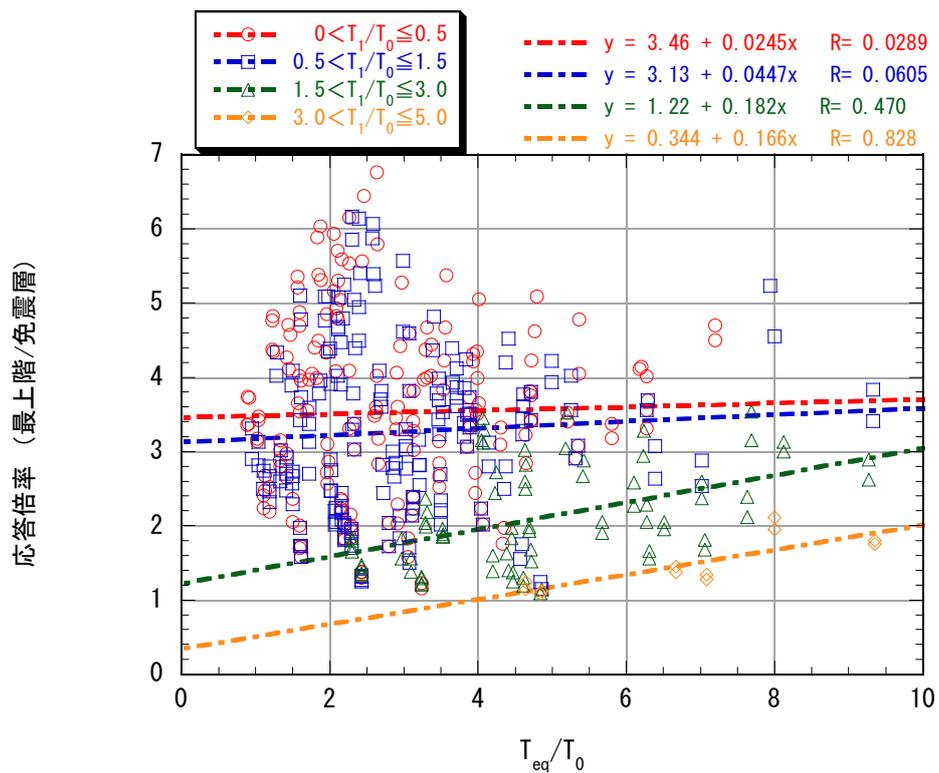


(a) 最上階の層せん断力比 (応答解析/告示 2009 号)

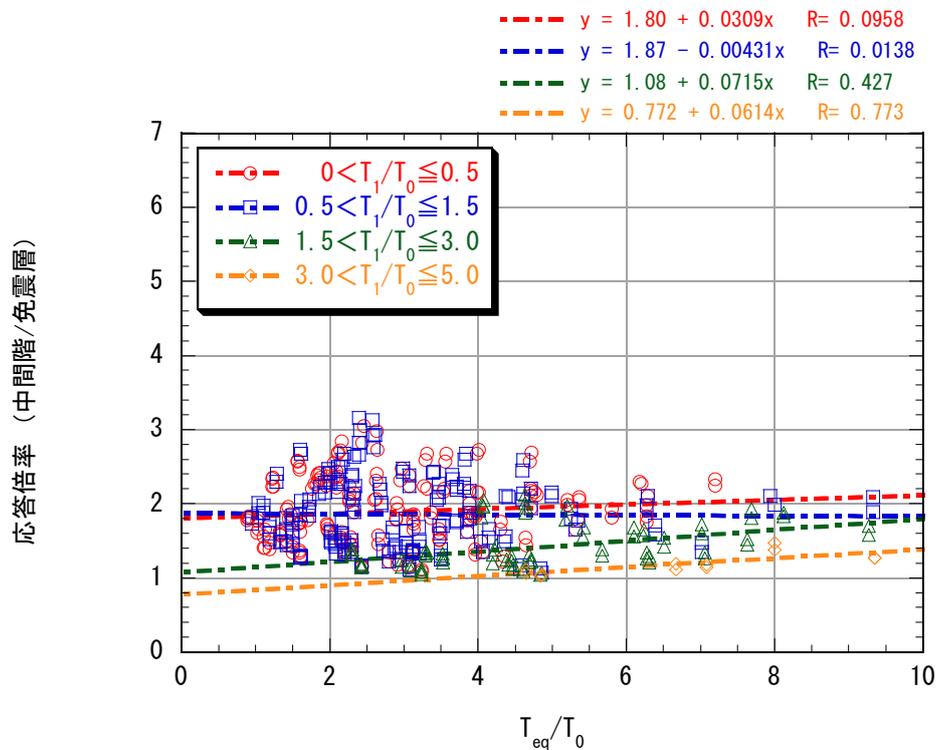


(b) 中間階の層せん断力比 (応答解析/告示 2009 号)

図 3.4-13 NL～告示 2009 号による層せん断力係数に対する応答解析結果の比率<第 1 種地盤>

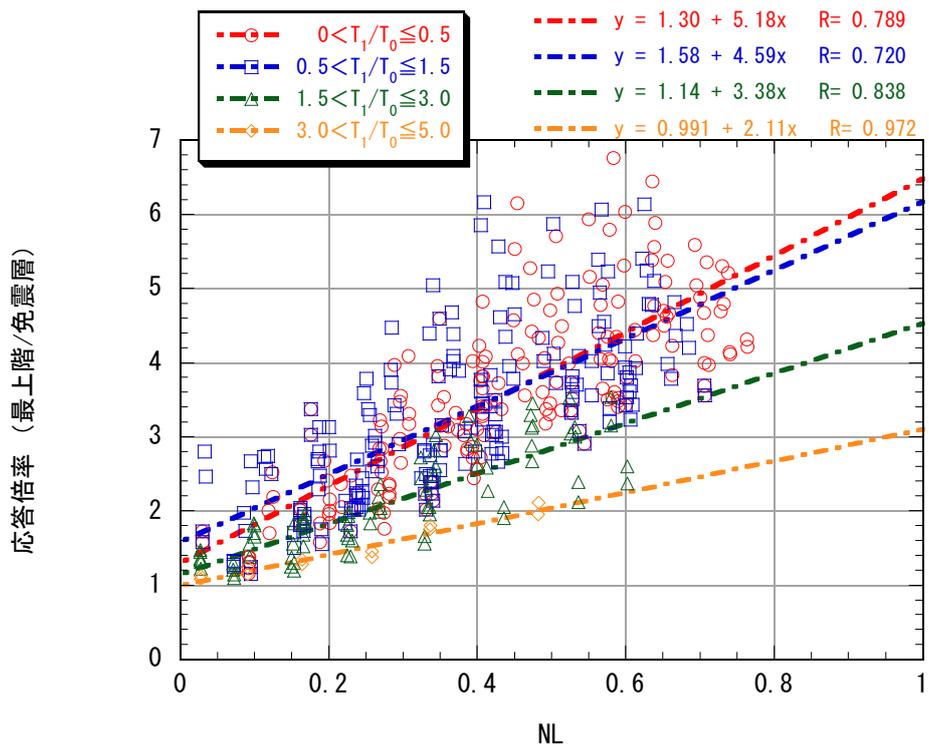


(a) 層せん断力比 (最上階/免震階)

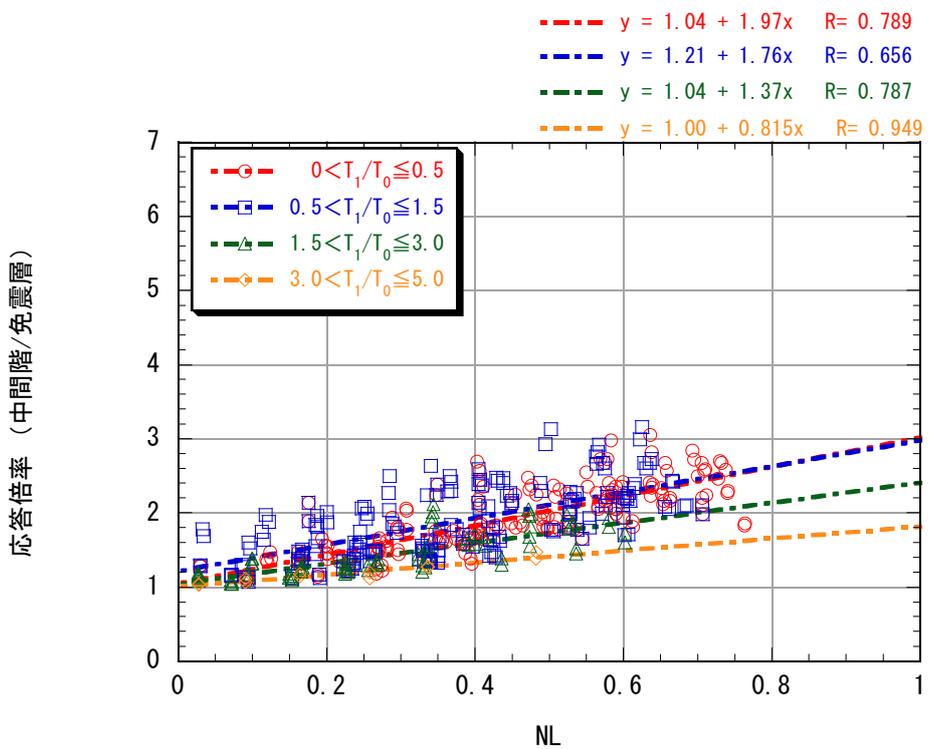


(b) 層せん断力比 (中間階/免震階)

図 3.4-14 $T_{eq}/T_0 \sim$ 免震層に対する層せん断力係数比<第 2 種地盤(長)>

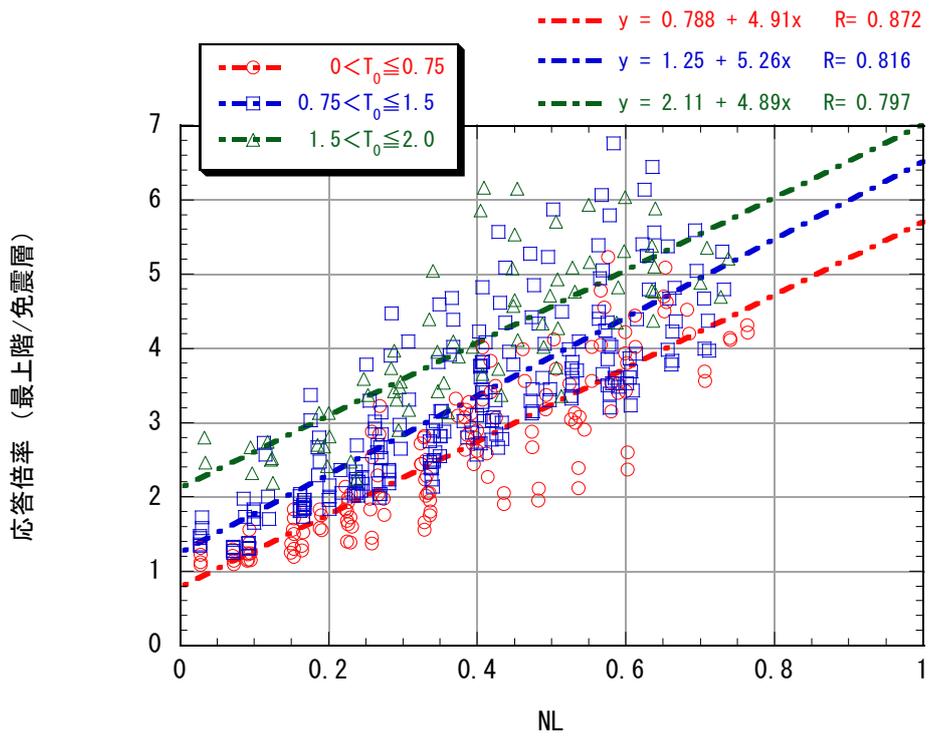


(a) 層せん断力比 (最上階/免震層)

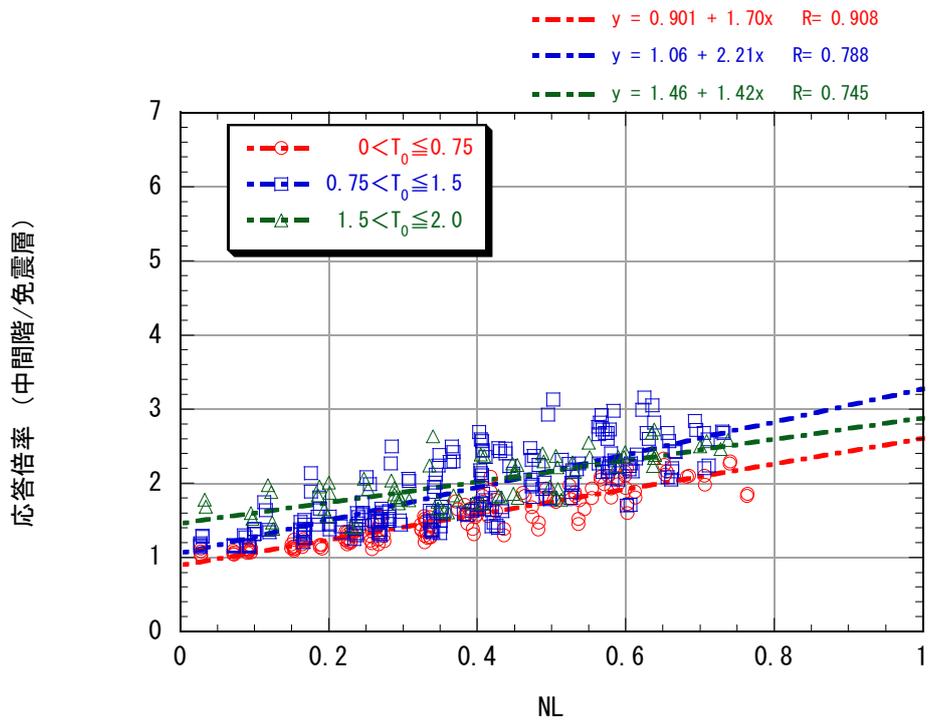


(b) 層せん断力比 (中間階/免震層)

図 3.4-15 NL～免震層に対する層せん断力係数比<第2種地盤(長)>

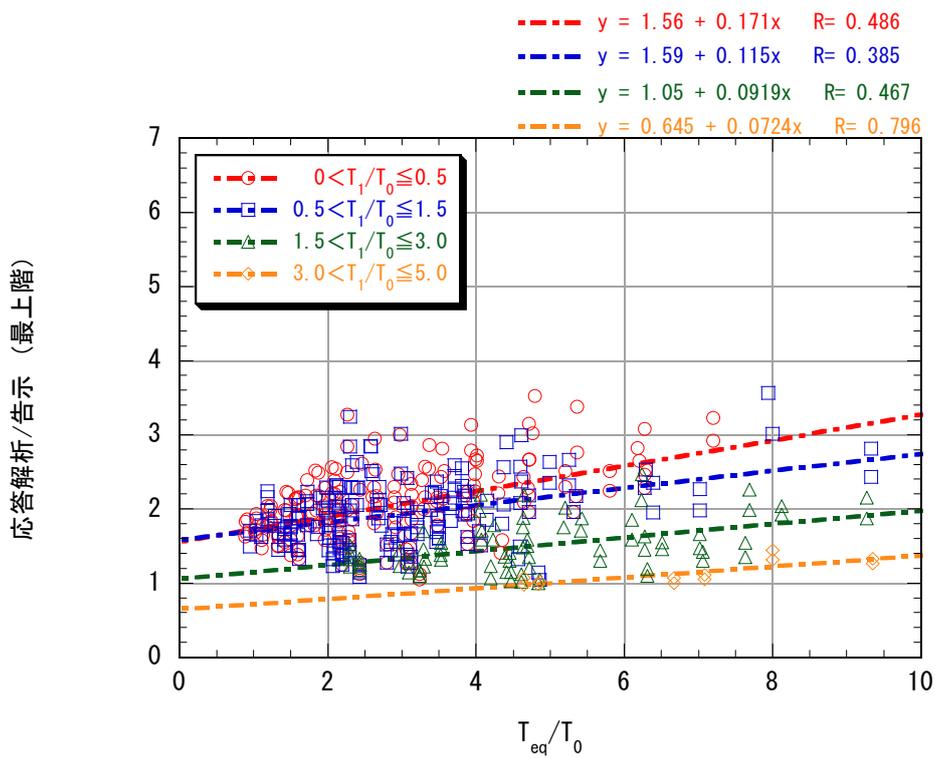


(a) 層せん断力比 (最上階/免震階)

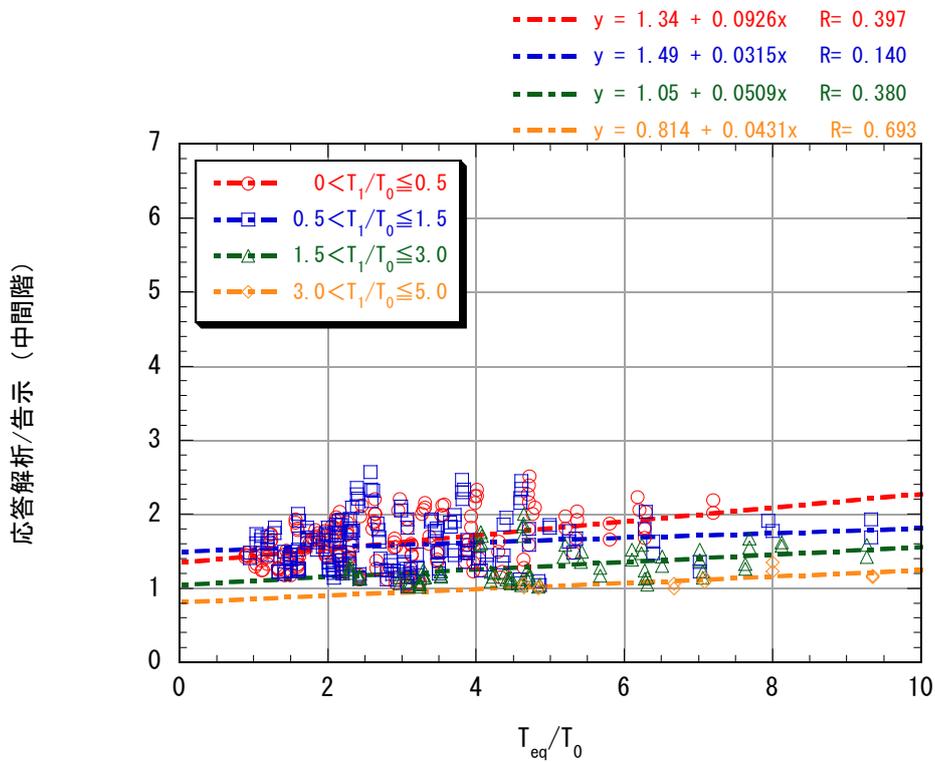


(b) 層せん断力比 (中間階/免震階)

図 3.4-16 NL～免震層に対する層せん断力係数比<第2種地盤(長)>

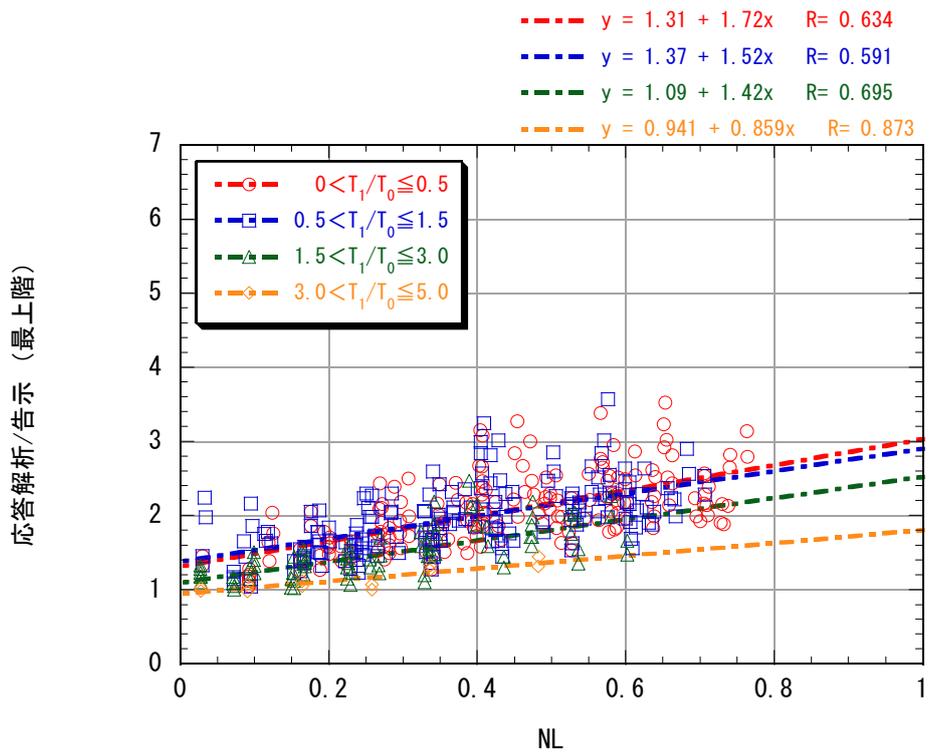


(a) 最上階の層せん断力比 (応答解析/告示 2009 号)

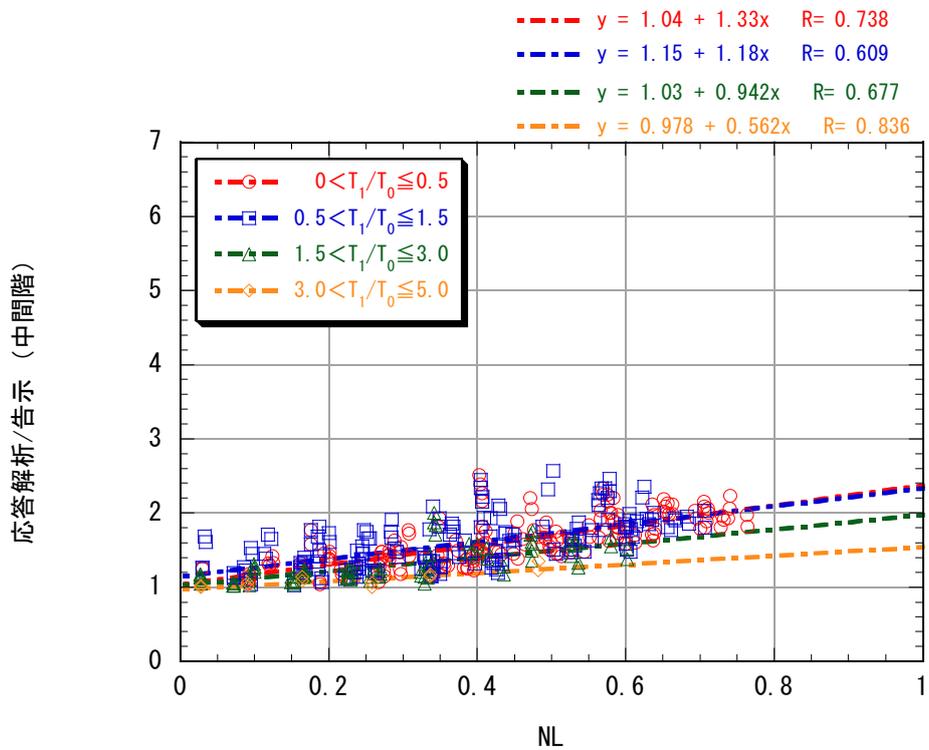


(b) 中間階の層せん断力比 (応答解析/告示 2009 号)

図 3.4-17 $T_{eq}/T_0 \sim$ 告示 2009 号による層せん断力係数に対する応答解析結果の比率<第 2 種地盤(長)>

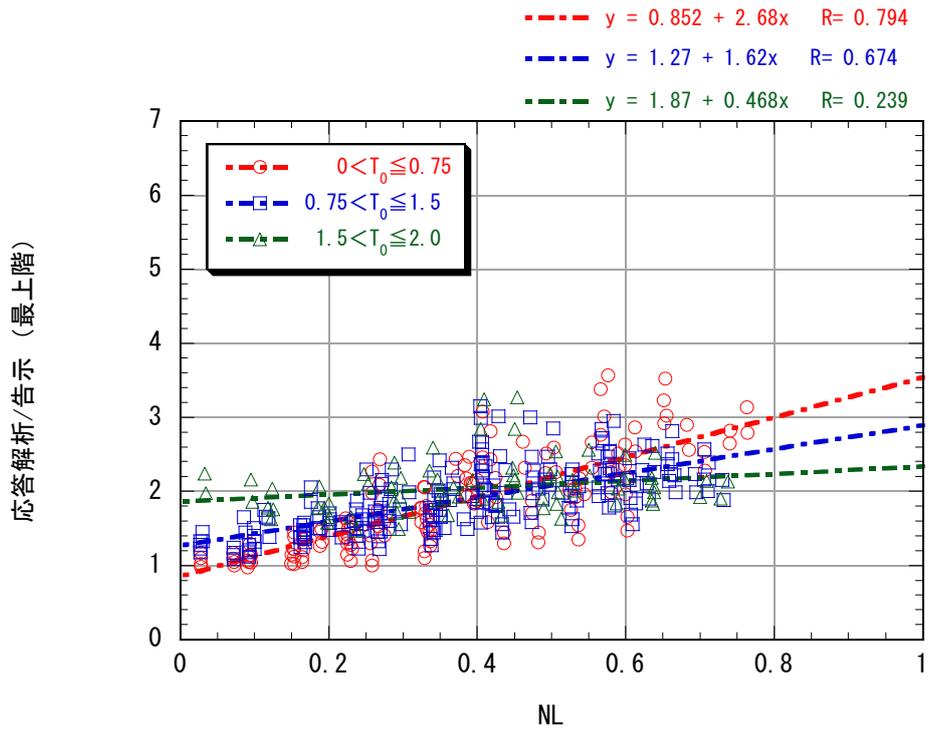


(a) 最上階の層せん断力比 (応答解析/告示 2009 号)

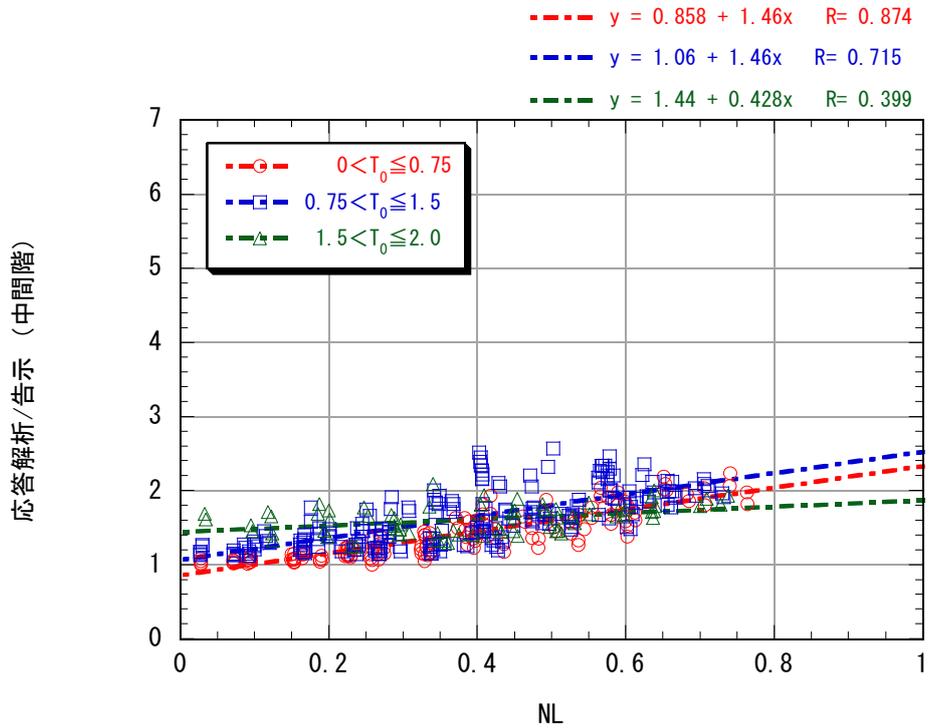


(b) 中間階の層せん断力比 (応答解析/告示 2009 号)

図 3.4-18 NL～告示 2009 号による層せん断力係数に対する応答解析結果の比率<第 2 種地盤(長)>



(a) 最上階の層せん断力比 (応答解析/告示 2009 号)



(b) 中間階の層せん断力比 (応答解析/告示 2009 号)

図 3.4-19 $T_{eq}/T_0 \sim$ 告示 2009 号による層せん断力係数に対する応答解析結果の比率<第 2 種地盤(長)>

(2) 復元力特性が上部構造の応答特性に及ぼす影響

ここでは、バイリニア型履歴を有する免震材料における復元力特性のモデル化による層せん断力係数の高さ方向分布に関する影響を確認するために、3種類の復元力特性を用いた時刻歴応答解析を実施した。

i) 解析諸元

解析モデルは、15質点せん断型モデルである。上部構造の質量分布は各階一定、剛性分布は、最上層 0.4、最下層 1.0 の台形分布である。減衰は剛性比例型とし、基礎固定時の上部構造の1次固有周期 (T_0) に対して減衰定数 $h_1=0.02$ となるように上部構造部分のみに線形粘性要素を付加している。なおここでは、 T_0 は1.47秒(階高を3.5mとすると、 $T_0=0.03H$ (H:建物高さ)に相当)とした。

本検討で対象とした免震層の特性は、図3.2-2で示した線形弾性要素と完全弾塑性要素の並列モデルを設定したものである。上部構造剛体時における免震層の線形弾性要素の剛性による周期 (T_2) は、4.0秒、完全弾塑性要素の降伏せん断力係数は0.05、降伏変位は0.01mである。

本検討で実施した地震応答解析に用いた免震層の復元力モデルは以下の3タイプである。

a) ノーマルバイリニアモデル

3-3で実施した種々のパラメータによる地震応答解析と同様のモデルである。

b) ROモデルと線形弾性要素の並列モデル

曲線型履歴モデルであるROモデルと線形弾性要素を並列に設置したモデルである。変形0からa)のモデルを用いた解析結果における最大変形までのスケルトンカーブによる仕事量が、a)のモデルと等価となるようにROモデルのパラメータおよび線形弾性要素の剛性を設定した。時刻歴応答解析の免震層の荷重変形関係を図3.4-20(a)に示す。

c) 等価線形化モデル

a)の解析結果における免震層の最大変形時における等価周期 T_{eq} および等価粘性減衰定数 h_{eq} から等価な粘性減衰係数 C_{eq} を式(3-4-1)により求めた。

$$c_{eq} = \frac{4\pi M}{T_{eq}} h_{eq} \quad (3-4-1)$$

M: 上部建物の全体質量

免震層の剛性は、a)の解析結果における免震層の最大変形時等価剛性とした。本モデルでは、線形弾性要素と等価線形粘性要素を免震層に並列配置した。時刻歴応答解析の免震層の荷重変形関係を図3.4-20(b)に示す。

入力地震動は、比較的卓越周期が短い第2種地盤(短)の告示波(3-2(2)参照)とした。

ii) 解析結果

免震層の応答解析結果を表3.4-1に示す。ノーマルバイリニアモデルに対して、ROモデルと線形弾性要素の並列モデル、等価線形化モデルの最大変形は10%以内、免震層の吸収エネルギーで2%以内の

差となっている。等価線形化モデルの最大荷重 F /全体重量 W は、ノーマルバイリニアモデルに対して23%大きくなっている。

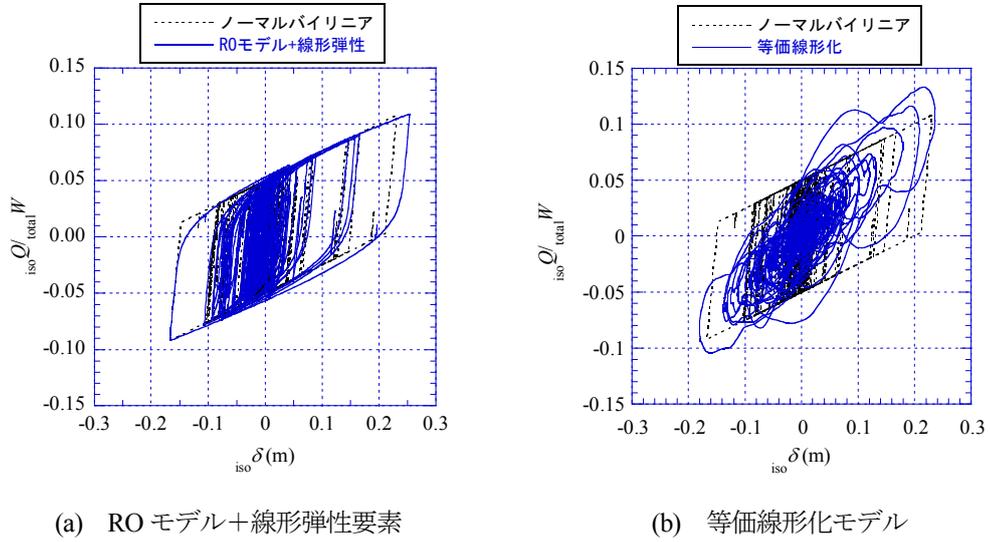
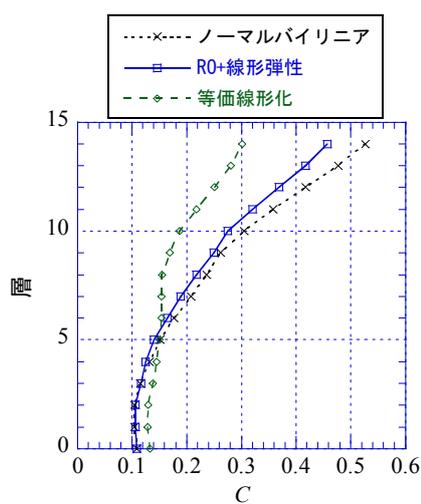


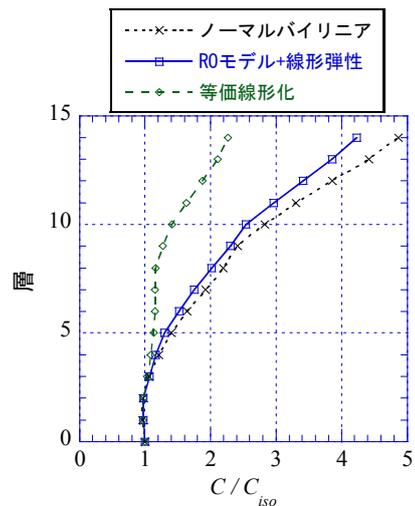
図 3.4-20 免震層の荷重変形関係

表 3.4-1 解析結果 (免震層)

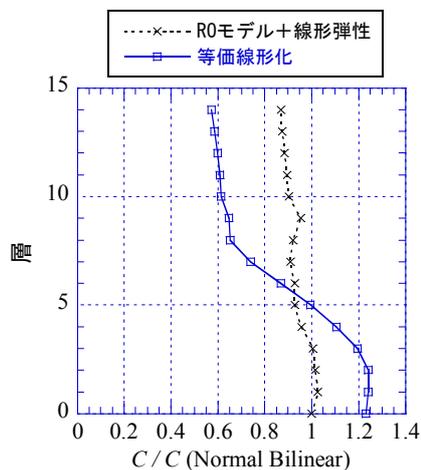
復元力モデル		最大変形		最大荷重 F/W		免震層吸収エネルギー	
		(m)	aとの比率		aとの比率	($kN \cdot m$)	aとの比率
a	ノーマルバイリニアモデル	0.231	1.00	0.108	1.00	3.20E+04	1.00
b	RO+線形弾性要素	0.254	1.10	0.109	1.01	3.26E+04	1.02
c	等価線形化モデル	0.237	1.03	0.133	1.23	3.23E+04	1.01



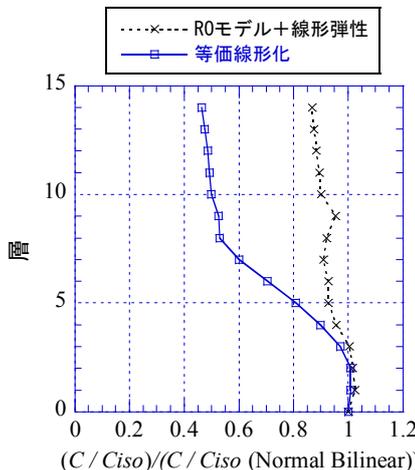
(a) 層せん断力係数 C



(b) 層せん断力係数の免震層に対する比



(c) 層せん断力係数 C の
ノーマルバイリニアに対する比



(d) 層せん断力係数の免震層に対する
比のノーマルバイリニアに対する比

図 3.4-21 最大層せん断力係数の高さ方向分布

最大層せん断力係数の高さ方向分布を図 3.4-21 に示す。図 3.4-21(a)は最大層せん断力係数、同図 b) は、最大層せん断力係数の免震層のせん断力係数に対する比を示す。ノーマルバイリニアモデルおよび RO モデルはほぼ同様の分布形状となっているが、等価線形化モデルは、上方への層せん断力係数の増幅が他のケースの分布形と異なり、

図 3.4-21(c)及び(d)は、ノーマルバイリニアモデルに対する、等価線形化モデル及び RO モデル+線形弾性要素モデルの層せん断力係数の比と層せん断力係数比に対する比を示す。RO モデルは、ノーマルバイリニアモデルよりやや小さな値であり、最上層ではノーマルバイリニアモデルに対して-14%である。下層において RO モデルがノーマルバイリニアを上回る層があるが、その差は2%とわずかである。等価線形モデルにおける免震層に対する層せん断力係数の比率は、頂部で 2.27 となっており、バ

イリニアモデル（同 4.87）、RO モデル（同 4.23）に対しそれぞれ-53%、-46%となっている。

各階の最大加速度値を図 3.4-22 に示す。等価線形化モデルでは、他の 2 モデルに対して加速度値が -35%～-50% となり各階とも大きく低下する。一方、RO モデルを用いた場合には、ノーマルバイリニアモデルの場合に対して-19%～+7%となり、概ねノーマルバイリニアモデルを下回る傾向が見られるものの、一部では大きくなる階も見られた。

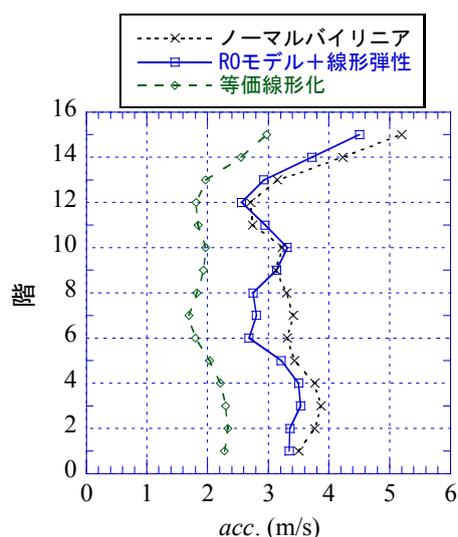


図 3.4-22 最大加速度分布

3) まとめ

バイリニア型復元力特性を有する免震材料を想定し、3 種類の異なる復元力特性を用いた層せん断力係数の高さ方向分布に関する影響を時刻歴応答解析により確認した。

- ・層せん断力係数の高さ方向に対する増幅率は、等価線形化モデルを用いるとノーマルバイリニアモデルに対して大きく抑えられる。また、剛性の急変を緩和する RO モデルを用いた場合は、ノーマルバイリニアモデルに対して、高さ方向に対する増幅がやや小さくなる。免震層の最大層せん断力に対する頂部の最大層せん断力係数の比において、RO モデルはノーマルバイリニアモデルに対して-14%であった。

- ・等価線形化モデルの最大加速度は、ノーマルバイリニアモデルの場合に対して-35%～-50%となり各階とも大きく低下する。一方、RO モデルを用いた場合には、ノーマルバイリニアモデルの場合に対して-19%～+7%となり、概ねノーマルバイリニアモデルを下回る傾向が見られるものの、一部では大きくなる階も見られた。

以上より、バイリニア型復元力特性の場合と等価減衰定数がほぼ同等な粘性減衰ダンパーを付加した場合の層せん断力係数は、バイリニア型モデルの場合よりも層せん断力係数が小さな値となっており、両者は異なる扱いとすべきと考えられる。

(3) 免震層の粘性減衰の影響

ここでは、免震層に粘性減衰を付与した場合の層せん断力係数の応答解析結果を図 3.4-23～図 3.4-32 に示す。各図は以下のものである。

図 3.4-23～25：粘性減衰がない場合の結果（バイリニア型復元力特性の場合）

図 3.4-26～28：バイリニア型復元力特性を有する免震層に減衰定数=5%分（上部構造剛体時）粘性減衰を付加した場合の結果

図 3.4-29～31：バイリニア型復元力特性を有する免震層に減衰定数=10%分（上部構造剛体時）粘性減衰を付加した場合の結果

図 3.4-32:免震層が線形弾性要素と粘性減衰要素からなり、付加する粘性減衰を減衰定数が 5%、10%、20%にした場合の結果の比較

これらより、免震層の粘性減衰が上部構造の増幅特性に及ぼす影響は、免震層の非線形復元力特性の影響と比較すると大きくはないことが分かる。

日本建築学会の免震構造設計指針⁷⁾でも粘弾性ダンパーを用いた場合の層せん断力分布は、非免震の最適せん断力係数分布（「基準法における A_i 分布」と併記している）でよいとする見解もあり、ここでの結果と合わせて、告示 2009 号の方法と比べて、特に大きな増幅率を見込む必要はないものと考えられる。

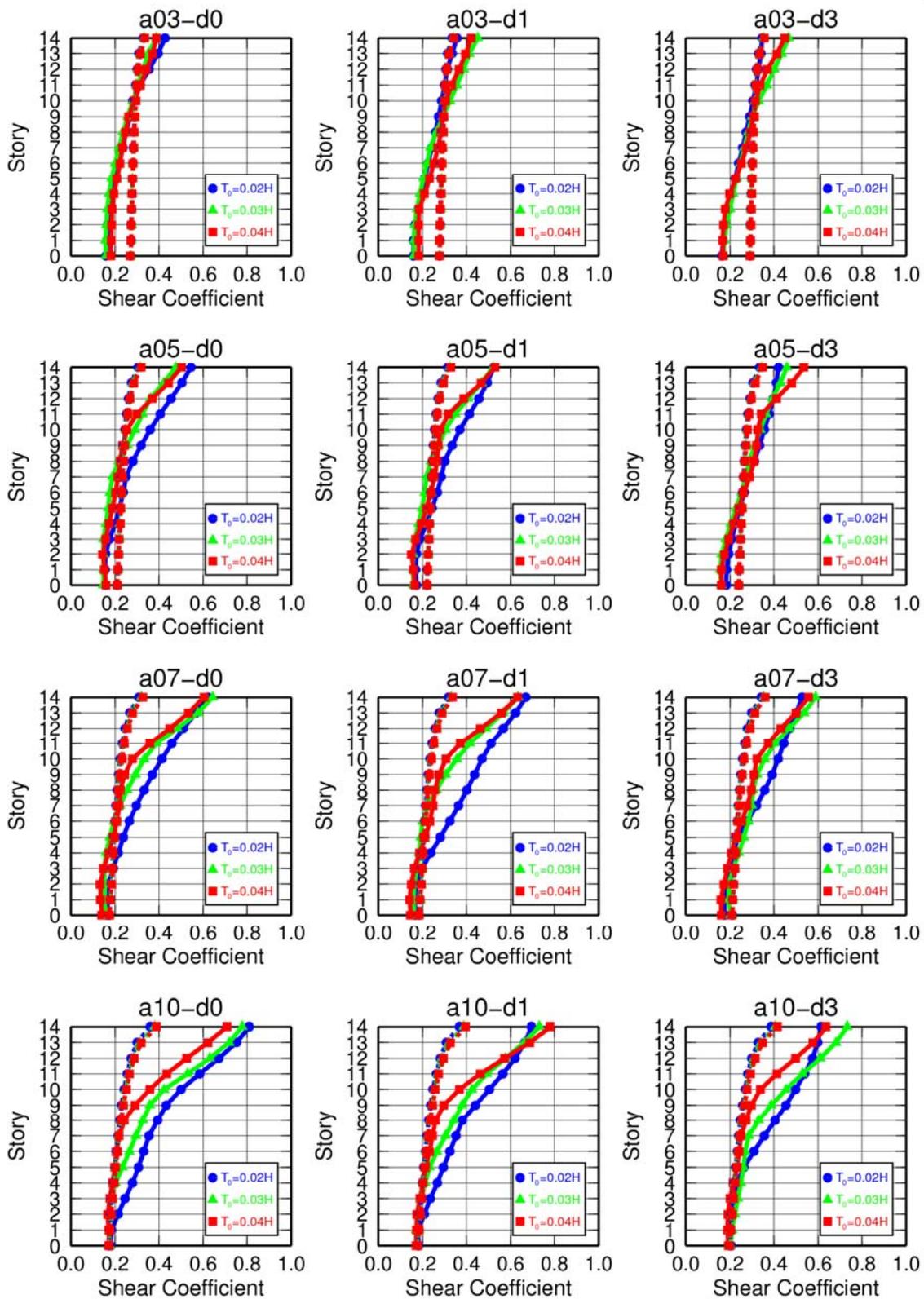


図 3.4-23 上部構造 14 層モデル (減衰定数 2%、免震層線形弾性要素周期 2.5 秒) の層せん断力係数 (実線は時刻歴応答解析結果、点線は告示計算結果)、入力波: 2 種地盤卓越周期 (短) (図 3.3-23 再掲)

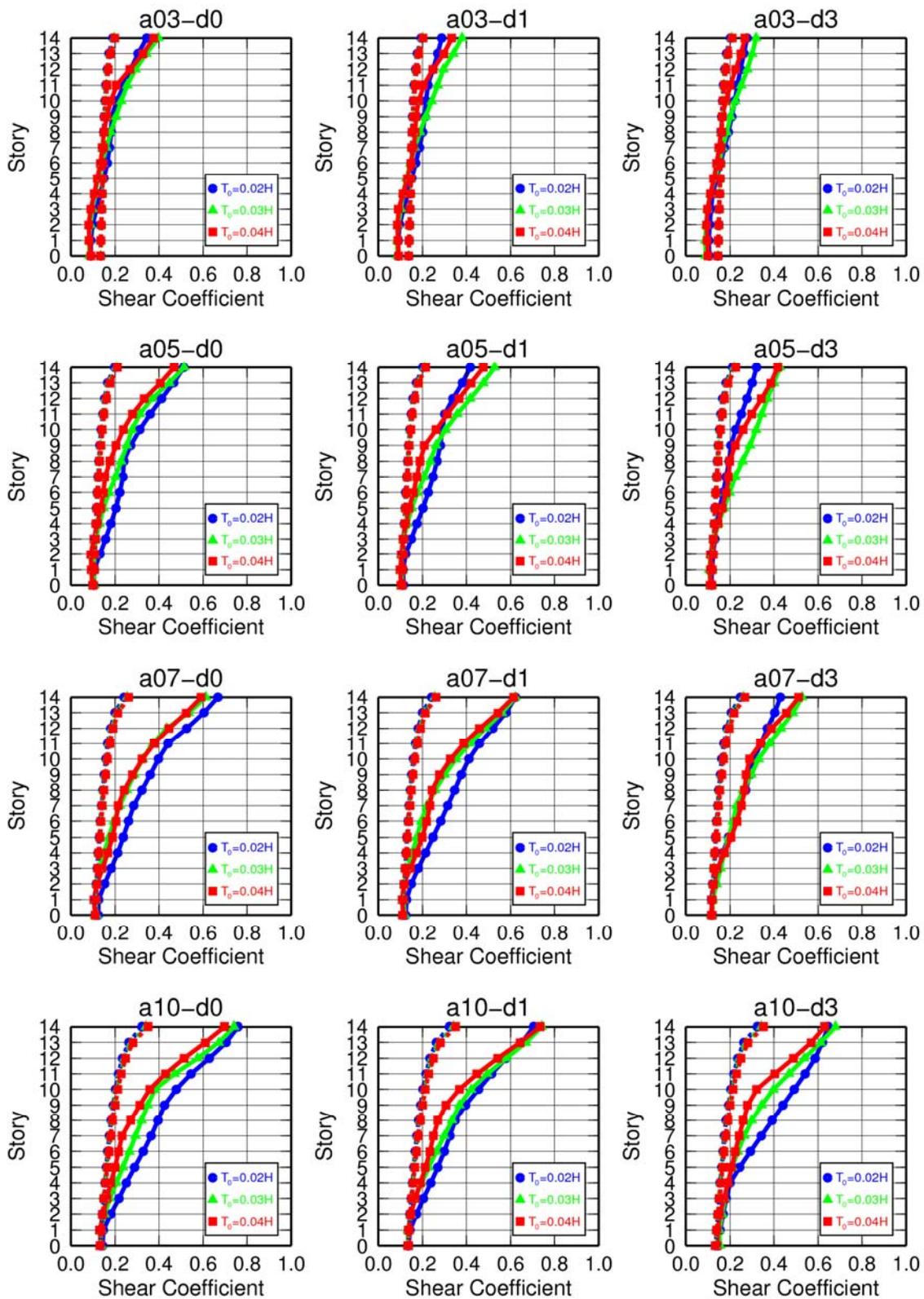


図 3.4-24 上部構造 14 層モデル (減衰定数 2%、免震層線形弾性要素周期 4.0 秒) の層せん断力係数 (実線は時刻歴応答解析結果、点線は告示計算結果)、入力波：2 種地盤卓越周期 (短) (図 3.3-25 再掲)

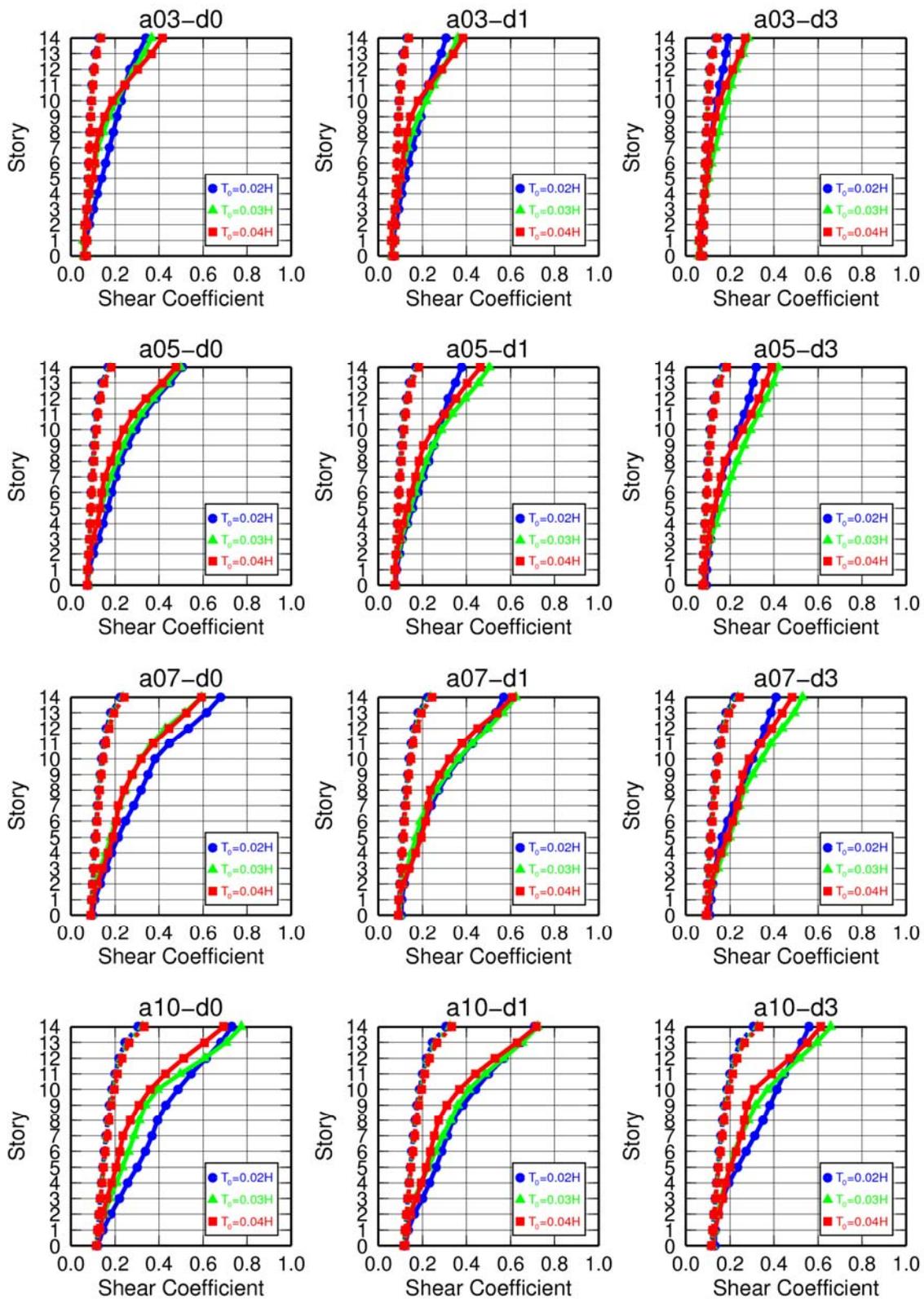


図 3.4-25 上部構造 14 層モデル (減衰定数 2%、免震層線形弾性要素周期 6.0 秒) の層せん断力係数 (実線は時刻歴応答解析結果、点線は告示計算結果)、入力波: 2 種地盤卓越周期 (短) (図 3.3-27 再掲)

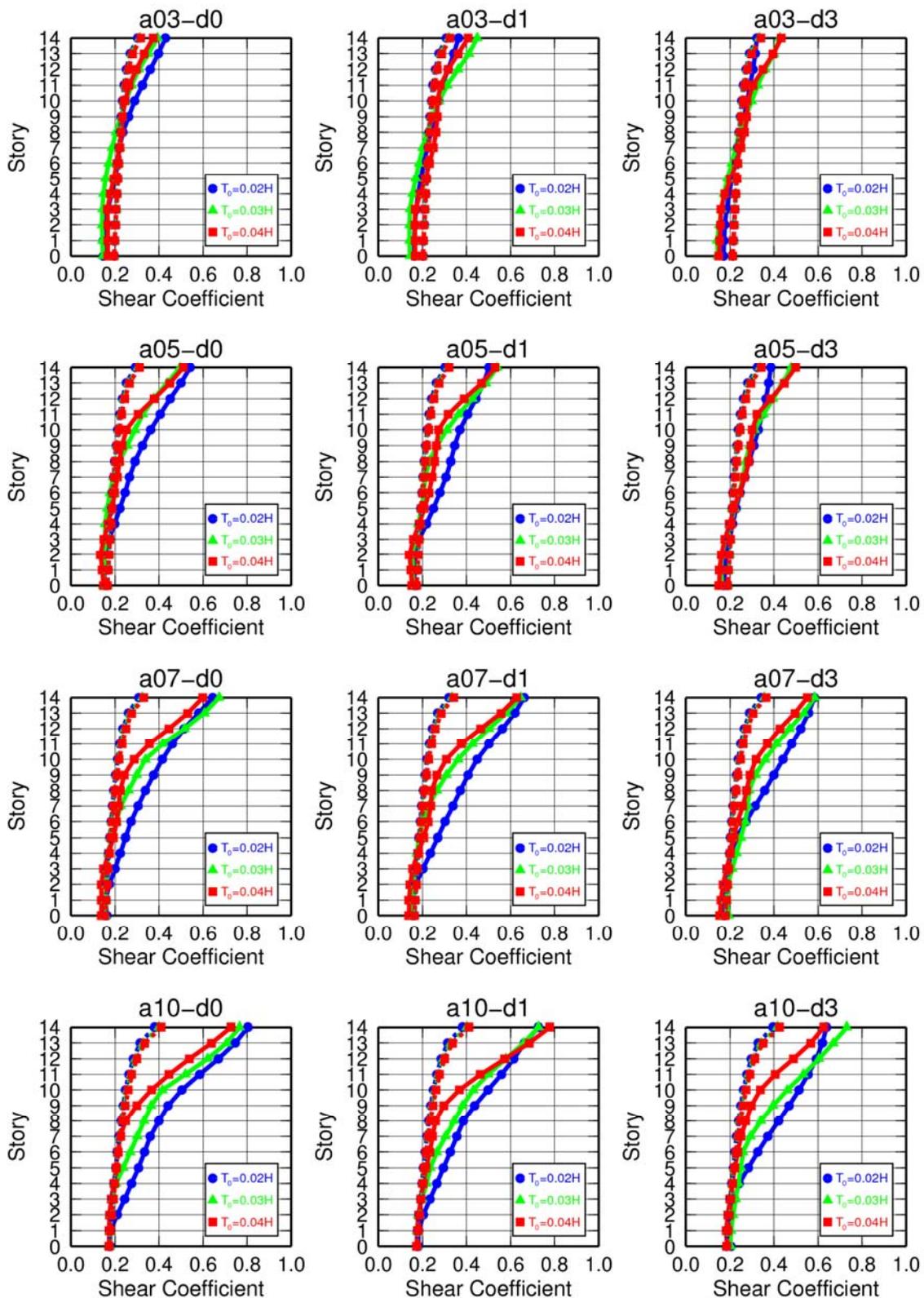


図 3.4-26 上部構造 14 層モデル (減衰定数 2%、免震層線形弾性要素周期 2.5 秒) の免震層に粘性減衰 (減衰定数 5%) を付与したケースの層せん断力係数 (実線は時刻歴応答解析結果、点線は告示計算結果)、入力波: 2 種地盤卓越周期 (短)

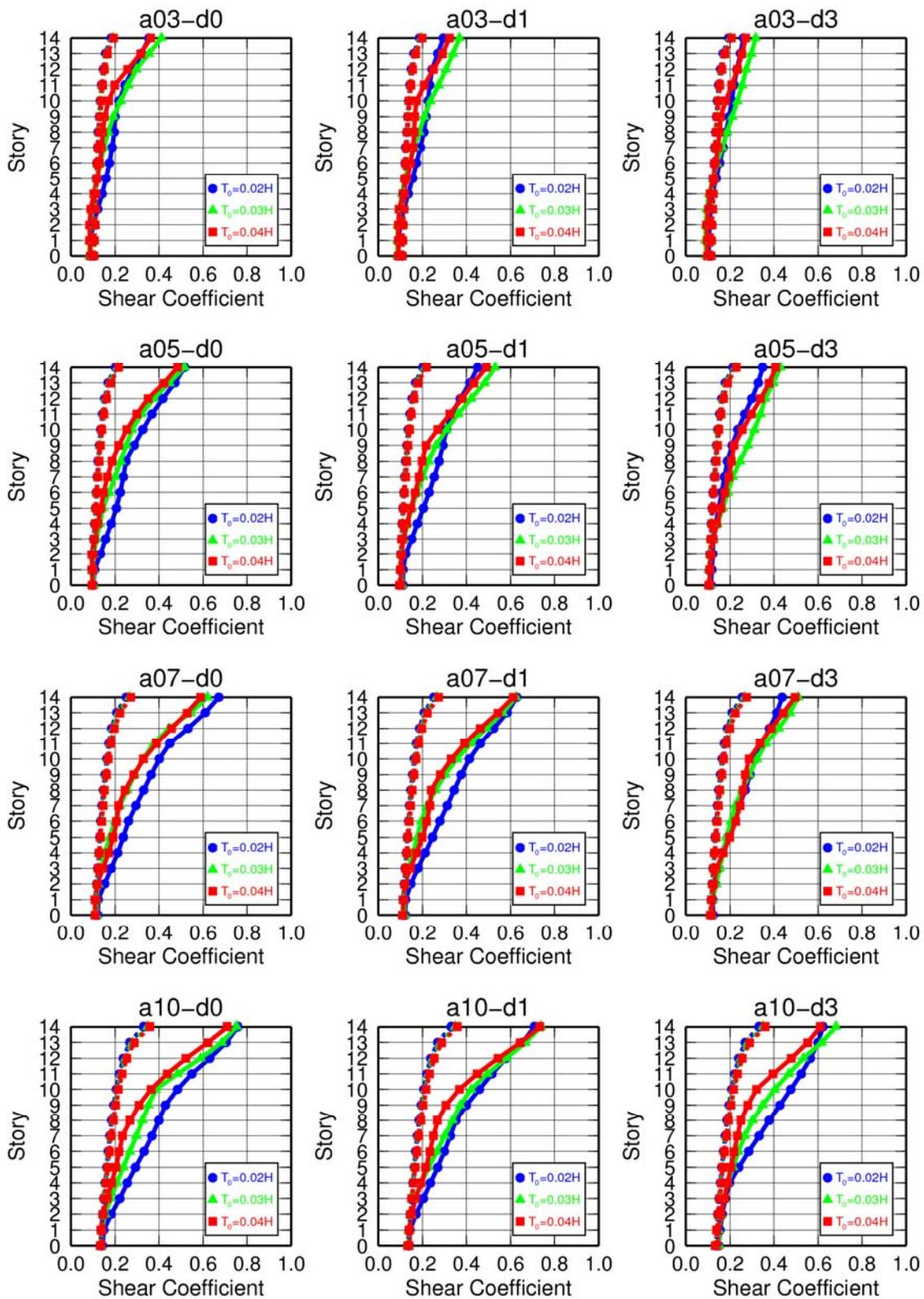


図 3.4-27 上部構造 14 層モデル (減衰定数 2%、免震層線形弾性要素周期 4.0 秒) の免震層に粘性減衰 (減衰定数 5%) を付与したケースの層せん断力係数 (実線は時刻歴応答解析結果、点線は告示計算結果)、入力波: 2 種地盤卓越周期 (短)

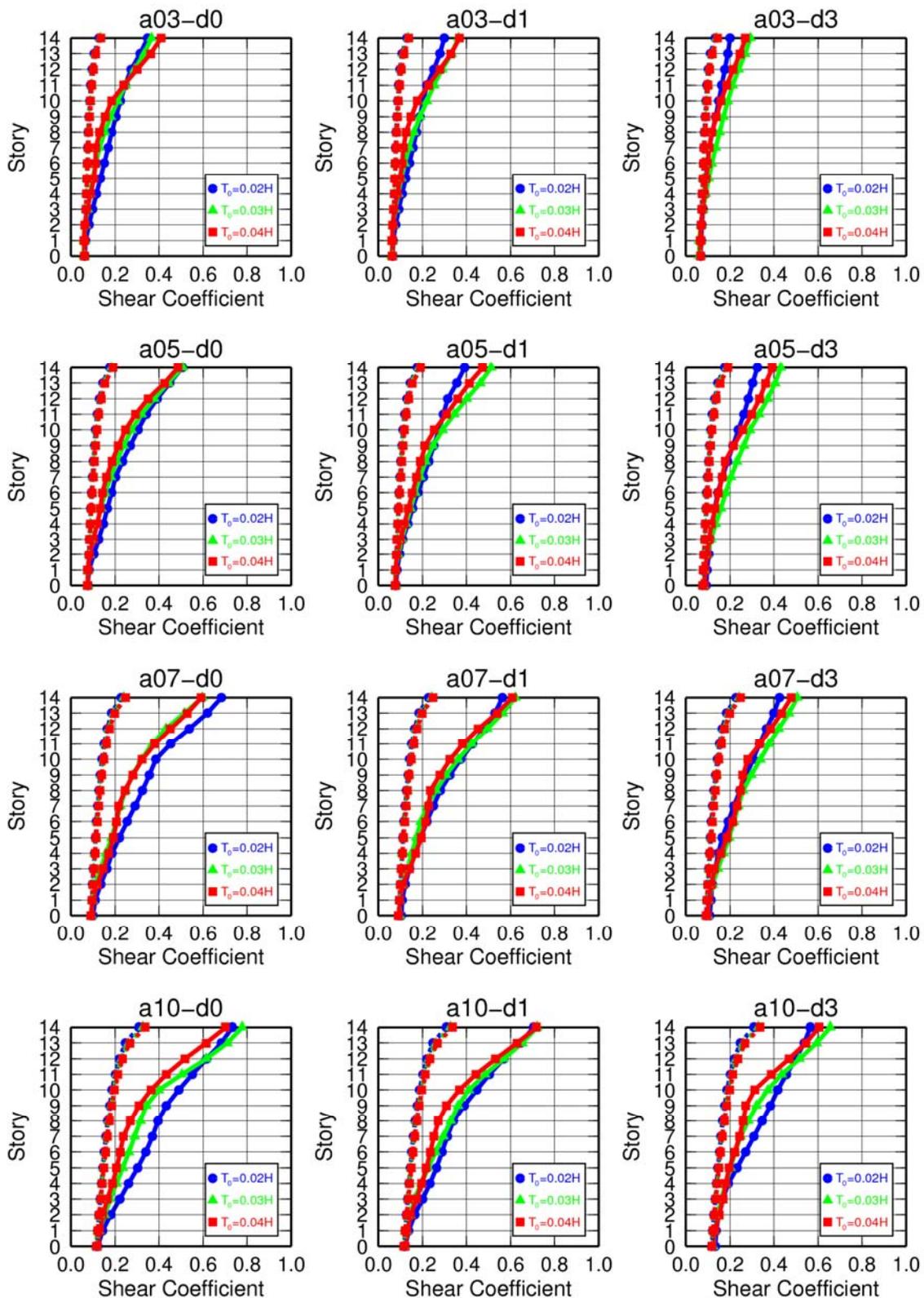


図 3.4-28 上部構造 14 層モデル (減衰定数 2%、免震層線形弾性要素周期 6.0 秒) の免震層に粘性減衰 (減衰定数 5%) を付与したケースの層せん断力係数 (実線は時刻歴応答解析結果、点線は告示計算結果)、入力波: 2 種地盤卓越周期 (短)

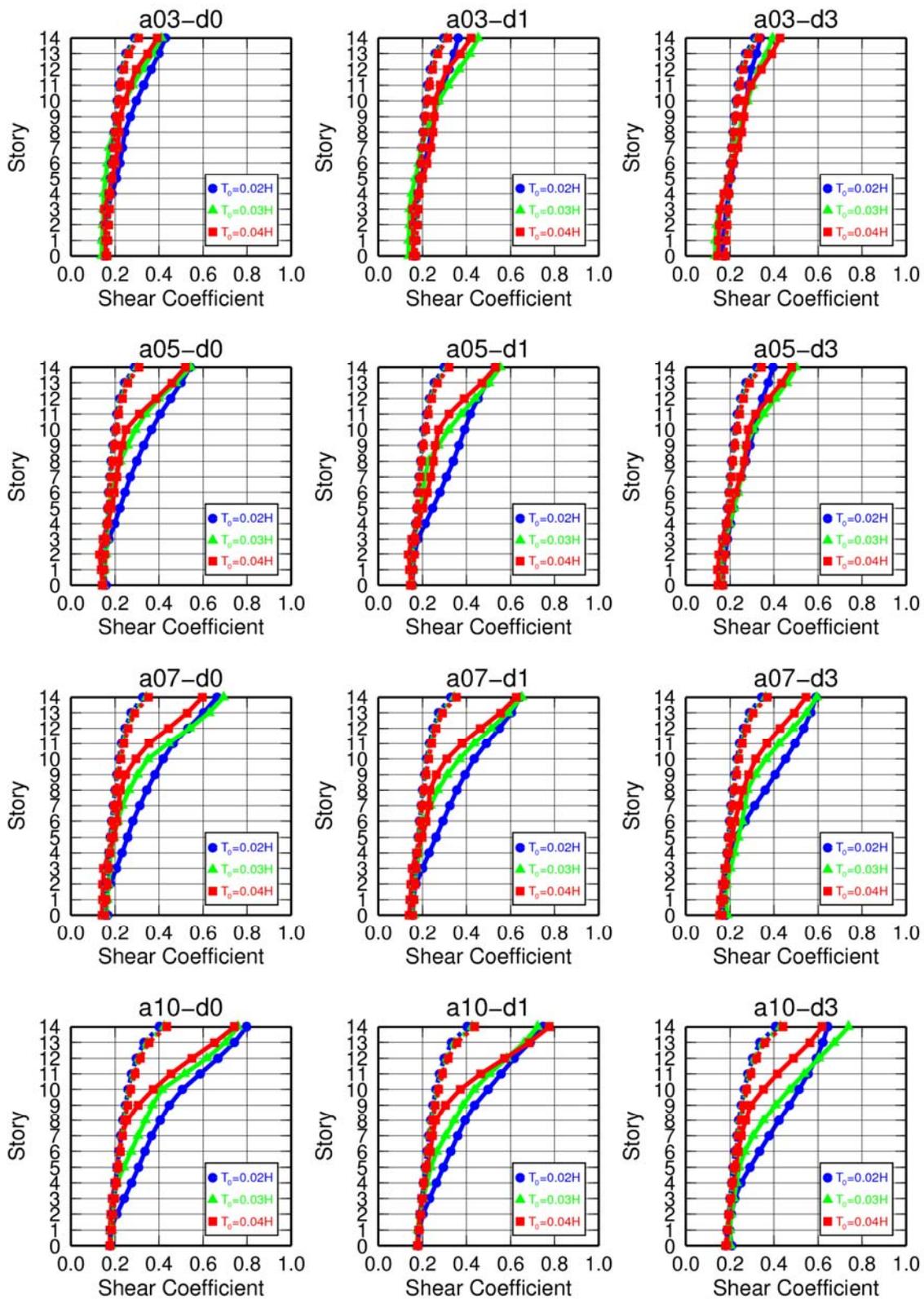


図 3.4-29 上部構造 14 層モデル (減衰定数 2%、免震層線形弾性要素周期 2.5 秒) の免震層に粘性減衰 (減衰定数 10%) を付与したケースの層せん断力係数 (実線は時刻歴応答解析結果、点線は告示計算結果)、入力波: 2 種地盤卓越周期 (短)

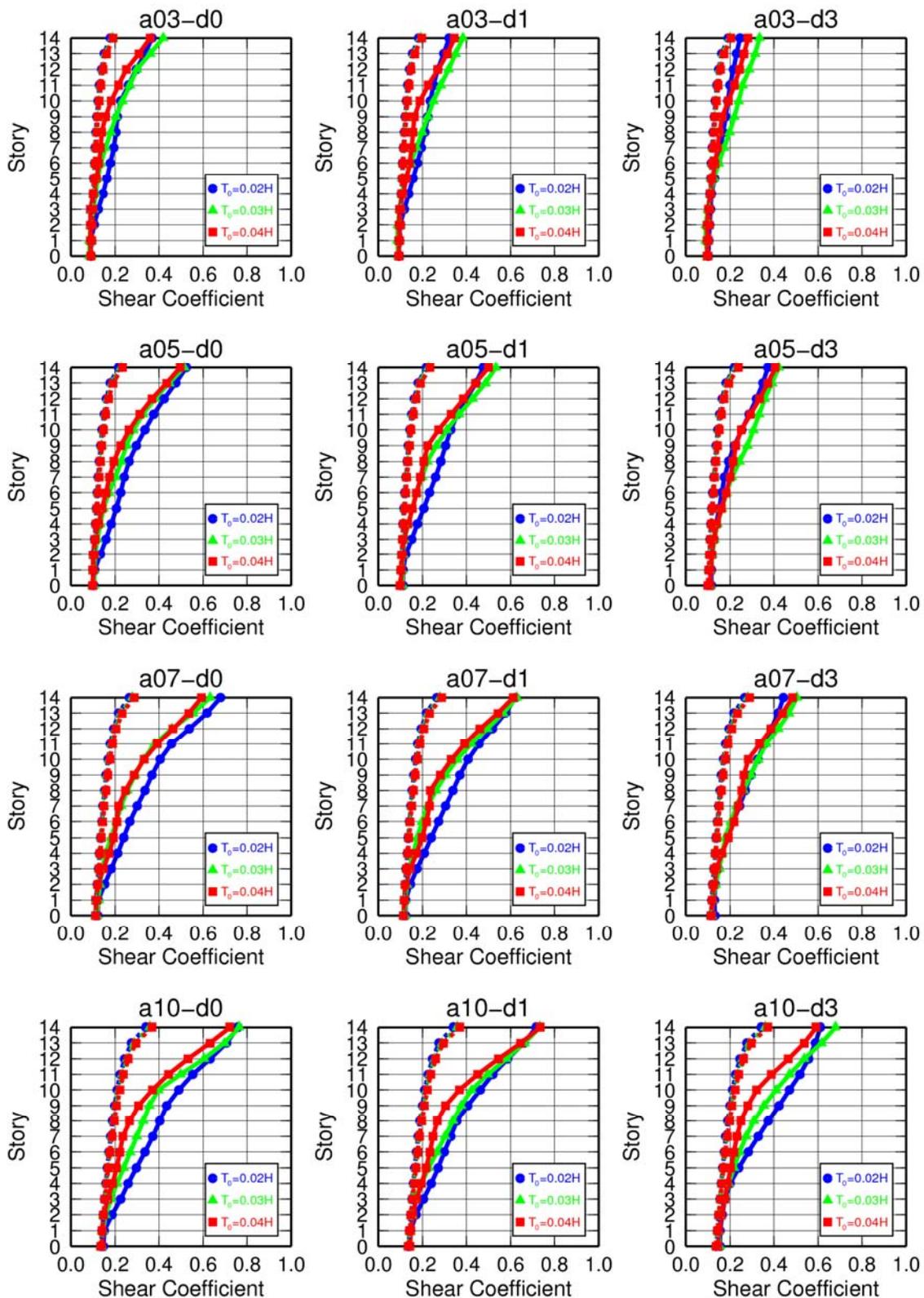


図 3.4-30 上部構造 14 層モデル (減衰定数 2%、免震層線形弾性要素周期 4.0 秒) の免震層に粘性減衰 (減衰定数 10%) を付与したケースの層せん断力係数 (実線は時刻歴応答解析結果、点線は告示計算結果)、入力波: 2 種地盤卓越周期 (短)

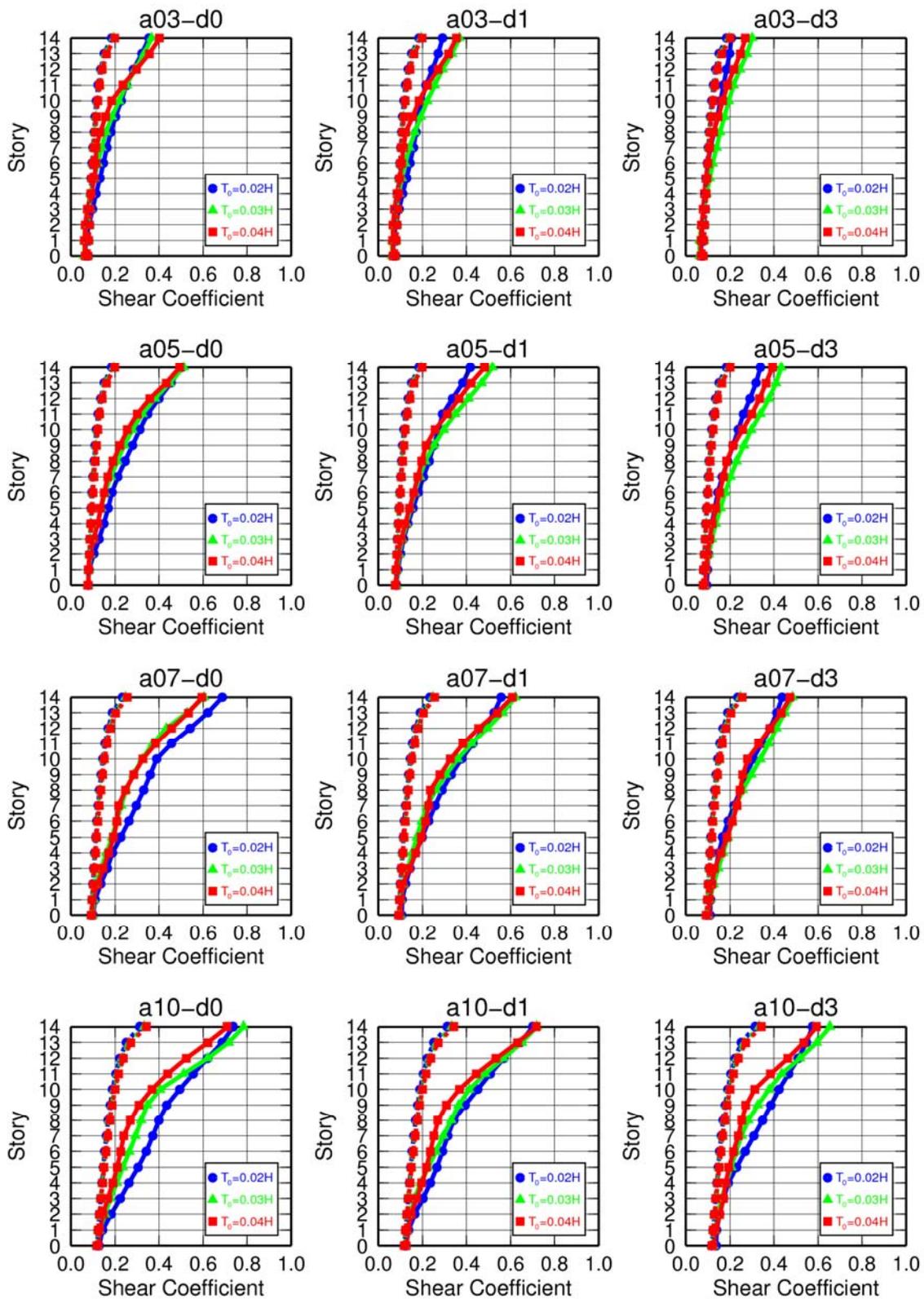


図 3.4-31 上部構造 14 層モデル（減衰定数 2%、免震層線形弾性要素周期 6.0 秒）の免震層に粘性減衰（減衰定数 10%）を付与したケースの層せん断力係数（実線は時刻歴応答解析結果、点線は告示計算結果）、入力波：2 種地盤卓越周期（短）

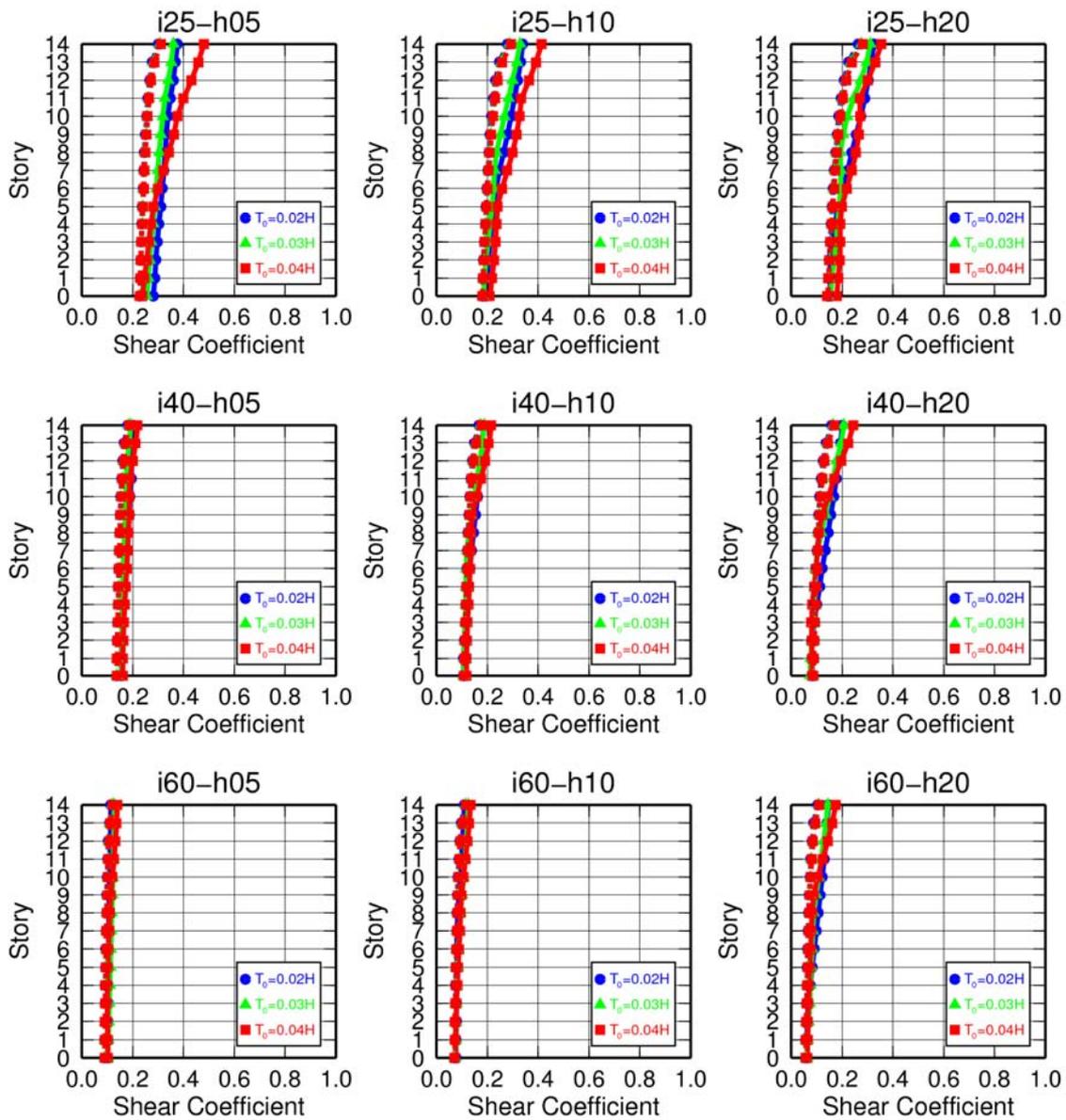


図 3.4-32 上部構造 14 層モデル (減衰定数 2%) の免震層に粘性減衰のみ (左から減衰定数 5%、10%、20%) を付与したケースの層せん断力係数 (実線は時刻歴応答解析結果、点線は告示計算結果)、入力波 : 2 種地盤卓越周期 (短)

3-4-2 層せん断力係数増幅の要因検討

層せん断力係数が上部で増幅されるのは、上部構造の柔性による増幅や、免震層の非線形的な性質を受けて短周期の高次の振動モードに相当する成分が励起されることなどによると考えられる。具体的な事例として、正弦波地動をうける4質点せん断モデルの応答結果を示す。解析モデルの復元力特性は最下層の復元力特性のみバイリニアとし、最下層より上では弾性とする。質量分布は一定、上部構造の剛性分布は最上層と最下層の比を0.4:1とする台形分布である。上部構造の免震層固定時における1次固有周期 T_0 は0.315秒であり、建物高さを H とした場合 $T_0=0.03H$ に相当する。免震層の降伏せん断力係数は0.05、降伏変位は0.01m、2次剛性に基づく上部構造剛体時の周期 T_2 は4.0秒である。地動入力には図3.4-33(a)に示す周期3秒の正弦波とした。

免震層の変形を図3.4-33(b)に示す。最大変形は約0.3mであり、入力波形と同様に周期3秒にて調和振動している。これに対し免震層のせん断力係数(図3.4-33(c))の周期は3秒であるが、波形は正弦的ではない。頂部相対変位の時刻歴波形を図3.4-33(d)に、加速度波形を図(e)にそれぞれ示す。相対変位波形は周期3秒の正弦波形となっている。一方、加速度波形は周期3秒の波形に短周期の波が重なりあったものとなっている。これより地動入力に短周期成分を含まない場合であっても、免震層の非線形化により短周期の振動が励起されることがわかる。質点に作用する力は加速度応答に比例するため、このような短周期成分の励起は層せん断力の特性に大きな影響を与えたと考えられる。

以下に応答解析結果の一部を用いて層せん断力係数増幅の要因を検討した事例を示す。

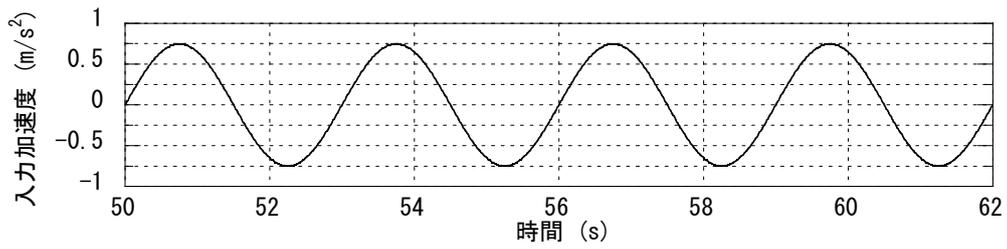
(1) 帯域フィルタを用いたモードの分離

「3-3-1 代表モデルによる結果」で計算例として示した2ケースの結果について分析を行う。各層の層せん断力の時刻歴波形に対してフィルタ処理を施し、低次モードの分離を試みた。ここでは、1.0Hz以下で1.0、1.2Hzで0.0となるコサイン型のフィルタを用いて低振動数成分を抽出した。

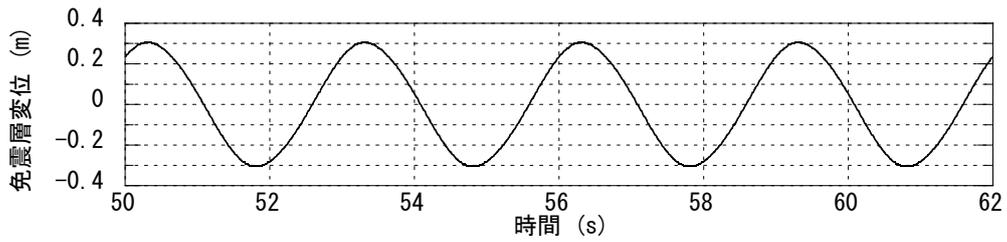
フィルタ処理結果を図3.4-34及び図3.4-35に示す。時刻歴波形とフーリエスペクトルは、フィルタ処理後のものである。フィルタ処理前の波形と比較すると(図3.3-3及び図3.4-33参照)、低振動数成分のみ含まれていることが確認できる。

低次モードの寄与率を評価するため、フィルタ処理前後の各層のせん断力の最大値を用いて両者の比率(処理後/処理前)を算出した。上部構造の最上部においては、ケース1では約0.5、ケース2では約0.3となった。上部構造において、層せん断力係数の増幅が大きいケースでは寄与率が小さくなっていることが分かる。

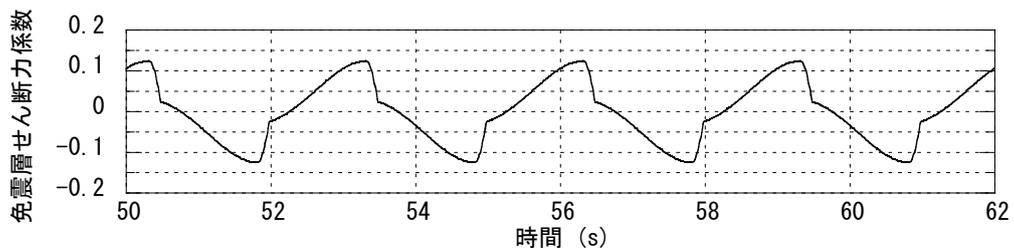
このように、フィルタ処理により低次モードの成分を分離することは可能であると考えられる。ただし、図3.4-34のフーリエスペクトルを見ると、上部構造の最上層7Fでは何Hzまでが低次モードであるのかを判断するのは非常に難しい。ここでは振動数ポイントとして両ケースともに一律で1.0Hzと1.2Hzを設定しているが、フィルタ処理により求まる寄与率は設定した振動数ポイントにも依存する。評価を行う際には、フィルタの振動数ポイントを適切に設定することが重要となる。



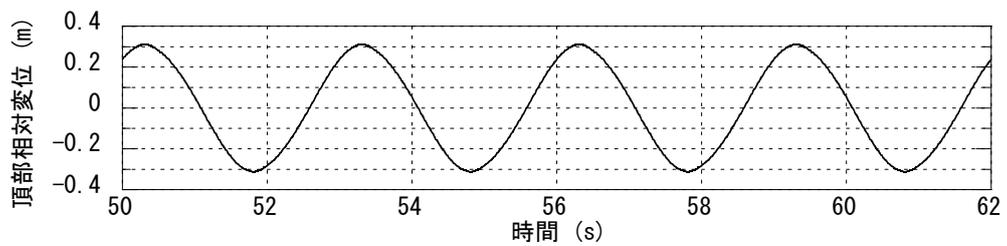
(a) 入力加速度 (周期 3 秒、 0.75m/s^2)



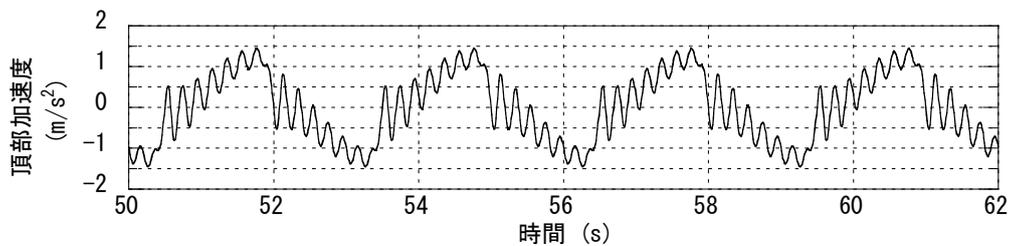
(b) 免震層層間変形



(c) 免震層せん断力係数



(d) 頂部相対変位



(e) 頂部加速度

図 3.4-33 正弦波地動入力時の 4 質点モデル応答解析結果

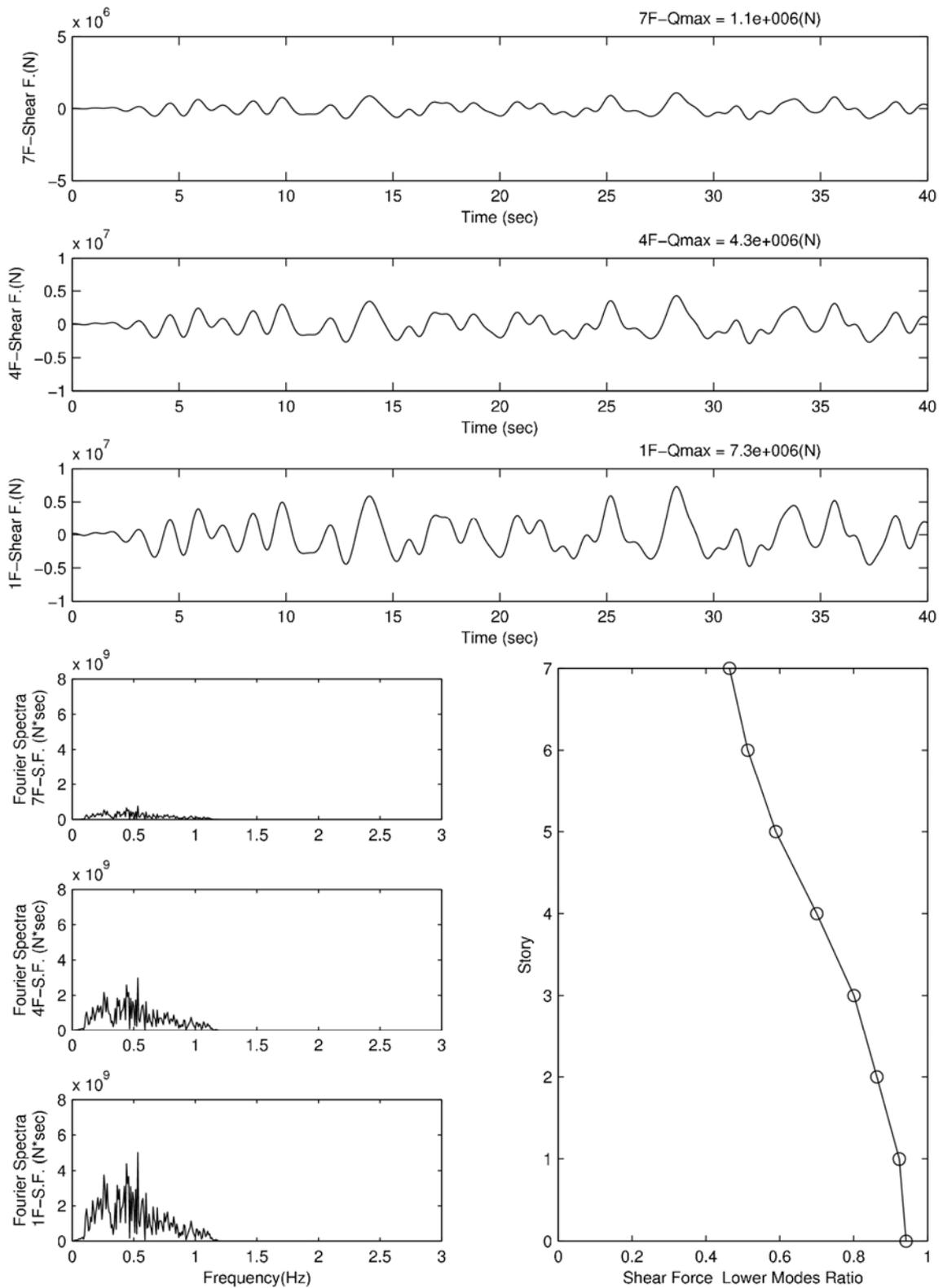


図 3.4-34 帯域フィルタ処理結果 (ケース 1)

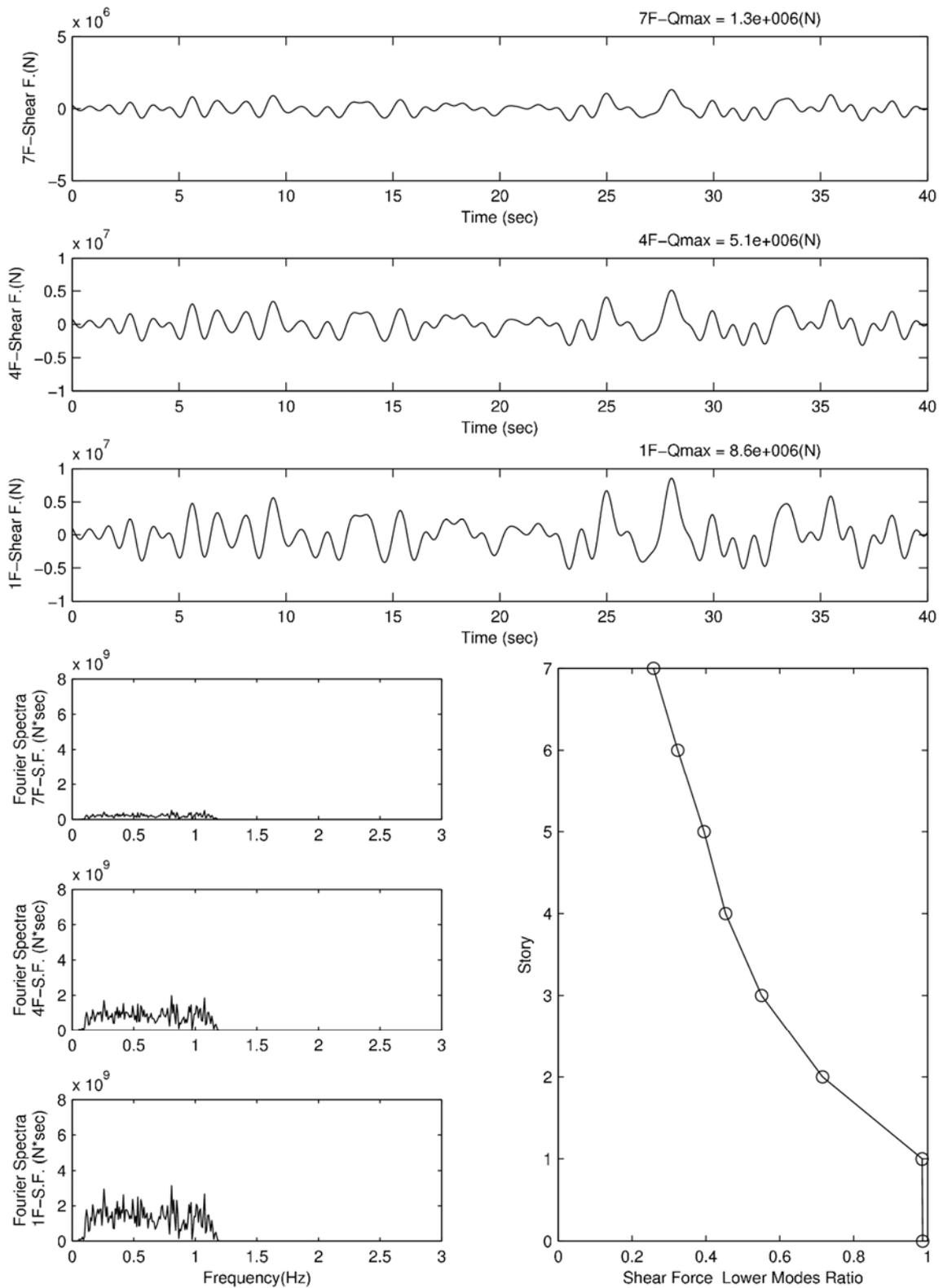


図 3.4-35 帯域フィルタ処理結果 (ケース 2)

(2) 主成分分析によるモード分析

「(1) 帯域フィルタを用いたモードの分離」と同様にして、ここでも「3-3-1 代表モデルによる結果」で計算例として示した 2 ケースの結果について分析を行う。各層の応答加速度および層せん断力の時刻歴波形に対して主成分分析を行い、低次モードの寄与率を算出した。

主成分分析とは統計的手法の一つである。その名の通り、統計データから主成分を抽出するものである⁸⁾。基準座標の分散が最大となるような座標系に変換することを意味し、各時刻歴のデータを最も効率良く表現する座標系で評価することになる。なお、この分析は、各時刻歴データの分散・共分散からなるマトリクスの固有値問題に帰着する。求まる固有値は、変換した各基準座標上での時刻歴の分散と等しくなり、各モードの寄与率となる。

主成分分析の結果を表 3.4-1 及び図 3.4-36 と図 3.4-37 に示す。表には 3 次モードまでの寄与率と累積寄与率をまとめてあり、図は 3 次までの固有ベクトルをそれぞれ重ね書いてある。また、参考のために両ケースの通常の固有値解析結果を表 3.4-2 及び図 3.4-38 と図 3.4-39 に示す。なお、通常の固有値解析結果の固有ベクトルは、刺激関数のノルムを 1 として基準化したものである。図 3.4-38 は免震層の剛性として 1 次剛性を設定した場合の結果であり、図 3.4-39 は 2 次剛性を設定した場合の結果である。なお、両ケースでは完全弾塑性要素の降伏せん断力係数と降伏変位のみが異なるため、2 次剛性を設定した場合には両ケースの固有ベクトルは等しくなる。

加速度波形に主成分分析を行った場合、ケース 1 では刺激関数を基準化して求めた固有ベクトルとの対応は非常に良い。ケース 2 では 1 次のモード形を見ると、上部構造の最下層と最上層で位相が逆転しており、刺激関数を基準化して求めた固有ベクトルとの対応はあまり良くない。なお、ケース 1 において 1 次剛性及び 2 次剛性を設定した場合の固有値解析結果を見ると、固有周期は当然異なっているものの、モード形としてはほとんど変わっていないことが分かる。このことが結果に影響しているものと推察される。1 次の寄与率で見ても、ケース 1 では 64%であるのに対して、ケース 2 では 43%と低くなっている。層せん断力係数の上部構造での増幅が大きいケースでは、寄与率が低くなる結果が得られる。

層せん断力波形に主成分分析を行った場合、ケース 1 とケース 2 のモード形は似た形状となることが分かる。1 次のモード形を見ると、刺激関数を基準化して求めた固有ベクトルとの対応はあまりない。免震層が大きく、上部構造では上層ほど小さくなっている。刺激関数を基準化して求めた固有ベクトルの 1 次と 2 次を合わせたようなモード形であると言える。ただし、この場合にも寄与率に両ケースの差が生じている。ケース 1 では 94%であるのに対して、ケース 2 では 85%と 10%程度寄与率が低くなっている。上部構造では高次の成分が多く含まれることによって、層せん断力係数が増幅している結果との対応は良い。

以上より、主成分分析により低次モードの寄与率を評価することは可能であると考えられる。ただし、ここで述べた考察は、2 ケースの結果からのみの限定的なものである。検討ケース数を増やして傾向を把握することとともに、免震層の変位時刻歴等との対応関係の分析なども加えて適切な評価につなげる必要がある。

表 3.4-1 主成分分析で算出した低次モードの寄与率 (括弧内の数値は累積値、単位%)

モード	ケース 1		ケース 2	
	加速度	層せん断力	加速度	層せん断力
1 次	64.37(64.37)	94.27(94.27)	42.97(42.97)	85.11(85.11)
2 次	34.17(98.54)	5.64(99.91)	27.36(70.33)	11.95(97.06)
3 次	1.21(99.75)	0.08(99.99)	18.52(88.85)	2.27(99.33)

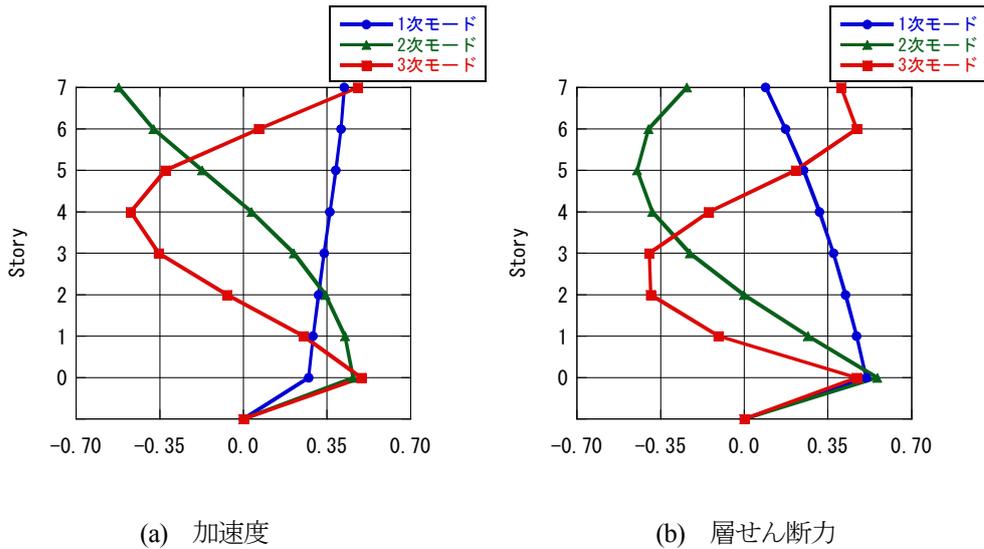


図 3.4-36 主成分分析結果 (ケース 1)

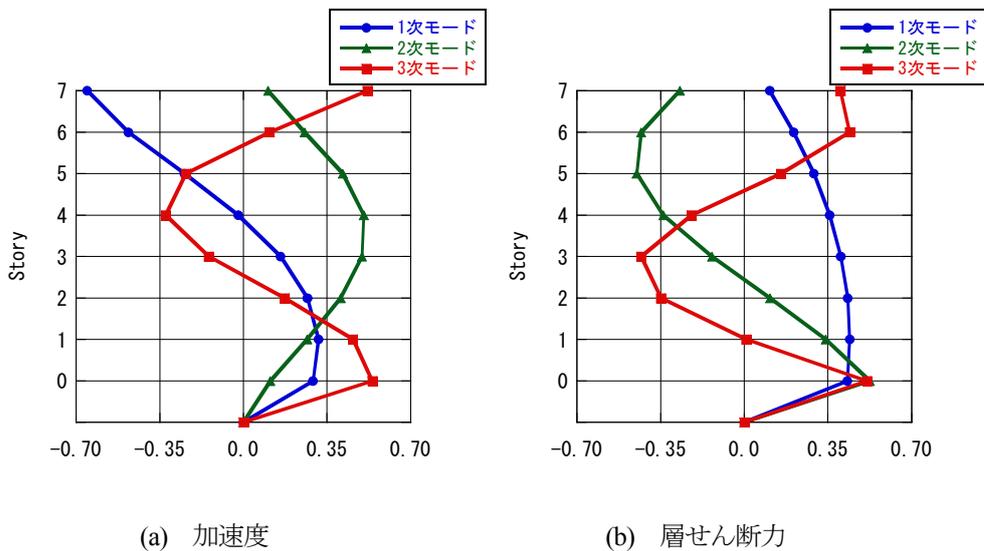
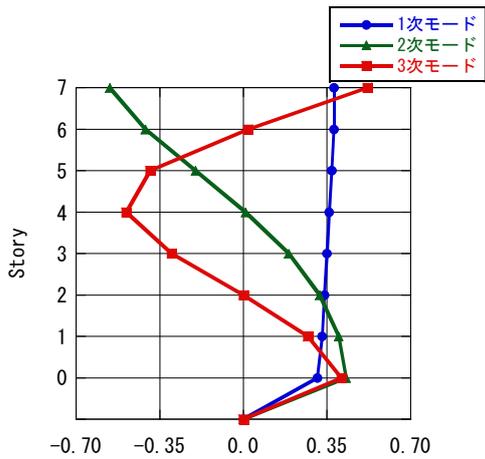


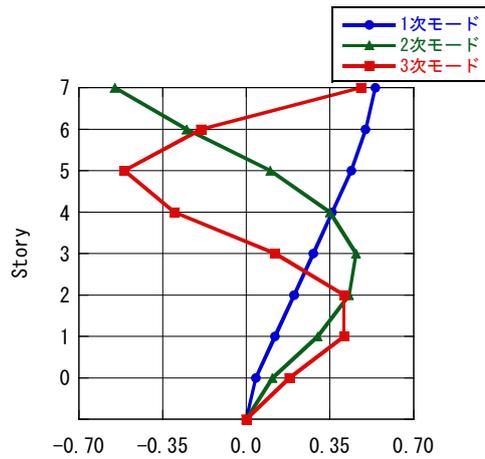
図 3.4-37 主成分分析結果 (ケース 2)

表 3.4-2 固有値解析で算出した固有周期

モード	ケース 1		ケース 2	
	免震層剛性			
	1次剛性	2次剛性	1次剛性	2次剛性
1次	1.90s	4.05s	0.77s	4.05s
2次	0.41s	0.43s	0.29s	0.43s
3次	0.22s	0.22s	0.18s	0.22s

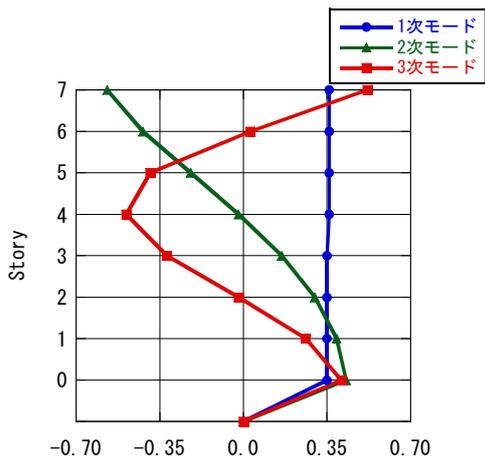


(a) ケース 1

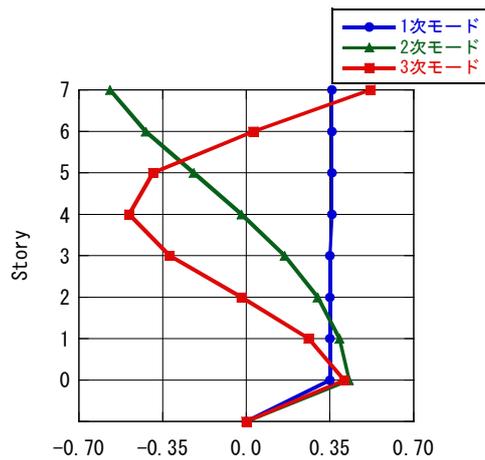


(b) ケース 2

図 3.4-38 免震層に 1 次剛性を設定して算出した固有ベクトル



(a) ケース 1



(b) ケース 2

図 3.4-39 免震層に 2 次剛性を設定して算出した固有ベクトル

(3) 高次モード励起の原理について

地震応答解析結果から直接的に、また上述の帯域フィルタや主成分分析による検討により、高次モードの発生が確認される。これらの検討はある種の視点を設定した上で、解析結果に分析を加えたものである。これを概念的に示せば図 3.4-40 のようになり、図の右側にある「分類・整理」が帯域フィルタや主成分分析に当たる。応答計算の過程はブラックボックスとして受け入れ、その結果に対していわば外部から分類・整理を行っているといえよう。このとき、構造物側の動的な特性と地震動の特性とが混在した計算結果を見ているため、結果に対する両者の影響を明確に分けて理解することは難しい。

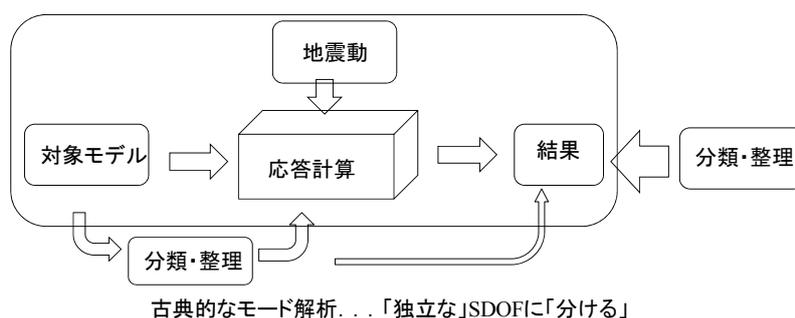


図 3.4-40 分類・整理の仕方の概念図

ここでは履歴系免震構造を区分線形系⁹⁾ととらえることで、そもそもの高次振動発生メカニズムが単純な物理モデルの応答として理解できることを示す。図 3.4-40 では図の下にある分類・整理がこれに当たり、いわば応答の計算過程の内部に立ち入って、計算前の状態でモードに分類・整理しておくことで、発生する応答の理解につなげていこうとするものである。この分類・整理は構造物側の特性だけで決定されていくため、地震動の特性の影響を分けて理解する上でも有用であると考えられる。

区分線形系ととらえれば、降伏や除荷を生じる間の時間範囲で区切って考えることで、対象モデルを線形系とみなすことができる。線形系であるから、無減衰又は条件付きの減衰とすれば古典的なモード解析を適用することができる。モード解析の利点を改めて強調しておく、独立な 1 自由度系の応答の和として系の応答が表現されることにある。単純な物理モデルと書いたのは、各モードに対応する物理モデル（質点-バネ系）で表すことを指している。

1) 区分線形系の運動方程式でみた高次振動発生メカニズム

履歴系の免震構造を対象とする。区分線形系としての扱いやすさと履歴則の単純さから免震層の履歴特性はノーマルバイリニア型とし、図 3.4-41 に示すように柔要素（線形要素）と剛要素（完全弾塑性要素）とに分けて考える。高次振動が履歴によるものであることを強調するとともに単純化のため、免震層に粘性減衰は設定しない。図 3.4-42 に示すように、免震層が初期の弾性状態では、柔要素と剛要素の剛性の和として免震層の剛性が決まる。塑性化後に除荷した場合の弾性範囲は、塑性変形によるズレ（復元力がゼロとなる変位のシフト）を考慮すれば初期の弾性状態と同じである。一方で、塑

性化した状態では剛要素の復元力は一定値 F_y となる。図 3.4-42 の右側にあるように免震層には柔要素のみが存在し、 F_y は一定の外力とみなしても同じである。つまり塑性化状態の対象構造物は、免震層の接線剛性に基づく線形系である。

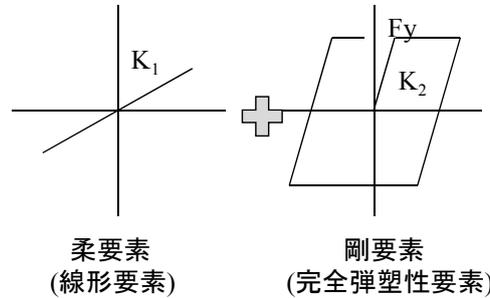


図 3.4-41 バイリニア型復元力の分解

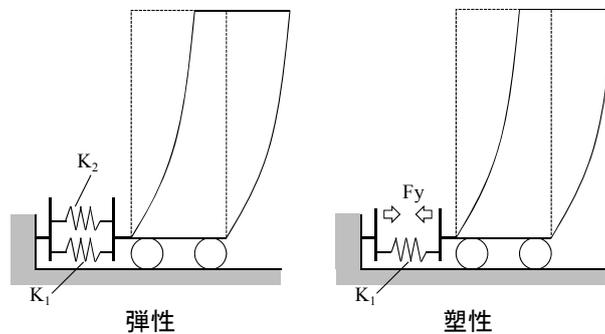


図 3.4-42 弾性状態と塑性状態

弾性状態、塑性状態のいずれも線形系としてとらえれば、固有値解析により古典的なモードが設定できる。単純化のため上部構造にも減衰がない場合を想定すれば、各モードの運動方程式は次のようになる。

$$\text{弾性状態： } M_j \ddot{\phi}_j + p_j^2 M_j \phi_j = -\beta_j M_j \ddot{y}_g \quad (3-4-1)$$

$$\text{塑性状態： } M_j \ddot{\phi}_j + p_j^2 M_j \phi_j = -\beta_j M_j \ddot{y}_g \mp F_y Y_{jH} \quad (3-4-2)$$

ここで、 M_j : j 次一般化質量、 ϕ_j : j 次一般化変位、 p_j : j 次固有円振動数、 ϕ_j : j 次一般化変位（一般化座標）、 β_j : j 次刺激係数、 \ddot{y}_g : 地動加速度、 F_y : 免震層の剛要素の降伏力、 Y_{jH} : j 次モードの免震層（基部）での値、であり、ドットは時間による微分を表わす。なお、式(3-4-2)右辺第 2 項の複合は免震層の速度が正のときマイナスをとる。式(3-4-1)及び式(3-4-2)は共通の記号を用いているが、それぞれ弾性状態と塑性状態、すなわち免震層の弾性剛性と塑性接線剛性とを用いた線形系を対象とした値であることを注意する。念のため確認しておく、上部構造を質点系（離散系）とした場合に慣性マトリクスを $[M]$ 、 j 次モードを $\{Y_j\}$ とすれば、 $M_j \equiv \{Y_j\}^T [M] \{Y_j\}$ であり、上部構造をせん断棒等の連続体とした場合には、高さ方向に座標 x をとり、単位高さ当たりの質量を $\rho A(x)$ 、 j 次モードを $Y_j(x)$ 、上部構造の高さを H とすれば、 $M_j \equiv \int_0^H \rho A(x) \{Y_j(x)\}^2 dx$ である。ここで $\rho A(x)$ と $Y_j(x)$ の「 (x) 」は x の関数であることを強調して示したものであり、 x を掛けるという意味ではない。

後の 2) で示すように、免震層の塑性接線剛性が小さく、当該剛性に基づく免震係数 $I = T_b/T$ (ここで、

Tb は上部構造を剛体と仮定した場合の周期、 T は免震層を固定した場合の上部構造の 1 次固有周期) が大きな場合には、塑性状態での 2 次以上の刺激係数 β_j は非常に小さな値となり、同様に確定値である有効質量 $\bar{M}_j \equiv \beta_j^2 M_j$ も小さな値になる。これは、塑性状態の 2 次以上には地震動の影響が小さいことを意味する。にもかかわらず高次振動が問題となるのは、降伏点に達したとき、区分線形系として弾性状態のモードから塑性状態のモードへと、いわば参照座標系を切り替える時点で、塑性状態の高次モードへとエネルギー (運動エネルギー及びひずみエネルギー) が付与されることになるためである。これを Skinner の著書⁶⁾では「非線形カップリング」と呼んでいる。降伏点を越えた後の塑性化状態では区分線形系として各モードは独立であり、エネルギーのやりとりをしない。構造物の特性と関わりなく、あるいは簡略化の意味で近似を持ちこむ (例えば両端自由のモードを採用する) ことで、意図的な又は恣意的なモードを座標として選択すれば、当然ながら「モード連成」⁶⁾¹⁰⁾が生じて、古典的なモード解析の利点である独立性を放棄しなければならない。上述のように塑性の免震係数が十分に大きければ高次モードは地震動の影響をあまり受けないから、塑性高次モードは降伏点での初期条件に基づいた自由振動状態にあると考えるても大きな間違いではないと言える。また、もう 1 つの重要な点として、式(3-4-2)右辺第 2 項にある剛要素の降伏力がある。 β_j が小さく零とみなせるならば、次に示す一定力を受ける 1 自由度系の運動方程式と、式(3-4-2)は同じ形をしている。

$$m\ddot{u} + \omega^2 mu = F \quad (3-4-3)$$

ここで、 m : 質量、 u : 変位、 ω : 固有振動数、 F : 一定力、である。例えば g を重力加速度として $F=mg$ とすれば、対応する物理モデルは鉛直方向にぶら下げた質点-バネ系である。変位 u の原点をバネに伸び (縮み) がない状態とすれば、式(3-4-3)では静的釣合位置 $u = F/(\omega^2 m)$ を中心として振動が生じることになり、その大きさは初期条件に依存する。ぶら下げた質点-バネ系では $u = mg/(\omega^2 m) = g/\omega^2$ が静的釣合位置であって、質点をどのような状態から振動させるか (例えばバネを引っ張った静止状態から離すと、バネの自然長の状態から静止した質点の支えを突然離す、など) によって振動の大きさは変わる。

2) 線形免震層を持つ均一せん断棒モデルのモード特性

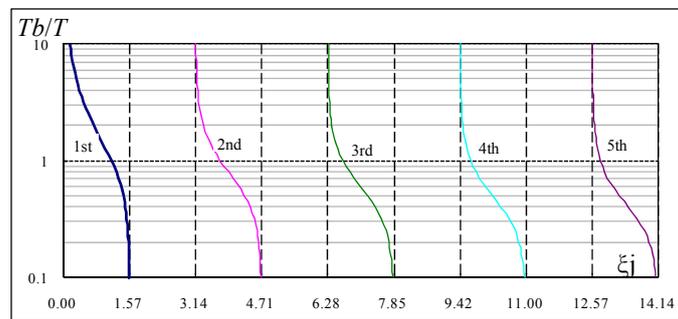
区分線形系として応答をとらえていくためには、線形免震層をもつ構造物のモード特性が基本となる。上部構造を均一せん断棒で模擬すると、各次の固有振動数、有効質量比、基部のモードの値は図 3.4-43 のように求められる。縦軸は免震係数 $F=Tb/T$ であり、横軸は図(a)では無次元振動数 ($\xi = \pi/2 = 1.57$ が脚部固定の場合の 1 次固有振動数に相当)、図(b)では有効質量比、図(c)では式(3-4-2)の右辺第 2 項に現れる基部のモードの値である。区分線形系としての考え方では各接線剛性に対応した複数のモードを参照すればよく、特にバイリニア型の場合には、弾性剛性に基づく免震係数と塑性接線剛性に基づく免震係数に対応する 2 種 (2 セット) のモードを選択することになる。

図 3.4-43(a)に示した無次元振動数は、免震層の剛性が無限大に相当する基部固定の場合 ($\xi_j = (2j-1)\pi/2 = \pi/2, 3\pi/2, 5\pi/2, \dots$) と、両端自由の場合 ($\xi_j = j\pi = 0, \pi, 2\pi, \dots$) との間にあり、各モードの変化の幅は $\pi/2$ である。ステッピング型の場合¹¹⁾と比較すれば変化の幅は小さい。

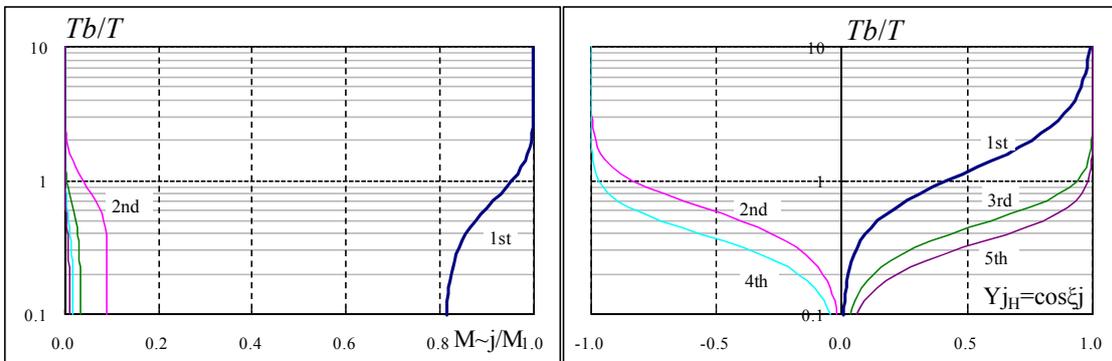
図 3.4-43(b)の有効質量比を見ると、1 次が大きく、2 次以上は非常に小さいことが分かる。縦軸の免震係数が 2 以上となると高次の有効質量比はほぼ零となるから、その場合には高次は地震動の影響をほとんど受けないことになる。文献 6)の p.144 でも降伏応答の 2 次振動が自由振動に近いことが指摘

されている。

図 3.4-43(c)の基部のモードの値 Y_{jH} は前出の式(3-4-2)右辺第 2 項に現れる項である。ただし、各モードは頂部の値を 1 とした場合である。免震層に柔要素がない場合 $Y_{jH} = \pm 1$ であり、また塑性時の免震係数が大きめの値であれば Y_{jH} の大きさはほぼ 1 であるから、剛要素の降伏力 F_y は全てのモードのほぼ同じ大きさで作用する。塑性モードから見ると、式(3-4-2)から全てのモードが降伏力によって励起されることになる(ステップ応答⁹⁾)。「非線形カップリング」⁶⁾に加えて、このステップ応答が高次モード励起の要因である。なお、降伏点に達したときの初期条件が特別な場合、すなわち静的釣合位置に静止するという条件の場合には振動しないモードもありうるが、その場合でも降伏力に応じた一定のひずみエネルギーを当該モードが負担していることになる。鉛直方向にぶら下げた質点-バネ系が振動していなくても、バネは伸びていることを考えればよい。



(a) 無次元振動数 ξ_j



(b) 有効質量比 \bar{M}_j/M

(c) 頂部を 1 とした場合の基部のモードの値 Y_{jH}

図 3.4-43 上部構造を均一せん断棒とした線形免震のモード特性

3) バイリニア型免震層を持つ均一せん断棒モデルの自由振動解析例

具体的な例題を示すことで、履歴系免震構造での高次モードの発生状況を確認しておく。

上部構造は均一せん断棒とする。免震層が弾性のとき 1 次モードのみで振動していると仮定して、正側へ降伏した時点から免震層が弾性除荷するまでを対象とする。地動加速度がない自由振動を考察の対象とする。なお、1)2)より、塑性の高次振動は地震動の影響をほとんど受けないことから、地震応答における基礎的な特性・傾向は自由振動から類推できると考えている。減衰はないとする。

例として、次のように設定する。

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{弾性の免震係数 } I=I_b/T=0.2、\text{ 塑性接線剛性による免震係数 } I=I_b/T=4.0 \\ \text{弾性(1次)最大ベースシア係数 } C_{Be1max}=1.0 \\ \text{免震層の降伏せん断力係数 } C_{By}=0.1 \end{array} \right.$$

弾性(1次)最大ベースシア係数 C_{Be1max} は振動の大きさ(強さ)を表わすパラメータとして採用したもので、免震層が降伏せずに弾性剛性を保った場合の最大のベースシア係数を表わしている。

図 3.4-44 に時刻歴を示す。横軸は無次元時間 $\tau = p_{e1}t$ (ここで、 p_{e1} : 弾性1次固有円振動数、 t : 時間)であり、降伏した時点をも $\tau = 0$ としている。鉛直にぶら下げた質点-バネ系の静的釣合位置 g/p_{e1}^2 で変位を無次元化(基準化)し、速度は無次元化された変位の無次元時間に対する変化率として示している。図中の太線は実応答を表わすものとして塑性の10次までの和であり、細線は1~4次までの応答を示す。ベースシア係数を含む層せん断力係数は、慣性力の和として評価している。2)で述べたように初期条件によっては振動しなくとも変形は生じているモードが存在することもあり、層せん断力は変形から評価すべきとも考えられるが、特に基部の変形を表わすには塑性状態の多くのモードを採用する必要がある(収束が遅い)ことが分かったため、慣性力の和による評価を採用した。なお、慣性力の和による評価と変形による評価とでは、各モードの負担割合に差が生じるが、モードの総和としての応答は次数を打ち切ってもほとんど変わらないことを付記しておく。

図 3.4-44(a)の頂部変位は1次が支配的であり、2次の影響も出ている。図 3.4-44(b)の免震層の速度は緩やかに減少する1次の波形と大きな2次の波形が特徴的である。図 3.4-44(c)のベースシア係数(=免震層のせん断力係数)は1次が支配的である。一方、3.4-44(d)に示した上部構造の高さ方向の中央位置($x/H=0.5$)の層せん断力係数では2次の影響が非常に大きいことが分かり、3次はモードの腹にあたるためほぼ零であるが、4次の振動も確認できる。太線で示した10次までの和は、単振動の単純な和とは想像しにくいほど、角張った波形となっている。

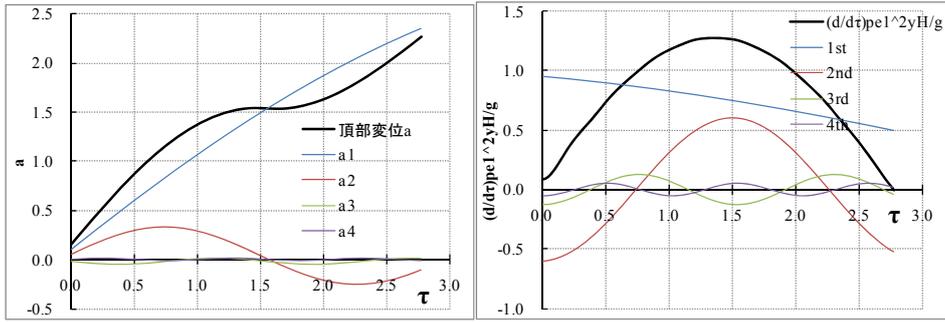
この例から、上部構造の応答に対しては高次モードが無視しえないほどに影響することが理解できるであろう。

図 3.4-45 には変形状態の推移を示している。凡例の数値は無次元時間であり、時間の経過とともに図の左から右へと移っていく。免震層が降伏することで基部の速度が上がり、下層部が上層部を追い越していく様子が分かる。

図 3.4-46 は層せん断力係数の降伏時、最大値及び最小値を示している。一方向に塑性化が進行している間だけを対象にしているが、高次モードの影響もあり、最小値の大きさは最大値とほぼ等しくなっている。

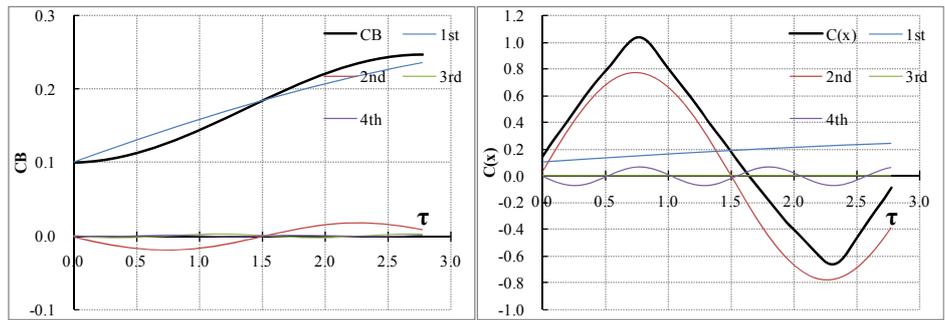
図 3.4-47 は、振動の強さとしての弾性(1次)最大ベースシア係数 C_{Be1max} を 0.5, 1.0, 1.5 と変化させた場合の層せん断力係数分布を示したものである。 C_{Be1max} が大きくなると上部でやや大きな分布となるが、著しい変化はない。分布形状は直線的である。

図 3.4-48 は塑性時の免震係数を変化させた場合である。層せん断力係数分布に対して塑性時免震係数の影響が大きいことが分かる。



(a) 頂部変位

(b) 免震層速度



(c) ベースシア係数

(d) 層せん断力係数($x/H=0.5$)

図 3.4-44 時刻歴

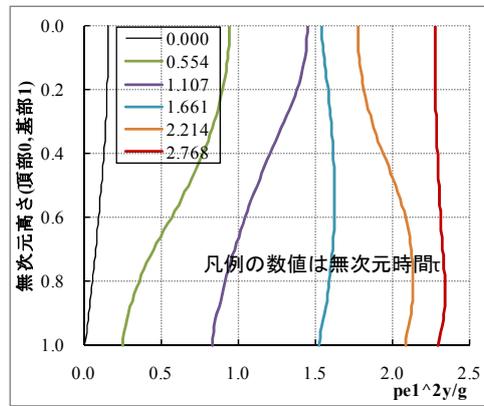


図 3.4-45 変形状態の推移

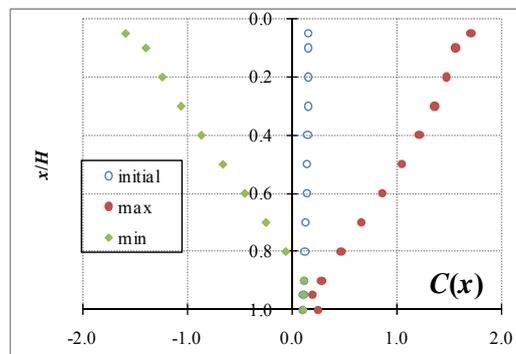


図 3.4-46 層せん断力係数の降伏時、最大値及び最小値

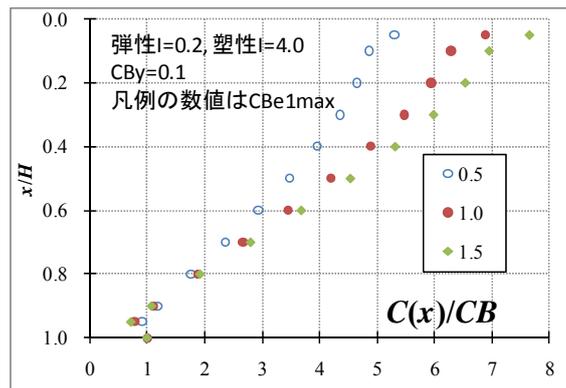


図 3.4-47 層せん断力係数分布（振動の強さによる変化）

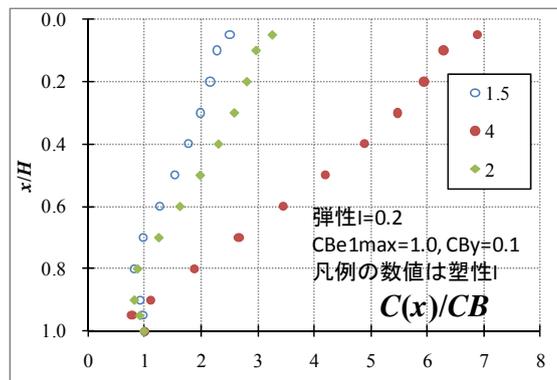


図 3.4-48 層せん断力係数分布（塑性時免震係数による変化）

4) まとめと課題

区分線形系ととらえることで、高次モードの発生メカニズムを説明し、均一せん断棒モデルによる自由振動解析例を示した。

地震応答解析結果を整理する上での非線形係数の有用性⁶⁾¹²⁾等との関連を整理することが今後の課題である。