

建築材料・部材の物理的耐用年数と資源循環性に関する評価技術の開発
材料研究グループ 研究員 土屋直子

建築材料・部材の物理的耐用年数と資源循環性に関する 評価技術の開発

材料研究グループ 研究員 土屋 直子、山口修由

目次

- I はじめに：建物の長期利用と保全の考え方
- II RC 建物
 - 1) 研究背景と概要
 - 2) RC 建物の耐久性研究
 - 3) 資源循環に関する評価方法およびデータ
 - 4) 物理的耐用年数を考慮した資源循環性評価
 - 5) RC 建物まとめ
- III 木建物
 - 1) 研究背景と概要
 - 2) 木建物の耐久性研究
 - 3) 木建物まとめ
- IV おわりに
- 参考文献

I はじめに

建築分野は膨大な量の資源を消費し、廃棄物を排出している。この点において、建築分野が循環型社会の形成に対して負う責任はきわめて大きい。近年、新興国における資源消費量が著しく増大しており、資源の調達が今後、一層難しくなることに対する懸念も拭えない。我が国は、もともと資源が少ない国であり、海外からの輸入に頼っているところが大きい。今後も建築物の供給における質と量を適切に確保するためには、建築ストックに蓄えられている資源を含め、現在入手可能な資源をその資源特性に応じて最大限活用することを考えなければならない。

したがって建築材料・部材においては、その資源特性を考慮して設計・計画がなされることが望ましい。例えば、枯渇型の資源（砕石など）を原料とする建築材料・部材はできるだけ長く使用し、使用後も再利用を行うなどの対策を講じることが望ましく、再生産型の資源（木

材など）を原料とする建築材料・部材は、再生産を阻害しない（あるいは促す）ように、その利用方法を考えるべきであり、場合によっては積極的に消費することも重要となる。

しかし一方で、材料・部材は経年劣化するものであり、材料設計を行う際には要求する耐用年数を達成する部材設計を行う必要がある。図-1に、建物の耐用年数と環境負荷に関する概念図を示す。資源特性を考慮しながら、要求する耐用年数を達成するような保全計画と材料設計が必要である。

しかしながら、現在、建築物の設計においては、建築材料・部材を構成する原料の資源特性を考慮して、材料・部材を選択し、設計に反映するケースはほとんどない。というのも、環境負荷評価については、これまでにいくつかの有用なツールが開発されているが[1]~[6]、材料の精緻な耐用年数の評価およびこれらを変数とした資源循環性評価の計算手法がないことが一因と考え

られる。

そのため、建築に係る材料の資源循環性を的確に評価するためには、建物と建物を構成する部位の耐用年数を的確に推計し、推計した耐用年数を考慮して、資源循環性を評価するための手法が必要である。

本研究では、建築材料・部材の物理的耐用年数を評価する方法を開発し、建築材料・部材の製造と廃棄、並びに資源の再生に係る環境負荷データを収集し、その物理的耐用年数を変数とする環境負荷評価手法を提案することを主な研究目的とした。また対象は木建築およびRC建物とし、RC造建物と木造建物では、構造部材を構成する材料の劣化メカニズムが異なるため、それぞれの建物材料特性に従い研究を進めた。

II RC 建物

1) 研究背景と概要

RC建物の耐久設計では、コンクリート中の鉄筋腐食によるコンクリートの損傷をさせないように行われている。現在の一般的な設計では、前者は水セメント比やコンクリート強度に置き換えられた仕様や指針が示され、後者はJIS仕様に従う生コンの発注を受け入れることで達成している。

しかし、近年使用が増加している資源循環性を考慮した材料の設計手法は、例えば高炉セメントやフライアッシュの一部など、仕様や指針などにより示されているが、まだ検討が不十分な部分も多い。また、RC建物の経年劣化を低減させる効果が見込めかつ維持管理を遂行する上で重宝すると考えられる仕上げを含めた部位の保全計画ならびに設計手法も同様に十分な検討はされていない。

そこで、近年使用が増加している資源循環性を考慮した材料である混和材を大量使用したコンクリートの耐久性評価実験およびこれらに基づく調合設計の提案、また仕上げを施したコンクリートの耐久性評価式の提案を行う。

次に、資源循環性に係るデータの収集を行い、耐用年数を考慮した資源循環性評価方法とそのツールを提案した。

2) RC 建物の耐久性研究

① 耐久設計の考え方

材料・部材の設計では、告示や指針[7]、仕様書[8]などを参考にすることができる。これらにおける供用期間を満たすための耐久設計の技術背景には、鉄筋の腐食確率が設定値に至るまでの期間を使用可能な期間と考え、より具体的な算定手法としてはコンクリートの中性化がかぶり厚さに到達するまでの時間とする手法が用い

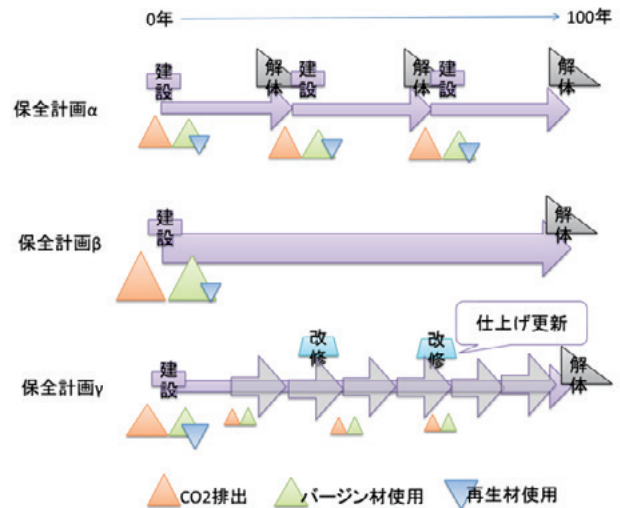


図-1 建物の耐用年数と環境負荷に関する概念図

られている。中性化の進行深さ D は $D=A\sqrt{t}$ として推定されることが一般的に知られる。ここで A は中性化速度係数であり、材料種類や調合、環境などをパラメータとする係数であり、実験的に取得される。

② 混和材使用時の耐久性評価のための実験

コンクリート用混和材料である高炉スラグ微粉末やフライアッシュを対象とし、これらの耐久性（中性化速度係数）の評価のための実験を行った。試験水準はフライアッシュ置換率 0, 15, 30%、高炉スラグ微粉末置換率 0, 20, 43, 60%、水セメント比 50, 55, 60%、養生期間とした。中性化深さの評価は、JIS A 1153 および JIS A 1152 に従ってコンクリートの促進中性化試験方法による中性化深さを測定した。なお、ここでの実験検討および結果については[9]において発表しているため、更なる詳細についてはこちらを参照されたい。

③ 混和材を使用したコンクリートの調合設計手法の提案

上記の実験結果から得た中性化速度係数を用いて高炉セメント A 種、B 種、C 種相当のコンクリートの中性化の進行予測を行い、それにより推定されるコンクリートの物理的耐用年数を鉄筋コンクリート部材のかぶり厚さごとに試算した。ここでは、品確法に則った方法と耐久性指針の方法[7]により試算を行った。図-2 に、混和材置換率と耐用年数の試算結果を示す。図の横軸の 0~60 の数字は混和材の置換率 (%) であり、置換率の 10%が高炉セメント A 種、43%が高炉セメント B 種、60%が高炉セメント C 種相当である。縦軸が耐用年数を示しており、例えばかぶり厚さ 3cm の屋内耐力壁に耐用年数 100 年を希望する場合には、耐久設計指針の方法の結果では、W/C50%で混和材置換率が 45%以下である高炉セメント A 種・B 種が使用可能であること

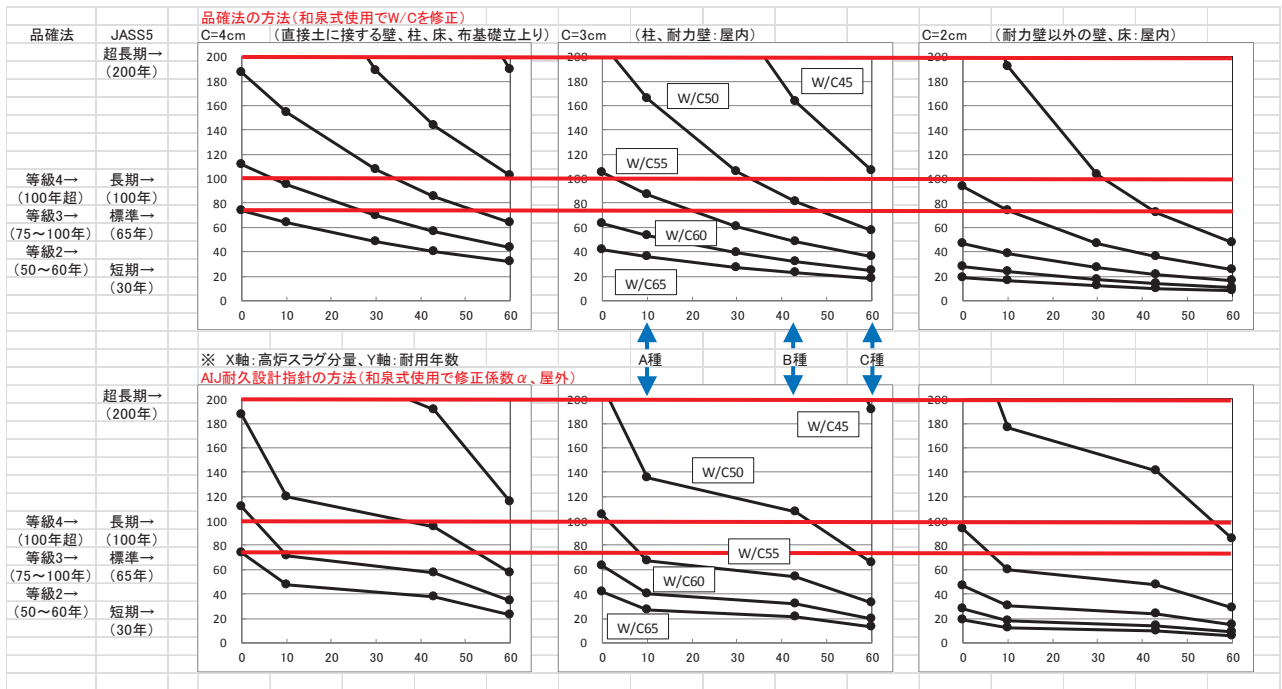


図-2 高炉セメント（A～C種）を用いたコンクリートの中性化の進行予測と推定されるコンクリートの物理的耐用年数（上図：品確法に則った方法、下図：耐久設計指針による方法、左図：かぶり厚さ4cm、中図：かぶり厚さ3cm、右図かぶり厚さ2cm）

がわかる。もう一例として、高炉セメントC種を用いることができるのは、W/C45%とすればあぶり厚さ3cmの屋内耐力壁・柱やかぶり厚さ4cmの直接土に接する部分などがあることが分かる。また一方で、希望する供用期間を満足すべき中性化速度係数の上限値を算出し、これを達成する各材料の調合について検討した。このような試算を行い、希望する供用期間中の材料の耐用年数が満足する設計方針の検討を行い、後述する物理的耐用年数を考慮した資源循環性評価ツールに反映した。

④仕上げによる劣化抑制効果の検討

各仕上げ条件による劣化抑制効果（中性化抑制効果）を検証するため実験を行った。仕上げ条件は、仕上げなし（打放し）が1種類、タイル貼りが5種類、モルタル塗りが10種類、外断熱材が5種類、仕上塗材が5種類とした。実験は、JIS A 1153 に倣って促進中性化試験を行い、JIS A 1152 に従って中性化深さを測定した。

促進材齢26週における各仕上げを施した試験体の中性化深さを図-3に示す。長期の促進材齢でも、基本となる試験体C1（打放し）に対し、モルタル以外の仕上材は、ほぼ10mm以上の中性化抑制効果があるという結果となった。一方、モルタルに関しては、1.0～2.0mmの地下調整塗材では10mm以上の中性化抑制効果を得ることはできず、少なくとも10mm程度の同等の厚さが必要であることがわかった。ただし、10mm以上の塗り厚のあるM5～M10のすべてのモルタルに抑制効

果がある訳ではない。これを踏まえ、モルタル仕上げの初期の湿潤養生、ポリマーの増量、塗り厚の増加などを水準として行った中性化促進実験の結果を図-4に示す。これらの条件がモルタル仕上げのコンクリートの中性化抑制効果を有することがわかる。なお、ここでの実験検討および結果の更なる詳細が必要な場合には文献[10][11]を参照されたい。

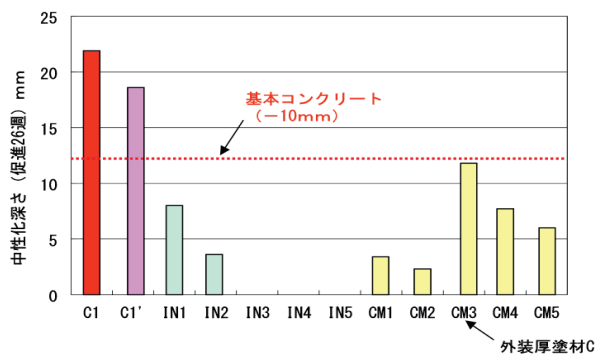
⑤仕上げを含めた部材の耐久性評価式の提案

仕上げを含めた部材の耐久性評価は、仕上げの中性化抑制効果を、コンクリートの中性化速度係数と関連づけることで可能である。上記の結果および後述する保全と長期使用のための設計方針に基づき、仕上げ材の耐久性評価を仕上塗材系とモルタル仕上げ系に区別して下記の通り提案する。

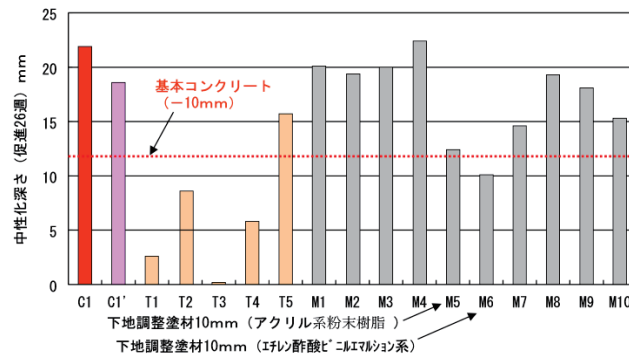
仕上塗材の中性化抑制効果はコンクリートの中性化速度係数Aの低減率をsとして設定すると、仕上げを含めたコンクリート部材の中性化速度係数 $A_t = s \cdot A$ として評価が可能である。中性化抑制効果は時間経過とともに線形的に低下するものと仮定する。

ここで、維持管理の周期 t_m における平均的なsの値は、次式で求められる。

$$s = \frac{t_p \cdot \frac{1+s_0}{2} + (t_m - t_p) \cdot 1}{t_m} = 1 - \frac{(1-s_0) \cdot t_p}{2t_m}$$



C : 標準コンクリート、IN : 外断熱材、CM : 仕上塗材



C : 標準コンクリート、T : タイル、M : モルタル

図-3 各種仕上げを施した試験体の中性化深さ (材齢 26 週)

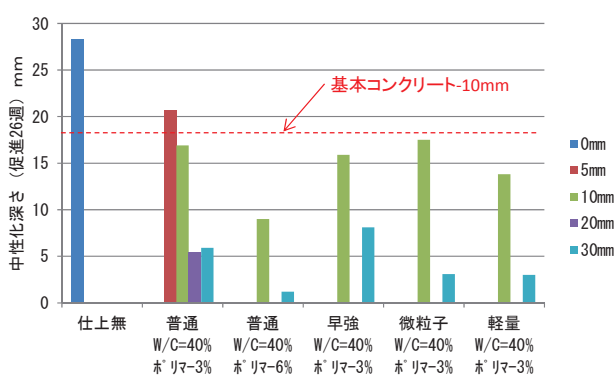
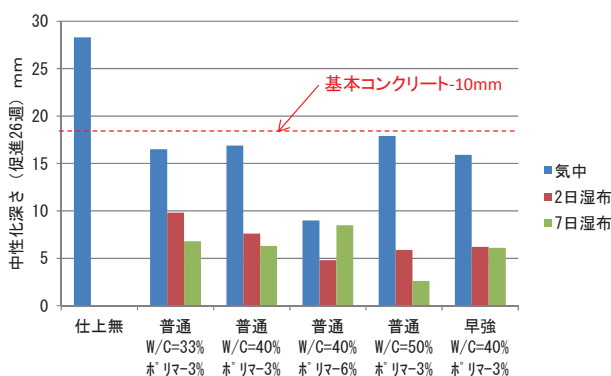


図-4 モルタル仕上げを施した試験体の中性化深さ (材齢 26 週)

ここで、

s_0 : 中性化の低減係数 (中性化率) の初期値 (促進試験等で得られる値)

t_p : 躯体保護効果がなくなるまでの年数

t_m : 維持管理 (塗替え等) の周期

例えば、初期の低減率 s_0 が 0.3、保護効果がなくなる年数 t_p が 6 年、メンテナンス周期 t_m が 12 年だとすると、低減率 $s=0.825$ となる。

s_0 は促進中性化試験などから求めることが可能であり、前述などの実験データが活用できる。 t_p については、既往の研究などによれば、外装仕上材 (複層塗材) の躯体の保護効果がなくなる時点は種類によって異なり 4 年~14 年と推定しているが [12] [13]、今後のデータの蓄積が必要などである。

一方、モルタル塗り仕上げの場合には、かぶり厚さの一部とする考え方や、躯体コンクリートの中性化が開始する遅れ時間として表す考え方がある。後者については例えば次式で示すような考え方である。

$$C = A(\sqrt{t} - R)$$

ここで、 R : 仕上材の仕様 (種類およびその厚さ) により決定する係数である。 R の決定方法は、仕上材を施した試験体の促進中性化試験の結果から求めることができる。

3) 資源循環に関する評価方法およびデータ

環境負荷量 (原単位) は経産省や各分野の関連協会の HP や研究報告などで公開されている。後述する資源循環性評価ツールの開発にあたり、材料設計の際の詳細な調査ごとに対応できるように、混和材などの CO₂ 排出量原単位 (kg-co₂) や廃棄物・副産物利用量 (kg/t) について整理し、データシートを作成した。シートの作成には、参考文献 [14]~[31] に示す参考資料を収集して行った。

4) 物理的耐用年数を考慮した資源循環性評価

① 保全と長期使用のための設計方針

建物を長期的に使用するための基本的な対策 (考え方) として、鉄筋コンクリート造建築物を対象とした場合には次のような考え方が可能である。

- i. かぶり厚さを大きくする (初期性能の向上)
- ii. 材料を高耐久化する (劣化速度の低減)
- iii. 積極的な維持保全による躯体性能 (保護性能) の確保 (健全な状態を保つ)

また、長期使用のための設計方針として、一般的に定義される設計限界 (構造性能などの性能低下を生じない限界の状態) および維持保全限界 (維持保全段階においてそれ以上性能が低下すると維持保全が困難になる限

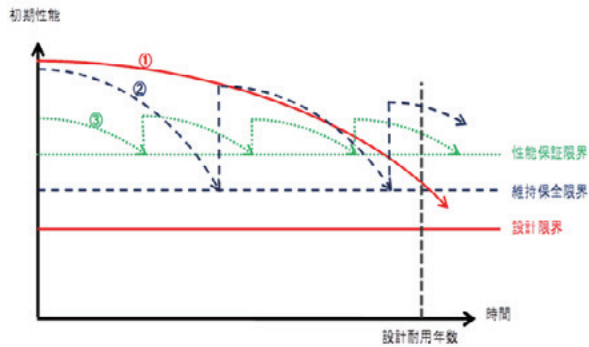


図-5 長期使用のための耐久設計の考え方の模式図

図-6 基本条件の入力例：コンクリートの調合強度を算出し、結合材を入力することで、種類強度上必要な水セメント比 (W/C) を算出する。

界の状態)に加え、予防保全の考え方を取り入れ、仕上材の躯体保護効果にも期待するための設計限界(ここでは「性能保証限界」と呼ぶ)を定義し、それらを組み入れた設計の方針として、以下の3つの考え方を示した。

図-5 に設計の考え方を模式的に示す。

- i. 高耐久型の耐久設計(図中①)：かぶり厚さの増加、W/Cの低減などを行い、初期性能の向上を目指す。
- ii. 維持保全型の耐久設計+維持保全(図中②)：モルタル仕上げを施すなどにより、設計限界に至るまでの劣化速度の低減を目指す。
- iii. 性能保証型の耐久設計+維持保全(図中③)：仕上塗材を定期的に施すなどにより、健全な状態を保つ。

②開発した評価ツール概要および使用方法

建築物1棟分のコンクリート総量の資源投入量 (t) および再生資源投入量 (t)、投入資源のイニシャルCO₂排出量 (kg-CO₂/year) (建材製造段階までのCO₂排出量) の評価が可能である。外装仕上げの有無および仕上げの種類、維持管理の頻度を想定して調合設計を行って

表-1 評価指標

評価指標 ＼ 評価の 段階	コンクリートの資源量	コンクリートのCO ₂ 排出量	外装仕上げ等の資源量	外装仕上げ等のCO ₂ 排出量
材料(生コンクリート)製造	○(再生資源使用量)	○	○	○
施工				
供用				
維持管理			○	○
解体				

表-2 モデル建築物の概要

項目	概要	
用途	賃貸マンション(用途比率100%)	
構造	RC	
階数(地上)	3	
階数(地下)	0	
建築面積	750 m ²	
述べ床面積	1,440 m ²	
基準階面積	510 m ²	
建物形状(平面)	L形	
軒高	9.3m	
階高	2.9m	
杭長	なし	
主な仕上げ	外装 外壁	タイル、複層塗材
	開口部	アルミサッシ(セミエアタイト)
	内装 床	フローリング、長尺塩ビシート
	壁	ビニルクロス、せっこうボード下地
	天井	ビニルクロス、せっこうボード下地

いる。外装仕上げの維持管理に伴う補修・改修等の行為を含めた建築物のライフサイクルを通じて投入される資源の総投入量ならびにそのイニシャルCO₂排出量となっている。表-1に本ツールにおいて加味している評価指標を示す。施工、維持管理、解体行為に伴い使用する重機によるCO₂排出量や、材料製造段階以降の輸送に伴うCO₂排出量は、建設物件固有の状況や立地により左右されるところが大きい。建築物の規模、用途、仕様を設定して算定をしている本検討では、これらは検討対象外とする。実際のプロジェクトに適用するコンクリートの環境負荷評価においては、これらの要素を加味して検討することが望ましい。また、評価においては関連指針等に示されている既往のコンクリートの強度とW/Cの関係式や標準調合表を参照している。そのため、実際の評価においては、使用するコンクリート(生コン工場)の製造実績等から定まる調合上の基準等を用いるとよい。

表-3 設計条件

記号	計画供用期間(年)	仕上げ	かぶり厚(mm)	F_c (N/mm ²)	F_m (N/mm ²)	中性化速度係数 A	仕上材料の中性化率 S_0	躯体保護効果がなくなるまでの年数 t_p	維持管理の周期 t_m
ア	50	無し	30	24	31.7	1.52			
	75					1.24			
	100					1.07			
イ	50	無し	40	24	31.7	2.79			
	75					2.28			
	100					1.97			
ウ	50	無し	50	24	31.7	4.01			
	75					3.27			
	100					2.83			
エ	50	有り	40	24	31.7	3.62	0.08	6	12
	75					2.96			
	100					2.56			
オ	50	無し	40	24	31.7	3.38	0.3	6	12
	75					2.76			
	100					2.39			
カ	50	有り	40	24	31.7	3.03	0.68	6	12
	75					2.48			
	100					2.14			
キ	50	有り	40	24	31.7	5.17	0.08	12	12
	75					4.22			
	100					3.65			
ク	50	有り	40	24	31.7	4.29	0.3	12	12
	75					3.51			
	100					3.03			
ケ	50	有り	40	24	31.7	3.32	0.68	12	12
	75					2.71			
	100					2.35			
コ	50	有り	40	24	31.7	3.2			
	75					2.60			
	100					2.25			

次の手順に従って計算を行う。

- i. **基本条件**：計画供用期間や維持保全周期、耐久設計基準強度 F_a あるいは中性化速度係数 A の設定、入力を行う。
- ii. **コンクリートの基本条件**：調合強度 F の決定から水セメント比を定める。
- iii. **部材の設計条件**：設計かぶり厚さを定める。
- iv. **仕上げによる躯体保護効果の考慮**：仕上材料の選択と維持管理シナリオを選択する。
- v. **耐久設計の確認**：要求する耐久性を満たすかの確認とともに仕上げ、かぶり厚さ、水セメント比あるいは中性化速度係数などの変更を行う。
- vi. **調合計算**：上記で定めた水セメント比を満たすよう資源投入量を設定する。
- vii. **資源性評価**：年あたりの CO₂ 排出量および再生資源投入量を算出する。

図-6 に評価ツールの入力例を示す。

③ ツール使用例：モデル建築物によるパラメトリックスタディ

表-2 に示すモデル建築物によるパラメトリックスタディを行い、各設計条件における 1 年あたりの CO₂ 排出量を評価した。耐久設計による場合は計画供用期間を【50 年、75 年、100 年】の 3 種類、かぶり厚を【30mm、40mm、50mm】の 3 種類とする。さらに、かぶり厚が 40mm の場合について、仕上げは、【仕上塗材 A（防水形複層塗材 RE、中性化率 S_0 :0.08）、仕上塗材 B（複層塗材 RE、中性化率 S_0 :0.30）、仕上塗材 C（防水形外装薄塗材 E、中性化率 S_0 :0.68）、モルタル塗り】の 4 種類、仕上塗材 3 種については、維持保全効果を検証するため躯体保護効果がなくなるまでの年数 t_p を【6 年、12 年】の 2 種類検討する。設計基準強度 F_c はいずれも 24N/mm² とする。表-3 に設計条件を示す。結果を図-7 に示す。

混和材料の置換率の影響について、混和材料の置換率

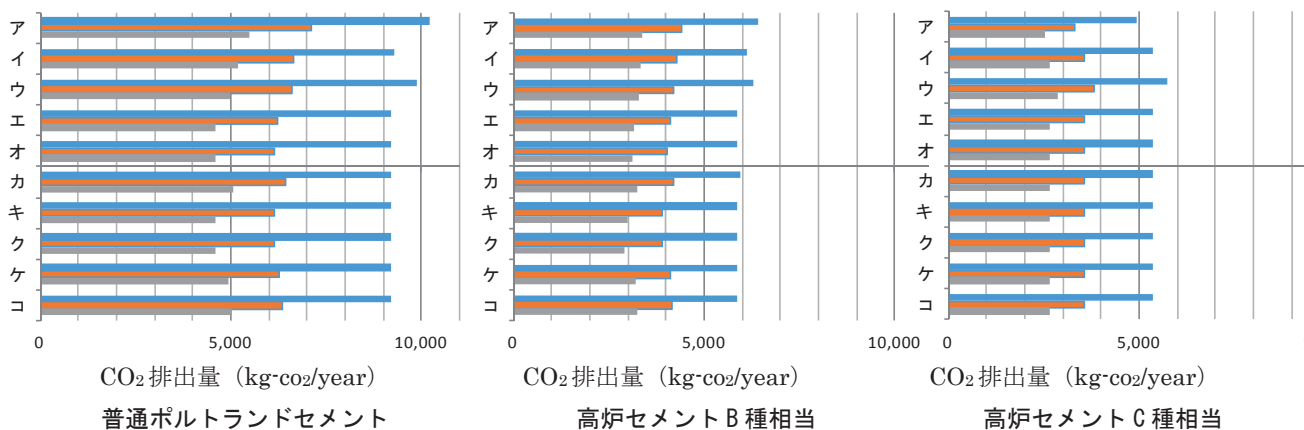


図-7 モデル建築物におけるCO₂排出量の結果 (kg-co₂/year)

凡例：計画供用期間 ■ 50年 ■ 75年 ■ 100年

が増加するとCO₂排出量が減少する。

計画供用期間の影響について、計画供用期間が長くなると、1年あたりのCO₂排出量を評価基準とする場合、その削減効果が認められる。

仕上げ材料や維持管理の影響について、仕上げ材料の選定においては、中性化率S₀が低い仕上塗材を用いた場合、CO₂排出量の削減効果が期待できる。言い換えれば、CO₂排出量の削減効果を評価する場合、仕上げ材料や維持管理の効果を考慮することは効果的であることがわかる。

かぶり厚さの変更等設計条件の影響について、コンクリートのかぶり厚さを増加させた場合、耐久性上必要な強度が減少するために、CO₂排出量が減少する。しかし、かぶり厚さの増加分の物量の増大の影響でCO₂排出量が増大する場合もある。ここでの評価は、かぶり厚さの増減がCO₂排出量や資源投入量に及ぼす影響を把握するために検討を行ったが、実際の建築物の設計においては、かぶり厚さの増加・減少は設計変更を伴うため、現実的な対応となり得るかについては、検討必要である。

なお、W/Cが40%以下となる場合、コンクリートに使用される材料（高性能AE減水剤）や要求されるフレッシュ性状（スランプではなくスランプフロー）等が異なるが、標準調合といえるものが調合指針等においても示されておらず、加えてコンクリートの中性化速度係数は、W/Cが40%下回るとかなり小さくなるため、中性化速度係数に基づく耐久性上の評価は不要と考えるため、評価の対象外とした。

5) RC建物まとめ

RC建築物の混和材を大量使用したコンクリートの調合設計の提案や仕上げを施したコンクリートの耐久

性評価式の提案を通じ、耐用年数を考慮した資源循環性評価方法とそのツールを提案した。

III 木建物

1) 研究背景と概要

RC造建物と木造建物では、構造部材を構成する材料の劣化メカニズムが異なり、資源循環性の評価に向けたアプローチが異なる。木材の劣化は、外部から侵入する雨水などの水分・腐朽菌やシロアリなどの生物等、外部環境の影響を大きく受ける。これらの外部環境の評価を含めた総合的な耐久性能評価を行うためには、ファクター・メソッドを用いることが有効である。本研究では、耐久性総プロ(1986)「木造建築物の耐久性向上技術の開発」で提案された「ファクター・メソッド」をベースに、新しい劣化データを追加して「耐用年数の計算式」を見直し、設計者が設定した耐用年数を目標に、コンピュータを使って部位ごとに適切な材料・構法を選択できる「木造住宅の耐久設計支援ツール」を最初に開発する。次に、「木造住宅の耐久設計支援ツール」の結果を「環境負荷評価ツール」に適用してLCWやエンボディCO₂を計算して、最終的に木造建物の資源循環性を評価できるシステムを開発することを目標とした。

2) 木造建物の耐久性研究

①物理的耐久性評価のためのツールの開発

木造建物については、試作した「木造住宅の耐久設計支援ツール」を見直し、プログラム化を行った(図-8参照)。ツールの、i 建設地の劣化外力(腐朽菌とシロアリの生息)、ii 建物の部位に起因する劣化外力、iii 木質系の建築材料の物理的耐久性(耐腐朽性・耐蟻性)、iv 工法上の対策、v 躯体保護に対する対策、vi 仕上げ材

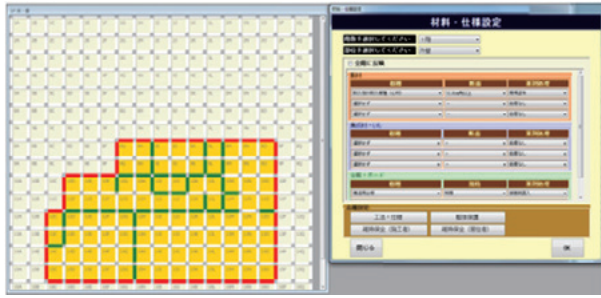


図-8 「木造住宅の耐久設計支援ツール」の入力例

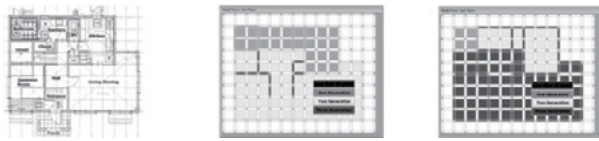


図-9 耐用年数の計算例

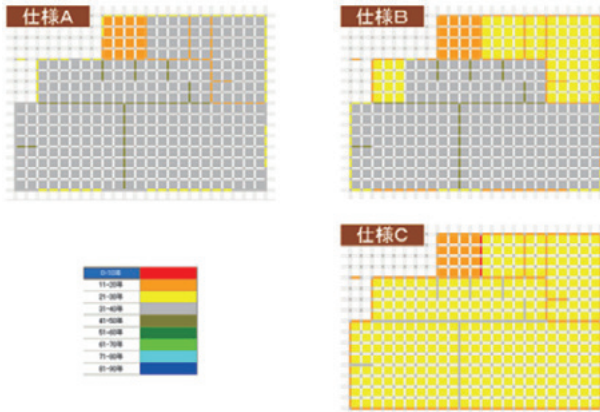


図-11 「木造住宅の耐久設計支援ツール」を用いた部位別の耐用年数計算例

等の物理的耐久性、vii 施工管理水準、viii 維持管理水準、について、木造建築物の物理的耐用年数に関する評価法の詳細について検討した。評価法に用いる計算方法は耐久性総プロにおいて提案された計算法を見直したものであり、試作した木造建築物に対して試行し、試作した算定手法の妥当性について検証した。計算した結果の表示例を図-9 に示す。研究詳細は文献[32]を参照された。

②資源評価のためのデータベース

「木造住宅の耐久設計支援ツール」において使用資材のエンボディード CO₂ を算出する際に用いる、i 各種建築材料の製造時における CO₂ 排出量、ii 各種建築材料を製造する際に消費する資源の種類と量、iii 建設/改修/解体により発生する廃棄物の種類と量、iv 各種木質材料が蓄積する炭素の量、のデータを収集し、資料として取りまとめた。データの一部を図-10 に示す。

③資源循環の環境評価システム

図-10 エンボディ CO₂ と廃棄物排出量を求めるためのデータベース

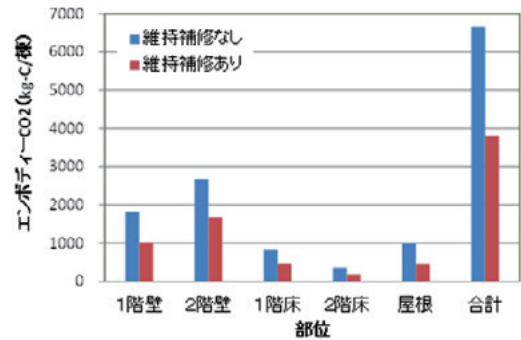


図-12 建物の維持補修の有無とエンボディード CO₂ との関係を示す計算結果の例

図-11 に示す、建物又は建物を構成する部材の物理的耐用年数に基づいて、建物のエンボディード CO₂ と LCW を算定するためのツールを試作した。さらに試作したツールを用いたケーススタディを行った。各部の物理的耐用年数を指標として、建物全体としての LCW 及びエンボディード CO₂ を定量的に算出することができる環境評価システムを開発した。図-12 は、建物の維持補修の有無とエンボディード CO₂ との関係を示す一例である。

3) 木建物まとめ

木造建築物の耐久設計を支援するためのツールを作成し、建物又は建物を構成する部材の物理的耐用年数に基づいて、建物のエンボディード CO₂ と LCW を定量的に算出できるシステムを開発した。この結果を用いて、建物の維持補修の有効性をエンボディード CO₂ と LCW を用いて示すことができた。

IV おわりに

本研究では、建築材料・部材の物理的耐用年数を評価する方法を開発し、建築材料・部材の製造と廃棄、並びに資源の再生に係る環境負荷データを収集し、コンクリート部材と木造建築物について、その物理的耐用年数を変数とする環境負荷評価手法を提案した。提案した評価ツールは、一定の環境配慮を満足させながら、建物あるいは部材に要求される性能を検証し、仕様を決定しなければならないような設計行為の際のケーススタディのためのプラットフォームとして活用可能である。

参考文献

- [1] 「コンクリート構造物の環境性能に関する研究委員会」報告書、(社)日本コンクリート工学協会、2008.8、pp.2-1～2-4
- [2] 住宅・建築省エネルギー機構ホームページ、<http://www.ibec.or.jp/CASBEE/>
- [3] 独立行政法人産業技術総合研究所ライフサイクルアセスメント研究センターホームページ、<http://www.aist-riss.jp/old/lca/ci/activity/project/lime/>
- [4] 建築研究資料No.91「建築のライフサイクルエネルギー算出プログラムマニュアル」、小玉祐一郎、澤地孝男、中島史郎、建設省建築研究所、1997.11
- [5] 国土交通省総合技術開発プロジェクト「持続可能な社会構築を目指した建築性能評価・対策技術の開発」報告書、平成20年12月、国土交通省国土技術政策総合研究所
- [6] 建物のLCA指針第3版、2006年11月、社団法人日本建築学会
- [7] 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針(案)・同解説、2004.3
- [8] 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事 2009、2009.2
- [9] 鹿毛忠継、棚野博之、濱崎 仁、古賀純子、土屋直子、下屋敷朋千、コンクリートの中性化に及ぼすコンクリート用混和材料の影響 その1 実験計画と試験結果 その2 中性化速度の評価、日本建築学会大会学術講演梗概集、2014.9
- [10] 仕上材によるコンクリートの中性化抑制効果に関する基礎的検討 その4～その8、日本建築学会大会学術講演梗概集、2012.9 および 2013.9
- [11] コンクリート造建築物の劣化対策に関する基準の整備に資する検討報告書、平成 25.3
- [12] 今本 啓一、本橋 健司、兼松 学、楡木 堯、清原千鶴、越中谷光太郎、井上 照郷、：マルコフ連鎖モデルに基づく外装材の劣化シミュレーション その3、その4、日本建築学会大会学術講演梗概集、2013、2014
- [13] 古賀順子他：建築物の長期使用に対応した外装・防水の品質確保ならびに維持保全手法の開発に関する研究、建築研究資料、No.145、2013
- [14] セメント協会ホームページ：
<http://www.jcassoc.or.jp/cement/4pdf/>
- [15] セメント協会：セメントのLCIのデータの概要、p.2、p.7、2011年8月1日
- [16] 環境省：平成23年版環境・循環型社会・生物多様性白書、p.156
- [17] 土木学会：コンクリート技術シリーズ62 コンクリートの環境負荷評価(その2)、p.39の差替え表、平成16年9月30日"
- [18] 鉄鋼スラグ協会：鉄鋼スラグ統計年報(平成22年度実績)、p.3、平成23年7月
- [19] 日本フライアッシュ協会ホームページ：
<http://www.japan-flyash.com/pdf/fcuse10.pdf>
- [20] (社)日本コンクリート工学協会：コンクリートセクターにおける地球温暖化物質・廃棄物の最小化に関する研究委員会報告書、p.52、2010年7月30日"
- [21] 土木学会：コンクリートライブラリー125「コンクリート構造物の環境性能照査指針(試案)」、p.52、平成17年11月1日
- [22] 土木学会：コンクリートライブラリー111「コンクリートからの微量成分溶出に関する現状と課題」、pp.35～39、2003年5月
- [23] 経済産業省ホームページ「平成22年砕石等統計年報」
<http://www.meti.go.jp/statistics/sei/saiseiki/result/xls/agyear22.xls>
- [24] (公社)日本コンクリート工学協会：平成23年度コンクリート技師研修テキスト、p.12、平成23年6月1日
- [25] 未踏科学技術協会：「環境負担性評価システム構築のため基礎調査研究」調査報告書(別冊)ー金属インベントリーデーター、1995.11
- [26] 国立環境研究所：産業連関表による環境負荷データブック(3EID)ーLCAインベントリーデータとして、2002
- [27] 土木学会：土木建設業における環境負荷評価(LCA)研究小委員会委員会報告、1997.8
- [28] 土木学会：コンクリート技術シリーズ62「コンクリートの環境負荷評価(その2)」、pp.32～40、2004
- [29] (社)日本コンクリート工学協会：環境時代におけるコンクリートイノベーション、pp.4・45～4・47、2008
- [30] 日本鉄鋼連盟：鉄鋼業における地球温暖化対策の取組、平成21年11月

<http://www.jisf.or.jp/business/ondanka/joukyo/docs/siryou1.pdf>

[31] kikuchi, T. and kuroda, Y.: Carbon Dioxide Uptake in Demolished and Crushed Concrete, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.9, No.1, pp.115-124, 2011

[32] S. Nakajima: SERVICE LIFE PREDICTION

AND EMBODY CO₂ OF WOODEN BUILDINGS, Proceedings of XIII International Conference on Durability of Building Materials and Components, 2015, pp. 158-165