長寿命化対策のライフサイクル資材使用量と二酸化炭素排出量に与える影響

THE INFLUENCE ON LIFE CYCLE MATERIAL USAGE AND CO₂ EMISSION
FROM COUNTERMEASURE OF LONG-LIFE BUILDING漆 崎 昇*, 水 野 稔**, 下 田 吉 之***, 酒 井 寛 二****
*Noboru URUSHIZAKI, Minoru MIZUNO, Yoshiyuki SHIMODA
and Kanji SAKAI*

Increasing protective concrete cover, design strength, and story height prolong the life of RC structure building. The influence of those factors on life cycle material consumption (LCM) and life cycle carbon dioxide emission rate (LCCO₂) were investigated. The results show as follows.

1. Increasing protective concrete cover is more effective measures to decreasing LCM and LCCO₂, than increasing design strength.
2. Increasing story height has less influence on LCM and LCCO₂.
3. Blast-furnace cement is more effective than normal portland cement in reducing LCCO₂, considering suitable protective concrete cover and more than 100 years life cycle.

Keywords : Material Usage, Construction Waste, CO₂ Emission, Life Cycle, Long-life

資材使用量、建設廃棄物、二酸化炭素排出量、ライフサイクル、長寿命

1. はじめに

建築物の更新における環境負荷の低減を検討する際に、建物の長寿命化は効果の大きい施策の一つと考えられる¹⁾。建物を長期間（例えば 100 年以上）使用するためには、物理的に 100 年の使用に耐えることが必要である。さらに当然その建物が魅力的でなければならぬ。

しかし、建物の長寿命化の対策を採用した場合の省資源、二酸化炭素排出抑制への影響を定量的に分析した例^{2), 3), 4)}は少ない。

そこで本報では、長寿命化のための要件として高耐久性、階高の増加を取り上げ、実施物件（RC 造）を対象にその対応策に伴う資材使用量、二酸化炭素排出量の変化を分析し、ライフサイクルにおける影響を検討した。

2. 長寿命について

建築の長寿命化の対策としてスケルトン・イン・フィルなどが提案されている。建築学会でも、「サステナブル・ビルディング普及のための提言」⁵⁾で、建築の“造り手”や“使い方・住まい方”の具体的方策等を提案している。長寿命の要素について課題を大別すると以下ようになる。

① 高耐久化

防錆・防腐処理、コンクリートの中酸化防止、鉄骨腐食分の断面増、耐震性の向上

② フレキシビリティ

スペースの余裕（階高、設備スペース等）、耐荷重の余裕、設備容量の余裕、二重床・ワイヤリングシステム、システム化・ユニット化、モジュール設計、交換容易な取り付け方法

③ メンテナンス

予防保全による維持管理システム、ビル運営・運用総合支援システム、日常点検・清掃、劣化診断

ここでは、長寿命化のために次項に示す対策を取った場合の資材使用量、二酸化炭素排出量に与える影響を検討する。さらに、二酸化炭素排出量の少ない資材として、高炉セメントの使用についても同様に検討した。

3. 対象モデルの設定と検討項目

3. 1 モデルの設定

表 1 に対象とした建物の概要を示す。対象とした建物は RC 造で、2000 年中に実際に竣工した建物である。対象とする建物に対して、

* 大林組地球環境室 環境課長・工修
(大阪大学大学院工学研究科 博士課程)

** 大阪大学大学院工学研究科 教授・工博

*** 大阪大学大学院工学研究科 助教授・工博

**** 中央大学大学院 教授・工博

Manager, Global Environment Dept. Obayashi Corporation, M. Eng.
(Environmental Engineering Graduate School of Engineering, Osaka Univ.)
Prof., Dept. of Environmental Engineering, Graduate School of Engineering, Osaka Univ., Dr. Eng.
Assoc. Prof., Dept. of Environmental Engineering, Graduate School of Engineering, Osaka Univ., Dr. Eng.
Prof., Graduate School, Chuo Univ., Dr. Eng.

表 1 対象とした建築物の概要

構造	R C 造一部 S 造
用途	事務所
階数	地上 9 階、地下 1 階、 塔屋 1 階
最高軒高	34.75 m
地下の深さ	7.10 m
基礎形式	場所打ちコンクリート 杭
敷地面積	888.19 m ²
建築面積	696.65 m ²
容積対象面積	5,820.57 m ²
延床面積	6,664.39 m ²
階高	3,800 mm
駐車台数	33 台

竣工図面、見積書、機器カタログなどにより投入された資材量を算定した。延べ床面積当たりの投入資材量を表 2 に示す。さらに、投入資材生産時に排出される二酸化炭素量の算定結果を表 2 に併せて示す。投入資材量は、コンクリートが全体の 65% を占めている。また、二酸化炭素排出量は、コンクリートが 48% を占めている。コンクリート量が資材量と二酸化炭素排出量に大きく影響することが分かる。

ここで、算定に使用した主な資材の製造時の二酸化炭素排出量原単位⁶⁾を表 3 に示す。表 3 の二酸化炭素排出量原単位は、1995 年の産業連関表をデータベースとし、「限定間接効果算入法」により算出したもので、国内生産部門のみを取り扱い、消費支出分のみを取り扱ったものである。

3. 2 検討項目

以下に検討項目を示す。

a) 長寿命化のためにコンクリートかぶり厚を増加

鉄筋までのコンクリート厚さ（以降「かぶり厚さ」と呼ぶ）を増加させることにより、鉄筋コンクリートの耐用年数を増加させることができる。ここでは、標準設計におけるかぶり厚さの変更による資材投入量、二酸化炭素排出量の変化が耐用年数に与える影響を検討する。

b) 高耐久化のために高強度コンクリートを採用

高耐久化を実現するためにコンクリートの高強度化が考えられる。ここでは、コンクリートの強度を増加した場合の資材量の減少、二酸化炭素排出量の変化が耐用年数に与える影響について検討する。

c) フレキシビリティを向上するために階高を変更

将来にわたってフレキシビリティを保証するために、当初計画段階で階高に余裕を持たせた場合の資材量の増減と、二酸化炭素排出量への影響を検討する。

d) ライフサイクルの評価

上記の項目毎にライフサイクルにわたる資材使用量と二酸化炭素排出量を算定し、省資源、温暖化抑制効果について検討する。

4. 長寿命への対応による資材量、二酸化炭素排出量の試算

4. 1 コンクリートの寿命の推定

鉄筋コンクリート造躯体の耐用年数を左右する要因の中でも最も大きい要因は、鉄筋コンクリート中の鉄筋の発錆による劣化である。

表 2 対象とした建物の資材投入量と二酸化炭素排出量

	投入資材量 kg/m ²	構成比率 (%)	二酸化炭素排出 量 kg-CO ₂ /m ²	構成比率 (%)
土工・地業*	554.6	21.4	50.8	12.6
躯体コンクリート	1,687.6	65.0	195.1	48.3
内(地下基礎)	354.2	13.6	38.1	9.4
鉄筋	103.5	4.0	26.3	6.5
鉄骨	58.9	2.3	57.4	14.2
その他	18.4	0.7	1.2	0.3
外装	95.3	3.7	18.9	4.7
内装	52.0	2.0	30.0	7.4
建築合計	2,015.8	77.6	328.9	81.5
電気設備	7.4	0.3	6.0	1.5
衛生設備	3.6	0.1	2.9	0.7
空調設備	7.4	0.3	6.4	1.6
昇降設備	8.8	0.3	8.6	2.1
設備合計	27.2	1.0	23.9	5.9
合計	2,597.6	100.0	403.6	100.0

*：場所打ちコンクリート杭を含む

表 3 主な資材の二酸化炭素排出量原単位

資材	二酸化炭素排出量原単位
砂利・石材	0.00112 (kg-CO ₂ /kg)
ポルトランドセメント	0.744 (kg-CO ₂ /kg)
高炉セメント	0.424 (kg-CO ₂ /kg)
鉄（高炉材）	0.979 (kg-CO ₂ /kg)
鉄（電炉材・鉄筋）	0.254 (kg-CO ₂ /kg)
繊維製品	0.636 (kg-CO ₂ /kg)
木材（製材）	0.074 (kg-CO ₂ /kg)
木材（合板）	0.878 (kg-CO ₂ /kg)
塗料	0.401 (kg-CO ₂ /kg)
合成樹脂製品	0.637 (kg-CO ₂ /kg)
ガラス	0.874 (kg-CO ₂ /kg)
銅	0.447 (kg-CO ₂ /kg)
亜鉛	1.248 (kg-CO ₂ /kg)
鉛	1.248 (kg-CO ₂ /kg)
アルミニウム	0.354 (kg-CO ₂ /kg)

鉄筋の発錆の要因は、かぶり厚さの位置までコンクリート躯体が中性化し、鉄筋に対する防錆能力が無くなることと考えられる。鉄筋コンクリート造躯体の耐用年数については、幾つかの推定式が提案⁷⁾されている。ここでは、中性化速度に及ぼす要因が多岐に渡り、コンクリート材料の中性化速度のポテンシャル、環境条件、建物の仕上げ、および施工条件など重要な要因を考慮した、日本建築学会編「建築物の耐久計画に関する考え方」⁸⁾に示されている推定式を採用することにする。RC造躯体の推定耐用年数(Y)は、鉄筋の防錆処理を行わない通常の建物の場合式(1)⁸⁾によって求まる。Y=Y_s×A×B×C×D×E×F×G×H ——— (1)

Y_s：RC造躯体の標準耐用年数(60年)とする

A～Hまでの係数を表 4 に示す。式(1)から、推定耐用年数は、セメントの種類、水セメント比、かぶり厚さなどの関数となっている。

表4 コンクリートの推定耐用年数の式(1)の係数

係数	係数の内容	具体的係数値
A	コンクリートの種類	普通コンクリート：1.0、軽量コンクリート1～2種：0.95
B	セメントの種類	普通ポルトランド：1.0、高炉・フライッシュA種：0.85、同B種：0.8
C	水セメント比	原文では、65%：1.0、60%：1.2、55%：1.5となっているが、ここでは $C = -0.05X + 4.233$ (Xは水セメント比(%))の回帰式にて推定した
D	鉄筋に対するコンクリートのかぶり厚さ	原文では30mm：0.56、40mm：1.0、50mm：1.56となっているが、ここでは $D = -0.000002X^3 + 0.0008X^2 - 0.0058X + 0.06$ (Xはかぶり厚さ(mm))の回帰式にて推定した
E	仕上げ材の種類	なし：0.5、被層仕上塗材：1.0、モルタル厚15mm：1.5、タイル・石：3.0
F	コンクリートの施工方法	通常施工：1.0、入念な施工：1.5
G	建物の維持保全の程度	打放コンの場合に劣化後補修しない：0.5、補修あり：1.0
H	地域による係数	一般地域：1.0、凍結融解作用地域：0.9、海岸地域：0.8

4.2 コンクリートの調合強度および水セメント比の算定

コンクリートの強度については、日本建築学会編：建築工事標準仕様書・同解説(JASS 5、鉄筋コンクリート工事)⁹⁾にそって試算した。まず式(2)で示されるコンクリートの品質基準強度が耐久設計基準強度で決定されるもとし、調合強度は式(3)、(4)によって算定される値の大きい方の値とした。

$$F_q = F_d + \Delta F \quad (2)$$

ここに、 F_q ：品質基準強度(N/mm²)

F_d ：耐久設計基準強度(N/mm²)

ΔF ：構造体コンクリート強度管理用供試体と構造体コンクリート強度との差を考慮した割り増し=3(N/mm²)とする。

$$F = F_q + {}_{28}T_n + 1.73\sigma \quad (3)$$

$$F = 0.85(F_q + {}_{28}T_n) + 3\sigma \quad (4)$$

ここに、 F ：調合強度(N/mm²)

${}_{28}T_n$ ：補正值(N/mm²)

σ ：標準偏差=2.5N/mm²または0.1 F_q の大きい方の値

求められた調合強度に対する水セメント比の算定は普通ポルトランドセメントは式(5)に、高炉セメントB種は式(6)によった。

$$X = 51 / [(F/K_p) + 0.31] \quad (5)$$

$$X = 51 / [(F/K_b) + 0.29] \quad (6)$$

ここに、 X ：水セメント比(%)、

F ：調合強度(N/mm²)、

K_p ：普通ポルトランドセメント強さ(60.8 N/mm²)

K_b ：高炉セメント強さ(57.1 N/mm²)

水セメント比の算出結果から、参考調合表¹⁰⁾を用い、コンクリートm³あたりの構成材料の単位重量を算出した。図1に普通ポルトランドセメントコンクリートと高炉セメントコンクリートの単位重量当の構成材料量を示す。コンクリートm³あたりの単位重量はおおよそ2,250kg/m³程度となっている。同じ耐久設計基準強度にすると、水セメント比は小さくなり、セメント量は増加する。また、セメントの種類に関しては、同じ耐久設計基準強度を確保するためにポルトランドセメントより高炉セメントの水セメント比を小さくする必要があることから、高炉セメント量はポルトランドセメント量よりも増加する。

4.3 コンクリートの二酸化炭素排出量の算定

ここでは、コンクリートの製造における環境負荷の指標として、

二酸化炭素排出量を選定し、対象としたコンクリート毎の耐久設計基準強度別の二酸化炭素排出量を算出する。

対象の範囲は、資材の生産工程(国内のみ、資本形成分は除く)と生コンクリートの製造工程とし、資材の輸送に関する二酸化炭素の排出は考慮していない。二酸化炭素排出量原単位算出のためのエネルギー源からの二酸化炭素排出量原単位を表5¹¹⁾に示す。プロセスから発生する二酸化炭素に関しては、セメントの製造においては、高炉・フライアッシュセメント製造時の混合工程、高炉スラグ・の粉砕工程、生コンクリートの調合工程¹²⁾を考慮した。その結果、高炉セメントの製造時における二酸化炭素排出量は表3に示すように0.424kg-CO₂/kgとなった。図2にこれらの結果と図1の結果を基に計算したコンクリートの構成資材の二酸化炭素排出量原単位を示す。コンクリート製造時の二酸化炭素の排出割合は、セメントからの排出が90%以上を占めている。コンクリートの設計強度が高くなる

図1 コンクリートの単位重量当の構成資材量

表5 エネルギー源の二酸化炭素排出量原単位

エネルギー源	二酸化炭素排出量原単位
電力	0.357 kg-CO ₂ /kwh
軽油	2.64 kg-CO ₂ /l
灯油	2.51 kg-CO ₂ /l
C重油	2.96 kg-CO ₂ /l
石油コークス	3.3 kg-CO ₂ /kg

図2 コンクリートの単位重量当の二酸化炭素排出量

とセメントの構成比率が増すため、二酸化炭素排出量も増加する。

5. 建物の建設段階の資材投入量と二酸化炭素排出量

ここでは、建築物の長寿命対策としての以下の条件で試算し、建設段階の資材使用量とその二酸化炭素排出量との関連について検討を行った。

① かぶり厚の増加

・40mm、50mm、60mm、70mmの5条件

② コンクリートの高強度化

・24N/mm²、27N/mm²、30N/mm²、33N/mm²、36N/mm²、の5条件

③ 階高の変更

・3,300mm、3,800mm、4,200mmの3条件

さらに、セメント材として、普通ポルトランドセメントとリサイクル材の高炉セメントの2種類について検討した。

5. 1 推定耐用年数とかぶり厚さ、設計強度の関係

表6に式(1)により求めた推定耐用年数を示す。耐久設計基準強度とかぶり厚さを増加すると推定耐用年数は延びる。高炉セメントコンクリートは普通セメントコンクリートに比べ推定耐用年数は短くなる。

5. 2 階高を変更した場合の資材量の影響

階高の変更を行なった場合の資材量の算定に当たっては、以下の項目を考慮した。

- ① 躯体のコンクリートは、階高 4,200mm の場合は、荷重増加分を見越して柱の太さを階高 3,800mm の柱に比べて 50mm 増加
- ② 鉄筋量は、階高の増減に伴う加重の増減率分を増減
- ③ その他、外装、内装、設備の配管、ラックなど高さ方向の資材量の増減を積算

表7にその結果を示す。資材の増減は主に躯体が全体の90%を占めている。また二酸化炭素の排出量も躯体が全体の90%を占めてい

る。階高の変更に影響がない土工、基礎を除いた階高 3,800mm の資材量に対する増減率は階高 4,200mm で4.3%増、階高 3,300mm で5.1%減となった。二酸化炭素排出量では、3.1%増、3.7%減であった。さらに、階高の増減率1%に対する資材量の増減率は0.4%、二酸化炭素排出量でおよそ0.3%である。このことから、階高を変更しても資材使用量、二酸化炭素排出量への影響は少ないと考えられる。

5. 3 耐久設計基準強度の増加による資材使用量の削減効果

コンクリートが高強度化されると、柱部材では軸力比一定とすれば断面積を減らすことが可能となる。すなわち、耐久設計基準強度を上げることにより資材量は減少させることができる。しかし、耐久設計基準強度を上げると図2で示したようにコンクリート製造時の二酸化炭素排出量が増加する。ここでは、普通ポルトランドセメントコンクリートと高炉セメントコンクリートの耐久設計基準強度の増加によるコンクリート削減量とその二酸化炭素排出量の関係を検討した。

図3に設計強度 24N/mm²、階高 3,800mm を基準として、軸力比一定の基で耐久設計基準強度および階高を変化させた場合の躯体コンクリートの増減量を示す。また、図4にコンクリートの増減量に伴う二酸化炭素排出量の変化を示す。

普通ポルトランドセメントコンクリートの場合、階高 3,800mm で、耐久設計基準強度を 27N/mm²から 36N/mm²に増加させるとコ

表6 かぶり厚と設計強度と耐用年数の関係

普通セメント						
かぶり厚	設計強度 (N/mm ²)					備考
	24	27	30	33	36	
40mm	70	82	92	102	110	標準厚
50mm	109	128	144	159	172	
60mm	151	177	200	220	238	
70mm	202	237	267	294	318	

高炉セメント (B種)

かぶり厚	設計強度 (N/mm ²)					備考
	24N	27N	30N	33N	36N	
40mm	58	68	77	84	91	標準厚
50mm	91	106	120	132	142	
60mm	126	147	166	182	197	
70mm	168	197	222	244	263	

表7 対象とした建物の資材投入量と二酸化炭素排出量

階高	3,300mm		3,800mm		4,200mm	
	投入 資材量 kg/m ²	二酸化炭素 排出量 kg-CO ₂ /m ²	投入 資材量 kg/m ²	二酸化炭素 排出量 kg-CO ₂ /m ²	投入 資材量 kg/m ²	二酸化炭素 排出量 kg-CO ₂ /m ²
土工・地業*	554.6	50.8	554.6	50.8	554.6	50.8
躯体 コンクリート	1,617.0	187.5	1,687.6	195.1	1,746.8	201.5
内(地下基礎)	354.2	38.1	354.2	38.1	354.2	38.1
鉄筋	96.4	24.5	103.5	26.3	109.2	27.7
鉄骨	57.9	56.4	58.9	57.4	59.8	58.3
その他	18.4	1.2	18.4	1.2	18.4	1.2
外装	88.1	18.3	94.2	18.8	99.1	19.2
内装	50.6	29.8	52.0	30.0	53.2	30.1
建築合計	1,928.4	317.7	2,014.6	328.8	2,086.5	338.0
電気設備	7.0	5.8	7.3	6.0	7.6	6.2
衛生設備	3.5	2.9	3.6	2.9	3.7	3.0
空調設備	7.2	6.2	7.4	6.3	7.5	6.5
昇降設備	8.7	8.4	8.8	8.6	8.9	8.7
設備合計	26.4	23.3	27.1	23.8	27.7	24.4
合計	2,509.4	391.8	2,596.3	403.4	2,668.8	413.2
合計 (土工・基礎を除く)	1,600.6	302.9	1,687.5	314.5	1,760.0	324.3
	-5.1%	-3.7%	-	-	4.3%	3.1%

*: 現場打ちコンクリート杭を含む

ンクリート量は、 $66.7\text{kg}/\text{m}^2$ の削減（基礎を除くコンクリート躯体の5.0%）になるが、二酸化炭素排出量は、 $55.3\text{kg-CO}_2/\text{m}^2$ の増加（基礎を除くコンクリート躯体の35.2%増）になる。このことから耐久設計基準強度を増加させることは二酸化炭素排出量を増加させることになる。しかし、高炉セメントコンクリートの場合、耐久設計基準強度の増加によるコンクリート削減量は普通セメントコンクリートと同程度で、それに伴う二酸化炭素排出量は普通ポルトランドセメントに比べ大幅に減少している。これは、高炉セメント製造時の二酸化炭素排出量原単位が小さいことによるものである。

6. ライフサイクル評価

6. 1 ライフサイクルの範囲と使用原単位

コンクリート部材の耐用年数を建物の寿命と仮定して、かぶり厚さ、コンクリートの設計強度、建物の階高をパラメータとして、建物のライフサイクル資材使用量と二酸化炭素排出量を推定した。

$$\text{LCM} = \Sigma M(i) / Y \quad (7)$$

$$\text{LCCO}_2 = \Sigma \text{CO}_2(i) / Y \quad (8)$$

ここで

LCM：ライフサイクル資材使用量 ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{年}$)

LCCO₂：ライフサイクル二酸化炭素排出量 ($\text{kg-CO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{年}$)

M(i)：ライフサイクル各段階の資材使用量 (kg/m^2)

CO₂(i)：ライフサイクル各段階の二酸化炭素排出量 ($\text{kg-CO}_2/\text{m}^2$)

Y：推定耐用年数 (年)

i=1：投入資材製造段階

2：施工段階

3：運用段階

4：修繕段階

5：改修段階

6：解体段階

7：資材輸送段階

図3 耐久設計基準強度と階高の変更によるコンクリート量削減効果

図4 耐久設計基準強度と階高の変更によるコンクリート量削減に伴う二酸化炭素排出量

(1) ライフサイクル資材使用量 (LCM)

投入資材製造段階 M(1)は、竣工図面、見積書、機器カタログなどにより投入された資材量を算定した。建物の日常の維持管理、修繕の比率、改修の期間等は、既存の資料¹³⁾をもとに工事項目毎に設定し、修繕 M(4)・改修段階 M(5)の投入資材を算定した。M(2)、M(3)、M(6)、M(7)は0とした。

(2) ライフサイクル二酸化炭素排出量 (LCCO₂)

投入資材製造段階の CO₂ 排出量 CO₂ (1)は、表3の原単位に投入資材製造段階 (M₁) の資材使用量を乗じて求めた。

施工段階での二酸化炭素排出量 CO₂ (2)については、筆者らの実測データ¹⁴⁾があるが、ここでは、表8に示す建築業協会の調査結果^{15)、16)}を基に、表5に示すエネルギー源の二酸化炭素排出原単位を乗じて求めた。その結果施工段階の二酸化炭素排出量は $13.0\text{kg-CO}_2/\text{m}^2$ となった。

運用段階の二酸化炭素排出量 CO₂ (3)は、動的熱負荷計算とシステムシミュレーション^{1)、17)}を実施した。表9に対象とした建物の空気調和換気設備概要を示す。シミュレーション結果の一例を図5に示す。図5には、階高を3,300mm、3,800mm、4,200mmに変化させた場合の結果を示す。基準となる3,800mmとの差は、1%程度であることから、階高の運用段階の二酸化炭素排出量に与える影響は小さいと考えられる。

修繕段階、改修段階の二酸化炭素排出量 CO₂ (4)、CO₂ (5)は修繕段階、改修段階で使用する資材の製造時の二酸化炭素排出量とし、工事段階で使用するエネルギーから発生する二酸化炭素は少ないので無視した。

解体段階の二酸化炭素排出量 CO₂ (6)は RC 造 9 階 (解体延べ床面積 $17,529\text{m}^2$) の解体工事における燃料消費量の実測値 $1.94\text{l-軽油}/\text{m}^2$ から $5.1\text{kg-CO}_2/\text{m}^2$ とした。輸送段階の二酸化炭素排出量 CO₂ (7)は、平成7年度の運輸関係エネルギー消費量と輸送量¹⁸⁾から推定したトラック輸送の原単位 $0.200\text{kg-CO}_2/\text{t} \cdot \text{km}$ 、貨物船舶

(内航海運) 輸送の原単位 $0.038\text{kg-CO}_2/\text{t} \cdot \text{km}$ に輸送量を乗じて推定した。資材・廃棄物の輸送距離は、建築業協会の調査結果¹⁵⁾、¹⁶⁾等を参考に表8のように設定した。

6. 2 ライフサイクル評価

長寿命対策としてのかぶり厚さの増加、コンクリートの耐久設計

表8 施工段階のエネルギー使用量
および資材・廃棄物の輸送距離

施工段階	エネルギー源	消費量	
電力	電力	1.76	kWh/m ²
	灯油	2.6	l/m ²
	軽油	2.2	l/m ²
輸送距離	主要資材	輸送距離	
	生コンクリート	10 km	(トラック)
	粗骨材	35 km	(トラック)
	細骨材	150 km	(船舶) +
		10 km	(トラック)
	セメント	460 km	(船舶) +
		15 km	(トラック)
	鉄筋	35 km	(トラック)
	鉄骨	115 km	(トラック)
離	その他の資材	137 km	(トラック)
	廃棄物	48 km	(トラック)

表9 対象とした建物の給気調和換気設備概要

項目	空調域	非空調域
人員	人/m ²	0.2
照明	W/m ²	15
コンセント	W/m ²	40 (20)
換気	W/m ²	-
窓面積率	%	22
稼動日数	d/年	250
稼動時間	h/d	10
熱源設備	空冷ヒートポンプビル用マルチ 空冷ヒートポンプパッケージエアコン	
空調機設備	個別方式ビル用マルチ、全熱交換機

図6 ライフサイクルの資材使用量

基準強度の増加、階高の増加などがライフサイクル資材使用量 (以降 LCM と呼ぶ) および、ライフサイクル二酸化炭素排出量 (以降 LCCO₂ と呼ぶ) に与える影響を検討する。ここでは、上記の長寿命対策のうち運用段階エネルギー消費に直接影響するのは、階高変更による空気調和空間の変化による消費エネルギーの変化であるが、図5に示したようにその変化量は極めて小さいので、運用段階はライフサイクルの対象から除外した。

(1) 長寿命の効果

高度成長時代に建設された RC 造建物は、概ね階高 3,300mm 程度であり、またその寿命は 35 年と言われている。そこで、耐用年数 35 年、階高 3,300mm と 3,800mm、かぶり厚さ 40mm で一定とし、耐久設計基準強度を 24N/mm^2 から 36N/mm^2 に対応する推定耐用年数とした場合の LCM、LCCO₂ を求めて図6、7に示す。耐用年数が長くなると、1年当たり床面積当たりの LCM、LCCO₂ は減少していく。

LCM では、推定耐用年数が 35 年の場合、建設段階と修繕・改修の比率はおおよそ 95 : 5、推定耐用年数が 70 年の場合 85 : 15、推定耐用年数が 110 年になると 78 : 22 となり、耐用年数が長くなると修繕・改修の比率が大きくなる。

LCCO₂ では、輸送段階での二酸化炭素排出量が全体の約 10% を

図5 階高変更による運用時の二酸化炭素排出量の比較

図7 ライフサイクル二酸化炭素排出量

占めている。ライフサイクル資材使用量に比べ、修繕・改修段階の二酸化炭素排出量の割合は、耐用年数 35 年では 10%、70 年で 23%、110 年で 30%と推定耐用年数が長くなるほど大きくなる。これは、修繕・改修段階で使用される資材が鋼材など製造時に多くの二酸化炭素を排出する資材が多いことと、推定耐用年数が長くなると改修の回数が増えるためである。

図 8 に LCM の資材別比率を示す。推定耐用年数が長くなるとコンクリートの割合が減少し、鉄やその他の資材の割合が増加する。これらは最終的に廃棄物となる。鉄はほぼ 100%再資源化がされている。平成 12 年度の実態調査¹⁹⁾からは、コンクリート塊の再資源化率は 96%、混合廃棄物は 7%である。耐用年数が長くなるとコンクリートの割合が減少し、混合廃棄物の割合が増加することからライフサイクルの廃棄物再資源化率は減少することになる。平成 12 年度の建設廃棄物の再資源化率を適応すると、推定耐用年数を 30 年から 110 年に伸ばすとライフサイクルの再資源化率は 90%から 86%に減少する。

(2) 資材使用量と二酸化炭素排出量との関連

図 9 に、かぶり厚さ、設計強度を変化させた場合の LCM と $LCCO_2$ の関係をセメントの種類と、階高毎に整理した。図 9 では、資源消費量、二酸化炭素排出量が小さい方が省資源、温暖化抑制効果が高いと考えられる。

耐久設計基準強度を増加させると LCM、 $LCCO_2$ とも減少する。また、かぶり厚さを増加させても同様の傾向が見られるが、その効果は、かぶり厚さの方が大きい。階高の影響は、階高を高くするとコンクリート量が増加するため図中では若干右上に移行するが $LCCO_2$ と LCM の比率はほぼ等しい。

表 6 に示すように高炉セメントは、普通ポルトランドセメントに比べ推定耐用年数が短くなるが、 $LCCO_2$ と LCM の比率が普通ポルトランドセメントに比べ小さいことから、資源削減効果より二酸化炭素削減効果の大きい資材となっている。

図 8 ライフサイクルの資材使用量 (資材別)

図 9 に示すように高炉セメントは、普通ポルトランドセメントに比べ推定耐用年数が短くなるが、 $LCCO_2$ と LCM の比率が普通ポルトランドセメントに比べ小さいことから、資源削減効果より二酸化炭素削減効果の大きい資材となっている。

(3) 耐用年数 100 年の建物

コンクリートのかぶり厚さや耐久設計基準強度を上げると計算上は表 6 に示すように推定耐用年数は 300 年まで向上する。推定耐用年数が長くなればなるほど LCM、 $LCCO_2$ は小さくなり現実的でなくなる。そこで、耐用年数を 100 年で固定し、式 (1) を満足するかぶり厚さと耐久設計基準強度の組合わせて求めた。図 10,11 にその結果を示した。耐久設計基準強度を上げると LCM は減少するが、図 2 に示すようにコンクリートの二酸化炭素排出量原単位が上昇する。図 11 に示すように耐久設計基準強度の増加による資材使用量の削減効果を考慮しても $LCCO_2$ は上昇する。高炉セメントへの変更は、資

図 9 ライフサイクル資材使用量と二酸化炭素排出量の関係

図 10 耐用年数を 100 年に固定した場合のライフサイクルの資材消費量と二酸化炭素排出量

材量は若干増加するが、二酸化炭素削減効果は大きいことから、温暖化抑制対策としては、高炉セメントへの採用は有効である。

7. おわりに

長寿命化の対策として、かぶり厚さの増加、耐久設計基準強度の向上、階高を変更した場合の資材使用量、二酸化炭素排出量に与える影響を検討した。さらに、二酸化炭素排出量の少ない資材として、高炉セメントについて同様な検討をした。その結果、以下のことが分かった。

- 1) 階高の変更を行なった場合、階高の増減率 1% に対する資材量の増減率は 0.4%、二酸化炭素排出量でおよそ 0.3% であることから、資材使用量、二酸化炭素排出量への影響は少ないと考えられる。また、運用段階の二酸化炭素排出量への影響は、1% 程度であることから、階高の運用段階の二酸化炭素排出量に与える影響は小さいと考えられる。
- 2) $LCCO_2$ は LCM に比べ、修繕・改修段階の二酸化炭素排出量の割合が大きくなり、推定耐用年数が長くなるほどその傾向も大きくなる。
- 3) 耐久設計基準強度を増加させると LCM、 $LCCO_2$ とも減少する。また、かぶり厚さを増加させても同様の傾向が見られるが、その効果は、かぶり厚さの方が大きい。
- 4) 高炉セメントは、普通ポルトランドセメントに比べ推定耐用年数が短くなるが、 $LCCO_2$ と LCM の比率普通ポルトランドセメントに比べ小さいことから、資源削減効果より二酸化炭素削減効果の大きい資材と考えられる。
- 5) 耐用年数を 100 年に固定すると、耐久設計基準強度を上げることにより LCM は減少するが $LCCO_2$ は上昇する。しかし、高炉セメントへの変更は、資材量は若干増加するが、二酸化炭素削減効果は大きいことから、温暖化抑制対策としては、高炉セメントへの採用は有効である。

図 11 耐用年数を 100 年に固定した場合のライフサイクルの資材消費量と二酸化炭素排出量（耐久設計基準強度を向上による資材量削減効果を考慮した）

参考文献

- 1) 酒井寛二、漆崎 昇、相賀洋、下山真人：建築物のライフサイクル二酸化炭素排出量とその抑制方策に関する研究、日本建築学会計画系論文集、第 484 号、pp.105-112、1996.6
- 2) 漆崎 昇、酒井寛二、下川泰三：長寿命化対策における建築資材使用量、廃棄物排出量への影響、日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）、pp.1017-1018、2001.9
- 3) 岩田衛、堂野前等、久松雄治：建築鉄骨構造のライフサイクルにおける環境負荷削減のシナリオとその評価、日本建築学会構造系論文集、第 533 号、pp.167-173、2000.7
- 4) 山田哲、黒川礼子、曾澤貴浩、岩田衛：廃棄物重量と $LCCO_2$ 量に着目した鉄骨造建物における環境負荷の評価、日本建築学会構造系論文集、第 554 号、pp.131-137、2002.4
- 5) 建築学会地球環境委員会サステナブル・ビルディング小委員会：サステナブル・ビルディング普及のための提言、1999 年 3 月
- 6) 漆崎 昇、水野 稔、下田吉之、酒井寛二：産業連関表を利用した建築業の環境負荷推定、日本建築学会計画系論文集、第 549 号、PP.75-82、2001.11 など
- 7) たとえば、岸谷孝一：鉄筋コンクリートの耐久性、鹿島建設技術研究所出版部、1962 年、森永繁：鉄筋の腐食速度に基づいた鉄筋コンクリート建築物の寿命予測に関する研究、東京大学学位論文、1986 年など
- 8) 日本建築学会編：日本建築学会編：建築工事標準仕様書・同解説、JASS 5 鉄筋コンクリート工事、pp.147-149、1997.1 など
- 9) 日本建築学会編：建築物の耐久計画に関する考え方、1988.10
- 10) 日本建築学会編：日本建築学会編：建築工事標準仕様書・同解説、JASS 5 鉄筋コンクリート工事、1997.1
- 11) 佐野奨：セメントおよびコンクリートのエコバランス、Cement Science and Concrete Technology、No.53、1999
- 12) 改訂 建築物のライフサイクルコスト（建設大臣官房官庁営繕部 監修）2000 年 5 月など
- 13) 下川泰三、漆崎 昇、吉田直裕、川瀬清晴、伊香賀俊治、遠藤純子：N ビルにおけるライフサイクルアセスメント実施例（第二報）施工に起因する二酸化炭素排出量と削減効果の把握、日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）、pp.1011-1012、2001.9
- 14) 栗袋寿昭、漆崎 昇：建設工事における二酸化炭素排出量調査、日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）、pp.1015-1016、2001.9
- 15) 建築業協会：建築物の地球環境負荷の把握について—平成 12 年度調査結果—、平成 13 年 7 月
- 16) 相賀洋、酒井寛二、武井克丞、武元和治、金田久隆：省エネルギー建築計画における総合評価の一手法に関する研究、日本建築学会計画系論文集、第 540 号、PP.37-44、2000.2
- 17) 運輸省運輸政策局情報管理部 編：平成 9 年版運輸関連エネルギー要覧
- 18) 国土交通省：平成 12 年度建設副産物実態調査結果、平成 13 年 12 月

（2002 年 4 月 10 日原稿受理、2002 年 9 月 2 日採用決定）