

PC建築のライフサイクルコスト

竹田 清二*1・木村 義男*2

1. はじめに

ライフサイクルコスト (life cycle cost: LCC) の考え方は、1930年代の費用便益分析 (cost benefit analysis) に始まると言われる。わが国には1970年、京都大学異研究室によって紹介されている。その後1970年代の後半に建設省に営繕部企画保全室が設置され、良質な社会資本を残そうという機運から本格的な研究が始まったとされる。

しかし、当時は欧州のように何百年も建築物を保たせようという発想が歴史的に定着していなかったこと、また耐久性が短期的に結果の出にくいこともあり、建設コストが優先され、取組みは先送りされてきたようだ。ようやく、ライフサイクルコストが一般の関心を集めるようになったのは、昭和30年代後半から昭和50年代初期の高度成長期に建設されたRC構造物に、近年トラブルが急増し、品質の不十分な鉄筋コンクリート造 (以下、RC建築という) は信じられないくらい耐久性が乏しいという反省と、地球環境問題が国際的な重要課題になったからと思われる。

しかし、ライフサイクルコストを導入しようとしても、歴史の浅いこともあり、拠所とする蓄積データが極めて乏しい困難さに直面する。

なお最近では、ライフサイクルコストとは別に、世界標準ISOに基づき、建築物が生涯にわたって消費するエネルギー (MJ, Kcal) や排出炭酸ガス量 (CO₂) を用いるライフサイクルアセスメント (LCA) が脚光を浴びているが、本論では取り扱わない。

2. ライフサイクルコストの算出にあたって

ライフサイクルコストを一口で言えば、一定期間内の初期投資額 (企画・設計費、初期建設費)、運用管理費 (保全費、修繕費、改修費) および解体処分費の合計額を、現在価値あるいは年間価値による経済上の観点から評価する手法

であると言える。

式に示せば、以下のとおりである。

$$LCC = D + I + M + R$$

ただし、 D : 企画・設計費

I : 初期建設費

M : 運用管理費 (保全費、修繕費等)

R : 解体処分費

ライフサイクルコストのうち、運用管理費 (M) には建物を維持するための費用 (電気ガス・上下水道等のエネルギー費、清掃・保安費等の維持費、内外装・設備の修繕費等) すべてが含まれるが、ここではエネルギー費、維持費は省略し、修繕費等のみを取り上げる。修繕費等には建物の機能回復の程度に応じて点検、保守、修繕、補修、改修、更新と使い分けされたりするが、相互の区別が困難なため一括りに「修繕費」として扱う。

プレストレストコンクリート建築 (以下、PC建築という) のライフサイクルコスト算出にあたっては、比較対照の建物として、一般的なRC建築 (コンクリート圧縮強度は20 N/mm²前後程度) を取り上げる。

3. PC建築の寿命

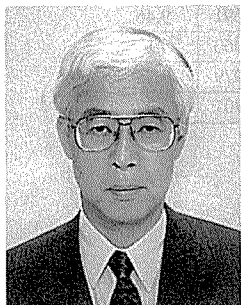
3.1 寿命について

構造物の供用年数または寿命 (service life) とは、構造物の構成要素・材料が物理的、機能的または経済的な劣化・陳腐化によって施設の有効性が失われたと認定されたとき、と言える。物理的寿命は、内的要因の中性化・アルカリ骨材反応等、外的要因の塩害・凍害等により物理・物質的な劣化損耗が進行し、また突発的な地震・火災・爆発等で当初の性能が低下し使用上の限界に達したときをいう。機能的寿命は、社会や時代の変化に伴って求められる一段高い性能・機能に対し陳腐化や不足の状態となり (法令改正・積載荷重不足・設備容量不足・天井高さ不足・外観の陳腐化等)、補強・リニューアルを加えても機能の回復見込みが限界に達したときをいう。経済的寿命は、維持管理費負担が収益性を超え建物の利用効率や採算性が悪化したときをいう。

建物の寿命は、過去の解体例によっても老朽化 (物理的寿命) を理由とするケースは少ない¹⁾。寿命を延ばすには、物理的寿命だけでなく供用期間中に訪れる用途・性能の変更に対応できるフレキシブルなプラン・構造にすることが必要条件と言える。フリープランが可能なPC建築はこの点において優位性があると言えよう。

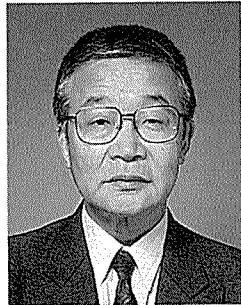
3.2 PC建築の寿命に関係する要素

PC建築の耐久性を左右する要素は、① PC鋼材、② 定着具、③ 定着具の保護材、④ コンクリート、⑤ 目地モルタ



*1 Kiyoji TAKEDA

フドウ建研(株) 技術本部



*2 Yoshio KIMURA

オリエンタル建設(株)
営業本部 建築部

ル、⑥グラウト、⑦シースであろう(図-1)。一方、高強度コンクリートとひび割れない構造は耐久性には有利に働きそうだ。それならば、PC建築はどのくらいの寿命がとれるのだろうか。わが国のPC建築の歴史は50年に満たないが、供用期間が16年から36年のPC建築の解体事例(4件)が報告されている^{2), 3)}。報告書によると、シース内のグラウトの充填性に関しては全物件とも若干の空隙が見られたが、PC鋼材には新しい錆はなかった(施工前の錆は部分的に観察された)。定着部に関しては、露出型は定期的な塗装の更新を行っていたため、埋込み型は保護モルタルが一部剥落していたが発錆はなかった。コンクリートに関しては30 N/mm²、40 N/mm²の部材には僅かな中性化が見られたもののほとんど問題はないと述べられている。

数例の解体事例が健全であったからといってPC建築の耐久性が優れていると断定するのは早計とも言える。しかし、定着部は定期的な点検更新は可能である。さらにノンブリーディングタイプグラウト、防錆ストランドの使用により耐久性は大幅に改善されている。このように各構成要素の改善により寿命はいくらでも延ばせるので数値的な寿命予測は不可能に近い。したがって、ここでは数式化されている中性化式を参考に寿命の予測を行うものとする。

3.3 中性化式による寿命の推定

PC建築のコンクリート圧縮強度の範囲は30 N/mm²~63 N/mm²である。表-1に標準的な調合例を、表-2に岸谷式による中性化深さに達するまでの年数の関係を示す。表-1から明らかなように、多使用帯の圧縮強度50 N/mm²の水セメ

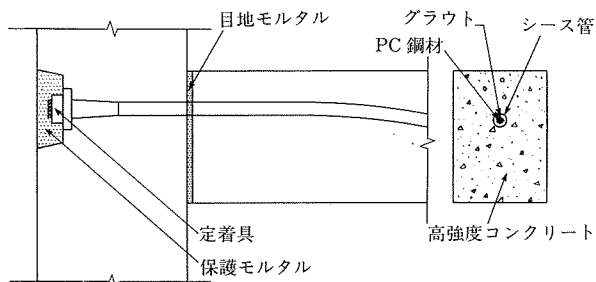


図-1 PC建築の耐久性に関する要素

ント比は37%程度であり、中性化が進行しないとされる40%を軽く下回っている。PC建築の場合数字から見れば優に1000年を超えている。しかし、より条件の厳しい塩害・凍害など寿命を縮める他の要因や、前項の構成要素の不確実性を考慮して、ライフサイクルコストの計算では供用期間を下記の年数とする。なお、修繕等により機能が改善されても供用期間は変わらないものとする(図-2)。

供用期間：PC建築 $T=200$ 年

RC建築 $T=30$ 年(ケース1)

$T=60$ 年(ケース2)

4. 初期建設費

図-3は参考文献^{12), 13)}に掲載されているプレキャストPC工事の事務所A(9階建て事務所、延床面積6912m²)の基準階を示す。図-4は図-3と同じ規模のRC建築の基準階を示す。表-3は図-3、4のRC建築、PC建築の上部躯体工事費の割合を示したものである。表-3のPC建築は参考文献¹³⁾の積算資料を転載している。RC建築は図-4に基づき部材断面を仮定し、RC建築の数量を算出している。コンクリートのm³あたりの工事単価を、RC建築では6.0万円/m³、PC建築では15万円/m³と仮定したとき、RC建築工事費100%に対し、RC・PC建築の上部躯体工事費の割合は、それぞれ20%、29%であることを示したものである。

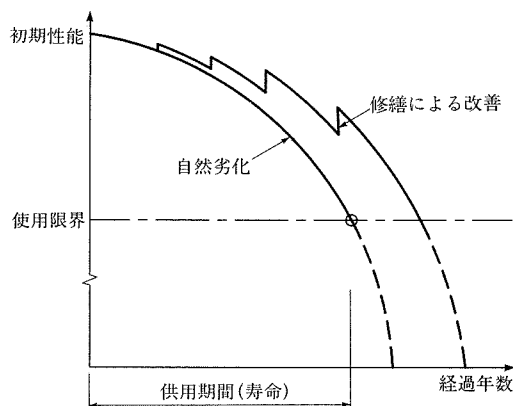


図-2 建物の性能劣化

表-1 コンクリートの調合例

設計強度 (N/mm ²)	粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 S/a (%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤 (kg/m ³)
						水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	
50	20	6	2	36.7	41	158	430	730	1091	9.46
40	20	8	4	40	45	168	420	749	1060	5.1
30	20	18	4	47	44	167	356	759	979	3.56
18	25	15	4.5	65	46.1	163	251	832	701	2.67

表-2 岸谷式によるコンクリートの中性化期間

設計強度 (N/mm ²)	水セメント比 W/C (%)	かぶり厚さ (cm)		
		2	3	4
50	37	1000年以上	1000年以上	1000年以上
40	40	1000年以上	1000年以上	1000年以上
30	45	300年	674年	1000年以上
24	58	35年	79年	140年
18	65	23年	52年	93年

岸谷式

$$t = \frac{7.2C^2}{R^2(4.6x - 1.76)^2} \quad (x \leq 0.6)$$

$$t = \frac{0.3(1.15 + 3x)C^2}{R^2(x - 0.25)^2} \quad (x \geq 0.6)$$

ここに、 t : C まで中性化する期間(年)

x : 強度上の水セメント比

C : 中性化深さ (cm)

R : 中性化比率 (=1.0)

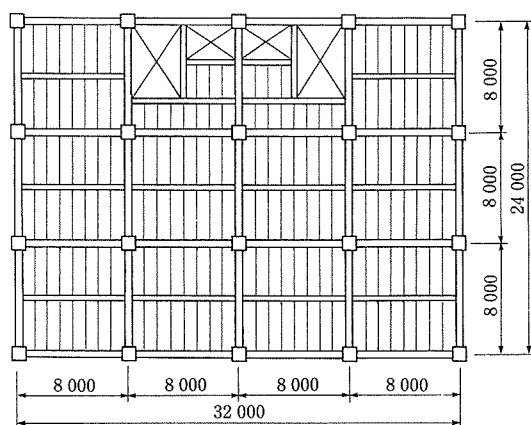


図-3 PC建築9階建て事務所基準階の梁状図

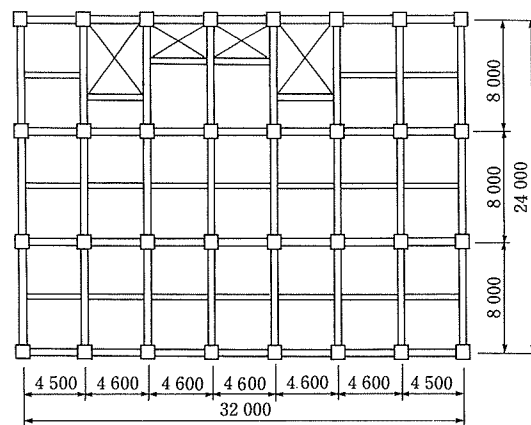


図-4 RC建築9階建て事務所基準階の梁状図

表-3 上部躯体工事費

種 別	仮定断面 (基準階)	上部躯体の コンクリート数量 (m^3)	延床面積あたり のコンクリート 数量 ($m^3/延m^2$)	コンクリートの m^3 あたりの 施工単価 (円/ m^3)	延床面積あたり の施工単価 (円/ $延m^2$)	PC合理化要素 (仮 設・施工管理費・現 場経費・工期短縮等) (円/ $延m^2$)	建築工事費 (RC) に対する上部躯体 工事費の割合 (%)
RC建築	柱: 950×950 梁: 600×1000	3 564	0.516	5.5~7.5 (6.0)	3.096	(変わらず) 3.096	20%
PC建築	柱: 850×850 梁: 400×800	PC: 1 868 RC: 691	PC: 0.271 RC: 0.10	12~20 (15)	PC: 4.065 RC: 0.65 計 4.715	5%コストダウン $4.715 \times 0.95 = 4.479$	29%

- 注1) 下段のPC建築は「建築コスト情報、2000冬」のプレキャストPC工事の事務所A(延床面積6912 m^2)を参考にした。
 2) RC建築はPC建築の事務所Aの柱割を修正し断面を仮定して算出した(規模、階高同じ)。
 3) PC建築のRCは床のトッピングコンクリート示す。
 4) RC建築もPC建築も基礎および壁は含まない。
 5) PC建築の上部躯体工事費の割合29%は、RC建築の20%(表-4の設定値)に延床面積あたりの単価比(4.479/3.096)を乗じて算出した。

表-4 工事費内訳

		A		B	
建築工事費：160 000～300 000円/延m ² (205 000円/延m ²)					
RC建築 (100%)	基礎工事費	上部躯体工事費	建築内外装工事費	電気機械設備工事費	その他工事費 (仮設・外構)
	6%～10% (8%)	18%～25% (20%)	25%～40% (35%)	20%～40% (30%)	6%～10% (7%)
PC建築 (109%)	基礎工事費	上部躯体工事費	建築内外装工事費	電気機械設備工事費	その他工事費 (仮設・外構)
	(8%)	(29%)	(35%)	(30%)	(7%)

- 注1) RC建築は「建築コスト情報、2000冬」のコスト資料を参考に分析。
 対象建築物は、5階~9階建て事務所(地下室なし)。
 2) PC建築は、上部躯体工事費について表-3の値を用い、その他はRC建築と同じとした。
 3) 工事費内訳の割合は、平均値の()の値を用いた。

表-4の上段は、参考文献¹²⁾を参考に、RC建築の5階~9階建て事務所(地下室なし)の工事費内訳を分析したものである。建築工事費は延床面積 m^2 あたり2万5000円と設定している。表-4の下段は、表-3のRC建築上部躯体をPC建築に置き換えたもので、その結果PC建築の建築工事費はRC建築に比べ9%高いことを示している。

なお、企画・設計費(D)はRC建築100%に対し、RC・PC建築ともに5%とする。

5. 修繕費、修繕周期

修繕費、修繕周期の設定は極めて困難である。建物を構成する各部位の耐用年数がことごとく異なるからである。

塗装、シーリングの5年から7年、屋根防水の8年から12年、タイルの30年から60年、衛生・給水・排水・ガス設備の5年から26年など。骨組みがいかにしっかりしていてもこれらの一部に不具合が生じたら建物としての機能は失格である。

表-5は、修繕率、修繕周期をおおまかに仮定したものである。基本的には、RC建築もPC建築も仕上げ材・設備材の寿命は変わらないので修繕周期は同じとしている。違いは、構造躯体の修繕費の有無である(PC建築は定着部等一部の修繕を見込む)。10年ごとに小修繕を行い、30年ごとに大改修を行う。過去の事例を調べると30年前後に建物の解体が最も集中している。建物が陳腐化する周期と判断される。

表-5 修繕率と修繕周期

種 別	修繕周期 (年)	上部躯体費 A		内外装費・設備費 B		解体処分費	建築工事費に 対する割合 (a+b+c) (%)
		修繕率 (%)	建築工事費に 対する割合 a (%)	修繕率 (%)	建築工事費に 対する割合 b (%)	建築工事費に 対する割合 c (%)	
RC建築	10	10	2	10	6.5	0.5	9.0
	20	20	4	25	16.3	1.2	21.5
	30	30	6	80	52.0	3.5	61.5
PC建築	10	0	0	10	6.5	0.4	6.9
	20	5	1	25	16.3	1.0	18.3
	30	5	1	80	52.0	3.2	56.2

注 1) 修繕率は上部躯体費、内外装費・設備費をそれぞれ100%としたときの比率を示す。
2) 上部躯体費 A、内外装費・設備費 B は表-4 による。
3) 建築工事費に対する割合 a, b = 修繕率% × A % (RC=20, PC=29), B % (RC, PC=30)
4) 解体処分費は建築工事費に対する割合の6%を計上している。c = (a+b) × 6%

表-6 解体処分費

14 094 円/m ² (建築工事費に対する割合 6.9%)		
RC建築	上部躯体 解体費 0.516 m ³ /m ² ×17 000円/m ³ =8 772円/m ² 運搬処分費 0.516 m ³ /m ² × 4 500円/m ³ =2 322円/m ² 基礎解体・杭引抜き処分費 2 000円/m ²	その他費用 (共通仮設・経費等)
	計 13 094円/m ²	1 000円/m ²
PC建築	上部躯体 解体費 (PC) 0.271 m ³ /m ² ×17 000円/m ³ ×1.2=5 528円/m ² (RC) 0.10 m ³ /m ² ×17 000円/m ³ =1 700円/m ² 運搬処分費 0.371 m ³ /m ² × 4 500円/m ³ =1 670円/m ² 基礎解体・杭引抜き処分費 2 000円/m ²	その他費用 (共通仮設・経費等)
	計 10 898円/m ²	1 000円/m ²
11 898 円/m ² (建築工事費に対する割合 5.8%)		

注 1) PC部材はRC建築に比べ硬いので、解体費20アップを見込む。
2) 基礎解体・杭引抜き処分費およびその他費用は、RC建築、PC建築とも共通の金額とする。
3) 建築工事費は205 000 円/延 m² で設定。

6. 解体処分費

解体処分費は、コンクリート造であっても建物の位置が市街地か郊外地か(解体方法)、基礎杭の状況、処分材の種類、廃棄場所等によって開きが生じる。

一般には、1 万円/m² から 1 万 8 000 円/m² (平均で 1 万 4 000 円/m² 程度) と言われている。

表-6 に前述のRC建築とPC建築の事務所の解体処分費を示す。上部躯体の解体費と運搬処分費は、表-3 のコンクリート数量に解体・処分単価を掛けて求めている。残りがその他の費用(共通仮設、諸経費)である。建築工事費(2 万 5 000 円/延 m²)に対する割合は、6.9%である。同様にPC建築の解体処分費の計算を行うと、1 万 1 898 円/m² (RC建築の建築工事費に対する割合は5.8%) となる。ここでPC建築は硬いので解体費単価はRC建築の1.2倍を見込んでいる。

7. ライフサイクルコストの推定例

図-5 は、今までに推定した年数、金額(コスト指数、基準値100)をもとにライフサイクルコストを推定したものである。グラフは、PC建築の寿命を200年とし、寿命30年(ケース1)、60年(ケース2)のRC建築は、解体撤去後同じ性能の建物を建てることを前提としている。維持費を含めていないのでコスト比でなく差額比較になる。30年経てばPC建築のトータルコストはRC建築を下回り、200年後にお

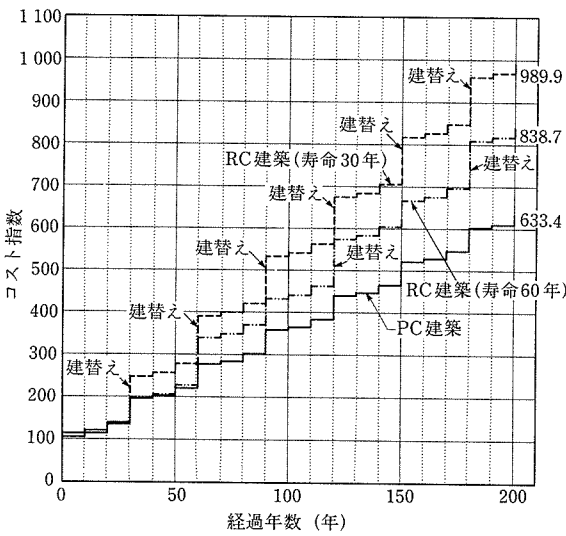


図-5 ライフサイクルコストの推定例

ける寿命60年のRC建築は建設費に換算して2棟分、寿命30年のRC建築は3棟半に相当する費用が余分にかかる。

8. おわりに

PC建築の耐久上の優位性は水セメント比が小さいことに加えて、鉄筋腐食に有害なひび割れがない構造であることも忘れてはならない。また、供用期間中に受ける中程度の

地震には、一時的に生じたひび割れも直ちに塞がって復元するのでPC部材には補修費用はかからない。

これを裏付ける事例を紹介しよう。プレストレスト・コンクリート建設業協会・本協会共催で1997年4月にパネルディスカッション「PC建築に明日はあるか」を開催した。パネリストに内田祥哉 東京大学名誉教授をお招きしたとき、先生が1956年～1957年頃に設計されたNTT（調布市）のプレテンションのダブルTスラブ、NTT（東京都千代田区）の場所打ちポストテンションの庇および1970年頃の武蔵大学（東京都練馬区）の歩道用渡り橋のプレテンションPC板と一緒に見学した（写真-1）。いずれも、屋外の厳しい環境に晒され30年～40年を経ているが、観察する限りPC部分は健全そのものであった。お話によると、本体のRC造はひび割れが生じて補修に苦労したが、唯一健全なのはPC部分でフェノールフタレイン反応も僅かであったということである。ライフサイクルコストというツールを用いた建物の経済性評価は、高品質のPC構造物という少々高価な買い物をしても長い目でみれば安い投資になるという認識が必要だろう。資源に限りある地球のため、そして社会資本の蓄積のために。

参 考 文 献

- 1) 日本建築学会：高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針（案）・同解説，1991
- 2) 沖田ほか：オリエンタル建設(株)旧社屋の調査[33年間供用したプレキャストPC造の建築物]，プレストレストコンクリート，Vol.36，No.4，pp.70～78，1994
- 3) 沖田：PC構造物の調査—PCa（プレキャスト）造と場所打ち造—，プレストレストコンクリート，Vol.40，No.4，pp.54～62，



写真-1 武蔵大学の歩道用渡り橋
（プレテンション板）

- 1998
- 4) 飯塚：建築維持保全，丸善，1990
- 5) 石塚：建築のライフサイクルマネジメント，井上書院，1996
- 6) 田村ほか：新建築学大系49，維持管理，彰国社，1983
- 7) 西川：道路橋の寿命と維持管理，土木学会論文集，No.501/I-29，pp.1～10，1994.10
- 8) 西川：ライフサイクルコストを最小にするミニマムメンテナンス橋の提案，橋梁と基礎，pp.64～72，1997.8
- 9) 白山：建築におけるライフサイクルマネジメント研究の動向，セメントコンクリート，No.612，1998.2
- 10) 喜多：コンクリート構造物の中性化「中性化」，技報堂出版，1986
- 11) 加藤：建築ストックの基本問題，日本建築学会大会(近畿)研究協議会資料「建築のライフサイクルマネジメントを考える」，1996
- 12) 建設物価調査会：建築コスト情報，2000冬，2000.1
- 13) プレストレスト・コンクリート建設業協会：プレキャスト・PC建築工事積算資料，1998.4

【2000年4月18日受付】