ライフサイクルからみた外壁材料の品質評価と材料設計法

QUALITY EVALUATION AND DESIGN PROCEDURE FOR EXTERIOR WALL MATERIALS FROM VIEWPOINT OF LIFE CYCLE

道正 泰弘*, 村 雄一**, 菊池 雅史***, 佐藤 仁人****

成川 匡文*****, 牧野 真之*****

*Yasuhiro DOSHO, Yuichi MURA, Masafumi KIKUCHI,
Masato SATO, Masafumi NARIKAWA and Chikao MAKINO*

This paper presents a design procedure for external wall materials. It is significant and unique because it proposes a material design procedure which enables the selection of optimum materials in response to user's request based on a life-cycle assessment. The quality of material was evaluated qualitatively in three different terms, performance, economy and environmental conservation. Quantification was carried out as follows. For performance evaluation, the qualities of materials were graded and evaluation points were calculated by AHP (Analytic Hierarchy Process). Economy was evaluated based on the life-cycle cost. Evaluation in terms of environmental conservation was made according to the life-cycle carbon dioxide. The material most satisfactorily meeting the design requirement in terms of a combination of three factors was selected as an optimum option. The suitability of the material was verified by model-based simulation for external walls to be used at a industrial plants of large scale steel structures. As a result, the validity of the proposed material design procedure was verified.

keywords: Procedure for selecting materials, Quality evaluation, Exterior wall materials, Life-cycle Assessment, Analytic Hierarchy Process (AHP)
材料設計法、品質評価、外壁材料、ライフサイクルアセスメント、階層化意思決定法(AHP)

1. はじめに

わが国における建築材料の選定(設計)は、多くの場合、建物の部位や空間に要求される性能に対して、経済的な制約条件のもと、材料の品質特性を考慮して最終的な決定がなされてきた。一方、最近の環境に対する配慮の重要性や性能設計への移行等、その設計に対して従来の評価要素に加えて、リサイクル性や環境負荷、環境コスト等に係わる評価、あるいはそれに対応したライフサイクルからみた評価法を確立する必要性が増してきている^{1) 2)}。このような状況において、材料品質としての性能、経済性および環境保全性に対する使用者の要求を満たす適切な材料の設計の方法を構築するためには、建物のライフサイクル全体から求められる相対的かつ総合的な品質の評価法と選定法、すなわち、建物のライフサイクルに基づく材料の品質全体を捉えた設計の方法(以下、材料設計法という)を確立することが必要となる。この材料設計法については、建設省建築研究所をはじめ、かねてより研究がおこなわれてきており¹⁾、白山らによると、当該建築物に要求される性能(要求性能)を実現するための材料・工法を選定する手順、つまり、性能設計のうち、材料工法の性能に関わる部分の設計であると定義されている。

筆者らは、これまで海岸に隣接する大規模(概ね床面積 8,000m²以上)な工業系鉄骨造建物(以下、大規模鉄骨建物という)の建設、

維持・保全あるいは解体行為の合理化および環境保全性の向上を目的に使用する各種建築材料の品質、行為の評価および設計法について調査検討を行ってきた^{3) ~ 7)}。本検討は、これら一連の研究の一環をなすもので、建物のライフサイクルからみた評価要素、評価項目を体系化し、それをもとに材料の品質評価および材料設計法の提案を行った。なお、本提案は大規模鉄骨造建物を例とし、それを構成する部位のうち最も重要な構成要素の一つである外壁材料をモデルにその設計をシミュレートすることにより、その適合性を確認し、適切な建築材料の品質評価および材料設計法を構築するための基礎資料を得ようとするものである^{8) 9)}。

2. 外壁材料の品質評価および材料設計法

本検討では、品質評価の項目として図-1に示す「性能」と「経済性」および「環境保全性」の基本軸を設定した。このうち、経済性、環境保全性は評価に係わる基準等の一般的な合意が確立していないため^{8) 9)}、算定範囲、方法を定め、材料間における相対値の比較程度に留めた。性能については、現在得られる情報から、定量的評価が可能であると判断し、定量化と、それに対する要求性能に基づく重み付けを行い、その数値をもとに評価を行った。なお、上記の各評価は絶対的なものではなく、材料間の相対的な比較となる。

* 東京電力㈱ 工博

** 東電設計㈱建築意匠部

*** 明治大学理工学部建築学科 助教授・工博

**** 東京電力㈱電力技術研究所建築グループ 工博

***** 東京電力㈱電力技術研究所建築グループ
マネージャー

***** 前田建設工業㈱技術研究所

TEPCO, Dr. Eng.

Architectural Design Department, Tokyo Electric Power Services Co., Ltd.

Assoc. Prof., Department of Architecture, Science & Technology, Meiji Univ., Dr. Eng.

Senior Research Eng., Architecture Group, Electric Power R&D Center, TEPCO, Dr. Eng.

Manager, Architecture Group, Electric Power R&D Center, TEPCO

Research Eng., Technical Research Institute, Maeda Corporation

2. 1 ライフサイクルアセスメント

建築材料のライフサイクル全体からみた品質の評価および設計を実施するため、その評価を行うためのマトリクスを構築し、それに基づきおのおのの評価を行うこととした。

(1) 建築材料のライフサイクルマトリクス

本検討において設定した建築材料のライフサイクルマトリクス（メインマトリクス）を図-2に示す。ここに示したライフサイクルマトリクスは、本検討で体系化しようとするライフサイクル性能分析の根幹をなすものであり、評価すべきライフサイクルの各段階と、それらの段階における評価要素から構成される。

(2) サポートマトリクス

メインマトリクスに示された評価要素を具体化するために設定したマトリクス（サポートマトリクス）を図-3に示す。ここで、評価要素で構成されたサポートマトリクスを一次サポートマトリクス、さらにその細項目で構成されたサポートマトリクスを二次サポートマトリクスとする。二次サポートマトリクスは、一次サポートマトリクスの評価要素を、要求性能に対応したより高い精度での定量的評価が、現在または将来的に可能かつ必要と考えられる評価項目群として展開し構成した。

→ 有利な方向

+ 性能：使用者の要求に応じた性能

経済性：LCC

環境保全性：LCCO₂

図-1 本検討で設定した建築材料の品質評価の基本軸⁶⁾

ライフサイクルの区分	評価要素
A. 原料・材料 計画段階	<div>資源 → 原料 → 素材 → 製品 → 部品</div> <div>計画 → 開発 → 製造 → 加工 → 組立</div>
B. 部位・空間 計画段階	<div>部位 → 空間 → 建物 → 建物群*1 → 都市*1</div> <div>計画 → 設計 → 建設</div>
C. 供用・維持 計画段階	<div>メンテ製品・部品 → 交換製品・部品・部位・空間 → 撤去製品・部品・部位</div> <div>維持・保全・管理計画 → メンテナンス・補修・改修 → 撤去・交換</div>
D. 撤去・解体 計画段階	<div>撤去製品 → 撤去部品 → 撤去部位 → 建物*1 → 建設副産物*1</div> <div>撤去・解体計画 → 撤去 → 事前解体 → 本解体</div>
E. 再生・処理 計画段階	<div>建設副産物 → 再生製品・部品 → 再生原料 → 再生エネルギー → 最終処分物</div> <div>再生・処理計画 → 再生製品・部品加工 → 中間処理・分別・選別 → 再生原料製造 → 最終処分</div>

*1 建物全体に係わる評価要素

図-2 本検討で設定した材料のライフサイクルマトリクス（メインマトリクス）

2. 2. 1 材料特性の評価

(1) 性能評価基準の設定

性能としての定量化については、評価方法とともに評価結果の判定のためのグレーディングを設定することにより対応した。材料の性質として、定量的に評価可能となった評価項目に対する評価基準は、図-4に示すように、建築の部位に関する性能評価の指標となる JIS A 0030（建築の部位別性能分類）を基準に、建築材料に関連する JIS、日本建築学会より刊行されている各種工事の標準仕様書、あるいは公的試験機関である建材試験センターによる規格（JSTM）等に基づき設定を行った。但し、JIS A 0030 における評価基準は 0～7 の 8 段階評価であり、グレード 0 の場合も、ある一定の基準以下の性能を有することと定義されているが、本検討においては、「該当する性能が全く期待できない場合」といった評価が発生すること

も想定されることから、その場合をグレード 0 として、0～8 の 9 段階で評価することとした。また、現状で定量化が困難なことから定性的に定めた 3～6 段階評価と 9 段階評価との整合を図るため、表-1に示すようなグレードを設定した。以上の方法で設定した材料に対する評価項目および評価値のグレード一覧を表-2に示す。

(2) 材料性能評価

表-2により設定した評価基準により、表-3に示す 12 種類の外壁材料について評価を行った。グレーディングの方法は、各材料について製造メーカーおよび製品を任意に選定し、各製品のカタログ中に記されている特性値を性能評価の対象とした。カタログ中に明記されていない特性値に関しては、製造メーカーへのヒヤリング調査を行い⁵⁾、特性値を設定した。各材料をグレーディングした結果も併せて表-2に示す。

図-3 品質評価項目設定手順および外壁材料評価項目

図-4 グレード設定手順

表-1 本研究設定グレードとJIS A 0030の関係

評価方法		グレード								
JIS A 0030		－	0 ²⁾	1	2	3	4	5	6	7
本 検 討 案	3段階評価	0	1	－		－		－		8
	4段階評価	0	1	－		4		－		8
	6段階評価	0	1	2		4		6		8
	8段階評価	0 ¹⁾	1	2	3	4	5	6	7	8

* 1 : 性能が全く期待されないか、性能として要求されないもの

* 2 : 性能値としては測定可能であるが、性能としては期待できないものとして位置づけられる

表-2 本検討で設定した外壁材料の性能評価項目、グレードならびに評価結果

評価項目			具体的評価(測定・試験)方法		判定方法		グレード								材料NO.													
大分類	小分類	測定項目(測定単位)			JIS A 0030	0	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
力学性能	強度	A1 局圧荷重(kgf/cm ²)	JIS A 0030	—	<13	13≤	30≤	80≤	200≤	500≤	1250≤	3000≤	—	—	6	6	6	7	7	7	1	1	1	1	1	1		
		A2 安全衝撃強さ(kg・cm)	JIS A 0030	—	<45	45≤	63≤	160≤	400≤	1020≤	2500≤	6300≤	—	—	2	7	7	5	5	5	—	—	—	—	—	—		
		A3 面内せん断強さ(kgf/m)	JIS A 6501他	—	<100	100≤	1083≤	2067≤	3059≤	4033≤	5017≤	6000≤	—	—	2	2	—	—	—	—	—	—	2	2	2	2		
		A4 単位荷重(kgf/m ²)	JIS A 0030	—	<40	40≤	70≤	125≤	230≤	400≤	710≤	1250≤	—	—	1	—	—	—	—	—	—	1	1	1	1	1		
		A5 曲げ強さ(kgf/cm ²)	JIS A 5430他	—	<10	10≤	60≤	110≤	160≤	210≤	260≤	310≤	—	—	4	2	2	6	6	6	8	8	8	8	8	8		
		A6 軸方向圧縮強さ(×10 ³ kgf/m)	JIS A 5416他	—	<30	30≤	110≤	190≤	270≤	350≤	430≤	510≤	—	—	3	3	3	6	6	6	—	—	8	8	8	8		
		A7 軸方向引張強さ(×10 ³ kgf/m)	JIS A 5416他	—	<5	5≤	21≤	37≤	53≤	69≤	85≤	101≤	—	—	—	—	3	3	3	2	2	2	8	8	8	8		
		B1 ヤング係数(10 ³ kgf/cm ²)	JASS 21他	—	<4	4≤	8≤	12≤	16≤	20≤	24≤	28≤	—	—	5	6	6	6	6	6	8	8	8	8	8	8		
		C1 耐火時間・難燃度	建築基準法	—	無	準不燃	不燃	防火構造	10分耐火	1時間	2時間	2時間超	—	—	6	6	6	8	8	8	2	2	2	6	6	6		
		C2 熱膨張率(×10 ⁻⁶ /°C)	JASS 21他	—	≥23	≥20	≥17	≥14	≥11	≥8	≥5	5>	—	—	5	6	6	5	5	5	5	5	5	1	1	1		
物理性能	音	D1 有害物質の飛散量	設定評価	—	発生有	—	—	—	—	—	—	—	—	発生無	1	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8		
		E1 透過損失(dB)	JIS A 0030	—	<12	12≤	20≤	28≤	36≤	44≤	52≤	60≤	—	—	4	4	4	6	6	6	3	3	3	3	3	3		
		E2 吸音率(α)	JIS A 0030	—	<20	20≤	30≤	40≤	50≤	60≤	70≤	80≤	—	—	8	8	8	8	4	4	3	3	3	3	3	3		
		F1 熱抵抗(m ² K/kcal)	JIS A 5908他	—	<0.05	0.05≤	0.13≤	0.2≤	0.28≤	0.35≤	0.43≤	0.5≤	—	—	8	8	8	4	4	4	6	6	6	6	6	6		
		F2 熱貫流抵抗(m ² deg/kcal)	JIS A 0030	—	<0.2	0.2≤	0.3≤	0.5≤	0.8≤	1.25≤	2.0≤	3.2≤	—	—	7	7	7	3	3	3	5	5	5	5	5	5		
		G1 透水の有無(時間異常有無)	JIS A 1414	—	5分異常有	10分異常有	30分異常有	1時間異常有	2時間異常有	3時間異常有	24時間異常有	24時間異常無	—	—	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8		
		G2 水密圧力(kgf/m ²)	JIS A 0030	—	<10	10≤	16≤	25≤	40≤	63≤	100≤	160≤	—	—	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8		
		H1 色彩の自由度	設定評価	—	単一限定	—	—	複数限定	—	—	—	無制限	—	—	8	8	8	1	8	8	4	4	4	8	8	8		
		H2 形状の自由度	設定評価	—	単一限定	—	—	複数限定	—	—	—	無制限	—	—	1	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8		
		H3 テクスチャの自由度	設定評価	—	単一限定	—	—	複数限定	—	—	—	無制限	—	—	4	4	4	4	4	4	1	1	1	1	1	1		
耐候性	耐劣化性	I1 耐久性能指数(%)	JIS A 5430他	—	<30	30≤	75≤	120≤	165≤	210≤	255≤	300≤	—	—	3	5	5	5	5	5	8	8	8	8	8	8		
		J1 色差(ΔE)	建研 ^{※1}	—	≥10	≥7	—	≥5	—	≥3	—	3>	—	—	4	8	4	8	6	8	8	8	8	4	8			
		J2 劣化保持率(%)	建研 ^{※1}	—	<30	30≤	40≤	50≤	60≤	70≤	80≤	90≤	—	—	1	1	1	1	1	1	8	8	8	8	1	1		
		J3 ひび割れ・膨れ・剥がれ等の劣化	設定評価	—	入り易い	—	—	入り難い	—	—	—	入らない	—	—	4	4	4	4	4	4	8	8	8	8	8	8		
		K1 耐水性	設定評価	—	かなり	—	—	やや劣化	—	—	—	劣化無	—	—	8	8	8	4	4	4	1	1	1	1	1	1		
		L1 塩水噴霧時間(hr)	G 3312他	—	<200	200≤	500≤	800≤	1100≤	1400≤	1700≤	2000≤	—	—	8	8	8	8	8	8	3	3	3	3	4	4		
		L2 耐アルカリ性(異常の有無)	JIS A 5908	—	異常有	—	—	—	—	—	—	異常無	—	—	8	8	8	8	8	8	8	8	8	1	1	1		
		L3 耐酸性(異常の有無)	JIS A 5908	—	異常有	—	—	—	—	—	—	異常無	—	—	8	8	8	1	8	8	6	8	8	8	8	8		
		M1 塩分浸透深さ	設定評価	—	期待できない	—	—	期待できる	—	—	かなり期待できる	4	4	4	4	4	4	4	8	8	8	8	8	8	8			
		M2 中性化深さ	設定評価	—	期待できない	—	—	期待できる	—	—	かなり期待できる	4	4	4	4	4	4	4	8	8	8	8	8	8	8			
耐汚染性	水起因性	N1 降雨水落下(汚染程度)	JSTM ^{※3} J 7601	—	顕著	かなり	—	認められる	—	やや	—	無	—	—	4	6	4	6	6	6	6	6	6	4	4	6		
		N2 懸濁水落下(汚染程度)	JSTM ^{※3} J 7602	—	顕著	かなり	—	認められる	—	やや	—	無	—	—	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4		
		O1 汚染の除去の容易さ	設定評価	—	困難	—	—	やや容易	—	—	—	容易	—	—	1	4	1	4	4	4	4	4	4	1	1	4		
		P1 劣化時の対応の容易さ	設定評価	—	0	1	—	2	—	3	—	4	—	—	4	4	4	8	8	8	4	4	4	4	4	4		
		P2 保証年数(年)	設定評価	—	無	<5	5≤	8≤	11≤	14≤	17≤	20≤	—	—	2	2	2	1	2	4	4	4	4	2	2	4		
		Q1 磨耗量(mm)	JIS A 0030	—	>3.2	3.2≥	1.8≥	1≥	0.56≥	0.32≥	0.18≥	0.1≥	—	—	—	—	—	8	8	8	—	—	—	—	—	—		
		生産性	構成の容易性	R1 現場加工の有無・容易性(曲げ・切断)	設定評価	否	—	—	—	—	—	—	—	—	可	—	8	0	0	0	0	0	8	8	8	1	1	1
				R2 作業工程数	設定評価	否	—	—	—	—	—	—	—	—	無制限	—	8	4	4	0	0	0	8	8	8	8	8	8
				R3 作業時間数	設定評価	—	≥14	13	12	11	10	9	8	7	—	—	4	2	4	0	2	1	8	8	8	8	5	4
				R4 作業時間数	設定評価	—	長い	—	—	普通	—	—	—	短い	—	—	4	4	4	4	4	4	8	8	8	8	4	4
R5 養生の有無・時間数	設定評価			—	有・長い	—	—	有・短い	—	—	—	無	—	—	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4		
R6 気象の影響の有無	設定評価			—	受ける	—	—	やや	—	—	—	受けない	—	—	1	1	1	1	1	1	4	4	4	4	4	4		
R7 寸法誤差	JIS A 6501他			—	≥23	≥20	≥17	≥14	≥11	≥8	≥5	5>	—	—	7	8	8	3	3	3	4	4	4	4	4	4		
R8 構成方式	設定評価			—	接合式	—	—	接合・機械式	—	—	—	機械式	—	—	8	8	8	4	4	4	8	8	8	8	8	8		
R9 要求される構成材の数	設定評価			—	≥3	—	—	2	—	—	—	1	—	—	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8		
R10 要求寸法に対する対応度	設定評価			—	不可能	—	—	やや容易	—	—	—	容易	—	—	8	8	8	4	4	4	8	8	8	4	4	4		
副産物の発生性	副産物の発生性	R11 寸法安定性(長さ変化率)	JIS A 5430他	—	≥0.25	≥0.22	≥0.15	≥0.12	≥0.08	≥0.04	≥0.02	0.02>	—	—	3	8	8	8	8	6	6	6	6	6	6			
		S1 単位重量	JIS A 5416他	—	≥480	≥240	≥120	≥60	≥30	≥15	≥7.5	7.5>	—	—	7	4	4	2	2	2	8	8	8	8	8			
		S1 廃棄物発生率の程度	設定評価	—	現場	—	—	工場・現場	—	—	—	工場	—	—	4	8	8	8	8	8	8	8	8	4	4	4		
		T1 再利用率	設定評価	—	廃材	—	—	再生可能	—	—	—	有価物	—	—	1	1	1	4	4	4	8	8	8	8	8	8		
		U1 騒音レベル程度	騒音規制法	—	≥85	≥80	≥75	≥70	≥65	≥60	≥55	55>	—	—	6	6	6	4	4	4	6	6	6	6	6			
		V1 粉塵発生率の程度	設定評価	—	多	—	中	—	小	—	—	無	—	—	3	3	3	5	5	5	8	8	8	8	8	8		
		W1 振動発生率の程度	設定評価	—	大	—	中	—	小	—	—	無	—	—	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8		
		X1 悪臭発生率の程度	設定評価	—	大	—	中	—	小	—	—	無	—	—	3	3	3	5	3	3	8	8	8	8	3	3		
		Y1 特殊処理必要性	廃掃法 ^{※2}	—	特別管理	—	—	管理型	—	—	—	安全型	—	—	1	1	1	8	8	8	8	8	8	8	8	8		

※1: 建設省建築研究所

※2: 廃掃法は「廃棄物処理及び清掃に関する法律」及び「同施行令」を指す

※3: 建材試験センター規格

: ヒアリング調査ができなかった項目

表-3 調査対象とした外壁材料

試料 No.	材料の組み合わせ		
	基 材	仕 上 材	補助材(副資材)
1	ポリスチレンボード	アクリル樹脂	ロックウール [※] ネ
2	押出成形	ポリウレタン脂塗	ロックウール [※] ネ
3	セメント板	アクリル樹脂塗装	
4		浸透性防水剤	ケイ酸カルシウム [※] ネ
5	PCa 板	ケイ酸系弾性吹付タイル	
6		フッ素樹脂	(鉄 筋)
7		アクリル樹脂	
8	亜鉛メッキ鋼板	シリコン変性樹脂塗	サド [※] イソ [※] ネ
9		フッ素樹脂塗装	
10	アルミニウムパネ	電解着色	
11	ル	アクリル樹脂	サド [※] イソ [※] ネ
12		フッ素樹脂塗装	

2.2.2 要求性能

(1) 要求性能の展開

材料の性能に対する使用者の要求と要求の重みを明らかにすること、および二次サポートマトリクスで設定した評価項目が要求性能の観点から適切であることを確認することを目的として要求性能の展

開を行った。展開の方法は、二次サポートマトリクスの評価項目から要求性能の項目を抽出し、以下、「親和図法」を用いて図-3に示すようにレベル1→レベル2→レベル3の手順で設定した。

(2) 要求性能の重み付け方法

a. 重み付けのための方法

材料設計に活用されうる意思決定のための技法(以下、意思決定法という)は、数理計画法、OR、AHP法等をはじめにいろいろなものがある¹⁾。筆者らはこのうち要求性能の重み付けを行うことが可能な技法として、絶対評価法、AHP法、ファジィ評価法および重回帰分析を選定し、本検討への適用性について評価を行った。その結果、総合的に評価が最も高いAHP法を採用することとした²⁾。AHP法は、意思決定のための評価手法の一つで、幾つかの選択肢の中から最も重要なものあるいは優劣の順位を相対的に決定するための方法として提案されたもので、最近では建築の分野においてもいくつかの研究例がみられる³⁾¹⁰⁾。

(2) 算定方法

CO₂ 排出量の算出方法は、概算法と精算法があるが¹³⁾、本検討では精算法を採用することにした。精算法に用いる各換算値は、表-5に示す排出量の原単位および表-6に示すエネルギー換算値をもちいて(5)式により算出した。

$$LCCO_2 = CO_2 a + CO_2 b + CO_2 c + CO_2 d + CO_2 e + CO_2 f \cdots (5)$$

LCCO₂: ライフサイクルCO₂総量(kg-C)

CO₂ a[製造・流通]: 外壁1㎡当たり材料物量(kg)×原単位(kg-c/kg)

CO₂ b[輸送]: 燃費(l/km)×軽油原単位(kg-c/l)×走行距離(km)/積載重量(kg)

CO₂ c[工事]: 外壁1㎡当たり機器燃費(l/㎡)×軽油原単位(kg-c/l)
×燃料単位物量当たり消費エネルギー(kg-c/l)

CO₂ d[維持保全]: 維持保全工事CO₂排出量(kg-c)×外壁補修率(%)
+解体廃棄時CO₂排出量(kg-c)×外壁補修率(%)

CO₂ e[解体]: 外壁1㎡当たり解体機器燃費(l/㎡)×軽油原単位(kg-c/l)
×燃料単位物量当たり消費エネルギー(kg-c/l)

CO₂ f[廃棄]: 外壁1㎡当たり材料物量(kg)×廃棄物処理原単位(Kg-c/kg)
+輸送時CO₂排出量(kg-c)

3. モデルシミュレーション

本検討において提案した外壁材料の評価法および材料設計法について、大規模鉄骨造建物に適用されうる外壁材料を対象としたシミュレーションを行うことにより、その適合性を検証した。

3.1 解析条件

3.1.1 対象とした材料

シミュレーションの対象とした外壁材料は、表-3に示した12種類の試料とした。但し、環境保全性は、現状ではCO₂排出量の原単位が、外壁材料の詳細な仕様ごとには定まっていなかったため¹³⁾、本検討では5種類の基材単位で算定することとした。

3.1.2 要求性能

アンケートの被験者は、外壁材料の使用者でかつ、大規模鉄骨造建物の外壁材料の選定業務の経験者を対象とし、表-7に示すように、想定した立地条件ごとに、それぞれ4,5,6名の計15名とした。要求品質の重み付けは、図-5に示した調査票を用いて調査を行った。抽出された各要求品質と、それに対応する重み付けの調査結果を表-8に示す。

3.1.3 経済性

LCCは、(4)式を用いて表-4の範囲において算定を行ったが、算定根拠となる建物耐用年数等は以下のように設定した。

(1) 建物の耐用年数

本検討においては、最近の耐久計画の目標耐用年の定め方等を考慮して短寿命型35年、標準寿命型65年および長寿命型100年の3パターンに設定した¹⁴⁾。

(2) 外壁の補修形態

筆者らの大規模鉄骨造建物に関する現状調査³⁾において抽出した外壁の補修実績等をもとに、表-9に示す外壁材料の補修頻度、補修率を各材料の基材単位に設定した。

(3) 物価上昇率

平成2年～7年までの6年間の工場建設標準指標の平均値から3.25%を物価上昇率として設定した。

3.1.4 環境保全性

建物の耐用年数および外壁の補修形態は、経済性と同様に設定した。建物のライフサイクルCO₂算出手順の例は、日本建築学会地球環境小委員会の報告¹³⁾等に示されているが、本検討では、対象を外壁材料に限定しているため、図-6に示す範囲で算定した。

評価要素: 製造・加工・組立	
評価項目	・各製品の構成資材製造に伴うCO ₂ 排出量 ・工場での組立加工に伴うCO ₂ 排出量
評価要素: 建設	
評価項目	・工場からの現場輸送に伴うCO ₂ 排出量 ・建設機械に伴うCO ₂ 排出量
評価要素: 補修・改修	
評価項目	・補修製品構成資材製造に伴うCO ₂ 排出量 ・工場での組立加工に伴うCO ₂ 排出量 ・工場からの現場輸送に伴うCO ₂ 排出量 ・補修工事機械に伴うCO ₂ 排出量
評価要素: 最終処分	
評価項目	・現場から処分場の輸送に伴うCO ₂ 排出量 ・廃棄物処理に伴うCO ₂ 排出量

図-6 環境負荷算定範囲

表-5 外壁材料のCO₂排出の原単位¹³⁾

試料 No.	算定対象材料		使用した原単位 (JMA型スタック国内排出)
	区分	仕様	
1	基 材	7mm厚 10mm	セメント製品 0.0749+0.0032= 0.0781(kg)
	仕上げ	アクリル樹脂塗装	塗 料 0.5198+0.0345= 0.5543(kg)
	補助材	遮音材	無機化学 0.3193+0.0078= 0.3271(kg)
2	基 材	押出成型セメント板 50mm	セメント製品 0.0749+0.0032= 0.0781(kg)
	仕上げ	塗 装	塗 料 0.5198+0.0345= 0.5543(kg)
3	補助材	遮音材	無機化学 0.3193+0.0078= 0.3271(kg)
4	基 材	PCa板 150mm	セメント製品 0.0749+0.0032= 0.0781(kg)
5	副資材	鉄筋	熱間圧延鋼材 0.3726+0.0051= 0.2981(kg)
6	補助材	内装材	無機化学 0.3193+0.0078= 0.3271(kg)
7	基 材	被覆鋼板 1.0mm	メッキ鋼材 0.3301+0.0083= 0.3384(kg)
8	仕上げ	樹脂被覆	高性能樹脂 0.8345+0.0311= 0.8656(kg)
9	補助材	サド・イ・チハ [®] セル	セメント製品 0.0749+0.0032= 0.0781(kg)
			ガラス繊維 1.0030+0.0439= 1.0469(kg)
10	基 材	7mm厚 2.0mm	アルミ圧延製品 0.9330+0.0370= 0.9700(kg)
	仕上げ	樹脂塗装	塗 料 0.5198+0.0345= 0.5543(kg)
11	補助材	サド・イ・チハ [®] セル	セメント製品 0.0749+0.0032= 0.0781(kg)
			ガラス繊維 1.0030+0.0439= 1.0469(kg)

表-6 輸送・工事エネルギーのCO₂排出量換算値

使用重機	消費エネルギー	CO ₂ 換算原単位
船舶貨物輸送		9.7kg-c/トノkm
10tトラック(軽油)	3.0km/l=0.33l/km	国内排出原単位
コンクリートポンプ車(軽油)	0.5l/m ³ × 0.15m ³ =0.075l/m ²	(JMA型スタック)軽油生産過程 0.0059kg-c/Mcal
80tクローラークレーン(軽油)	15l/h300m ² /8h=0.4l/m ²	0.0014kg-c/Mcal
45tラフターークレーン(軽油)	セメント板: 10l/h400m ² /8h =0.2l/m ²	軽油最終消費 9.2Mcal/l
	金属板: 10l/h340m ² /8h =0.235l/m ²	軽油リットル当り排出原単位 0.80316kg-c/l ⁷⁾

表-7 材料設計に対して与えられた条件およびその概要

要 因	対象建物の条件概要		
	想定条件A	想定条件B	想定条件C
形 態	新 築	新 築	新 築
立 地	首都圏150km	首都圏250km	首都圏内
条 件	立地環境	海岸隣接 [*]	海岸隣接 [*]
条 例	用途地域	指定なし	指定なし
お び 規 制	防火指定	指定なし	防火地域
	騒音規制	指定なし	隣地境界45dB
	景観条例	指定あり	指定なし
建物軽量化	要	要	-
関連施設	製造工場	10km	
との距離	最終処分場	10km	
被験者数	4名	5名	6名

※1 海岸線より100m以内に建設

表－８ 重み付け調査結果

レベル1				レベル2					
要求性能	p1			要求性能	p2				
	想定A	想定B	想定C		想定A	想定B	想定C		
1. 外的影響に強い	0.464	0.493	0.429	a. 外力に対して丈夫である	0.455	0.224	0.380		
				b. 水に害されにくい	0.141	0.254	0.108		
				c. 熱に害されにくい	0.061	0.093	0.055		
				d. 飛来・飛散物に害されにくい	0.196	0.234	0.166		
				e. 火災による被害を受けにくい	0.079	0.133	0.255		
				f. 太陽による被害を受けにくい	0.068	0.061	0.035		
2. デザインしやすい	0.192	0.040	0.094	a. 自由な形状を選択できる	0.691	0.648	0.829		
				b. 自由な色彩を選択できる	0.309	0.352	0.171		
3. 環境を害さない	0.077	0.187	0.162	a. 工事に際し公害を発生しない	0.272	0.228	0.273		
				b. リサイクル性が高い	0.153	0.307	0.094		
				c. 廃材処理をしやすい	0.177	0.177	0.079		
				d. 常時発生音が外部に漏れにくい	0.399	0.288	0.553		
4. 工事が容易である	0.157	0.151	0.142	a. 施工品質を確保しやすい	0.192	0.259	0.608		
				b. 施工期間が短い	0.144	0.469	0.177		
				c. 施工しやすい	0.664	0.272	0.215		
5. マンナンスしやすい	0.109	0.130	0.174	a. 保守しやすい	0.229	0.441	0.360		
				b. 補修しやすい	0.442	0.405	0.411		
				c. 改装しやすい	0.329	0.154	0.228		

3. 2 解析結果

材料設計のシミュレーション結果を表－１０および図－７に示す。性能の評価結果は、性能の総合評価点として順位付けされる。また、経済性および環境保全性は、それぞれLCCおよびLCCO₂として定量化され、それらの値を用いることにより、図－１に示した基本軸に基づく相対的な評価を行った。

3. 2. 1 性能評価

(1) 重み付け調査結果

表－９に各想定条件の重み付け調査結果を示す。これによると、想定条件Aの場合、外力に対して丈夫な性能、景観条例によるデザイン性に対する性能、建屋軽量化の方針から自重の低減に係わる施

工し易さに対する重みが高くなっている。想定条件Bは、水に対する性能、飛来・飛散物に対する性能等、耐久性に係わる性能に対する重み付けが高い傾向を示している。想定条件Cは、想定条件Bと同様、耐久性にかかわる性能に対する重み付けが高い傾向を示しているが、与えられた条件から他の想定条件と比較して、火災に対する性能、遮音性に係わる性能に対する重み付けが高くなる。この結果から、本検討の範囲においては、与えられた条件からみて常識的な重み付けが行われていることを確認した。

(2) 性能評価

表－１０より、性能の総合評価結果から対象材料の傾向をみると、各材料ともあまり評価値自体に大きな相違はみられなかった。これは、本検討で対象とした外壁材料は、既に大規模鉄骨造建物で実際に使われているか、または今後使われうる可能性がある材料に限定しており、また、外壁材料を基材、仕上げ材、および補助材の複合材料として、それぞれの性能を補うように構成し、各材料の性能は要求される条件に対して、おおよそ所要の性能は保有しているためである。総合評価値に基づく順位付けでは、各想定条件とも上位に亜鉛メッキ鋼板系の材料が上位となった。この材料は最近の大規模鉄骨造建物において、比較的多く使用されている外壁材料の一つである⁴⁾。一方、想定条件Cの評価結果にみられるように、与えられた条件から、防火性能を重視した場合、PCa板、セメント板など、耐火性能の良い材料が、亜鉛メッキ鋼板系の材料とほぼ同程度の評価結果を得ている。以上のことから、本検討で提案した性能評価で評価した結果は、使用者の要求に対する性能を有する材料として、実際に設計者が選定してきた材料と矛盾しないことが確認できた。但し、実際の設計では、要求条件としての規定値がある場合、その条件を満たすことが絶対条件となり、それに適合しない材料はグレーディングした段階で対象から削除する等の対応が必要となる。

表－９ 外壁材料の補修頻度、補修率の設定

試料記号		経年数(年)																				備考
		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	100	
1	基 材	100%張替(40年)										100%張替(80年)										実績調査 ^{3), 4)} により設定
	仕上材	25%補修		25%補修		100%補修		25%補修		100%補修		25%補修		100%補修		25%補修		100%補修				
2	補助材	100%張替										100%張替										
	基 材	100%張替(40年)										100%張替(80年)										
3	仕上材	25%補修		25%補修		100%補修		25%補修		25%補修		100%補修		25%補修		100%補修		100%補修				基 材 の 耐 用 年 数 は 100 年 と し た 。
	補助材	100%張替										100%張替										
4	基 材																					
	仕上材					100%補修(30年)								100%補修(60年)				100%補修(90年)				
5	補助材																					実績調査 ^{3), 4)} により設定
	基 材					20.25.30年で各33%張替				50.55.60年で各33%張替				80.85年で各33%張替								
7	仕上材					20.25.30年で各33%補修				50.55.60年で各33%補修				80.85年で各33%補修				実績調査 ^{3), 4)} により設定				
	補助材					20.25.30年で各33%張替				50.55.60年で各33%張替				80.85年で各33%張替								
10	基 材					100%張替(30年)				100%張替(60年)				100%張替(90年)					実績調査 ^{3), 4)} により設定			
	仕上材					100%補修				100%補修				100%補修								
11	補助材					100%張替				100%張替				100%張替				実績調査 ^{3), 4)} により設定				
	基 材																					
12	仕上材																		実績調査 ^{3), 4)} により設定			
	補助材																					

表－１０ 本検討におけるシミュレーション結果

材料 番号	基材	表面仕上げ	性能評価点						インシヤルコスト (円/㎡)	ライフサイクルコスト(円/㎡)			ライフサイクルCO ₂ (kg-c/㎡)		
			想定A	順位	想定B	順位	想定C	順位		短寿命	標準寿命	長寿命	短寿命	標準寿命	長寿命
1	フレキシブルシート	アクリル樹脂	5.095	9	5.158	12	5.078	11	16.190	27.018	109.337	163.583	12.300	24.279	24.762
2	押出成形セメント板	ポリウレタン樹脂	5.216	7	5.512	7	5.340	5	23.700	42.090	159.394	251.819	12.300	24.279	24.762
3	押出成形セメント板	アクリル樹脂	5.002	10	5.312	10	5.184	8	21.890	34.074	139.550	201.100			
4	PCa板	浸透性防水剤	4.601	12	5.629	6	5.275	6	53.760	82.314	141.933	318.021			
5	PCa板	アクリル系弾性吹付タイル	4.943	11	5.490	9	5.174	9	56.600	86.671	150.249	333.840	76.953	77.407	77.861
6	PCa板	フッ素樹脂	5.134	8	5.705	5	5.345	4	56.600	88.907	157.316	368.540			
7	亜鉛メッキ鋼板	アクリル樹脂	6.068	1	6.205	1	5.380	1	23.900	89.100	351.595	880.991			
8	亜鉛メッキ鋼板	シリコン変性樹脂	6.068	1	6.205	1	5.380	1	20.100	76.859	304.782	764.899	17.081	31.244	42.574
9	亜鉛メッキ鋼板	フッ素樹脂	6.068	1	6.205	1	5.380	1	20.500	78.148	309.709	777.119			
10	アルミニウムハネル	電解着色	5.972	4	5.869	4	5.195	7	22.300	92.682	275.048	752.693			
11	アルミニウムハネル	アクリル樹脂	5.371	6	5.211	11	4.871	12	23.900	98.458	291.727	797.831	22.426	33.638	44.851
12	アルミニウムハネル	フッ素樹脂	5.648	5	5.505	8	5.117	10	26.100	106.401	314.660	859.897			

3. 2. 2 経済性

算定対象とした各材料の経済性は、設定した寿命が長寿命になるほど基材の差異が及ぼす影響が大きくなる。イニシャルコストによる評価では、PCa 板を除き、他はほぼ同程度である。しかし LCC では、フレキシブルボード、押出し成形セメント板および PCa 板は、イニシャルコストに比べて、短寿命の場合で 1.5 倍程度、標準寿命の場合でおおよそ 5～6 倍程度、長寿命では、6～10 倍程度であるのに対し、亜鉛メッキおよびアルミニウムパネルについては、それぞれ、4～5 倍、10～12 倍、40 倍となり、前 3 者に比べてその増加が顕著になる等、イニシャルコストによる評価とは大きく異なる傾向がみられた。この結果から大規模鉄骨造建物に使用する外壁材料の適切な材料設計を行うための経済性は、LCC による評価を行うことにより、材料の特性がより明確に表れてくる。

3. 2. 3 環境保全性

算定対象とした基材の環境保全性は、経済性同様、基材の種類および寿命の影響が認められる。フレキシブルボードおよび押出し成形セメント板は、部位・空間計画段階から撤去・解体計画に至る各段階で低い負荷を示すことに起因して、短寿命で 12,300(kg-c/m²)と他の基材に比べて最も小さく、また、標準寿命になると短寿命のおおよそ 2 倍程度になるが、長寿命とした場合でもその標準寿命の場合とほぼ同等である。PCa 板については、建設時に高い負荷を示し、解体時では最も高くなるため、他に比べて相対的に高い負荷を示すが、供用・維持計段階ではその行為の発生が少ないことに起因して、寿命の増加にともなう CO₂ 排出量の増加はみられない。亜鉛メッキ鋼板およびアルミニウムパネルの金属板系は、供用維持計画段階における補修頻度が多いことに起因して、寿命の増加に伴いその排出量もほぼ直線的に増加する傾向がみられた。

3. 2. 4 材料設計結果

図-7 にシミュレーションで得られた品質評価結果を図-1 に示した基本軸に基づき表示したもの一例を示す。実際の材料設計においてはこの評価結果を用いて対象となる建物の寿命を想定し、おのおのの評価結果の総合的なバランスを考慮して、使用者が相対的に最も要求に近いものを採用することとなる。

図-7 品質評価結果の一例(性能と経済性および環境保全性の関係)

4. まとめ

適切な建築材料の評価および設計法を構築するための基礎資料を得ることを目的に、性能、経済性および環境負荷性の相対的かつ総合的な品質評価および材料設計の方法を提案し、その適合性について大規模鉄骨造建物をモデルに、それに適用可能な外壁材料を対象に検討を行った。その結果をから、大要以下のようなことがいえる。

(1) 本検討で提案した、材料の特性値をグレーディングし、AHP により要求性能を抽出する性能評価方法は、与えられた建物の諸条件をおおよそ適切に反映することが可能であり、使用者の要求に対する材料を設計するための手法として有効である。

(2) 経済性および環境保全性は、ライフサイクルでみた場合、建物の寿命および基材の種類の影響が大きく、算出される値の変動が大きい。従って、適切な材料設計を行うためには、ライフサイクルによる評価が不可欠である。

(3) 本検討で示した品質評価方法は、現時点では性能、経済性および環境負荷性の各評価軸において、評価項目、評価方法が合意されていない、あるいはまだ確立されていない項目等が多く含まれている。しかし、今後、これらの定量的な評価方法が確立されるに伴い順次、組込むことにより、評価精度の向上が期待できる。

(4) 今後は、建築物全般に対する建設行為あるいは維持・保全行為に関わる評価要素の材料設計への展開を踏まえるとともに、外壁材料のみならず屋根、建具、内装材等の各種材料についても検討を行う予定である。

【注 釈】

- 注1) 本検討の一部は 1997 年度日本建築学会学術講演(関東)にて発表した⁵⁾。
- 注2) 得られた結果は、一定の想定条件のもとでシミュレートしたもので、製品自体の採用の決定を行ったものではない。
- 注3) 経済性、環境保全性については、性能評価と同様な評価項目の設定が必要であるが、本検討では定量的な算出が可能な項目のみ評価を行った。
- 注4) 定性的な評価項目については、筆者らがブレンストロミングを行い、グレードを設定した。
- 注5) カタログに記載されていない品質特性を書面に列記し、アンケート形式で製造メーカーへの配布・回収を行い特性値を設定した。
- 注6) 文献¹⁴⁾に示される標準的目標耐用年数は工場の場合、高品質で 40 年以上となっているが、近年の省資源化等における長寿命化の有用性を考慮し、他の用途の普通品質の 60～65 年を標準耐用年数とし、高耐久仕様の場合の目標耐用年数 100 年を上限、鉄骨造電力建物の法定耐用年数 35 年を下限とする 3 つのパラメータを設定することとした。

【謝 辞】

本研究を実施するにあたり、材料設計法の概念について白山和久筑波大学名誉教授より懇切なご指導を頂きました。調査・解析におきましては、東電設計(株):鈴木謙氏、入江潔士氏、前田建設工業(株):小林桂樹氏、吉沢宏一氏、森野聡氏、安見信昭氏、木曾昌志氏、小高信久氏、1995 年度明治大学大学院生:細谷永恵氏、1996 年度明治大学大学院生:呉坪愛子氏に多大なご協力を頂きました。ここに厚く謝意を表します。

【参考文献・資料】

- 1) 建築材料設計研究会編「性能からみた建築材料設計用教材」彰国社 1996.10
- 2) (財) 建材試験センター「平成 9 年度通商産業省工業技術院委託 新発電システム環境評価標準確立調査成果報告書」平成 10 年 3 月
- 3) 村 雄一、佐藤仁人、道正泰弘、牧野真之他「大規模電力建物の外壁材料選定に関する基礎調査(その 1～2)」日本建築学会大会学術講演梗概集(材料・施工) p.p.721-724 1995.8
- 4) 鈴木 謙、道正泰弘、佐藤仁人、村 雄一、牧野真之、菊池雅史、細谷永恵他「大規模電力建物の外壁材料選定に関する基礎調査(その 3～6)」日本建築学会大会学術講演梗概集(材料・施工) p.p.1227-1234 1996.9
- 5) 村 雄一、佐藤仁人、道正泰弘、牧野真之、菊池雅史、小林桂樹他「要求性能に基づく外壁材料選定システムの開発(その 1～5)」日本建築学会大会学術講演梗概集(材料・施工) p.p.1115-1124 1997.9
- 6) 増田 彰、道正泰弘、中込 昭、寺西浩司、菊池雅史「建築構造物の解体に伴い発生するコンクリート廃材のリサイクルシステム-経済性および環境負荷性に関するシミュレーション」日本建築学会技術報告集 No.4 p.p.1-6 1997.12
- 7) 内川祐一郎、道正泰弘、成川匡文、角陸純一、村上一夫他「大規模電力建物のライフサイクルにおける解体行為の評価(その 1～2)」日本建築学会大会学術講演梗概集(材料・施工) p.p.653-656 1998.9
- 8) 例えば、建設省総合プロジェクト「住宅性能総合評価システムの開発研究報告書、建築研究報告 NO.87、1979.3、建設省建築研究所
- 9) 河村 廣、谷 明勲、松本真一、山田 稔「AHP およびファジィ統合則による主観的構造損傷評価の客観的定式化-R/C 建物、柱、耐震壁を対象として」日本建築学会構造系論文報告集 No.389 p.p.42-51 1988.7
- 10) 玄 昌澤、金 文漢「AHP および LCC 概念を利用した最適案選定システムの開発-設備システムの選定を中心に」日本建築学会計画系論文集 No.469 p.p.149-156 1995.3
- 11) 大藤 正、感性の評価-QC に役立つ手法-(2)AHP -言語情報の主観的評価法-、品質管理、1993.2
- 12) 例えば、村上公哉、尾島俊雄、竹林芳久、高部素行「建物の保全費用からみた物理的要因の機能劣化に関する研究」日本建築学会計画系論文報告集、第 418 号、p.p.115-124、1990.12
- 13) 日本建築学会地球環境委員会ライフサイクル CO₂ 小委員会編「ライフサイクル CO₂ を測る-建物の環境負荷評価の手引き-」1996.2
- 14) 建築物の耐久計画に関する考え方 日本建築学会 編 1988.10

(1999 年 3 月 10 日原稿受理、1999 年 7 月 12 日採用決定)