

既存学校施設の長期使用を視野に入れた改修手法に関する研究

- 既存改修と外断熱改修の運用コスト累積差シミュレーション -

REPAIR METHODS FOR EXISTING SCHOOL FACILITIES TO EXTEND USAGE TIME

- SIMULATION OF TOTAL COST DIFFERENCE BETWEEN CONVENTIONAL REPAIR AND EIFS IMPROVING -

平井 健嗣*1, 李 祥準*2, 堤 洋樹*3, 小松 幸夫*4, 高口 洋人*5

Kenji HIRAI, Sangjun Yi, Hiroki TSUTSUMI, Yukio KOMATSU and Hiroto TAKAGUCHI

External Insulation Finishing System (EIFS) have been focused on mainly in cold districts in Japan. But EIFS is effective not only in cold districts but also in other districts in terms of elongation improving. Today in Japan, EIFS is not often used and the cost of EIFS is higher than that of conventional repair. The purpose of this study is to examine the payback period of the cost increment by the use of EIFS. This study is LCC simulation of the cost increment and focuses on electric cost reduction by the use of EIFS, specifically that of air conditioners. The main results are:

1. It is difficult to collect cost increment only by longer repair cycle and cost reduction of materials.
2. For Rooftop repair, built-up roofing with wear course is less expensive than with single-ply roofing in terms of total LCC.
3. In consideration electric cost reduction, payback period of cost increment can be examined 40 years.
4. By extending the time for usage, for example open school after school, payback period of cost increment is extended by 0~15 years.

Keywords: Existing Facilities, Elongation Improving, External Insulation Finishing System, Life Cycle Cost, Payback Simulation,

既存施設, 長寿命化工法, 外断熱工法, LCC, 費用回収シミュレーション

1. はじめに

近年、少子・高齢化社会が到来した我が国では、財政状況の逼迫が始まりつつある。特に政府・自治体の保有する既存建物ストックに関しての運用手法の検討は急を要する。中でも多くの地方自治体では、今後、人口が減少し続けると予想される場合も多く、既存ストックを「解体・建替」によって運用し続けるだけの財源を確保することは難しい。民間では、事務所建築などが概ね40年¹⁾で解体されており、また公立学校施設は国からの補助金を受けている関係で、耐用年数(概ね60年)の過半を経過すると建替が可能となり、それを機に建替を行う事例が多かったという背景がある。

既存ストックを長寿命化、延命化させて運用していくには、従来のような計画性の乏しい維持管理手法ではなく、長期的な視点からの積極的な改修手法の検討が必要である。既存建物ストックの改修を検討する際、空調設備の更新、太陽光パネル、人感センサー、LED照明等については頻りに検討されている。しかし、建築物の外断熱工法に代表される躯体に関する改修手法も同時に検討することが重要であり、投資コストの回収についても併せて検討する必要がある。

2. 既往の研究

外断熱工法を長寿命化改修としての有効性の視点から研究した事例は多くなく、特に本州以南の比較的温暖な地域での研究事例は極めて少ない。外断熱工法の長寿命化の効用については、山形・堺らによって壁面における温度応力によるひび割れ発生の抑制効果について²⁾、申・長谷川らによって押出法ポリスチレンフォームを外断熱に用いた場合のコンクリートの中酸化進行の抑制効果について³⁾⁴⁾⁵⁾、吉野によって外断熱工法により鉄筋腐食開始時期を築後65年から180年に遅らせることが可能である^{6)等}7)8)9)の報告がなされている。これらの既往研究は、外断熱工法の長寿命化改修手法としての物性的な面からの検討を行っている。

一方、今後のストック社会の到来に備え、長寿命化改修手法としての外断熱改修を導入するのであれば、コスト面からの検討も不可欠である。北海道外断熱建築協議会のコスト試算¹⁰⁾によると、新築の場合は、内断熱工法と比べ外断熱工法が割高となると報告されており、断熱材を付加しない場合に比べるとさらに割高になることは明らかである。しかしながら、外断熱工法の導入コストや運用コス

*1 早稲田大学大学院創造理工学研究科 博士課程・修士(工学)

*2 早稲田大学理工学術院創造理工学部建築学科 助手・工修

*3 前橋工科大学建築学科 准教授・博士(工学)

*4 早稲田大学理工学術院創造理工学部建築学科 教授・工博

*5 早稲田大学理工学術院創造理工学部建築学科 准教授・博士(工学)

Graduate Student, WASEDA University, M. Eng.

R. A., Dept. of Architecture, Faculty of Sci. and Eng., WASEDA University, M. Eng.

Assoc. Prof., Dept. of Architecture, MAEBASHI Inst. of Technology, Dr. Eng.

Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Sci. and Eng., WASEDA University, Dr. Eng.

Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Sci. and Eng., WASEDA Univ., Dr. Eng.

トについて、長期的な視点での検討は見られない。

本研究では、学校施設について100年程度の長期使用を前提とし、外断熱改修を行った場合の累積工事費用、また用途変更やエアコン導入などが行われた場合のシナリオを想定し、外断熱工法を導入した場合のコスト増加分回収について概算シミュレーションを行う。

3. 研究の流れ

本研究では、2008～09年にかけて比較的温暖なK県Y市にて行った外断熱改修実験に用いた小学校¹⁾を対象とする。概要を表1に、外観を図1に、基準階平面図を図2に示す。なお、本稿では、対象小学校の給食棟・体育館を除く校舎部について検討する。

表1 対象概要

名称	YZ小学校
所在地	Y市
建築時期	1978年
構造	鉄筋コンクリート造
階数	地上4階建
敷地面積	11,621㎡
延床面積	(校舎部)5,526㎡



図1 対象外観

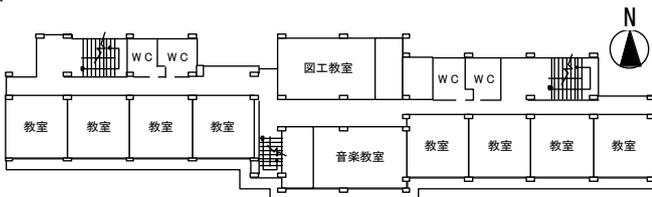


図2 対象平面図(基準階)

外断熱改修実験にあたっては、屋上スラブ、西側壁、南側壁、北側壁、教室天井の各部位の表面温度表面温度の計測を行った。本稿では、外部表面温度の計測値を使用する。図3に外断熱施工部位および熱電対設置部(表面温度計測点)を示す。なお、温度計測は熱電対を用い、10分毎に行った。まず、複数の従来改修手法と外断熱改修のコスト比較を行い、改修周期を設定し、築100年となるまでのLCC概算シミュレーションを行う。次に、エアコン設備が導入済みの場合およびエアコン設備が今後導入された場合を想定し、改修実験を通して得た測定値から運用コスト削減分を算出し、コスト増加分の回収²⁾概算シミュレーションを行う。なお、本稿では、利子率は物価上昇と相殺されるものとして考慮しない。

4. 外断熱改修によるLCC概算シミュレーション

4.1 シミュレーションの概要

1) シミュレーションの目的

まず従来手法による改修と図4のような外断熱工法による改修の場合の工事費用の比較を行う。次に、2010年(築32年)に初回改修を行った後、改修周期を想定した上で築100年まで使用する場合のコストシミュレーションを行い、外断熱改修を行った場合の増加コストの回収について検討する。

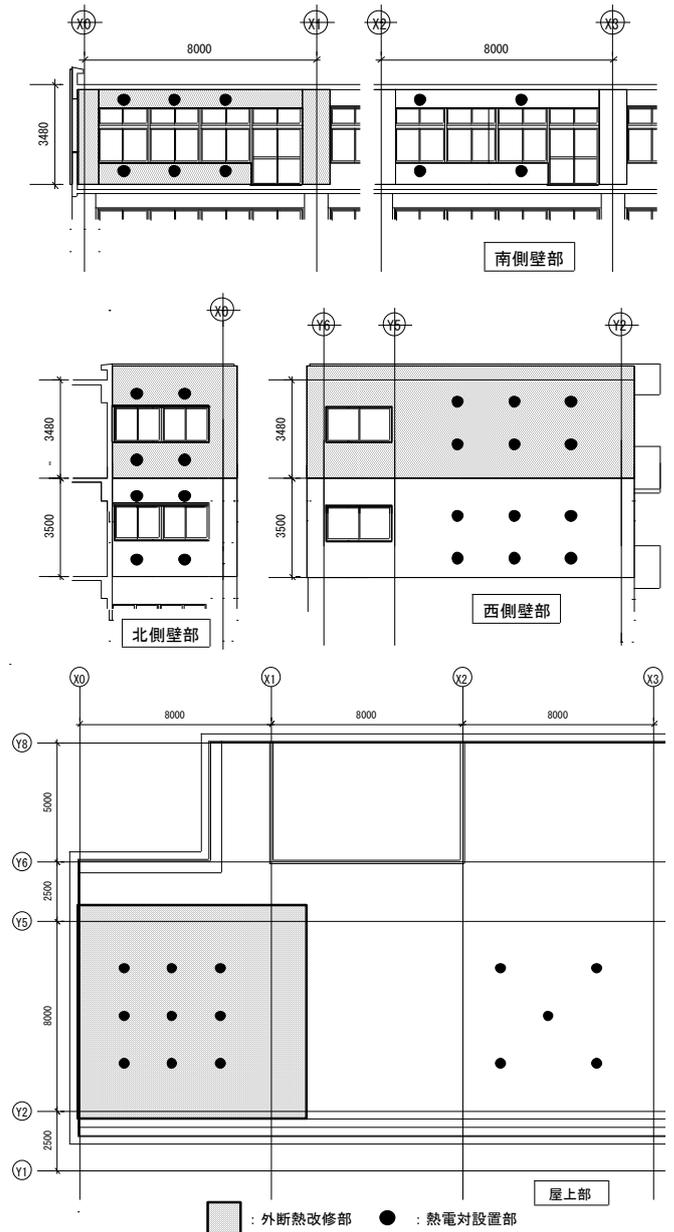


図3 外断熱改修施工部位と熱電対設置部

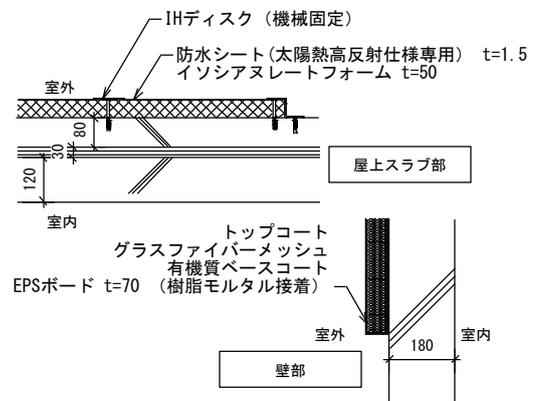


図4 外断熱改修の仕様

2) シミュレーションの方法

初回とその後の更新改修時に分けて検討する。本稿では、仮設工事・躯体補修工事・外壁工事・屋上防水工事について検討する。工事費用算定にあたっては、建築コスト情報¹²⁾、建築施工単価¹³⁾、マンション修繕費用¹⁴⁾を参考に主に標準施工単価を用い、設定のないものはメーカー見積書作成時の施工単価を参考にした。また、改修周期^{注4)}は、日本建築学会¹⁵⁾、BELCA(ロングライフビル推進協会)¹⁶⁾、旧建設省¹⁷⁾¹⁸⁾¹⁹⁾²⁰⁾などによる改修周期を参考とし、設定のないものについては、既往研究²¹⁾²²⁾を参考に表2の通り設定した。なお、窓等の開口部の断熱化は、行わないものとする。

①従来改修と外断熱改修の改修内容

従来改修、外断熱改修の内容を表2の通り設定した。以下に、それぞれの差異について、要点を述べる。

学校施設の外壁改修に際し従来のアクリル樹脂エナメル塗料から複層塗材(RE)へ変更する試み^{注2)}が見られるが、複層塗材(RE)は、硬質塗料のためクラック発生に対する追従性は持ち合わせていない。その結果、コンクリート部の温度変化による影響を直接受けることになり、仕上げが剥がれるリスクが高まる。一方、防水型複層塗材(RE)は、弾性塗料であり、クラック発生時の追従性などの面では複層塗材(RE)よりも優れる²³⁾。ただし、塗材であるということから改修周期^{注4)}については、複層塗材(RE)と同様とする。

屋上部においては、コスト削減や施工性からかぶせ工法が一般的に採用されている。しかしながら、公共建築においては、既存保護層・防水層を撤去した上で、防水工事を行う例も多い。保護層を設けることで、改修周期を伸ばせるメリットもあるが、コスト増加、廃棄物発生などのデメリットもある。

②初回改修時の工事費用

初回改修時の工事内容、留意点を表3に示す。a)仮設工事では、直接仮設工事費のうち、外壁工事を行う際に必要となる枠組み本足場の材工共の工事費を考慮する。b)躯体^{注5)}補修工事では、既存塗膜除去、外壁ひび割れ補修(0.3mm未満、0.3mm以上ダイレクトシール補修、0.3mm以上エポキシ注入補修)、露筋補修(10cm未満、10cm以上)、コンクリート欠損補修を考慮する。外壁ひび割れ補修工事は、従来改修の場合にのみ行う。鉄筋露出補修、コンクリート欠損については構造面の影響も危惧されるため、従来改修・外断熱改修の場合共に補修工事を行う。なお、既存塗膜除去は外壁面全体で行う。それ以外の躯体補修工事については、築年数30年程度の鉄筋コンクリート造でタイル仕上げのない建物において実際に行われた補修工事から、補修項目毎の補修箇所発生率の中央値^{注6)}を用いる。以上を踏まえて算出した工事費用の内訳を表4に示す。

③更新工事費用(2回目以降の改修工事費用)

2回目以降の改修工事時の工事内容、留意点を表5に示す。b)躯体補修工事では、従来改修においては、初回改修時に使用した補修項目別の補修箇所発生率の中央値の25%(1/4)の割合で補修を行うと仮定し^{注7)}、外壁ひび割れ補修、露筋補修、コンクリート欠損補修を考慮する。既存塗膜除去は、外断熱改修・従来改修共に外壁面全体で行う。c)外壁工事では、既往研究²²⁾より断熱材の耐久性は非常に高いため、外断熱改修における断熱材の張替えは想定しない。以上を踏まえて算出した工事費用の内訳を表6に示す。

表2 従来改修と外断熱改修の改修内容(上段:屋上部・下段:外壁部)

ケース	改修内容	改修周期(年)
従来改修 A	シート露出防水(既存保護層にかぶせ工法)	15
	複層仕上塗材(複層塗材 RE)	15
従来改修 B	アスファルト保護防水(既存保護層・防水層は撤去)	30
	複層仕上塗材(複層塗材 RE)	15
従来改修 C	シート露出防水(既存保護層にかぶせ工法)	15
	防水型複層仕上塗材(防水型複層塗材 RE)	15
従来改修 D	アスファルト保護防水(既存保護層・防水層は撤去)	30
	防水型複層仕上塗材(防水型複層塗材 RE)	15
外断熱改修	発泡プラスチック系断熱材 50mm	15
	シート露出防水(既存保護層にかぶせ工法) ビニル法ポリスチレンフォーム 70mm ベースコート+メッシュ+トップコート	20

表3 初回改修工事の工事内容、留意点

種別	工事内容			留意点
	従来改修 A,C	従来改修 B,D	外断熱改修	
a) 仮設工事	枠組み本足場設置			<ul style="list-style-type: none"> 従来改修(A-D)、外断熱改修共通 材料損料、架け手間、運搬量を含む。 屋上防水工事の際は考慮しない。
b) 躯体補修工事	既存塗膜除去			<ul style="list-style-type: none"> 従来改修(A-D) 既存塗膜除去...高圧水洗(50-100Mpa)
	露筋補修			<ul style="list-style-type: none"> 外断熱改修 既存塗膜除去...高圧水洗(30-50Mpa)
	コンクリート欠損補修			
c) 外壁工事	外壁ひび割れ補修			<ul style="list-style-type: none"> 従来改修(A-D)、外断熱改修共通 外壁目地、シーリングは考慮しない。
	素地調整			
	塗材吹付			
			断熱材接着	
			ベースコート塗	
d) 屋上防水工事	既存保護層撤去			<ul style="list-style-type: none"> 従来改修(A-D)、外断熱改修共通 廃材処理費は考慮していない。 伸縮目地設置、入隅部の銅板、押え金物などについては考慮しない。 屋上部の手摺等の設置物および笠木、ドレイン設置は考慮しない。
	既存防水層撤去			
	下地処理			
	下地調整			
	防水層新設			
	保護層新設			<ul style="list-style-type: none"> 外断熱改修 下地処理はケレン・清掃程度とする。
	断熱材敷設			
	防水シート設置			

表4 初回改修時の工事費用

ケース	仮設工事	躯体補修工事	外壁工事	屋上工事	合計
従来改修 A	3,778,000	6,940,000	6,480,000	6,179,000	23,377,000
従来改修 B	3,778,000	6,940,000	6,480,000	7,520,000	24,719,000
従来改修 C	3,778,000	6,940,000	9,144,000	6,179,000	26,041,000
従来改修 D	3,778,000	6,940,000	9,144,000	7,520,000	27,382,000
外断熱改修	3,778,000	1,297,000	33,299,000	11,777,000	50,151,000

(円)

表5 更新工事（2回目以降の改修工事）の工事内容、留意点

種別	工事内容			留意点
	従来改修 A,C	従来改修 B,D	外断熱改修	
a) 仮設工事	枠組み本足場設置			<ul style="list-style-type: none"> 従来改修(A-D)、外断熱改修共通 材料損料、架け手間、運搬量を含む。 屋上防水工事の際は考慮しない。
b) 躯体補修工事	既存塗膜除去			<ul style="list-style-type: none"> 従来改修(A-D)、外断熱改修共通 既存塗膜除去...高圧水洗(30-50Mpa)
	露筋補修			
	コンクリート欠損補修			
c) 外壁工事	外壁ひび割れ補修			<ul style="list-style-type: none"> 従来改修(A-D)、外断熱改修共通 外壁目地、シーリングは考慮しない。
	素地調整			
d) 屋上防水工事	塗材吹付			<ul style="list-style-type: none"> 外断熱改修時 断熱材の貼替えは行わない。
	トッポコートメンテナンス			
	既存保護層撤去			
	既存防水層撤去			
d) 屋上防水工事	下地処理			<ul style="list-style-type: none"> 従来改修 A,C 下地処理はケレン・清掃程度とする。 既存シートの撤去は行わない。
	下地調整			
	防水層新設			
	保護層新設			
	防水シート設置			
	防水シート設置			<ul style="list-style-type: none"> 外断熱改修 下地処理はケレン・清掃程度とする。 既存シートの撤去は行わない。 断熱材の貼替えは行わない。

表6 更新工事費用（2回目以降の改修工事費用）

ケース	仮設工事	躯体補修工事	外壁工事	屋上工事	合計
従来改修 A	3,778,000	1,376,000	6,480,000	5,213,000	16,848,000
従来改修 B	3,778,000	1,376,000	6,480,000	6,554,000	18,189,000
従来改修 C	3,778,000	1,376,000	9,144,000	5,213,000	19,512,000
従来改修 D	3,778,000	1,376,000	9,144,000	6,554,000	20,853,000
外断熱改修	3,778,000	1,285,000	10,246,000	5,213,000	20,522,000 (円)

4.2 シミュレーションの結果

1) シナリオ 1-1

2010年（築32年）の段階で、初回改修を行い、設定した改修周期で築100年となるまでの更新を行う。図5に、設定期間における累積工事費用の推移を示す。

外断熱改修によって延長される外壁の改修周期や、屋上部の撤去費用が不要であるという効果のみでは外断熱改修が設定期間内に従来改修 A~D の累積工事費用を下回することは難しい。これは、初回改修時の工事費用増加分が大きく、2回目以降の改修工事でも外断熱改修の場合の方が割高な工事となること（対従来改修 A~C）や、割安となる場合（対従来改修 D）であってもその削減分が初回増加分に比べ小さいことが起因している。しかしながら、15年後、30年後、45年後、60年後といった従来改修における更新工事の時期には、工事費用差が一時的に小さくなることもわかる。また、従来改修 B は防水層の撤去を伴う改修であっても、改修周期がシート防水に比べ長いことから累積工事費用は最も低くなる。

図6に設定期間における累積工事費用の工事種別の割合を示す。設定期間内の累積工事費用を見ると、外断熱改修の場合、仮設工事、躯体補修工事の占める割合が従来改修と比べ小さくなる。また、屋上防水工事の占める割合は、従来改修の場合とほぼ同程度である。外壁工事の占める割合は、非常に大きく55%となる。また、外断熱改修では、設定期間（築100年まで）における累積工事費用の42%が初回改修時のものであった。

2) シナリオ 1-2

シナリオ 1-1 と同様の改修を行う。外断熱工法が普及している北

米や欧州^{註9)}に比べ、我が国の現状では外断熱改修は割高とされている。シナリオ 1-2 では、諸外国の施工費用を参考に、外断熱改修の初回および2回目以降の改修工事における外壁および屋上防水工事の材料費がそれぞれ50%低下した場合と70%低下した場合を想定する。なお、施工費用の内訳については、労務費：材料費=1：1と想定した。図7に、設定期間における累積工事費用の推移を示す。

外断熱改修の材料費が50%低下した場合でも、対従来改修 A、B では、外断熱改修の累積工事費用は下回らなかった。対従来改修 C の場合は、15年後（屋上防水改修時）に一時的に外断熱改修の累積工事費用が従来改修を下回る。その後、45年後までは互いの累積工事費用が上回ることと下回ることを繰り返す。45年後以降は、外断熱改修の累積工事費用が下回る。対従来改修 D では、60年後以降は外断熱改修の累積工事費用が下回り続ける。

また、外断熱改修がかなり普及し材料費が70%低下すると仮定した場合には、対従来改修 B を除いて、45年後以降、外断熱改修の累積工事費用が従来改修を下回る。

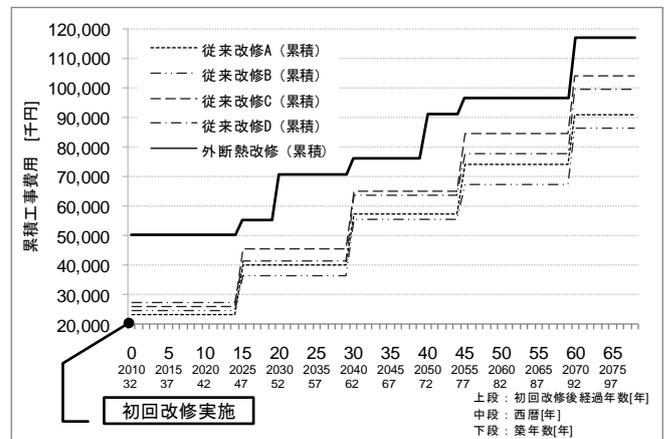


図5 累積工事費用の推移（シナリオ 1-1）

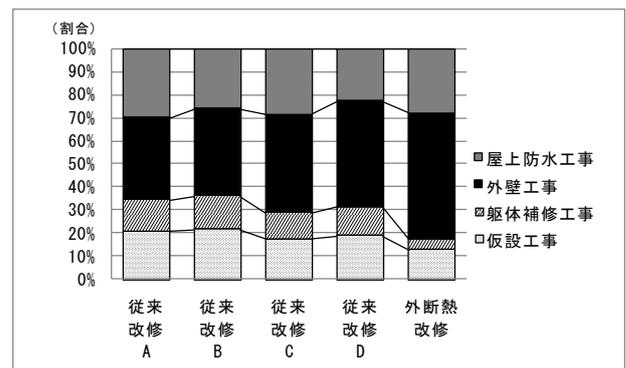


図6 累積工事費用の工事種別の割合

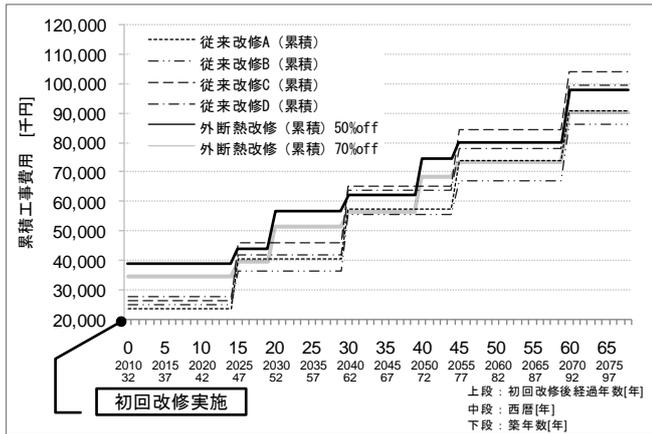


図7 累積工事費用の推移（シナリオ1-2）

表7 運営シナリオ

シナリオ	概要
2-1	初回改修（屋上・外壁部）時にエアコンの導入を行い、冷暖房を授業時間内に行う。
2-2	初回改修（屋上部のみ）時にエアコンの導入を行い、冷暖房を授業時間内に行う。
2-3	初回改修（屋上・外壁部）時にエアコンの導入を行い、冷暖房を授業時間内に行う。学校開放を午後9時までに行い、施設の使用時間を延ばす。
2-4	初回改修（屋上・外壁部）後、10年経過した時点で用途変更を行い、施設使用時間を24時間とする。なお、エアコンの導入は、用途変更時点とする。

表8 エアコン運転設定（日数・時間）

	運転種別・内部設定温度[°C]	シナリオ2-1・2-2		シナリオ2-3		シナリオ2-4	
		運転日数	運転時間	運転日数	運転時間	運転日数	運転時間
6月	OFF						
7月	冷房・26°C	15	9:00 15:00	15	9:00 21:00	31	0:00 24:00
8月	冷房・26°C	0		0		31	
9月	冷房・26°C	20		20		30	
10月	OFF						
11月	暖房・19°C	10		10		10	
12月	暖房・19°C	15		15		31	
1月	暖房・19°C	15		15		31	
2月	暖房・19°C	20		20		28	
3月	暖房・19°C	15		15		15	
4月	暖房・19°C	10		10		10	
5月	OFF						

表9 各部位の熱貫流率 (K)

	従来改修A・C	従来改修B・D	外断熱改修
壁面	4.19[W/m ² ・K]	4.19[W/m ² ・K]	0.36[W/m ² ・K]
屋上スラブ	1.81[W/m ² ・K]	1.84[W/m ² ・K]	0.34[W/m ² ・K]

次式の通り外断熱改修による削減熱量を求める。

$$Q_{\text{外断熱改修}} = \Delta t_{\text{外断熱改修}} \times K_{\text{外断熱改修}} \times \text{部位面積} \quad \dots(1)$$

$$Q_{\text{従来改修}} = \Delta t_{\text{従来改修}} \times K_{\text{従来改修}} \times \text{部位面積} \quad \dots(2)$$

$$\Delta Q = Q_{\text{従来改修}} - Q_{\text{外断熱改修}} \quad \dots(3)$$

Δt : 外部表面温度と内部設定温度の温度差
 K : 熱貫流率^{注13)} (表9に示す)
 ΔQ : 外断熱改修による削減熱量

1日の運転時間内で ΔQ の積分を行い、月運転日数を乗ずることで1か月あたりの外断熱改修による削減熱量とする。その値から削減消費電力を算出した結果を外断熱改修による電力料金^{注10)}コスト削減分とする。また、年間ピーク時の消費電力量差から基本料金^{注10)}コスト削減分を算出する。表10にエアコン運転によるコスト削減分を示す。

5. 運用コスト削減分による工事費用増加分回収シミュレーション

5.1 シミュレーションの概要

1) シミュレーションの目的

4.のシミュレーションより、外壁部の改修周期が長くなることや、改修工事費用の削減による効果のみでは、外断熱改修による工事費用増加分を回収することは難しいことが明らかになった。そこで、現在エアコン設備が一部の学校施設で導入されていること、導入を検討する学校施設が多数存在することを背景に、外断熱のメリットである各部位の流入および損失熱量の削減量に注目する。

ここでは、従来改修と外断熱改修の場合の各部位における温度差の実測値から、エアコン運転時の運用コスト削減分を求める。その削減分によって、工事費用増加分の回収^{注9)}について検討する。なお、本シミュレーションでは、校舎部についての検討を行うこととする。

2) シミュレーションの方法

外断熱改修の場合、材料費は現状のものを使用する。本稿では、壁面および屋上スラブからの夏期の熱流入、冬季の熱損失の差異に注目し、その他の条件については、外断熱の有無に関わらず同条件となるとして考慮しないこととする。

熱流入量および損失量は、定常条件下を想定し、2008年から2009年にかけて行った外断熱改修実験¹¹⁾ ^{注11)}より得た屋上部、西側壁部、北側壁部および南側壁部の外部表面温度を利用する。この際、従来改修A~Dの外部表面温度は、改修実験の際に計測した未改修部のものを採用する。また、各月の計測データを平均化し、1日の平均データを作成し、熱流入量および損失量算出に使用する。なお、東側壁部については、計測を行っていないので考慮しない。^{注9)}

導入されるエアコンはEHP方式とし、COP=3（冷房時）および4（暖房時）とし、東京電力(株)業務用電力^{注10)}契約時を想定する。なお、エアコン導入費用、メンテナンス費用は外断熱改修と従来改修の間に差がないため考慮しない。運転条件は、現在エアコンを導入済みの自治体運用基準^{注11)}、アンケート調査^{注12)}の結果を参考にする。

また、今後の運営について、表7のようなシナリオを設定し、表8に、シナリオ2-1~2-4のエアコン運転設定を示す。

表 10 エアコン運転によるコスト削減分

	電力料金コスト削減分		基本料金コスト削減分		コスト削減分の合計	
	対 従来改修 A・C	対 従来改修 B・D	対 従来改修 A・C	対 従来改修 B・D	対 従来改修 A・C	対 従来改修 B・D
7月	6,565 4,031 12,598 25,738	6,676 4,474 12,565 26,092			58,853 15,274 64,036 80,013	59,173 15,927 64,206 80,614
8月	0 0 0 146,387	0 0 0 147,206			52,288 11,243 51,438 200,662	52,497 11,453 51,641 201,728
9月	6,818 4,031 14,095 21,083	6,919 4,136 14,192 21,315			59,106 15,274 65,533 75,358	59,416 15,589 65,833 75,837
10月	0 0 0 0	0 0 0 0			52,288 11,243 51,438 54,275	52,497 11,453 51,641 54,522
11月	7,192 869 14,060 36,043	7,207 884 14,108 36,201			59,480 12,112 65,498 90,318	59,704 12,337 65,749 90,723
12月	19,483 3,177 37,908 185,974	19,537 3,232 38,046 186,779	52,288 11,243	52,497 11,453	71,771 14,420 89,346 240,249	72,034 14,685 89,687 241,301
1月	27,700 4,577 53,758 254,031	27,780 4,657 53,946 255,063	51,438 54,275	51,641 54,522	79,988 15,820 105,196 308,306	80,277 16,110 105,587 309,585
2月	41,386 7,095 80,397 240,752	41,518 7,227 80,677 241,689			93,674 18,338 131,835 295,027	94,015 18,680 132,318 296,211
3月	19,608 1,964 37,071 90,461	19,641 1,997 37,162 90,781			71,896 13,207 88,509 144,736	72,138 13,450 88,803 145,303
4月	563 1,956 1,872 1,801	607 2,012 1,938 1,866			52,851 13,199 53,310 56,076	53,104 13,465 53,579 56,388
5月	0 0 0 0	0 0 0 0			52,288 11,243 51,438 54,275	52,497 11,453 51,641 54,522
6月	0 0 0 0	0 0 0 0			52,288 11,243 51,438 54,275	52,497 11,453 51,641 54,522
計	129,315 27,700 251,759 1,002,270	129,885 28,619 252,634 1,006,992	627,456 134,916 617,256 651,300	629,964 137,436 619,692 654,264	756,771 162,616 869,015 1,653,570	759,849 166,055 872,326 1,661,256

(円)

- 1 段目：シナリオ 2-1
- 2 段目：シナリオ 2-2
- 3 段目：シナリオ 2-3
- 4 段目：シナリオ 2-4

5.2 シミュレーションの結果

1) シナリオ 2-1

シナリオ 1-1 に加え、校舎部にエアコンを導入した場合の年間のエアコン運転における外断熱改修によるコスト削減分として、使用電力量の差による電力料金および基本料金の削減分を考慮する。図 8 に、設定期間における運用コスト累積差^{注 10)}の推移を示す。

対従来改修 A の場合、30 年後に一旦費用増加分を回収できるが、45 年を過ぎないと費用増加分の回収は完了できない。対従来改修 B の場合は、30 年後に初めて一旦回収が可能となるが、44 年後までは拮抗状態が続く。対従来改修 C、D の場合は、15、18 年後に一旦回収が可能となるが、回収が完了するのは共に 30 年後である。

いずれの従来改修と比較した場合も、遅くとも 30 年程度で拮抗状態を迎えることになり、40 年程度で外断熱による増加費用の回収を完了することができる。シナリオ 1-1、1-2 に比べ費用増加分の回収完了となるまでの期間は短縮され、エアコン運転費用の削減が工事費用増加分の回収に寄与することが認められた。

2) シナリオ 2-2

屋上部のみに外断熱改修を行い、外壁改修は従来改修を行う想定で、築 100 年となるまでの更新を行う。なお、屋上部断熱による効果のみを想定するので、熱量および運転費用の削減分は、屋上部からの熱流入量、損失量のみを検討対象とする。図 9 に、運用コスト累積差^{注 10)}の推移を示す。なお、外壁改修は、比較対象とする従来改修手法の場合と同じとする。また、従来改修 A と C および従来改修 B と D は、改修内容が同じであるため、まとめて扱う。

従来改修 A、C といったシート防水による改修と比較した場合、28 年後に費用増加分の回収は完了する。また、従来改修 B、D といった既存撤去を伴う改修と比較した場合は、43 年後に一旦回収状態となるものの、60 年後に回収が完了する。

3) シナリオ 2-3

シナリオ 1-1 と同様の改修を行うが、放課後に学校が午後 9 時まで利用される場合（一般開放など）を想定する。図 10 に、運用コスト累積差^{注 10)}の推移を示す。従来改修と比較した場合、エアコン運転時間がシナリオ 2-1 に比べ 6 時間延びることで削減効果が累積し、毎年約 87 万円の費用削減が可能となる。いずれの従来改修と比較しても回収完了の時期が早まり、シナリオ 2-1 に比べ 0～15 年程度早まったことがわかる。なお、拮抗状態の期間は、いずれの従来改修と比較しても大差なかった。

4) シナリオ 2-4

シナリオ 1-1 と同様の改修を行い、10 年後に学校としての用途が住宅、介護福祉施設など（エアコンが 1 日中運転されるケースの多い用途）に変更され、それを機にエアコンが新設される場合を想定する。図 11 に、運用コスト累積差^{注 10)}の推移を示す。

エアコン運転時間が 24 時間となることで、費用削減効果は非常に大きくなり、年間約 170 万円の費用削減を見込むことができる。従来改修 C と比較した場合、初回改修後、15 年後から 23 年後の期間で拮抗状態となり、24 年後に回収完了となる。また、従来改修 C 以外でも 30 年後には回収完了となり、30 年後以降はいずれの従来改修と比較した場合でも費用の回収が完了する。なお、学校としての使用期間が 10 年間あることから、回収完了までの期間は用途変更後 15～20 年である。

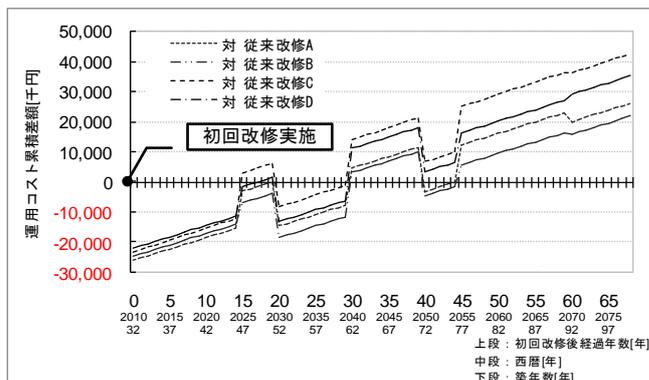


図8 運用コスト累積差額の推移 (シナリオ 2-1)

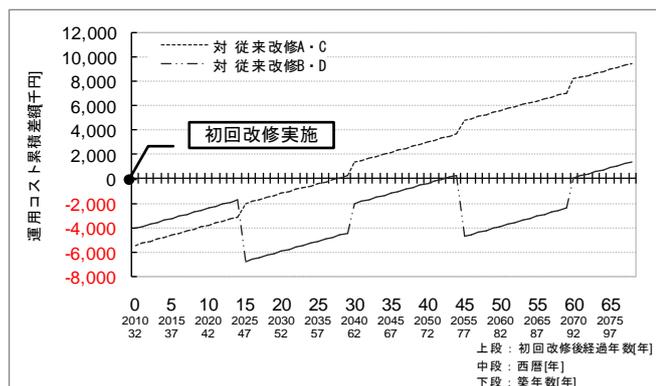


図9 運用コスト累積差額の推移 (シナリオ 2-2)

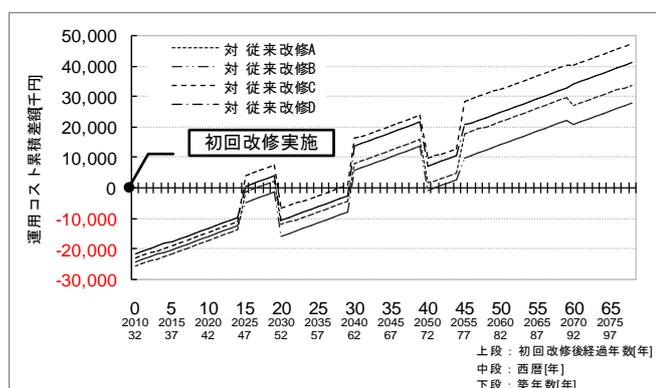


図10 運用コスト累積差額の推移 (シナリオ 2-3)

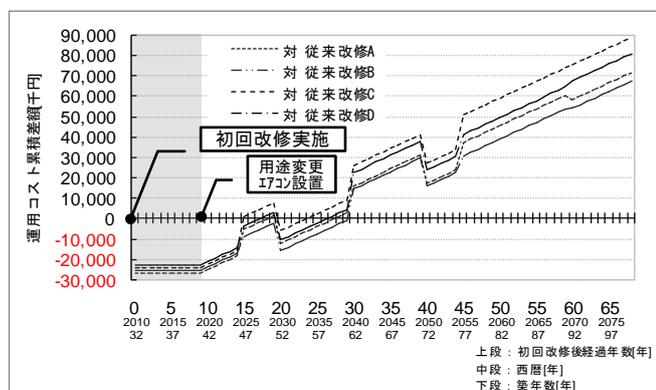


図11 運用コスト累積差額の推移 (シナリオ 2-4)

6. まとめ

本稿では、今後の公共施設の中でも学校施設に着目し、長寿命化工法として期待できる外断熱工法を採用した場合における、100年程度の長期使用を前提とした場合の累積工事費用の検討を行った。また、エアコン導入や用途変更が行われた場合などのシナリオを想定し、外断熱工法を導入した場合のコスト増加分の回収概算シミュレーションを、実際に改修実験を行った学校施設をモデルとして行った。以下に本稿を通じて得られた知見を示す。

1) 外断熱改修によって、改修周期を伸ばせる効果や、撤去を行わずに施工が可能、躯体補修を抑制できるという効果のみで、導入時の工事費用増加分を回収することは難しい。

- 2) 外断熱改修の場合、累積工事費用において、外壁工事が最も大きな割合を占める。
- 3) エアコン運転時には外断熱改修による運転費用削減コストによって、外断熱改修導入による増加コストを改修後40年程度で回収することが可能である。また、回収完了状態ではないが、拮抗状態となるまでには、早ければ15年程度、遅くとも30年程度必要である。
- 4) 屋上防水について既存撤去を含む手法は、屋上防水工事の改修周期が長いことで、累積工事費用で見ると低額となる。
- 5) エアコン導入時には、放課後の学校開放などによって使用時間が延びると、外断熱改修によるエアコン運用コスト削減効果の累積を期待でき、0~15年程度回収完了時期が早まる。
- 6) 将来、長時間エアコンを使用する用途への変更を想定する場合は、比較的早期に外断熱改修による増加コストの回収が可能である。

外断熱改修時のコスト増加という課題はあるが、外断熱改修には長寿命化工法としてのメリットも存在する。

従来改修の場合、外壁改修の際に追従性を持たない塗材を使用するケースが多く、その場合、塗材にクラックが発生した場合は、水や二酸化炭素の侵入によるコンクリートの劣化を促進させ、更新時の躯体補修費の増加につながる。その結果、大幅な補修コスト増加や、想定していた長期間の使用が不可能となることも危惧される。

また、屋上防水改修については、効率的であるとされるかぶせ工法よりも、アスファルト保護防水の方が更新期間の長くなるため累積工事費用が低額となる場合が多いことがわかった。しかしながら、騒音、施工中の雨養生など、解決したいアスファルト保護防水の課題もある。この点については、アップサイドダウン工法(USD工法)のように防水層の上に断熱層を設け、さらにその上に保護層を設けるものも選択肢の一つであろう。²⁴⁾²⁵⁾一方、エアコン運転費用削減によって、外断熱改修によるコスト増加分回収の可能性が明らかになったので、エアコンを既に導入している学校施設においても、外断熱改修の積極的な導入を考慮すべきである。

今後は、学校施設以外の建物を検討対象とすること、外断熱改修以外の長寿命化改修を採用した場合との比較、またコスト比較の精度向上のため、躯体補修を行った部分の不具合発生状況や改修周期についての検討等が課題である。

謝辞

実験・調査にあたり、綿半鋼機(株)、アーキヤマデ(株)、STO ジャパン(株)、野原産業(株)、横浜市教育委員会、藤沢市教育委員会の皆様に全面的なご協力を得ました。この場を借りて御礼申し上げます。なお、本研究の一部に財団法人トステム建材産業振興財団平成19年度(第16回)助成金の助成を受けました。最後に、研究を進めるにあたりご助言を頂戴した板谷敏正氏、金政秀氏(当時、早稲田大学大学院)に心より感謝申し上げます。

注

注1) K県Y市にて、廃校舎の一部(最上階西端教室の西・南・北側壁面と教室上部の屋上スラブ)に外断熱改修を行い、外壁面および屋上外部表面の表面温度の計測を行った。計測期間は2008年8月から2009年8月である。なお、本稿では、教室の窓が密閉されている場合の計測結果から、月

毎に平均化された1日のデータを用いる。

- 注2) 本稿では、外断熱改修の累積コスト(工事費用・エアコン運転費用)が従来改修の場合と比べて下回った場合を回収と呼ぶ。
 注3) 平成12年策定「公共工事コスト削減対策に関する新行動指針」
 注4) 参考文献による改修周期は、下表の通りである。本稿では、その中でも、最も改修周期の長いものを用いた。

表 各参考文献による改修周期

材料	日本建築学会	旧建設省	BELCA
シート露出防水		13	15
アスファルト保護防水	20	30	30
複層塗材		10	15
防水型複層塗材			

なお、防水型複層塗材は塗材であるということから複層塗材と同様とする。

- 注5) 躯体の範囲は、外壁部・柱部とする。
 注6) 早稲田大学小松幸夫研究室で収集した集合住宅の大規模改修時の見積書30サンプルから、補修項目毎の補修箇所発生率(中央値、最小値、最大値)を算出し、本稿では中央値を用いた。

表 補修箇所発生率

補修項目	発生率[%]		
	最小値	中央値	最大値
外壁ひび割れ補修工事 (0.3mm未満)	0.67	3.53	19.41
外壁ひび割れ補修工事 (0.3mm以上) ダイレクトシール補修	0.00	0.42	1.96
外壁ひび割れ補修工事 (0.3mm以上) エポキシ注入補修	0.00	1.14	20.01
露筋補修 (10cm未満)	0.00	0.14	1.71
露筋補修 (10cm以上)	0.00	0.00	0.74
コンクリート欠損補修	0.00	0.00	1.87

なお、補修項目毎の補修箇所発生率は、
 外壁ひび割れ補修工事…発生率[%]=(補修長さ[m]/延床面積[m²])×100
 露筋補修工事…発生率[%]=(補修箇所[箇所]/延床面積[m²])×100
 コンクリート欠損工事…発生率[%]=(補修箇所[箇所]/延床面積[m²])×100とする。

- 注7) 下図の通り、補修箇所発生密度(故障密度)と補修箇所発生率(不信頼度) ※故障密度の時間による積分値)を仮定した。

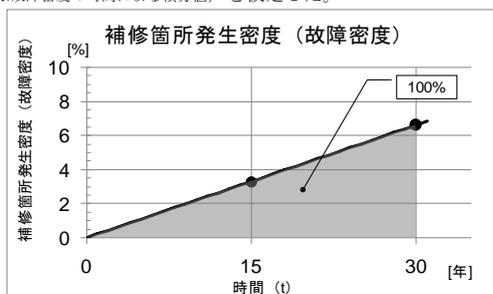


図 補修箇所発生密度(故障密度)

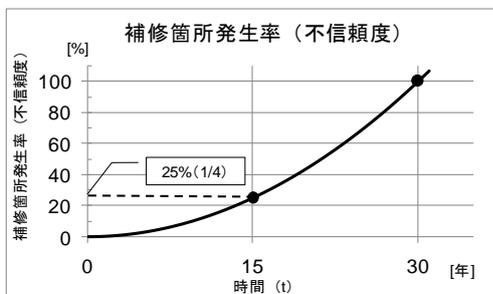


図 補修箇所発生率(不信頼度)

補修箇所発生密度は、改修後、徐々に上昇するとして、30年間を基準とした場合の15年間における値(補修箇所発生率=25%(1/4))を算出した。

- 注8) 調査の結果、欧米においては、イタリア・ロンバルディア州で約60

ユーロ/m²(6,900円/m²:1ユーロ115円)程度であり、ドイツ・ウルム市で約80ユーロ/m²(9,200円/m²:1ユーロ115円)程度、北米(National Association of Home Builders傘下のNAHB Research Center, Ducker Worldwide等による)では、50~80ドル/m²(4,250円~6,800円/m²:1ドル85円)程度とされている。本研究では外断熱改修費用としては13,000円/m²(材料費+労務費)として検討を行った。

- 注9) 東側壁については、本研究における実測調査では測定がなされていないため、熱量については算出できず検討していない。そこで、東側壁は両者(外断熱改修:従来改修)共に断熱しないという前提で、差は0(外断熱改修による効果を含んでいない)となり、研究結果においては安全側(厳しい側)で検討している。

- 注10) 東京電力(株)業務用電気使用約款より、
 基本料金 : 契約電力1キロワットにつき1,638円00銭
 電力料金 : 夏季料金…13円75銭・その他季…12円65銭
 基本料金削減コストは、各月の消費電力量の削減熱量が最大となる場合を算出し、年間で最大となるものに対して1キロワットにつき1,638円を乗じたものとする。

- 注11) 練馬区教育委員会ではエアコン運用基準を以下のように定めている。

運転期間 : 冷房 : 6月初旬から9月下旬まで
 暖房 : 11月初旬から3月下旬まで
 運転時間 : 8時30分から17時まで
 運転開始 : 冷房 : 室内温度が扇風機を使用した状態で28℃を上回るとき
 暖房 : 室内温度が19℃を下回るとき
 設定温度 : 冷房 : 室内温度28℃(扇風機を併用すること)
 暖房 : 室内温度19℃

また、芦屋市教育委員会では、以下のように定めている。

運転期間 : 冷房 : 6月中旬から9月中旬まで
 暖房 : 概ね12月上旬から3月中旬まで
 運転時間 : 授業時間内を基準とする
 設定温度 : 冷房 : 25~28℃
 暖房 : 基本的に18℃

- 注12) 2008年7月に行った藤沢市の公立小学校に対するアンケート調査では、担任教諭らから以下の回答を得た。

設定温度 : 冷房 : 26~27℃

- 注13) 熱貫流率算出にあたっては、下表の熱伝導率を用いた。

表 各材料の熱伝導率

材料	熱伝導率[W/m・K]
鉄筋コンクリート	1.4
アスファルト防水層	0.106
押さえコンクリート	0.802
断熱材(イソシアヌレートフォーム)	0.021
断熱材(EPSボード)	0.039
塩化ビニルシート	0.170

また、室内側熱伝達抵抗は、屋上部=0.09[m²・K/W]、壁部=0.11[m²・K/W]とした。

- 注14) 本稿では、外断熱改修時を基準とした場合の累積工事費用およびエアコン運転による削減コストを考慮したものを運用コスト累積差とする。

参考文献

- 1) 小松幸夫, 島津護: 竣工記録に基づいた事務所建物の寿命調査, 日本建築学会構造系論文集 第565号, pp.317-322, 2003.3
- 2) 山形英之, 塚孝司, 藤田裕二, 真鍋忠晴: RC造集合住宅の耐久性に対する外断熱の温度応力抑制効果に関する研究, コンクリート工学年次論文集 Vol.26 No.2, pp.1675-1680, 2004
- 3) 申雪寒, 長谷川寿夫, 吉野利幸: 外断熱工法の透気性と躯体コンクリートの中性化に関する研究, 日本建築学会技術報告集, 第18号, pp.21-24, 2003.12
- 4) 申雪寒, 長谷川寿夫: 躯体コンクリートの中性化に及ぼす外断熱工法の透気性に関する研究, 日本建築学会北海道支部研究報告集, No.76, pp.9-12, 2003.6
- 5) 申雪寒, 長谷川寿夫: 外断熱建物躯体コンクリートの中性化に関する調査, 日本建築学会北海道支部研究報告集, No.77, pp.1-4, 2004.7
- 6) 吉野利幸: 外断熱による建物耐久性の向上, RC造外断熱工法ハンドブック

- ク 2003 年度版, 北海道外断熱建築協議会, pp.17-20, 2003.1
- 7) 柳 清峻, 大野義照: 中性化したコンクリート中の鉄筋腐食に及ぼすひび割れと水セメント比の影響, 日本建築学会構造系論文集, 第 559 号, pp.15-21, 2002.9
 - 8) 福島敏夫, 川瀬清孝: 外断熱化した鉄筋コンクリート造外壁の耐久性予測, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A, pp.121-122, 1985.10
 - 9) 伊庭千恵美, 鈴木大隆, 北谷幸恵, 桂修: 断熱されたコンクリート壁体の耐久性評価に向けた基礎実験その 2 (断熱工法が中性化に与える影響), 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-2, pp.461-462, 2005.9
 - 10) RC 造外断熱工法ハンドブック 2003 年度版: 北海道外断熱建築協議会, 2003.1
 - 11) 平井健嗣, 今井大樹, 李祥準, 堤洋樹, 小松幸夫, 新谷真人: 既存建築物の長寿命化を視野に入れた改修手法に関する研究 - 外断熱改修の実測調査による温度応力から見た長寿命化への可能性 -, 日本建築学会計画系論文集 Vol.76 No.659, pp.169-177, 2011.1
 - 12) 季刊 建築コスト情報 2009.4 春, (財)建築物価調査会, 2009.4
 - 13) 季刊 建築施工単価 09-10 秋, (財)経済調査会, 2009.10
 - 14) 大規模修繕単価研究会: マンション修繕費用 05 後期版第 4 号, (財)経済調査会, 2005.5
 - 15) 日本建築学会建築経済委員会: 耐火建築物の維持保全に関する研究 (学校・病院・事務所・アパートの修繕費), 1953.11
 - 16) BELCA (建築設備維持保全協会): 建築物の LC 評価用データ集 (改訂版), 2001.8
 - 17) 建設大臣官房官庁営繕部: 改訂 建物のライフサイクルコスト, (財)経済調査会, 2000.5
 - 18) 建設大臣官房技術調査室: 保全・耐久性向上技術の経済性評価手法, 技報堂出版, 1986.7
 - 19) 建設大臣官房技術調査室: 鉄筋コンクリート造建築物の耐久性向上技術, 技報堂出版, 1986.6
 - 20) 建設大臣官房技術調査室: 外装仕上げの耐久性向上技術, 技報堂出版, 1987.3
 - 21) Helmut Künzel, Hartwig M. Künzel, Klaus Sedlbauer: 複合外断熱システムの長期性状, fraunhofer 建築物理研究所 IBP IBP-Report 461, 2005
 - 22) 平山 善吉, 半貫 敏夫, 坪内 信朗, 高橋 弘: 南極昭和基地無電線のパネル構成要素の経年変化と耐久性, 南極資料 46(2A), pp.432-445, 2002.9
 - 23) 久保田浩, 松橋 俊一: 防水形複層塗材の屋外暴露によるひび割れ追従性の評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp.999-1000, 1996.7
 - 24) 松村知子, 相馬正美, 志村重顕, 松川忠文, 清水市郎: 屋根断熱防水工法 (USD 工法) の経年劣化に関する調査研究その 1 (施工後 25 年経過したアスファルト防水層の劣化診断), 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp.849-850, 2005.7
 - 25) 志村重顕, 相馬正美, 松村知子, 松川忠文, 清水市郎: 屋根断熱防水工法 (USD 工法) の経年劣化に関する調査研究その 2 (施工後 10,20,25 年経過したアスファルト防水層の比較検討), 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp.851-852, 2005.7