

| | |
|------|--------------------------------------|
| タイトル | 北海道における外断熱改修の鉄筋コンクリート躯体に対する有効性に関する研究 |
| 著者 | 足立, 裕介; Adachi, Yusuke |
| 引用 | 工学研究: 北海学園大学大学院工学研究科紀要(23): 9-19 |
| 発行日 | 2023-09-30 |

北海道における外断熱改修の鉄筋コンクリート躯体に対する有効性に関する研究

足立 裕介*

A Study on the Effectiveness of Exterior Thermal Insulation Renovation
for Reinforced Concrete Buildings in Hokkaido

Yusuke Adachi*

要 旨

北海道に1960年代から70年代にかけて建設され、1980年代に外断熱改修された6棟の鉄筋コンクリート造建築物の、外断熱の外観状況および背面状況、鉄筋コンクリート躯体の外観状況、中性化深さおよびかぶり厚さ、鉄筋の腐食状況を調査した。そのうち、本研究では鉄筋コンクリート躯体に関する結果を報告する。調査および分析の結果、外断熱により鉄筋コンクリート躯体は十分に保護され、外断熱により鉄筋腐食の確率が45~78%低減されること、外断熱材の接着方法が異なっても、外断熱材は中性化深さを30%以上抑制できることを明らかにした。また、北海道において中性化深さが増大する傾向にあった壁において、外断熱により中性化がさらに抑制されることを明らかにした。具体的には、日光により乾燥しやすい外壁面では外断熱により中性化が最大35%減少し、水の影響を受ける表面では49%減少した。

1. 序論

外断熱工法とは、鉄筋コンクリート（以下RCと略記）造などの構造体の外気側に断熱層を設ける工法と定義される¹⁾。この工法は新築中層RC造建築物の断熱工法としては工事コストの観点からあまり採用されないが、省エネルギー性能付加を目的とした改修において、採用されることが多い。北海道では、1980年代から結露対策や省エネルギー化を目的とした外断熱改修が行われてきており、羽山らは外断熱化改修を行った集合住宅では、エネルギー消費量が13~25%削減されたことを明らかにしている²⁾。

一方、RC躯体の保護は外断熱改修の副次的な効果として認識されている。しかし、RCに使用されるセメントは製造時に大量のCO₂を排出するため、鉄筋コンクリート造建築物を長期間使用するためには、耐久性を可能な限り高めることが重要であり、外断熱はこれに貢献することができる。RC造建築物において、外断熱による躯体保

護が耐久性向上に大きく寄与していると考えられるが、実建築物での実測例は非常に少ない。

申らは外断熱材の透気性からコンクリートの中性化抑制効果を実験的に検討している。その結果、外断熱材の透気係数と中性化深さとの間には関係があり、外断熱工法の中性化抑制効果は透気係数からある程度評価できることを明らかにしている³⁾。しかし、建築物を外断熱工法で覆う場合、長期的な材質の変化も含めて中性化を抑制する効果が発揮されるかが問題となる。

北海道では1980年代に外断熱材として繊維補強セメント板を貼り付けた複合パネルが多く使われていた。パネル間は防水シーリング材を充填して防水性を確保している。1990年代にはセメント板に含まれる水分の凍結・融解を繰り返すことによるひび割れや剥離、防水シーリングの経年劣化による材料内部への水の浸入などの問題が顕在化し、その対策委員会が設置された。そこでは、(1) 表層に吸水率の低い素材を使用する、(2) 透湿性の高いコーティング材を使用する、(3) シー

* 北海学園大学大学院工学研究科建設工学専攻（建築系）

Graduate School of Engineering (Architecture and Building Eng.), Hokkai-Gakuen University

表 1 調査対象建築物の概要

| 建築物 | 建築物 A | 建築物 B | 建築物 C | 建築物 D | 建築物 E | 建築物 F |
|---------------------------|---------|---------|---------|---------|------------|------------|
| 建設地 | 上川振興局管内 | 上川振興局管内 | 石狩振興局管内 | 石狩振興局管内 | オホーツク振興局管内 | オホーツク振興局管内 |
| 年間平均気温(°C) ¹ | 6.5 | 6.5 | 7.2 | 7.2 | 6.4 | 6.4 |
| 年間平均総積雪量(cm) ¹ | 424 | 424 | 534 | 534 | 414 | 414 |
| 竣工年 | 1973 | 1974 | 1971 | 1974 | 1966 | 1969 |
| 外断熱改修年 | 1984 | 1985 | 1988 | 1985-88 | 1980 | 1980 |
| 調査年 | 2016 | 2021 | 2017 | 2018 | 2019 | 2019 |
| 外断熱の曝露期間(年) | 32 | 36 | 29 | 30-33 | 39 | 39 |

¹: 気象庁の対象建築物に最も近い気象台の観測統計データ。

リングの防水性を確保する、といった対策が提案された⁴⁾。この問題に対して、森らは、複合板を乾燥した状態に保つのに貢献した、通気層を備えた外断熱複合板を開発した⁵⁾。

以上を踏まえ、本研究では、外断熱改修を行った北海道内の 6 棟の RC 造建築物に対して躯体の劣化調査と外断熱材の劣化調査を実施した。本報告では、そのうち、RC 躯体の劣化調査結果およびその分析結果を報告する。

2. 調査概要

2.1 調査対象建築物

表 1 に調査した建築物の概要を示す。調査対象建築物は 3 つの地域に 1960 年代から 70 年代に建設された集合住宅である。建築物 A と B、C と D、E と F はそれぞれ同じ地域に建設されている。各地域はケッペンの気候分類 *Dfb* に属しており、年間平均総積雪量は 4 m を超える。いずれの建築物も、1980 年代に、主に結露防止を目的とした外断熱改修が実施されているが、改修の範囲は建築物によって異なっている。

各建築物の配置と外断熱改修位置（緑線）の関係を図 1 に示す。いずれも妻面と非バルコニー面の外断熱改修を行っている。なお、階段室が非バルコニー面に突出して設置されている場合、その外壁は外断熱改修されていない（建築物 A、E、F）。建築物 C と D では妻面から非バルコニー面の妻面に最も近い窓の端部まで連続的に外断熱改修されている。建築部 E と F では、妻面からバルコニー面の妻面に最も近い窓の端部まで連続的

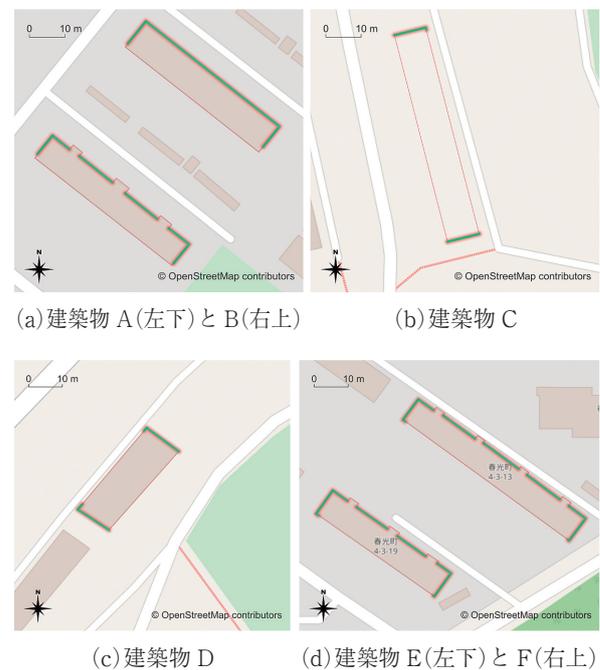


図 1 各建築物の配置と外断熱改修位置（緑線）⁶⁾

に外断熱改修されている。

図 2 に各建築物の外断熱工法の断面図を示す。断熱材には、発泡炭酸カルシウム (ECC)、押出法ポリスチレン (XPS)、ビーズ法発泡ポリスチレン (EPS)、ポリウレタンフォーム (PF) が使用されており、それらを保護するために、繊維強化セメント板 (FRC)、メッシュシート付きモルタル、ケイ酸カルシウム板等が使用されていた。

建築物 F を除き、外断熱材の固定には接着剤とファスナーの両方が使用されていた。建築物 A~D では、外断熱パネルを RC 外壁に接着剤や留め具で固定し、パネル間をシーリング材で防水

している。また、接着剤の塗布方法は建築物ごとに異なっている。建築物 A と B はパネル裏面全面に櫛引接着剤を塗布して貼り付け、建築物 C から E は直径約 100 mm のボール状の接着剤を等間隔に塗布して貼り付けていた。建築物 F は外断熱材として発泡ウレタンが吹き付けられてお

り、その接着力で密着させていた。建築物 E の外断熱は、外壁に外断熱材を貼り、表面をメッシュシートとモルタルでシームレスに仕上げていた。建築物 F の外断熱は、外壁に発泡ウレタンを吹き付けた後、外装材として木下地にケイ酸カルシウム板を貼り付けていた。

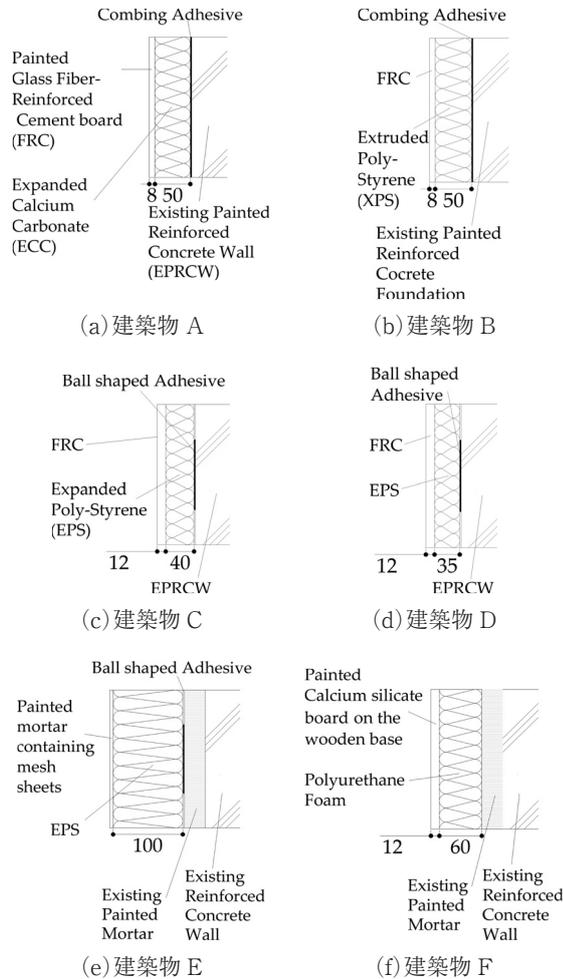


図 2 各建築物の外断熱工法の断面図⁶⁾

2.2 調査項目および調査方法

表 2 に調査項目、採取場所、各測定回数を示す。本研究では、外断熱の有無がコンクリートの中性化深さおよび鉄筋の腐食に及ぼす影響を明らかにするため、建物解体と同時に鉄筋を含むコンクリートコアのサンプリングを実施した。その後、コンクリートコアの中性化深さおよび鉄筋のかぶり厚さを測定した。なお、目視調査については、外断熱有無に関わらず、外壁全面に対して実施した。

2.2.1 コンクリートコア採取

コンクリートコアの採取位置は、各建築物同一面の外断熱有無による中性化深さの違いが明らかになるように決定した。また、かぶり厚さを測定するために、その他数か所でコンクリートコアを採取した。

建築物 A では、コンクリート表層の劣化によるコンクリートの中性化深さの違いを把握するため、採取位置を変更した。ここでは外断熱のない窓下において鉄筋の腐食によりコンクリート剥離が発生していたため、ひび割れが発生していない窓横と比較した。

建築物 B では方向によるコンクリートの中性化深さの違いを把握するため、採取位置を基礎側

表 2 調査項目、採取場所および各測定回数

| 調査項目と位置 | 建築物 A 外壁 | | 建築物 B 基礎 | | | 建築物 C 外壁 | | 建築物 D 外壁 | | 建築物 E 外壁 | | 建築物 F 外壁 | | | |
|-------------------------|----------|--------|----------|--------|--------|----------|--------|----------|--------|----------|--------|----------|--------|--------|--------|
| | 北東 | | 北東 | 南東 | 北西 | 東 | | 北西 | | 北東 | | 北東 | | | |
| コンクリートの中性化深さ測定箇所数 (コア数) | 方位 | 1F | | 4F | | 基礎 | 基礎 | 基礎 | 1F | 5F | 1F | 5F | 1F | 4F | 1F |
| | 階 | 窓横 | 窓下 | 窓横 | 窓下 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | 位置 | 窓横 | 窓下 | 窓横 | 窓下 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | 外断熱あり | 12 (2) | 12 (2) | 12 (2) | 12 (2) | 18 (3) | 18 (3) | 18 (3) | 15 (3) | 15 (3) | 18 (3) | 18 (3) | 18 (3) | 18 (3) | 18 (3) |
| | 外断熱なし | 12 (2) | 12 (2) | 12 (2) | 18 (3) | 18 (3) | 18 (3) | 12 (2) | 15 (3) | 15 (3) | 18 (3) | 18 (3) | 18 (3) | 18 (3) | 18 (3) |
| 鉄筋のかぶり厚さ測定箇所数 (コア数) | 25 (25) | | 17 (17) | | | 18 (18) | | 16 (16) | | 18 (18) | | 7 (7) | | | |

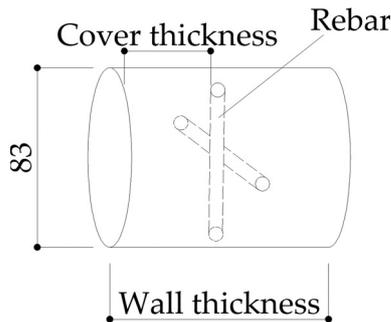


図3 コンクリートコアの概要⁶⁾

面の各方向に設定した、2本以上のコアを各方位から採取した。

いずれの場合も、事前に電磁波レーダー式鉄筋探査機を用いてコンクリート表面からコンクリート中の鉄筋を探査し、採取位置を決定した。その後、ISO 1920-6に基づくJIS A 1107:2012「コンクリートからのコアの採取方法及び圧縮強度試験方法」に従ってコンクリートコアを採取した。ダイヤモンドカッターを備えた円筒回転ボーリングマシンを使用して、水を流しながらコンクリートコアを貫通採取した。壁面では建築物の内側から、基礎側面では建物の外側からコンクリートコアを採取した。図3にコンクリートコアの概要を示す。コンクリートコアの形状は直径約83mm、高さは壁の厚さと同じ円柱であり、内部に縦横の鉄筋を含んでいる。

2.2.2 コンクリートの炭酸化深さの測定

採取したコンクリートコアの中酸化深さは、JIS A 1152「コンクリートの中酸化深さの測定方法」に準拠して測定した。具体的には、コンクリートコアを真水で洗浄した後、その側面にフェノールフタレイン1%溶液を噴霧し、コンクリート表面から赤色部分までの距離をスケールで測定した。測定点の数は、1つのコアの円周に対して6点または5点（建築物C）とした。

2.2.3 鉄筋のかぶり厚さ測定

外壁面から鉄筋までの距離をスケールで測定し、その最小値をかぶり厚さとした。

3. 結果と考察

3.1 鉄筋コンクリート部材に発生する変状の発生パターンの分類

外観目視調査結果から明らかになったRC部材



図4 バルコニー先端部の変状(建築物A)⁷⁾



図5 階段室外壁の変状(建築物A)

に発生する代表的な変状の発生パターンについて説明する。

外断熱改修されていない部位において、最も著しい劣化が確認された部位は、いずれの建築物においてもバルコニーの先端部分であり、図4に示すように、かぶり不足による鉄筋露出や塗装剥がれ、表層コンクリートのスケールが混在している状況であった。バルコニーは日射の当たる方位に設置されているため、凍結融解作用や乾湿を受けやすい環境である。また、上部からの水の接触を防ぐために笠木が設置されているものの、バルコニー支柱基部と笠木の取り合い部分に隙間が生じており、笠木の背面に水が侵入しやすい状況であった。これらに竣工当時の施工精度の低さが相まって変状が生じたものと推察された。

一方、階段室が面している非バルコニー面では、窓の下部（または目地の下部）において腐食鉄筋の露出やコンクリートの浮き、剥がれが確認され

た（図5）. 施工精度の低さに加え、これらは窓や目地から流れ落ちる水の影響を受けているものと推察された。

いずれの建築物においても外断熱を数か所で剥がし、外断熱背面のRC躯体状況を確認したが、外断熱改修されていない部分で確認された変状は全く確認されなかった。ただし、一部で水が侵入している状況が確認された（図6）。



図6 西面外断熱材撤去後の状況(建築物A). 撤去後表面が全体的に湿っていた。

3.2 鉄筋かぶり厚さの分布

図7に建築物ごとの鉄筋かぶり厚さの分布を示す。建築基準法施行令第79条では、かぶり厚さの最低値は耐力壁で30mm、連続基礎の側面で40mmと定められている。

全ての建築物で平均値が上記の最小値を上回っていたが、すべての鉄筋が最小かぶり厚を確保できている状況ではなかった。この原因としては、竣工時の施工技術の精度が低かったことと、鉄筋コンクリートの耐久性が考慮されていなかったことが考えられる。このことは、どの建築物でもかぶり厚さが薄い箇所があり、中性化による鉄筋の腐食が進行する可能性があることを示している。従って、建築物の鉄筋腐食の確率を推定するには、鉄筋かぶり厚さとコンクリートの中性化深さの調査結果を使用する必要がある。これらを考慮した鉄筋腐食確率の推定結果は後述する。

和泉らは、RC造建築物のかぶり厚さを調査し、鉄筋かぶり厚さの分布が正規分布に近いことを明らかにしている⁸⁾。今回の調査でもサンプル数が増加するにつれて同様の傾向が確認された。また、和泉らによる複数の建物の調査では、各建築

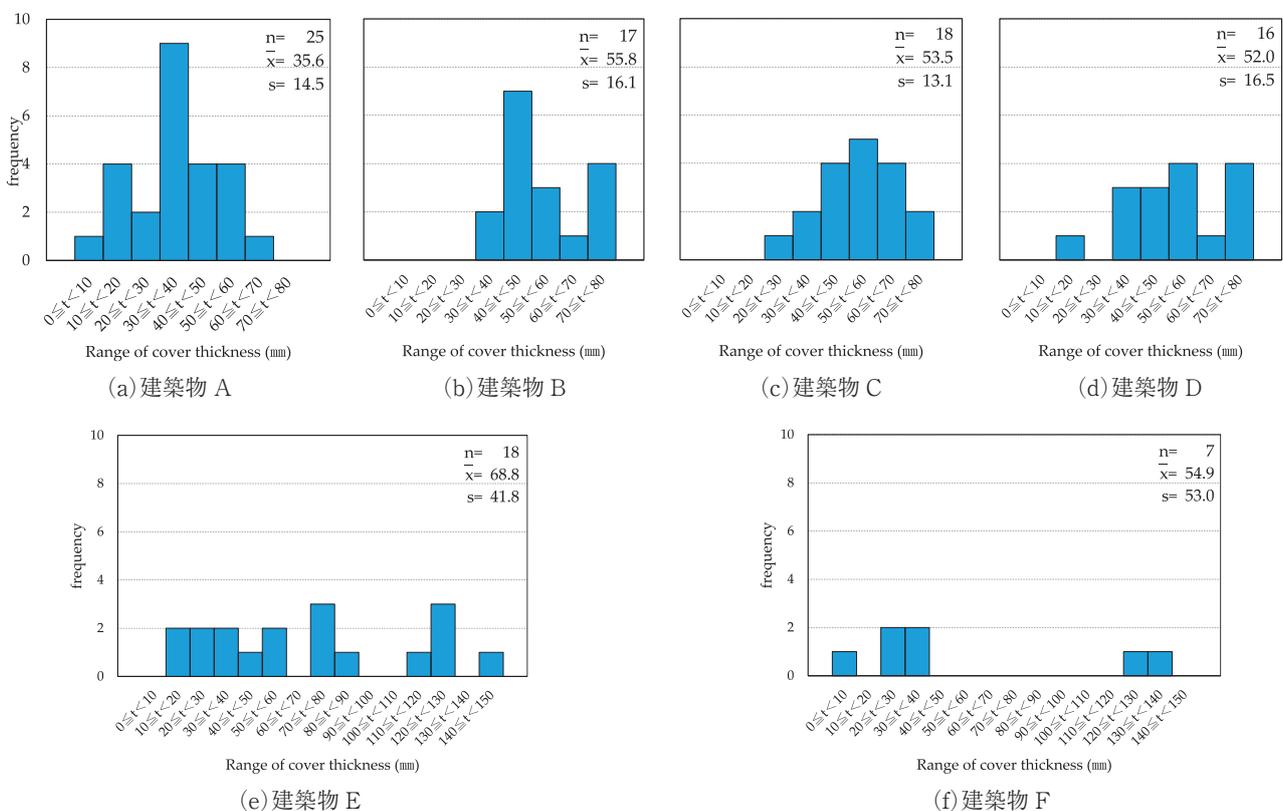


図7 各建築物における鉄筋かぶり厚さの分布⁶⁾. ここで、n：サンプル数、x：平均値、s：標準偏差。

物の鉄筋かぶり厚さの標準偏差の範囲は 11.2～19.1 mm であり、平均値は 15.5 mm であった⁸⁾。建築物 A～D の標準偏差は同様の傾向を示したが、建築物 E と F は異なる傾向を示した。これは、建築物 E と F が 1960 年代に建てられ、シングル配筋であったためと推測された。

3.3 コンクリートの中性化深さの分布

3.3.1 コンクリート劣化の影響

図 5 に示した通り、窓下の壁に鉄筋の腐食とコンクリートの剥離が発生していることが明らかとなった。窓の下の壁は窓から流れ落ちる水の影響を大きく受ける部分であり、寒冷地では水による鉄筋腐食や凍害が発生する。これらの劣化により中性化が進みやすくなったと考えられる。

図 8 に A 棟外壁の窓下と窓横の中性化深さの分布を示す。以下、外断熱で覆われた位置のデータ (EI) を緑色のグラフ、外断熱で覆われていない位置のデータ (NEI) を赤色のグラフで示す。和泉らは、鉄筋コンクリート構造物における十分に進行した中性化深さの分布を調査し、その分布が正規分布に近いことを示している⁸⁾。今回の調査では中性化が十分に進んでいないデータも含まれているため、分布の形が正規分布に近くない場

合があるが、分布の代表値として平均値と標準偏差を採用することとした。

表 3 に各条件の代表値と解析・試験結果を示す。NEI の中性化深さの平均値を見ると、窓の横の壁では窓の下の壁よりも炭酸化が 54% 進行していないことがわかる。このことから、水にさらされる箇所では炭酸化が進行しやすいものと考えられる。また、窓の下で EI と NEI の中性化深さ平均値を比較すると、NEI (100%) に対して EI の方が低かった (51%)。

ウェルチの両側 *t* 検定 (有意水準 $p < 0.01$) は、外断熱材の有無が母集団に影響を及ぼさないという帰無仮説の下で実行され、 $p = 0.000203$ となった。

以上より、寒冷地の水にさらされる部位では、外断熱が中性化の進行を抑制した判断できる。

ただし、外断熱やパネル間のシーリングの劣化により裏面に水が浸入すると、コンクリート表面の脆弱化がさらに進行する可能性がある。したがって、窓下部の外断熱面の防水対策状況を定期的に確認することが重要である。

3.3.2 日照時間の影響

図 9 に建築物 B 基礎側面の中性化深さの分布を示す。EI の北西面と NEI の北東面に 2 つの

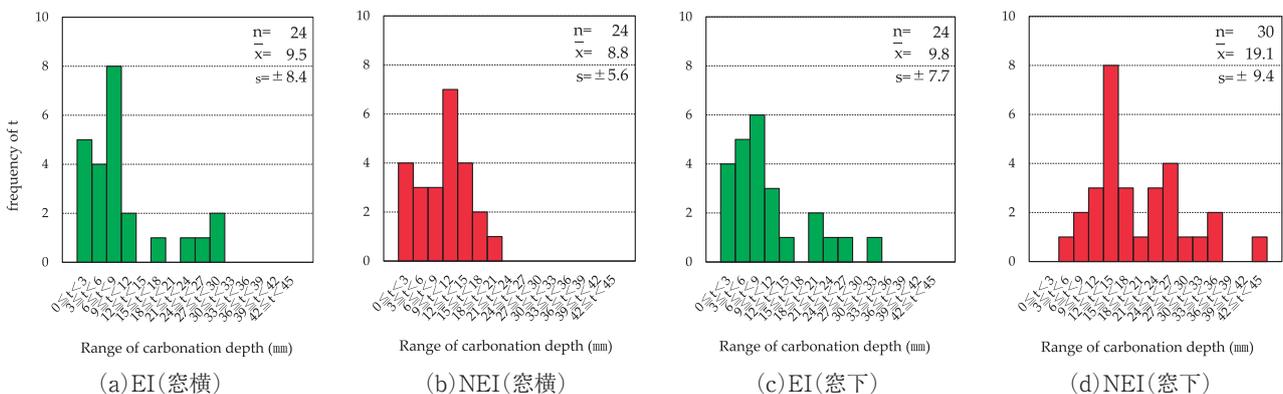


図 8 建築物 A の北東面外壁の窓下および窓横の中性化深さの分布⁶⁾。ここで、n：サンプル数，x：平均値，s：標準偏差。

表 3 建築物 A の各条件の代表値と解析・試験結果⁶⁾

| | 窓横の壁 | | 窓下の壁 | |
|--|-----------|-----------|-----------|------------|
| | EI | NEI | EI | NEI |
| 調査箇所数 <i>n</i> | 24 | 24 | 24 | 24 |
| 中性化深さの平均値 \bar{x} (±標準偏差 <i>s</i>) (mm) | 9.5(±8.4) | 8.8(±5.6) | 9.8(±7.7) | 19.1(±9.4) |
| 窓下の NEI の中性化深さ平均値に対する各平均値の割合 (%) | 50 | 46 | 51 | 100 |
| ウェルチの <i>t</i> 検定 ($p < 0.01$) | 0.732 | | 0.000203 | |

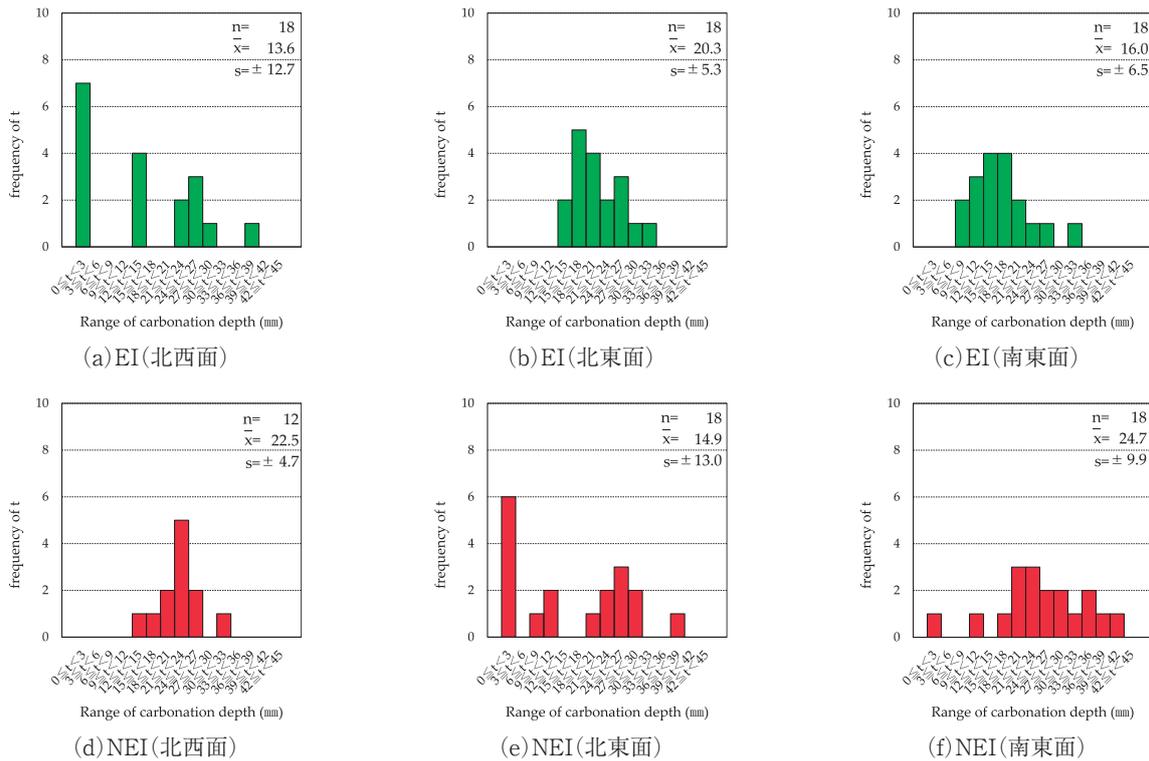


図9 B棟基礎側面の中性化深さの分布⁶⁾

表4 中性化が進行しているコンクリートコアの各種統計値⁶⁾

| 方位 | 北西面 | | 北東面 | | 南東面 | |
|---------------------------|-------|------|-------|------|---------|------|
| | EI | NEI | EI | NEI | EI | NEI |
| EI or NEI | | | | | | |
| 春分の日日照時間(hour) | 2.8 | | 1.9 | | 9.2 | |
| 調査箇所数 | 12 | 12 | 18 | 12 | 18 | 18 |
| 平均値(mm) | 20.4 | 22.5 | 20.3 | 22.4 | 16.0 | 24.7 |
| 標準偏差(mm) | ±9.9 | ±4.7 | ±5.3 | ±8.9 | ±6.5 | ±9.9 |
| NEI 平均値に対する割合(%) | 91 | 100 | 91 | 100 | 65 | 100 |
| ウェルチの t 検定 ($p < 0.01$) | 0.507 | | 0.459 | | 0.00448 | |

ピークが存在する。これは中性化が全く進んでいないコンクリートコアが存在したためである。今回の調査の目的は、外断熱の有無による中性化の進行の違いを把握することである。そこで、中性化が進行しているコンクリートコアを対象に研究を進めることとした。表4に中性化が進行したコンクリートコアの各種統計値を示す。NEIのデータを見ると、日照時間が長いほど、中性化深さが大きくなることわかる。和泉らも同様の結果を得ており、日照時間が長いほどコンクリートが乾燥し中性化が進むと説明している⁸⁾。

一方、NEI壁に対する中性化深さ比を見ると、日照時間が長いほど減少が大きくなっていること

がわかる。ウェルチの両側 t 検定は、南東面で $p = 0.00448 < 0.01$ という結果であり、日照時間の長い壁においては、外断熱改修により日射による中性化の進行が抑制されることが明らかとなった。

3.3.3 モルタル層の効果

図10に建築物EおよびFのモルタル層を有する外壁コンクリートの中性化深さに及ぼす外断熱材の影響を示す。いずれの場合も中性化深さ3mm未満の割合が88%以上を占めており、外断熱有無に関わらず、中性化はほとんど進んでいないことがわかる。

図11に建築物EとFのモルタル厚さの分布を

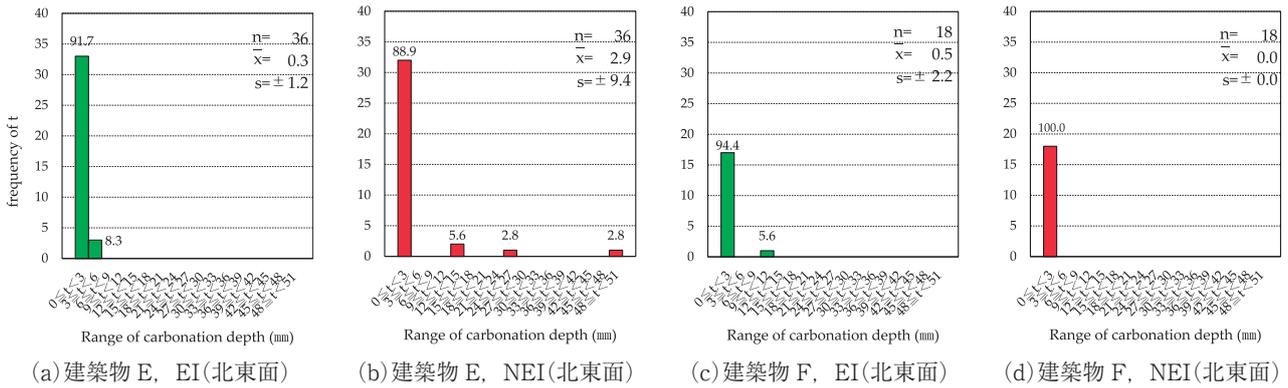


図 10 モルタル層付外壁コンクリートの中性化深さに及ぼす外断熱の影響⁶⁾

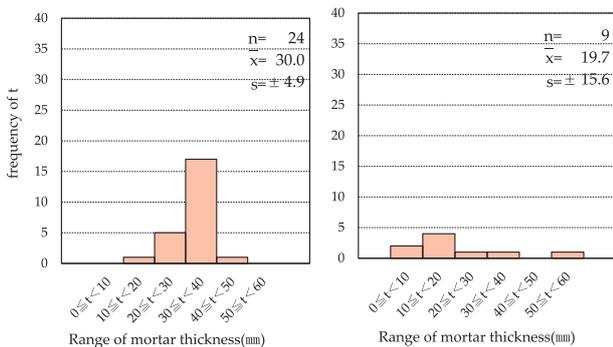


図 11 建築物 E と F のモルタル厚さ⁶⁾

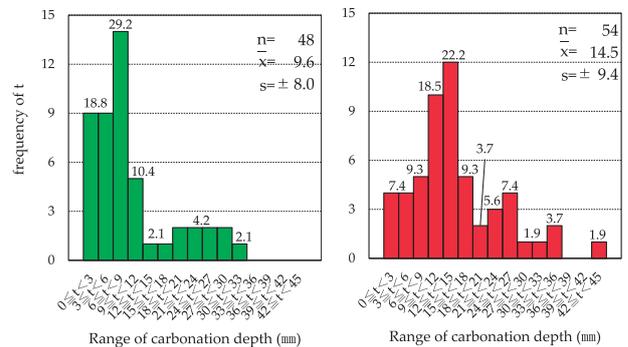


図 12 建築物 A (北東面) の中性化深さの分布⁶⁾

示す。平均モルタル厚さは建築物 E で約 30 mm, F で約 20 mm であった。1960 年代には RC 躯体の施工精度が低かったため、その修正のためにモルタルが塗られたこともあり、建築物ごとに厚さが異なっていると考えられる。

比較のために、図 12 に、建築物 A における同じ方位の炭酸化の進行を示す。建築物 A にはモルタル層がなかったため、NEI では中性化が進行しているが、建築物 E や F のようにモルタル層が存在する場合には、外断熱を行わなくても中性化はほとんど進行しなかった。

また、建築物 A のようにモルタル層のない場合は、外断熱を施すことで分布がモルタルありの場合に近づいている。このことから、中性化の進行度が高い場合には、外断熱による中性化抑制が効果的に働くことが明らかとなった。

3.3.4 接着剤塗布方法の効果

外断熱改修において外断熱材を既存外壁に張り付ける際に使用した接着剤は、建築物 C と D ではボール状、建築物 A では櫛引接着剤であった。

表 5 に各条件の代表値と解析・試験結果を示す。ウェルチの両側 t 検定 (有意水準 $p < 0.01$) は、外

部断熱材の有無が母集団に影響を及ぼさないという帰無仮説の下で実行された。その結果、建築物 D と建築物 A では $p < 0.01$ が得られた。D 棟では外断熱により中性化が 36% 減少し、A 棟では外断熱により中性化が 34% 減少した。接着方法に関わらず 30% 以上の中性化深さ抑制効果が認められた。

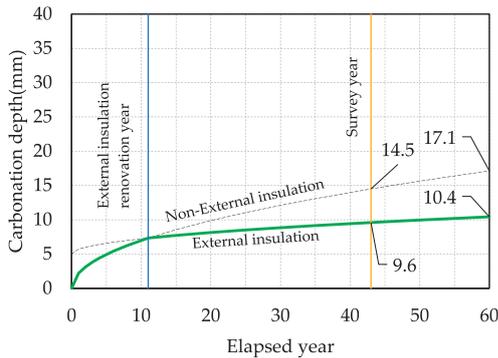
次に、明らかな外断熱抑制効果が確認された建築物 A と D について、接着剤の塗布方法による抑制効果の違いを調査した。今回の調査で得られたデータから、次の式により炭酸化の進行を予測した。

炭酸化の進行は式(1)に従うと仮定した。式(1)はいわゆる「 \sqrt{t} 則」であり、その妥当性は阿部らの促進中性化試験の結果によって確認されている⁹⁾。外断熱改修されていない場合の中性化速度係数 A_{nei} は式(2)、外断熱改修後の中性化速度係数 A_{ei} は式(4)、その場合の切片 b_{ei} は式(3)で表される。ここで、以下の条件を設定する。

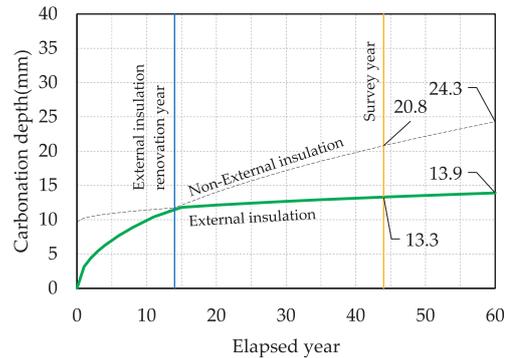
- 中性化の進行は式(1)に従う。
- 経過年数が 0 年の場合、中性化深さは 0 mm である。

表5 接着剤を使用した建築物の条件別の代表値と解析試験結果⁶⁾

| | ボール状接着剤 | | | | 櫛引接着剤 | |
|---------------------------------------|----------------------|----------------------|------------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|
| | 建築物 C 外壁(東面) | | 建築物 D 外壁(北西面) | | 建築物 A 外壁(北東面) | |
| | EI | NEI | EI | NEI | EI | NEI |
| 測定箇所数 n | 30 | 30 | 36 | 36 | 48 | 54 |
| 中性化深さの平均値 x (\pm 標準偏差 s) (mm) | 5.9 (± 5.5) | 6.2 (± 5.2) | 13.3 (± 10.2) | 20.8 (± 7.4) | 9.6 (± 8.0) | 14.5 (± 9.4) |
| NEI の中性化深さ平均値に対する各平均値の割合 (%) | 95 | 100 | 64 | 100 | 66 | 100 |
| ウェルチの t 検定 p ($p < 0.01$) | 0.829 | | 0.000693 | | 0.00567 | |



(a) 建築物 A (櫛引接着剤使用, 北東面)



(b) 建築物 D (ボール状接着剤使用, 北西の壁)

図13 外断熱による中性化抑制効果の比較⁶⁾

- 外断熱改修されていない場合, A_{nei} は式(2)より求められる.
- 外断熱改修された場合, 改修前と後ではコンクリートの中性化の進み具合が変わる. 改修後の切片 b_{ei} は, 改修までの経過年数, 改修までの炭酸化深さ, 調査までの経過年数, 調査時の中性化深さから式(3)により求められる. また, 炭酸化速度係数 A_{ei} は式(4)で求められる.

$$C_t = A\sqrt{t} + b, \tag{1}$$

$$A_{nei} = \frac{C_{nei}}{\sqrt{t_s}}, \tag{2}$$

$$b_{ei} = \frac{C_{ei}\sqrt{t_r} - A_{nei}\sqrt{t_s}\sqrt{t_r}}{\sqrt{t_r} - \sqrt{t_s}}, \tag{3}$$

$$A_{ei} = \frac{A_{nei}\sqrt{t_r} - b_{ei}}{\sqrt{t_r}}, \tag{4}$$

ここで,

C_t : 築年数 t におけるコンクリートの中性化深さ (mm)

A : 中性化速度係数 ($\text{mm}/\sqrt{\text{年}}$)

t : 築年数 (年)

b : 切片

A_{nei} : 外断熱改修していない場合の中性化速度係数 ($\text{mm}/\sqrt{\text{年}}$)

C_{nei} : 外断熱なしで調査したコンクリートの中性化深さの平均値 (mm)

t_s : 建物の調査経過年数 (年)

b_{ei} : 外断熱後の中性化予測式の切片

C_{ei} : 調査した外断熱コンクリートの中性化深さの平均値 (mm)

t_r : 建物の補修経過年数 (年)

A_{ei} : 外断熱を行った場合の中性化速度係数 ($\text{mm}/\sqrt{\text{年}}$)

その予測結果を図13に示す. これより, いずれの場合も外断熱施工後は数ミリ程度しか中性化が進行せず, 高い中性化抑制効果を示していることがわかる. 経過年数60年の時点で比較した場合, 外断熱により建築物Aでは39.1%, 建築物Dでは42.8%中性化が抑制されると推定された.

表 6 各建築物のさまざまな統計値, $P(z=0)$, t 検定および分析の結果⁶⁾

| | | 建築物 A 外壁 | | 建築物 B 基礎 | | | | 建築物 C 外壁 | | 建築物 D 外壁 | | | |
|-------------------------------|------------------------|-------------|--------|-------------|--------|---------|--------|-------------|--------|-------------|--------|----------|--------|
| 方位 | | 北東面 | | 北東面 | | 南東面 | | 北西面 | | 東面 | | 北西面 | |
| EI or NEI | | EI | NEI | EI | NEI | EI | NEI | EI | NEI | EI | NEI | EI | NEI |
| 鉄筋のかぶり り厚さ | 平均値 μ_R | 35.6 | | 55.8 | | | | 53.5 | | 52.0 | | | |
| | 分散 σ_R^2 | 210.3 | | 257.7 | | | | 172.8 | | 273.6 | | | |
| コンクリート の中性化 深さ | 平均値 μ_{c_t} | 9.6 | 14.5 | 20.3 | 22.4 | 16.0 | 24.7 | 20.4 | 22.5 | 5.9 | 6.2 | 13.3 | 20.8 |
| | 分散 $\sigma_{c_t}^2$ | 63.6 | 88.4 | 27.9 | 79.0 | 42.3 | 99.0 | 97.4 | 22.6 | 30.3 | 27.3 | 104.7 | 54.5 |
| ウェルチの t 検定 $p(p < 0.01)$ | | 0.00567 | | 0.459 | | 0.00448 | | 0.507 | | 0.829 | | 0.000693 | |
| $P(z=0)$ (鉄筋の腐食確率) | | 0.0582 | 0.1110 | 0.0181 | 0.0347 | 0.0109 | 0.0499 | 0.0305 | 0.0235 | 0.0004 | 0.0004 | 0.0230 | 0.0422 |
| P の NEI に対する 割合 (%) | | 52 | 100 | 52 | 100 | 22 | 100 | 130 | 100 | 102 | 100 | 55 | 100 |

3.4 確率密度関数を用いた鉄筋腐食確率に対する外断熱の影響の考察

以上の調査結果から、かぶり厚さと中性化深さの分布は正規分布に従っていることがわかった。ここでは、和泉らが提案した鉄筋かぶり厚さの信頼性設計法を用いて、外断熱の有無による鉄筋の腐食確率の違いを明らかにする¹⁰⁾。

ある材齢 t におけるコンクリートの中性化深さ x に対する平均値 μ_{c_t} 、分散 $\sigma_{c_t}^2$ の正規分布の確率密度関数 $N(\mu_{c_t}, \sigma_{c_t}^2)$ は次式で表される。

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{c_t}} e^{-\frac{(x-\mu_{c_t})^2}{2\sigma_{c_t}^2}}, \quad (5)$$

同様に、鉄筋かぶり厚さ y に対する平均 μ_R 、分散 σ_R^2 の正規分布の確率密度関数 $N(\mu_R, \sigma_R^2)$ は次式で表される。

$$g(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_R} e^{-\frac{(y-\mu_R)^2}{2\sigma_R^2}}, \quad (6)$$

また、ある材齢 t における鉄筋のかぶり厚さ y とコンクリートの中性化深さ x の差 z は、平均値 $\mu_R - \mu_{c_t}$ 、分散 $\sigma_R^2 + \sigma_{c_t}^2$ の正規分布となる。その確率密度関数 $N(\mu_R - \mu_{c_t}, \sigma_R^2 + \sigma_{c_t}^2)$ は次の式で表される。

$$h(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi(\sigma_R^2 + \sigma_{c_t}^2)}} e^{-\frac{(z - \mu_R + \mu_{c_t})^2}{2(\sigma_R^2 + \sigma_{c_t}^2)}}, \quad (7)$$

和泉らの研究では、鉄筋はかぶり厚さに達すると腐食が始まると考えている¹⁰⁾。その場合、 $z \leq 0$ の確率が鉄筋の腐食確率 P となる。

$$P(z \leq 0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi(\sigma_R^2 + \sigma_{c_t}^2)}} \int_{-\infty}^0 e^{-\frac{(z - \mu_R + \mu_{c_t})^2}{2(\sigma_R^2 + \sigma_{c_t}^2)}} dz, \quad (8)$$

鉄筋かぶり厚さの平均 μ_R と分散 σ_R^2 、コンクリート中性化深さの平均 μ_{c_t} と分散 $\sigma_{c_t}^2$ 、鉄筋腐食確率 $P(z=0)$ 、建物ごとの試験・解析結果を表 6 に示す。 $z=0$ における累積密度が鉄筋の腐食確率となる。建築物 C では中性化があまり進行していないため、外断熱の有無で鉄筋の腐食速度に大きな差は見られなかった。一方、建築物 A では、外断熱改修していない箇所では約 11%、外断熱改修部では約 6% の鉄筋が腐食すると推測された。これらは外断熱の効果と考えられ、腐食した鉄筋の本数は約 48% 減少したこととなる。同様に、建築物 D では約 45% 減少した。

基礎部においては、かぶり厚さが大きいため、外壁ほど鉄筋の腐食確率は高くなかった。中性化が比較的進んでいた南東部では、外断熱により腐食した鉄筋の数が約 78% 減少した。

外壁、基礎ともに統計的に有意な差が確認された場合、外断熱により鉄筋の腐食確率が大幅に低下することがわかった。

4. 結論

本研究では、躯体コンクリートの耐久性に及ぼす外断熱の有効性を明らかにすることを目的として、各種調査を実施した。その結果、外断熱改修から29年以上が経過した場合の劣化発生パターンを把握したとともに、外断熱材を接着剤で貼り付けることは、鉄筋コンクリートの鉄筋腐食確率を効果的に低下させることが明らかになった。中性化深さが大きくなる傾向にある、水に敏感で乾燥した部位では特に有効に機能した。

具体的な結論は、以下の通りである。

- (1) 寒冷地において、水分の影響により表面劣化が起りやすい窓下の中性化深さを外断熱により49%抑制しました。これは主に外断熱が水を遮断していることが原因と考えられるため、窓下部の外断熱面の防水状況を定期的に確認することが重要である。
- (2) 外壁面の日照時間が長いほど中性化が発生することが示された。外断熱は日射を遮ることによって乾燥による中性化深さを抑制し、その抑制効果は日照時間が長くなるにつれて増加し、最大35%に達した。
- (3) モルタル層の厚さが20~30mm程度になると、外断熱をしなくても中性化は全く進行していなかった。
- (4) 外断熱材は接着剤塗布方法に関わらず中性化深さを30%以上抑制した。
- (5) 外断熱の有無による中性化深さの違いについて統計的に有意な差が確認された場合、外断熱により鉄筋腐食の確率は45~78%減少した。

謝辞

本研究は北海道および関連自治体、北海道建築技術協会「外断熱耐久性調査委員会」および「外断熱建築物の温度性能および耐久性調査委員会」、その他北海学園大学工学部建築学科4年生の協力を得て実施したものである。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS24 断熱工事，第3版，2013。
- 2) 羽山広文，絵内正道と森太郎：B-57 外断熱 RC 建築の熱性能評価に関する研究：外断熱改修による集合住宅のエネルギー消費量の削減効果，公益社団法人 空気調和・衛生工学会，2002。
- 3) 申雪寒，長谷川寿夫と吉野利幸：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，vol.9，no.18，pp.21-24，2003。
- 4) 外断熱複合板の耐久性向上技術の開発研究委員会：外断熱複合板の耐久性向上技術の開発研究報告書。日本建築学会北海道支部，2000。
- 5) 森太郎，塚田佳奈，舘脇英，上林英文，絵内正道と羽山広文：通気層付き外断熱複合板の外装材の乾燥性状，日本建築学会技術報告集，vol.11，no.22，pp.275-280，2005。
- 6) Y. Adachi, H. Hirakawa, A. Fukushima, T. Uematsu, K. Kikuta と M. Taniguchi, 「Investigation of the Deterioration of Medium-Rise-Wall Type Reinforced Concrete Buildings with External Insulation in Snowy Cold Districts」, *Buildings*, vol. 12, no. 12, Art. no. 12, 2022.12, doi: 10.3390/buildings12122048.
- 7) 足立裕介，平川秀樹，谷口円，佐藤潤平，小浦孝次と松田未紘：外断熱改修後32年を経過した鉄筋コンクリート造建築物の調査，日本建築学会北海道支部研究報告集，2017。
- 8) 和泉意登志と押田文雄：経年建築物におけるコンクリートの中性化と鉄筋の腐食，日本建築学会構造系論文報告集，vol.406，pp.1-12，1989。
- 9) 阿部道彦，榊田佳寛，田中斉，柳啓，和泉意登志と友澤史紀：コンクリートの促進中性化試験法の評価に関する研究，日本建築学会構造系論文報告集，vol.409，pp. 1-10，1990。
- 10) 和泉意登志，嵩英雄と押田文雄：鉄筋コンクリート造建築物における鉄筋のかぶり厚さの信頼性設計手法の提案：コンクリートの中性化によって鉄筋が腐食する場合，日本建築学会構造系論文報告集，vol.384，pp. 58-67，1988。