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－

LONG LIFE REPAIR METHODS FOR EXISTING FACILITIES

－ Effectiveness of external insulation finishing system for long life facilities －

平井 健嗣^{*1}, 今井 大樹^{*2}, 李 祥 準^{*3}, 堤 洋 樹^{*4}
小松 幸夫^{*5}, 新谷 真人^{*6}*Kenji HIRAI, Daiki IMAI, Sangjun Yi,
Hiroki TSUTSUMI, Yukio KOMATSU and Masato ARAYA*

Today in Japan, there are so many old public facilities. External Insulation Finishing System (EIFS) have been focused on as the way to improve the performance of saving energy, and several studies of EIFS have been mainly made in cold districts. The purpose of this study is to examine the effectiveness of EIFS as the way of long life repairing for existing facilities. This study is by actual measuring the condition of a school repaired with EIFS and simulation with FEM. The main results are:

1. By EIFS, the thermal condition in summer and winter is improved a little.
2. By EIFS, change of the outside surface temperature is controlled and the difference of surface temperature between outside and inside are also controlled.
3. On the rooftop, EIFS is most effective in terms of control of surface temperature.
4. With FEM, the risk of cracking on the rooftop and walls is reduced by EIFS repairing.
5. On the rooftop without E.I.F.S., thermal stress is over cracking stress.

Keywords: Existing Facilities, Long Life Repairing, External Insulation Finishing System, Actual Measurement, Thermal Stress, FEM

既存施設, 長寿命化工法, 外断熱工法, 実測調査, 温度応力, 有限要素法

1. はじめに

近年、我が国では、地球環境問題、少子・高齢化社会の到来、政府・公共団体の逼迫する財政状況等を背景に、今後の既存施設のあり方について注目が集まっている。国・公共団体の所有する既存施設（ストック）を、維持するのか、廃止するのか、転用するのか、複合化するのか等、検討しなければならない問題は山積している。ストック社会が今まさに到来しようとしている今日、スクラップ・アンド・ビルドから脱却し、サステナブル社会を目標とし、「解体・建て替え」という選択肢は可能な限り回避しなければならない。そのためには、概ね 40 年（鉄筋コンクリート造の場合）と言われる既存施設¹⁾そのものの寿命を延ばし、施設の長寿命化を図ることが必須となる。建築物の寿命を延ばすためには、適正な維持管理と共に、長寿命化を視野に入れた改修が必要となり、その一つとして期待できるものが外断熱工法による改修である。

2. 既往の研究

外断熱工法については、北海道などの寒冷地におけるものや、空調時の環境性向上、省エネ性などに関する研究が進められている。しかしながら、本州の比較的温暖な地域においても、躯体の温度変化抑制によって挙動を抑え、建築物の長寿命化に寄与するものと考えられるが、この観点から具体的な検討を行っているものは多くは見られない。

外断熱の長寿命化への効用については、山形・堺らによる 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²⁾によって壁面におけるひび割れ発生を著しく軽減できるとする研究結果が報告されている。また、外断熱によるその他の効果として、申・長谷川らによる外断熱の透過性と躯体コンクリートの中性化に関する研究³⁾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、コンクリートの中性化がほとんど進行しないとする研究結果や、吉野による外断熱による建築耐久性の向上についての研究に

^{*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} 早稲田大学大学院創造理工学研究科 修士課程^{*3} 早稲田大学理工学術院創造理工学部建築学科 助手・工修^{*4} 九州共立大学建築学科 准教授・博士(工学)^{*5} 早稲田大学理工学術院創造理工学部建築学科 教授・工博^{*6} 早稲田大学理工学術院創造理工学部建築学科 特任教授・工修

Graduate Student, WASEDA University, M. Eng.

Graduate Student, WASEDA University

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

Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Eng., Kyushu Kyoritsu Univ., Dr. Eng.

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

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

よって外断熱により躯体コンクリートの中性化および鉄筋の腐食を抑制することが可能で、鉄筋腐食開始時期を築後およそ 65 年から 180 年にまで遅らせることができるとの結果⁴⁾等が報告されている。

これらの既往研究は、外断熱工法による温度応力抑制効果や、中性化抑制の観点から外断熱工法の有用性に着目したものである。なお、温度応力抑制効果については、内断熱と外断熱における異なる地点・建築物での比較により、壁面における温度応力の検討を行ったものがある²⁾。また、既往研究では、外断熱による「改修」について具体的な効果を測定調査・分析を行ったもの、同地点・同建築物・同時期の比較や壁面以外の屋上スラブに注目したものは多く見られない。

本研究では、公共団体の保有ストックの内、概ね 1/3 という多くを占める学校施設に着目し、外断熱の長寿命化工法としての可能性を示すことを目標とする。

3. 研究フロー

本研究では、実際に校舎の一部に外断熱による改修を実施し、実測調査による外断熱工法の長寿命化工法としての可能性を検討するものである。まず、外断熱改修測定調査によって、各部位の表面温度を測定し、年間と日間のデータ分析・検討を行った。その後、屋上スラブ^{注1)}、壁面における内外表面温度差が与える応力を有限要素法(FEM)によって解析し、外断熱工法による長寿命化検討を行った。図 1 に研究フローを示す。

図 1 研究フロー

4. 既存学校施設における外断熱改修測定調査

4.1 調査の目的

神奈川県 Y 市の小学校（廃校）の一部に、外断熱工法による改修を行った。改修を行った部位と改修を行っていない部位の内部・外部表面温度を計測し、躯体への影響を検討することを目的とする。

また、改修を行った教室と行わない教室の気温・湿度・グローブ温度も計測し、温熱環境状態への影響も検討する。夏期においては教室内の在室者発熱は考慮せず、冬期においては在室者発熱を想定する場合には、1,150W のセラミックヒーターを 1 教室あたり 2 台（2,300W: 9~11 歳の子供約 21 人分の発熱量を想定）設置した。

なお、本稿では、外断熱改修による長寿命化への影響を確認するため、主に計測した表面温度について述べる。

4.2 外断熱改修の内容

1) 調査対象

表 1 に調査対象の概要を、図 2 に南側からの外観を示す。1978 年築の鉄筋コンクリート造 4 階建て（校舎部延床面積 5,526 m²）で、東西軸を持つ典型的な開放型校舎である。なお、普通教室は南側に開口、ベランダを持つ。

表 1 調査対象概要

名称	Y 市立 YZ 小学校
所在地	Y 市 SK 区
竣工年	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 m ²
延床面積	(校舎部)5,526 m ²

図 2 調査対象外観

2) 外断熱改修内容

① 改修部位

終日日射量などを考慮し、夏期に最も教室内の温熱環境が悪いと考えられる最上階（4 階）の西端教室の屋上スラブ、西・南・北側壁面を選定した。施工部位を図 3 に示す。

図 3 外断熱改修部位

② 改修内容

図 4 に外断熱改修断面図を示す。

図 4 外断熱改修断面図

屋上部は、発泡プラスチック系断熱材イソシアヌレートフォーム 50mm に防水シート（太陽熱高反射仕様）1.5mm を張り付ける。

なお、既存の屋上仕上げは、コンクリート金ごて押さえ・アスファルト防水・押さえコンクリート 80mm である。なお、既存仕上げは、アスファルト防水に抑えコンクリート仕上げである。壁部は、EPS（ビーズ法ポリスチレンフォーム）ボード 70mm を外壁部に接着し、ベースコート、メッシュ、トップコートによって仕上げる透湿性の高い湿式外断熱工法を採用する。なお、既存仕上げは、コンクリート打放し・アクリルリシン吹き付けである。図 5 に外断熱改修前後の各部位の様子を示す。

図 5 外断熱改修前後の各部位の様子

3) 調査項目

調査項目は、各部位の表面温度および温熱環境に関するものである。計測内容を以下に示す。

① 表面温度

屋上スラブ、西側壁、南側壁、北側壁、教室内天井の各部位の表面温度を 10 分間隔で計測した。表面温度は、熱電対を用い、データロガー（江藤電気㈱製）にて計測した。図 6 に、熱電対設置箇所の断面図を示す。熱電対は、屋上部・壁部の改修部と未改修部に図 7、図 8 の通り設置した。なお、本稿では測定部位の平均値を各部位の表面温度とする。

図 6 熱電対設置箇所（断面図）

図 7 熱電対設置箇所断面図（屋上部）

図 8 熱電対設置箇所（壁部）

② 温熱環境

最上階（4 階）西端教室、最上階中間教室、3 階西端教室における温熱要素の計測を行った。温度、湿度は、温湿度データロガー（㈱ T&D 製）にて計測し、グローブ温度はロガー付グローブ温度計（㈱ブリード製）にて計測した。なお、これらの温熱要素は、教室内中央部の床上 110cm で計測した。

4) 調査期間

調査期間は、2008 年 8 月 1 日より 2009 年 8 月 30 日である。表 2 に調査期間中の計測環境を示す。なお、本調査では、学校施設の利用状況に近づけるため、夏期に 3 パターン（「終日閉鎖」「終日開放」「日中開放（9：00 窓を開放→17：00 窓を閉鎖）」）の窓の開放条件で計測を行った。また、冬期の一定期間は、教室内の在室児童による発熱を考慮し、セラミックヒーターを設置した。さらに、2009 年 7 月に 4 階西端教室の窓ガラス部に遮熱フィルムを施工した。

表 2 調査対象概要

ケース	窓開放条件	計測期間	計測日数	在室者発熱	遮熱フィルム
A	日中開放	08/8/1・4～8・11～15	11 日間	×	×
B	終日開放	08/8/18～31	14 日間	×	×
C	終日閉鎖	09/7/1～09/8/30	61 日間	×	○
D	終日閉鎖	09/1/14～09/2/18	36 日間	○	×
E	昼休みのみ開放	09/2/4・5・6・16・17	5 日間	○	×
F	終日閉鎖	上記以外（08/8/1～09/6/30）	269 日間	×	×

4.3 調査の結果

計測期間中の天候が良い日^{注 2)}で、窓が「終日閉鎖」の計測結果を取り上げる。

1) 各部位の日内表面温度

典型的な夏期および冬期の 1 日^{注 3)}に注目し、図 9、図 10 に屋上スラブの外部表面温度と内部表面温度の日内温度履歴を図 11、図 12 に西側壁部の外部表面温度と内部表面温度の日内温度履歴を示す。未改修部の屋上スラブでは、夏期・冬期共に、外部表面温度が外気温の最高温度よりも大幅に高くなるのが分かる。さらに、外

部表面温度は、日中最高気温よりも若干遅れて最高となり、内部表面温度は外部表面温度の最高を記録した時間より約6時間遅れる傾向が読み取れる。西側壁でも同様に、外部表面温度は外気温の最高温度よりも高くなる。外部表面温度は、屋上スラブの最高時よりもさらに遅れ16時ごろに最高となり、内部表面温度は外部表面温度の最高を記録した時間より約4時間遅れる傾向が読み取れる。これらは、太陽の位置する方位の影響によるものである。

図9 表面温度履歴
(屋上スラブ・夏期)

図10 表面温度履歴
(屋上スラブ・冬期)

図11 表面温度履歴
(西側壁・夏期)

図12 表面温度履歴
(西側壁・冬期)

表3に、各部位の表面温度の日較差を示す。屋上スラブ外部表面温度と内部表面温度の日内温度履歴は、未改修部では、夏期・冬期共に、外部表面での温度日較差が大きくなり、屋上スラブ、西側壁では改修部に対して10倍以上の範囲で温度変化が発生する。内部表面も未改修部の方が温度変化は大きくなる。

表3 各部位の表面温度日較差

(上段：外部表面，下段：内部表面)

部位	屋上スラブ		西側壁		南側壁		北側壁	
	改修	未改修	改修	未改修	改修	未改修	改修	未改修
夏期	1.5	15.4	0.7	9.6	0.9	5.4	1.3	3.9
	0.6	4.9	0.9	3.6	1.2	2.5	2.5	3.1
冬期	1.2	14.6	1.0	11.4	3.2	9.2	1.6	4.7
	1.2	4.0	1.9	4.6	3.8	6.2	2.7	3.8

単位：(°C)

図13に、屋上スラブの内外表面温度差^{注4)}の日内履歴を、図14に、西側壁の内外表面温度差^{注4)}の日内履歴を示す。改修部では、夏期はスラブ外部表面温度が1.1°C高い状態から0.1°C低い状態の範囲で、1日で1.2°C変化し、冬期は外部表面温度が1.0°C低い状態から1.5°C低い状態の範囲で、1日で0.5°C変化する。一方、未改修部

では、夏期は外部表面温度が11.8°C高い状態から4.0°C低い状態の範囲で、1日で15.8°C変化し、冬期は外部表面温度が7.2°C高い状態から7.0°C低い状態、1日で14.2°C変化する。西側壁、南側壁、北側壁でも同様に、程度の違いはあるものの、改修部では内外表面温度差が1日を通して非常に小さくなる結果を得た。これらの外断熱改修による効果は、屋上スラブで顕著に見られる。

図13 内外表面温度差履歴 (屋上スラブ)

図14 内外表面温度差履歴 (西側壁)

2) 各部位の年間表面温度

① 外部表面温度

表4に各部位の外部表面温度の年較差を、表5に各部位の外部表面温度履歴(月別)を示す。屋上部については、改修部では外部表面温度が年間で24.1°Cの範囲で変化していることに対して、未改修部では年間で51.5°Cの範囲で変化している。なお、最高温度となる時期は改修部、未改修部共に夏期となるのに対し、最低温度となる時期は改修部では冬期であるが、未改修部では春期となった。また、改修部では、月最高温度と最低温度との差も小さいことが分かる。西側壁部、南側壁部、北側壁部でも同様の結果を得た。なお、年較差の抑制については、屋上部で最も効果が見られ、西側壁部、南側壁部、北側壁部と続く。調査対象は、南側にベランダおよび庇が設置されており、日射を受けにくいため、南側壁部での効果が小さくなる結果となった。

② 内外表面温度差^{注4)}

図15に屋上スラブ部の内外表面温度差の、図16に西側壁の内外表面温度差の月別年間履歴を示す。屋上スラブ部については、改修部の内外表面温度差は、2009年6月に外部表面温度が内部より2.1°C高くなり、2008年12月に1.8°C低くなる範囲で変化する。また、未改修部は、2009年7月に外部表面温度が内部より19.8°C高くなり、2009年5月に8.8°C低くなる範囲で変化する。改修部の変

動範囲は 3.9℃となるのに対して、未改修部では 28.6℃である。西側壁、南側壁、北側壁でも同様の傾向が見られた。また、屋上スラブ部では、内外表面温度差の月内的変化は、暑い時期に最も大きくなる。一方、西側壁では、秋や春の時期に月内的変化が大きくなる。これは、各部の受ける日射量の違いによると考えられる。

表 4 各部位の外部表面温度年較差

部位	屋上スラブ		西側壁		南側壁		北側壁	
状況	改修	未改修	改修	未改修	改修	未改修	改修	未改修
年較差	24.1	51.5	22.5	39.0	24.0	29.1	25.4	30.3

単位：(℃)

表 5 各部位の外部表面温度（月別）

上段：月最高温度（**太字**は、年間最高温度）
中断：月最低温度（**太字**は、年間最低温度）
下段：月平均温度

部位	屋上部躯体 外部表面温度		西側壁部躯体 外部表面温度		南側壁部躯体 外部表面温度		北側壁部躯体 外部表面温度	
改修 状況	改修	未改修	改修	未改修	改修	未改修	改修	未改修
2008 08	31.7 29.3 (30.2)	46.1 27.9 (34.0)	30.5 28.8 (29.5)	37.4 27.5 (30.3)	31.1 27.3 (29.7)	33.6 27.3 (29.5)	31.8 29.0 (30.2)	33.4 27.6 (30.0)
2008 09	30.0 25.1 (27.8)	42.4 18.8 (30.5)	29.2 25.0 (27.4)	37.3 20.8 (28.4)	29.9 23.8 (27.7)	33.5 21.1 (28.1)	29.9 23.3 (27.3)	31.4 21.1 (26.7)
2008 10	23.7 20.6 (22.3)	33.6 13.1 (21.5)	23.6 21.0 (22.3)	30.0 15.1 (21.3)	25.7 20.0 (22.6)	29.1 15.8 (22.1)	22.5 18.7 (20.9)	23.4 14.5 (19.8)
2008 11	19.6 13.9 (16.3)	24.2 4.8 (13.5)	19.6 14.1 (16.7)	23.6 7.7 (14.2)	19.7 13.0 (16.3)	22.1 9.4 (15.1)	18.3 11.5 (14.4)	19.1 7.5 (13.0)
2008 12	15.6 12.0 (13.8)	21.1 0.4 (10.1)	16.3 13.2 (14.7)	20.3 3.7 (11.3)	17.2 11.2 (14.0)	20.6 5.8 (12.8)	15.1 8.8 (11.7)	17.3 4.0 (10.1)
2009 01	13.7 9.9 (12.2)	18.8 -0.1 (8.0)	14.4 10.7 (12.9)	16.8 2.7 (8.5)	15.2 8.8 (12.1)	16.8 4.5 (10.4)	11.3 6.6 (9.1)	10.7 3.1 (7.2)
2009 02	15.0 11.9 (13.3)	20.5 1.9 (9.2)	15.3 12.4 (13.5)	18.0 4.9 (8.8)	14.9 10.8 (12.8)	16.8 6.6 (10.8)	11.7 8.9 (10.1)	11.1 4.7 (7.5)
2009 03	15.7 7.9 (12.0)	27.0 2.1 (13.2)	15.4 8.0 (11.9)	24.8 4.5 (12.4)	17.3 7.1 (12.7)	22.0 5.2 (13.1)	16.2 6.4 (11.5)	18.0 4.5 (10.7)
2009 04	21.2 12.2 (17.2)	36.7 6.5 (21.1)	20.1 12.4 (16.6)	29.9 9.0 (18.1)	20.3 12.2 (16.8)	23.9 9.7 (17.3)	21.3 11.3 (17.1)	23.9 8.5 (16.6)
2009 05	24.3 17.5 (20.9)	42.8 15.1 (25.4)	22.8 17.2 (20.2)	32.4 15.9 (21.8)	22.8 17.4 (20.3)	25.5 16.6 (20.5)	24.0 18.0 (21.1)	26.8 15.9 (21.0)
2009 06	26.7 21.5 (24.1)	42.1 18.3 (28.1)	25.0 21.4 (23.3)	32.6 18.8 (24.5)	24.7 20.8 (22.9)	25.9 19.2 (22.8)	26.1 20.9 (23.9)	28.5 19.1 (24.1)
2009 07	29.6 25.0 (27.4)	51.4 22.2 (32.0)	27.6 24.7 (26.5)	37.7 23.6 (28.1)	27.9 24.1 (26.2)	30.8 22.9 (26.4)	29.5 24.8 (27.2)	32.5 23.8 (27.6)
2009 08	32.0 28.0 (30.1)	49.9 23.2 (34.6)	30.5 27.6 (29.1)	41.7 24.7 (30.9)	30.9 25.9 (28.1)	32.6 24.9 (28.6)	31.6 28.0 (29.8)	33.4 24.2 (29.0)

単位：(℃)

図 15 屋上スラブ部の内外表面温度差（月別）

図 16 西側壁の内外表面温度差（月別）

3) 室内環境

窓を「終日閉鎖」とした場合の計測結果を取り上げる。図 17、図 18 に、夏期および冬期の最上階西端教室（改修部）と最上階中間教室（未改修部）の典型的な 1 日^{注 3)}の日内室内温度の履歴を示す。改修部では、日中（8：00～15：00）の同時刻で比較すると、夏期では最大で 0.5℃涼しくなり、冬期では最大で 2.0℃暖かくなった。室内グローブ温度でも、同様であった。

図 17 室内温度履歴（夏期）

図 18 室内温度履歴（冬期）

5. 温度応力シミュレーションによる躯体への影響の検討

5.1 シミュレーションの目的

実測調査より、外断熱改修によって各部位における温度変化が抑制され、温度応力の軽減が期待できる知見が得られた。本研究では、屋上部および西側壁部に注目し、12 ケースを想定して FEM による温度応力シミュレーションを行い、外断熱改修の有無による発生応力の比較を行う。

5.2 シミュレーション解析の概要

応力解析は屋上スラブ、および妻壁の各温度条件のケースに対応する温度荷重を入力し、それぞれのケースにおける温度応力を求める。数値解析には 3 次元有限要素法プログラム（MIDAS Gen Ver.7.6.1）を用いる。また、ひび割れが発生するかどうかの判断は、次式の RC 規準（1999）第 8 条²⁷⁾の曲げひび割れモーメントと、発生応力の比較により行う。

$$M_c = 0.56\sqrt{\sigma_B} Z_e + \frac{ND}{6} \quad \dots (1)$$

σ_B ：コンクリートの圧縮強度

Z_e ：鉄筋を考慮した断面係数

N ：軸方向力 D ：部材せい

屋上スラブ、壁の解析モデル概要を図 19、図 20 に示す。FEM 解析は屋上スラブ、壁ともに 4 節点ソリッド要素を用い、スラブについては X-Y 方向それぞれ大梁で囲まれた 1 スパンを、壁については上下階の梁で囲まれた 1 層分の壁をモデル化する。また、周辺にとりつく大梁や小梁、柱等もモデル化する。

コンクリートの材料定数は以下の表 6 に、屋上スラブおよび壁モデルのリストを表 7 に示す。式(1)の Z_c は鉄筋を考慮した断面係数であり、スラブでは床主筋を、壁では縦筋を Z_c に考慮する。

コンクリート	ヤング係数	2.17×10^7 [kN/m ²]
	ポアソン比	0.2
	線膨張係数	1×10^{-5} [1/°C]
	圧縮強度 (σ_B)	21×10^3 [kN/m ²]
鉄筋	ヤング係数	2.05×10^8 [kN/m ²]

部材	屋上スラブ	壁
断面		
配筋	上 : D10@400 下 : D10@200	外 : D10@200 内 : D10@200

前述の外断熱改修測定調査によって得られた屋上部および壁面部の内・外部表面温度を採用する。温度分布の入力方法は、屋上スラブモデルにおいては、屋上外部表面温度をスラブの外部表面温度、屋上内部表面温度をスラブ内部表面および梁・柱の温度として用い、スラブの断面内部の温度はスラブ内外表面温度を線形補間して入力する。壁モデルにおいては、外部表面温度を壁の室外側表面温度、室内側の表面温度を室内側表面および梁・柱の温度として用い、壁の断面内部の温度はスラブと同様、線形に補間する。表 8 に入力温度条件 12 ケースを示す

case	測定日	時刻	部材	改修部 表面温度		未改修部 表面温度		備考
				外部	内部	外部	内部	
1	09/01/11	06:50	スラブ	10.5	11.5	-0.1	5.7	未改修部・外部表面温度最低
2	09/07/16	13:10	スラブ	29.6	27.6	51.4	31.6	未改修部・外部表面温度最高
3	09/07/16	13:10	スラブ	29.6	27.6	51.4	31.6	未改修部・内外表面温度差+側最大
4		03:40	スラブ	27.2	27.3	25.7	31.9	Case3 同日内外表面温度差-側最大
5	09/05/15	03:10	スラブ	21.5	22.1	15.5	24.4	未改修部・内外表面温度差-側最大
6		12:10	スラブ	23.0	21.8	36.1	22.2	Case5 同日内外表面温度差+側最大
7	09/01/11	06:50	西側壁	11.0	11.3	2.7	6.7	未改修部・外部表面温度最低
8	09/07/30	16:30	西側壁	27.6	27.5	37.7	29.5	未改修部・外部表面温度最高
9	09/04/09	15:00	西側壁	16.2	16.3	28.4	17.8	未改修部・内外表面温度差+側最大
10		04:40	西側壁	15.3	15.6	14.7	17.0	Case9 同日内外表面温度差-側最大
11	09/12/26	08:50	西側壁	13.9	15.8	6.1	12.8	未改修部・内外表面温度差-側最大
12		14:50	西側壁	14.4	16.0	14.0	13.0	Case10 同日内外表面温度差+側最大

– 174 –

5.3 シミュレーション解析結果

図 22、図 23 に最も発生曲げモーメントの大きな case1 のスラブ表面の応力図を、図 24、図 25 に最も発生曲げモーメントの大きな case7 の壁表面の応力図を示す。

図 22 未改修部 case1 スラブ解析結果（上面）

図 23 未改修部 case1 スラブ解析結果（下面）

図 24 未改修部 case7 壁解析結果（外面）

図 25 未改修部 case7 壁解析結果（内面）

表 9、表 10 に発生曲げモーメント M と曲げひび割れモーメント M_c の比較を示す。これらの表は発生応力の大きな順にスラブと壁のそれぞれ 3 ケースの結果である。応力は図 19、図 20 の座標軸に従った方向の直応力成分であり、Sout は室外側、Sin は室内側の表面応力である。

表 9 スラブの M 、 M_c 比較

状況	case	応力方向	Sout (kN/m ²)	Sin (kN/m ²)	M (kN・m)	Mc (kN・m)	M/Mc
外断熱未改修部	1	X	-3610	3000	10.11	8.73	1.16
		Y	-350	3030	5.17	3.99	1.30
	2・3	X	-2530	2100	7.08	8.47	0.84
		Y	-2930	2120	7.72	9.01	0.86
	4	X	1600	-1330	4.25	7.05	0.60
		Y	1860	-1060	4.23	6.29	0.67
外断熱改修部	1	X	-430	300	1.12	8.03	0.14
		Y	-420	240	1.01	8.11	0.12
	2・3	X	-260	180	0.67	7.96	0.08
		Y	-220	190	0.63	7.89	0.08
	4	X	100	-90	0.28	7.42	0.04
		Y	120	-70	0.28	7.37	0.04

表 10 壁の M 、 M_c 比較

状況	case	応力方向	Sout (kN/m ²)	Sin (kN/m ²)	M (kN・m)	Mc (kN・m)	M/Mc
外断熱未改修部	7	X	-2250	1570	2.18	3.29	0.66
		Z	-1370	1280	1.51	2.97	0.51
	10	X	1420	-970	1.36	2.68	0.51
		Z	770	-810	0.90	2.95	0.31
	11	X	-1730	1220	1.68	3.20	0.53
		Z	-790	1060	1.05	2.78	0.38
外断熱改修部	7	X	20	-20	0.02	2.92	0.01
		Z	20	-20	0.02	2.92	0.01
	10	X	410	-280	0.39	2.85	0.14
		Z	260	-240	0.28	2.91	0.10
	11	X	280	-80	0.21	2.82	0.07
		Z	0	-290	0.17	3.08	0.05

屋上スラブでは、未改修部に発生応力がひび割れ応力を上回る case1 が確認される。一方、断熱改修部の温度荷重条件では、スラブ、壁とも発生応力が大きく抑えられている。

特に、屋上スラブ・壁共に外部表面温度が年間最低となる場合に外断熱改修の効果が期待でき、屋上スラブでは年間最高となる場合にも効果が期待できる。なお、本シミュレーションでは、周辺部材の拘束による影響を無視できるよう境界条件を選んでいるため、実際の部材の取付け環境によっては、解析結果以上の外断熱改修の効果を期待することができる。

6. まとめ

本研究では、今後の公共施設の中でも量の多い学校施設に着目し、長寿命化工法として期待できる外断熱工法による有用性を検討するため、実際に外断熱改修を行い、部材表面温度等の実測調査と有限要素法による温度応力シミュレーションを行った。以下に得られた知見を示す。

- 1) 外断熱改修によって最上階教室の環境は夏期・冬期共に改善される。
- 2) 各部位の外部表面温度は、外断熱改修によって温度変化を抑制することができる。また、内部と外部の温度差を非常に小さくすることができる。
- 3) 外断熱による表面温度の変動抑制効果は、各部位で確認したが、その中でも屋上部での改善が最も顕著であった。
- 4) 温度応力シミュレーションにより、外断熱改修によって屋上スラブ・壁におけるひび割れリスクを低減する可能性が示された。なお、断熱未改修の屋上部では、ひび割れ応力を上回る温度応力が発生するケースがあった。

柳、大野ら⁹⁾は、ひび割れがコンクリート内の鉄筋腐食に影響を与えることを示していることから、外断熱改修は建築物の耐久性維持および長寿命化に関して有用であると言える。従来は、乾燥収縮によるひび割れが重要視される傾向にあったが、温度応力によるひび割れリスクの検討も重要であることがわかった。

また、改修の有無で屋上部の躯体環境およびひび割れリスクが大きく変化することからも、建築の長寿命化を考えた場合、特に屋上スラブにおいては外断熱改修が望ましいと言える。コンクリートのひび割れはコンクリート建築物の劣化につながる一因であり、躯体部のひび割れが進行すると、鉄筋の発錆やコンクリートのポップアウトを引き起こす可能性が高くなる。これまで屋上スラブのひび割れは防水層が維持されていることを前提に、あまり危険視されてこなかったが、ひび割れの存在は、防水性能の低下による躯体の劣化をもたらすと考えられ、ひび割れを無くすことが好ましいことは言うまでもない。したがって防水層や躯体部の熱応力によるひび割れの発生を最小限に抑える外断熱構法はコンクリート建築物の耐久性向上を実現する有効な手法であると考えられる。

その他にも、外断熱改修を行っていない場合は、短いスパンで躯体各部の表面温度が変化し、温度応力の作用が常態化する。この状況が長期に渡って持続するとコンクリート等に悪影響を及ぼすことが懸念されるが、外断熱改修によってこれらを抑制することが可能となる。

屋上スラブや壁においては、改修の際にひび割れ箇所の修繕を行うのが通常であるが、従来の改修でこれらに対応した場合は、温度応力の影響を低減することは難しく、ひび割れが再発する可能性がある。

屋上の改修については、本研究では実際に改修現場で多く採用される作業効率の良いかぶせ工法とし、断熱層の上に防水層を施工する工法を採用した。防水層が断熱層の上にあることから、熱や紫外線の影響によって経年劣化が進みやすいことが懸念される。この点については、メーカーの試験などによると施工 14 年経過時における伸び率で初期値比 80%以上を保持し、経年劣化が進みにくい無断熱の場合と比較しても 10%以内の差に止まるとの結果がある^{注 5)}。一方で防水層保護のため、断熱層の下に防水層を施工する工法では、断熱層の劣化が懸念されるため、熱層と防水層の位置関係については今後も検討が必要と思われる。

その他にも、外断熱によって非歩行仕様となることや、施工費用の増大についても今後検討の余地はあるが、既存ストックを有効に長期間使用する上で外断熱改修には大きな利点があると考えられる。

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（当時、早稲田大学大学院）、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) 屋上スラブ、防水層、保護コンクリート層を合わせてスラブ部とする。
 注 2) 天候が快晴、晴れ、薄曇りで降雨がない日とする。
 注 3) 典型的な 1 日は、夏期の場合は 7 月、8 月、9 月の、冬期の場合は 12 月、1 月、2 月の天候の良い日^{注 2)}から選択した。当日、前日、後日に降雨がなく、天候が快晴もしくは晴れで、計測時毎に極端な温度上昇、降下が見られず、計測データが平均値と大差ないものを選択した。夏期の典型的な 1 日は 2008 年 9 月 3 日、冬期の典型的な 1 日は、2008 年 12 月 28 日とする。
 注 4) (内外表面温度差) = (外部表面温度) - (内部表面温度) とする。
 注 5) 屋根メンブレン防水の劣化診断指針²¹⁾における 3 次診断の劣化度分類によると、劣化度ⅡおよびⅢの場合、漏水またはその痕跡が認められるとされている。なお、シート防水の場合、防水層の物性値（伸び率）が初期値比 30%以上 60%未満の場合に劣化度Ⅱ、初期値 30%未満の場合に劣化度Ⅲである。

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，堺孝司，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) 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 2003 年度版，北海道外断熱建築協議会，pp.17~20
- 5) 河原弘明，林 幸雄ほか：建築物の温度荷重に関するアンケート集計結果の報告（その 3），日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1，pp.85~86，1995.8
- 6) 柳 清敏，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
- 7) 長谷川寿夫，加茂雄宇太，北村奈津子：外断熱外装材の壁体構成による膨張収縮，日本建築学会技術報告集 第 13 巻 26 号，pp.427~430，2007.12
- 8) 長谷川寿夫，北村奈津子，加茂雄宇太：外断熱外装材の劣化に関する温度・歪み変化性状，日本建築学会北海道支部研究報告集 No.78，pp.381~384，2005.7
- 9) 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通気性に関する研究，日本建築学会北海道支部研究報告集 No.76，pp.9~12，2003.6
- 10) 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
- 11) 谷岡洋介，寺岡勝，福原安洋：自己歪応力による鉄筋コンクリート構造物の損傷とそれが耐震性能に及ぼす影響（その 3）（温度変動に伴うひび割れ幅の変動調査），日本建築学会大会学術講演梗概集 C-2，pp.109~110，2008.9
- 12) 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
- 13) 伊庭千恵美，鈴木大隆，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（外断熱が躯体内湿気性状に及ぼす影響），日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2，pp.489~490，2004.8

- 14) 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), 日本建築学会学術講演梗概集 D-2, pp.461~462, 2005.9
- 15) 西脇智哉, 三橋博三: 有害なひび割れの進展抑制によるコンクリート構造物の長寿命化に関する基礎的研究, 日本建築学会東北支部研究報告会, pp.33~36, 2006.7
- 16) 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
- 17) 北海道外断熱建築協議会: 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
- 18) 北海道外断熱建築協議会: RC 造外断熱の疑問に答える, 北海道外断熱建築協議会, 2008.5
- 19) 坂本雄三: 断熱工法の基礎, トステム建材産業振興財団
- 20) 坂本雄三: 住宅の断熱工法の現状と課題, トステム建材産業振興財団, 2004
- 21) 建設大臣官房技術調査室: 建築防水の耐久性向上技術, 技報堂出版, 1987.4
- 22) 清水建設テクニカルグループ: コンクリート建物のひびわれ, テクネット, 2009.4
- 23) 和泉意澄志ら: コンクリートの劣化と補修がわかる本+plus, セメントジャーナル社, 2009.2
- 24) 川上 洵, 小野 定, 岩城一郎: コンクリート構造物の力学 ~ 解析から維持管理まで ~, 技報堂出版, 2008.4
- 25) 戸川一夫ら: コンクリート構造工学, 森北出版, 2003.5
- 26) 町田篤彦ら: 鉄筋コンクリート工学, オーム社, 2005.12
- 27) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説—許容応力度設計法, 日本建築学会, 1999.11

(2010年5月10日原稿受理, 2010年10月1日採用決定)