

論文 RC 外壁の鉄筋付着損失とひび割れ幅の温度変動の関係性

橋田 浩*1・宮地 陸矢*2

要旨： RC 壁等の収縮ひび割れ幅はひび割れ発生後の鉄筋の付着損失長さに強く依存していることから、建築学会指針等のひび割れ幅予測式を拡大適用することで、実際に生じているひび割れ幅の計測値に基づき、等価付着損失長さを推定することが可能である。本報では、RC 外壁のひび割れ発生後の温度変化に伴うひび割れ幅の変位量もこの等価付着損失長さに依存していると仮定し、模擬ひび割れ試験体を用いてその関係性を検証した。その結果、温度変化によるひび割れ幅変位は、鉄筋付着損失長さに依存し、等価付着損失域のコンクリートの自由膨張・収縮変位に近い値であることを確認した。

キーワード： 乾燥収縮, ひび割れ幅, 付着損失長さ, 修正ベース・マレー式

1. はじめに

RC 壁の収縮ひび割れ幅は、ひび割れ発生後の付着損失域の鉄筋ひずみとコンクリートの収縮拘束引張に対する可逆性ひずみによって算定される。したがって、ひび割れ幅は鉄筋の付着損失長さに強く依存する。また、ひび割れ幅はコンクリートの乾燥収縮がほぼ収束した後も外気温変化などで変動することが知られている¹⁾。このようなひび割れ幅の変動量は、ひび割れ補修材を適切に選択する際の重要な指標となる。

本報告では、既往の報告²⁾を再整理することで、ひび割れ幅の温度変化に伴う変位量は、等価付着損失域のコンクリートの自由温度膨張・収縮変位と見なせるとの仮説を立て、ひび割れ幅の変動と付着損失長さの関係性について、模擬試験体を用いた実験で検証した結果について報告する。

2. 既往の報告²⁾の整理

2.1 等価付着損失と修正ベース・マレー法

鉄筋引抜き時の付着損失状況をひび割れ発生時のイメージに置き換えると図-1, 2 のようになる。

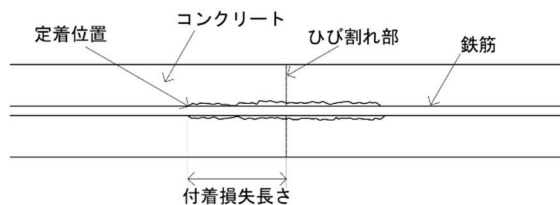


図-1 RC のひび割れ時の模式図

それまでコンクリートが負担していた収縮拘束引張力を鉄筋が負担することになり、それに応じた鉄筋ひずみとひび割れ近傍の付着損失が生じる。同時に、コ

ンクリートは破断時ひずみ分の収縮が生じる。ここで、ひび割れ幅は図-2 に示すようにハッチングした面積（ひずみ×付着損失長さ）となり、このひび割れ幅を図-2 のように三角形面積で簡便に近似すれば、等価付着損失長さ l_e は付着損失長さ l の 1/2 となる。

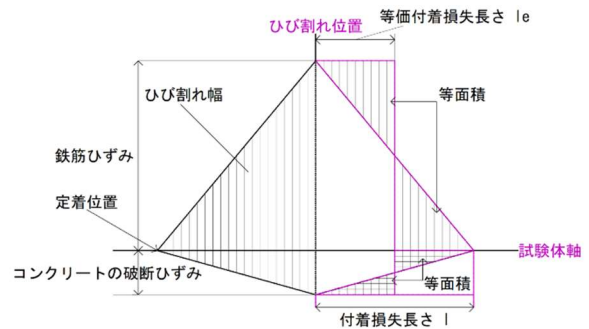


図-2 ひび割れ時の等価付着損失長さの定義

建築学会の RC 造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針³⁾で採用されている収縮ひび割れ幅予測式である修正ベース・マレー法（以降、修正 BM 法と称する）を以下に示す（式（1）～（4））。

ひび割れ近傍の等価付着損失長さ l_e (mm)

$$l_e = a \frac{db}{\rho} \quad (1)$$

収縮ひび割れ幅 ω (mm)

$$\omega = 2l_e \left(\frac{\sigma_s}{E_s} + \frac{\lambda \varepsilon_{sh}(t, t_0)}{b} \right) \quad (2)$$

収縮ひび割れ本数 m (本)

$$m = 1 + \frac{Ln\rho}{2l_e} \left(\frac{\lambda \varepsilon_{sh}(t, t_0) - \varepsilon_t}{b \varepsilon_t} \right) \quad (3)$$

*1 中部大学 工学部建築学科教授 博士（工）（正会員）

*2 中部大学大学院 工学研究科建設工学専攻

鉄筋応力 σ_s (N/mm²)

$$\sigma_s = E_s \left(\frac{\lambda \varepsilon_{sh}(t, t_0) - \varepsilon_t}{b} + \varepsilon_t \right) \cdot \left(\frac{L - 2m l_e}{L n \rho + 2m l_e} \right) \quad (4)$$

d_b : 鉄筋径 (mm) ρ : 鉄筋比

a : 比例定数 (標準値 $a = 0.05$)

σ_s : 鉄筋応力 E_s : 鉄筋のヤング係数 (N/mm²)

λ : 拘束度 $\varepsilon_{sh}(t, t_0)$: コンクリートの収縮ひずみ

L : 部材長 (mm) n : ヤング係数比 ($n = E_s/E_c'$)

E_c' : コンクリートの有効ヤング係数 (N/mm²)

ε_t : コンクリートの引張限界ひずみ ($\varepsilon_t = 1 \times 10^{-4}$)

b : クリープを考慮した低減係数 ($b = 2$)

修正 BM 法における等価付着損失長さ l_e は、鉄筋比に対する鉄筋径の比で単純に決定されている。比例定数 a は、コンクリートの付着強度に対する引張強度の比に依存しており⁴⁾、普通強度レベルの一定値を与えている。また、コンクリートのクリープ係数は 1.0、有効ヤング係数は静弾性係数の 1/2 としている。既往の報告では、標準比例定数 ($a=0.05$) を用いた等価付着損失長さは、一般的な外壁仕様である D10 および D13 の鉄筋比 0.5~1.0% 程度の範囲で、静的な引抜き試験における付着損失状況と概ね同等であることも確認されている²⁾。

2.2 修正 BM 法による等価付着損失長さの算定例

修正 BM 法を拡大適用することで、実際のひび割れ幅から等価付着損失長さを推定することが可能である。すなわち、実測ひび割れ幅に合致するように、修正 BM 法の式 (1)、(2) から比例定数 a および等価付着損失長さを逆算することができる。既往の報告²⁾ における築数十年経過した RC 外壁の実測ひび割れ幅から推定される等価付着損失長さの例を表-1 に示す。

表-1 実測ひび割れ幅と等価付着損失長さの推定

配筋	外壁A-1 D10 @200 ダブル	外壁A-2 D10 @200 ダブル	外壁B D10 @200 ダブル	外壁C-1 D10, D13 @200ダブル	外壁C-2 D10, D13 @200ダブル
鉄筋比(%)	0.48	0.48	0.48	0.55	0.55
壁寸法 (壁長×高さ× 壁厚)(mm)	6000×1400 ×150	6000×1400 ×150	12000×4000 ×150	18000×4000 ×150	18000×4000 ×150
実測ひび割れ幅(mm)	0.35	0.40	0.60	1.20	0.60
a	0.11	0.135	0.175	0.45	0.17
等価付着損失長さ(mm)	218	268	347	910	344

2.3 RC 外壁のひび割れ幅の変動測定例

図-3、図-4 に表-1 の外壁 A-1 (ひび割れ幅 0.35mm) を一例として、外壁の温度変化、パイ型変位計で計測したひび割れ幅の変動結果²⁾ をそれぞれ示す。これらの図から、温度変化に伴い膨張・収縮するひび割れ幅の変位が見られ、屋内外の温度差の影響による反りも認められる。そこで、屋内外平均値を用いて 1 日毎の温度と変位の関係をプロットしたのが図-5 である。

図-5 から、壁軸方向の単位温度当たりの平均ひび割れ幅変位は、0.0034mm となっている。仮に、この温度変化に伴う変位が、等価付着損失域のコンクリートの自由温度膨張・収縮変位に相当するとすれば、コンクリートの線膨張係数を $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ として、等価付着損失長さ l_e は 170mm ($2l_e = 340\text{mm}$) となる。

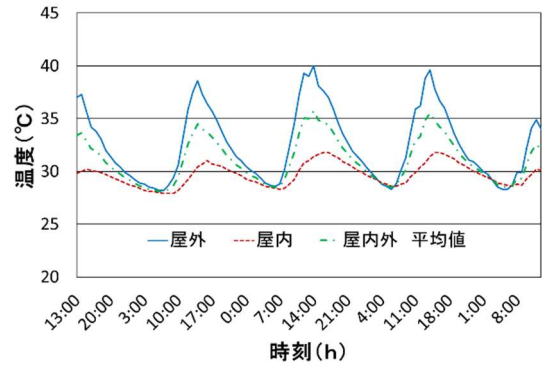


図-3 外壁 A-1 温度変化

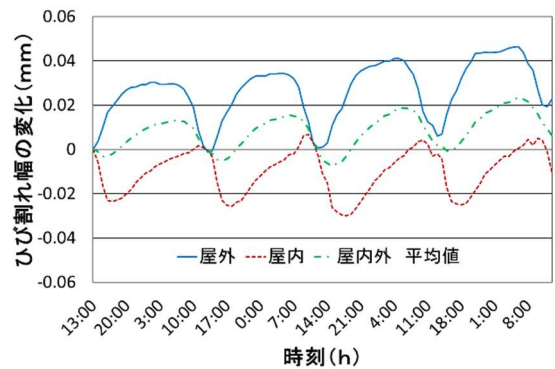


図-4 外壁 A-1 ひび割れ幅の変動

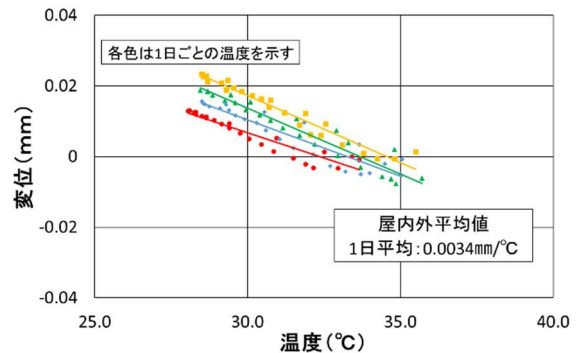


図-5 外壁 A-1 温度-変位の関係

2.4 等価付着損失長さとしひび割れ幅の温度変位

図-6 は、表-1 の各外壁における修正 BM 法を拡大適用して求めたひび割れ両側の等価付着損失長さ ($2l_e$) と実測したひび割れ幅の単位温度変位の関係を示している。両者は、外壁 C-1 を除き、ほぼ正の比例関係となっており、その傾きは $9.9 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 、すなわち、コ

ンクリートの線膨張係数に相当している。ここで、外壁 C-1 は長大壁最端部の斜めひび割れであり、収縮ひび割れが分散する「外壁一般部（かぶり 40mm 程度、開口部・端部斜めひび割れは除く）」³⁾を前提としている修正 BM 法の適合条件外といえるものである。

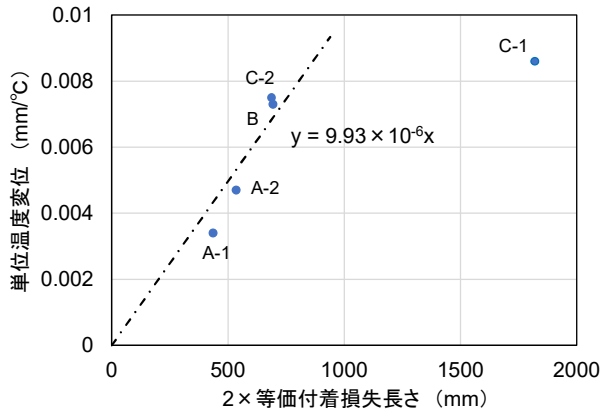


図-6 等価付着損失長さとひび割れ幅の単位温度変位

以上から、限られた実測データではあるが、温度変化に伴う RC 外壁一般部のひび割れ幅の温度変位は、修正 BM 法を拡大適用して得られた等価付着損失域におけるコンクリートの自由膨張・収縮変位とほぼ同等となっている。

しかし、ここでの等価付着損失長さは、あくまでひび割れ幅予測式による推定結果であり、実際の鉄筋付着損失長さが温度変化に伴うひび割れ幅の変動にどの程度影響しているかは検証できていない。そこで、実壁の拘束状態を想定した模擬ひび割れ試験体を用いた再現実験を行って確認することとした。

3. 模擬ひび割れ試験体のひび割れ幅変動計測

3.1 模擬ひび割れ試験体

実験で使用した模擬ひび割れ試験体を図-7, 8 に示す。試験体（断面 200×32mm）は、ひび割れを中央部に入れるために厚さ 1mm のスチレンボードを挟み模擬ひび割れとした。埋設鉄筋は D6 を使用し、鉄筋比は 0.5% とした。付着損失長さの違いは鉄筋に発泡シートを巻き付け絶縁することで再現し、付着損失長さ L は模擬ひび割れ部から 0mm および 100mm の 2 種類とした。なお、ここでの付着損失長さ L は、図-2 における等価付着損失長さ l_e と同義となる。

試験体は、実壁の梁・基礎による拘束状態を想定し、拘束鋼材として D10 の丸鋼を溶接した溝形鋼（75×45mm, 断面積 882mm²）を試験体に一体化させた。試験体の種類は、梁・基礎近傍のひび割れ部を想定した拘束力の強い試験体 A と、壁面中央のひび割れ部を想

定した拘束力の弱い試験体 B の 2 種類作製した。

試験体（被拘束体）はモルタルとし、調合は W/C = 50%, S/C = 2.7 とした。試験体は、打込み後 2 週間湿潤養生し、その後 2 週間乾燥させてから温度変化を与えた。

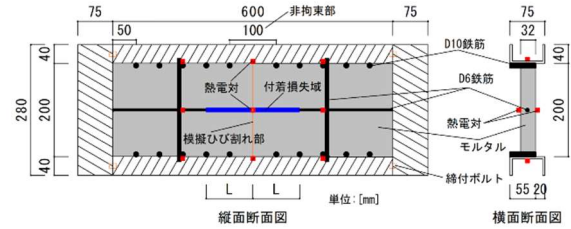


図-7 試験体 A（拘束強）

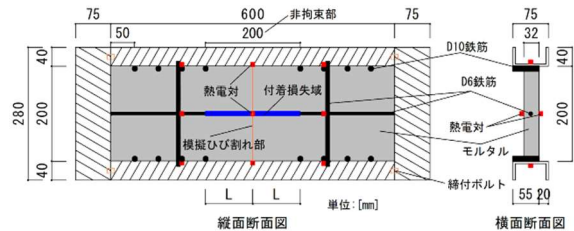


図-8 試験体 B（拘束弱）

3.2 ひび割れ幅変動の計測方法

実験では、試験体両面の模擬ひび割れ部にパイ型変位計をそれぞれ設置してひび割れ幅の変動を計測した。温度変化については、図-7, 8 に示すように、熱電対を用いてモルタル表裏面、拘束鋼材側面、パイ型変位計など計 14 ヲ所で計測した。

試験体の加熱方法は 2 種類とし、実験 I は、図-9 に示すように投光器を 1 台使い、模擬ひび割れ部に熱を当てて局所的に温度変化を与え、実験 II は、図-10 に示すように投光器を 2 台使い、試験体全面の温度がより均一になるようにした。いずれもひび割れ部の表面温度を 1 時間で 20°C から 40°C まで上昇させ、その後 1 時間 40°C を保持した後、自然冷却させた。なお、拘束鋼材は断熱材でカバーすることで、出来るだけ温度変化を与えないようにした。

3.3 実験 I の結果（局所的な加熱）

図-11 に実験 I の温度変化、図-12~15 に実験 I のひび割れ幅変動を示す。図-12~15 の図中に示す単位温度変位（表・裏面平均補正值）は、最高温度（40°C）を保持し、ひび割れ幅変動が比較的少ない 100~120 分時の平均値で算出している。ただし、実験中の拘束鋼材が 10°C 程度の温度上昇があり、その影響を無視できないと考えられたので、拘束材の温度膨張量を補正したものである。補正值は「鋼材の線膨張係数（11.5 × 10⁻⁶/°C）×温度差×（非拘束部の長さ、100mm または

200mm)」で計算した。なお、投光器側のパイ型変位計は温度変化が大きいため、変位計（測長 50mm）とモルタル表面との温度差分の補正を同様にやっているが、変位としての補正は最大 0.005mm 程度であった。

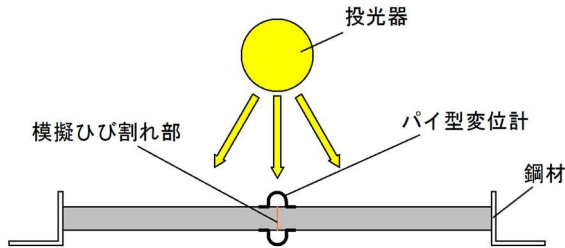


図-9 実験 I 実験状況

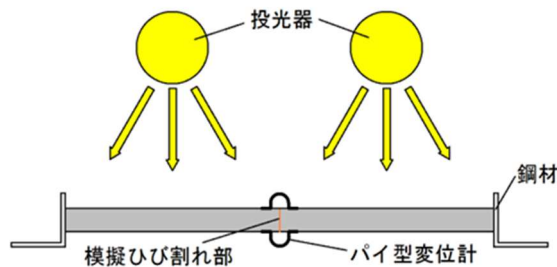


図-10 実験 II 実験状況

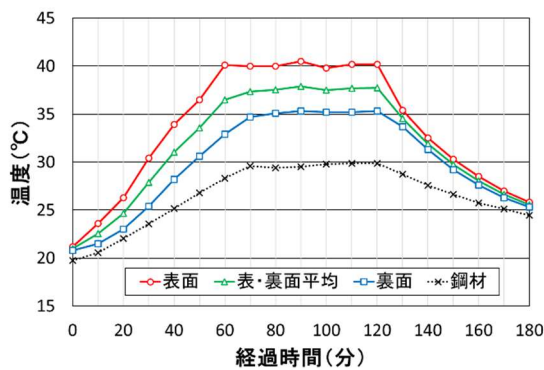


図-11 実験 I 温度変化

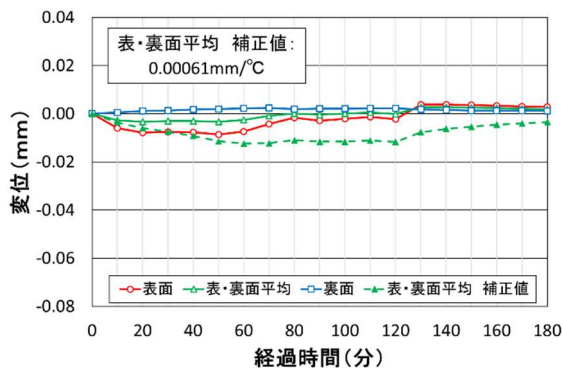


図-12 実験 I ひび割れ幅変動
試験体 A (L=0mm)

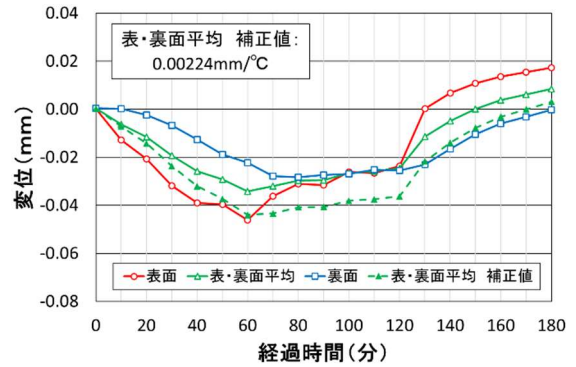


図-13 実験 I ひび割れ幅変動
試験体 A (L=100mm)

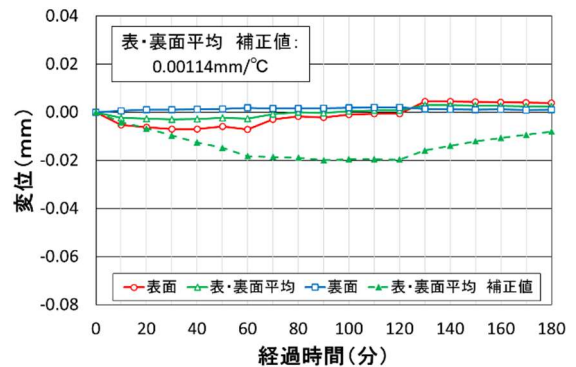


図-14 実験 I ひび割れ幅変動
試験体 B (L=0mm)

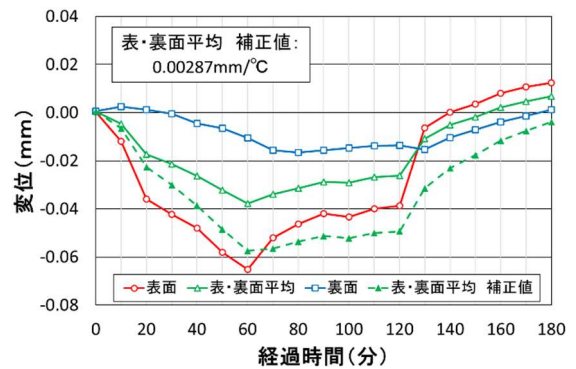


図-15 実験 I ひび割れ幅変動
試験体 B (L=100mm)

図-12, 14 の L=0mm 試験体の表・裏平均補正值から、付着損失が無くても最大 0.01, 0.02mm 程度の変位が生じている。一方、図-13, 15 の L=100mm 試験体の表・裏平均補正值は最大 0.04, 0.06mm 程度とより大きな変位が計測され、拘束の弱い試験体 B の方がひび割れ幅の変位が大きくなっていることがわかる。

3.4 実験 II の結果 (全面的な加熱)

図-16 に実験 II の温度変化、図-17~20 に実験 II のひび割れ幅変動を示す。単位温度変位とその補正は、実験 I と同様の算出方法とした。

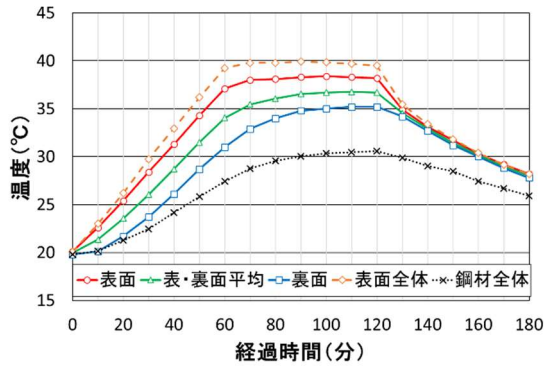


図-16 実験 II 温度変化

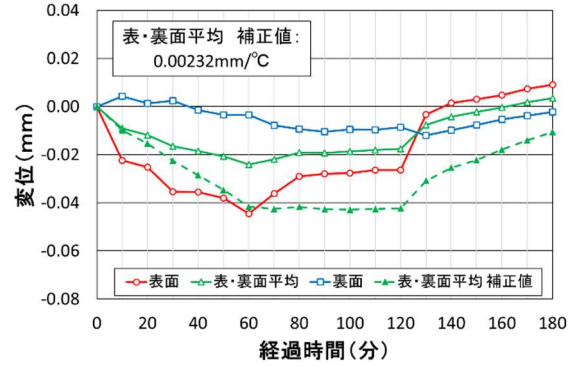


図-20 実験 II ひび割れ幅変動
試験体 B (L=100mm)

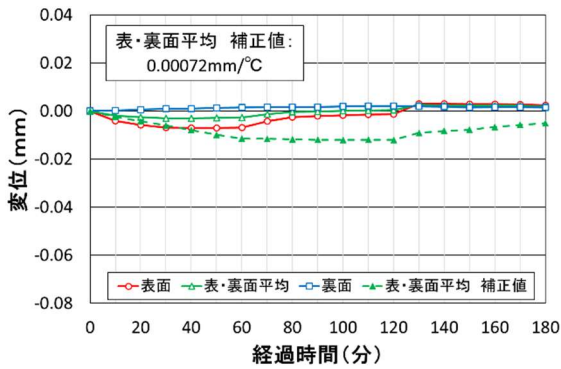


図-17 実験 II ひび割れ幅変動
試験体 A (L=0mm)

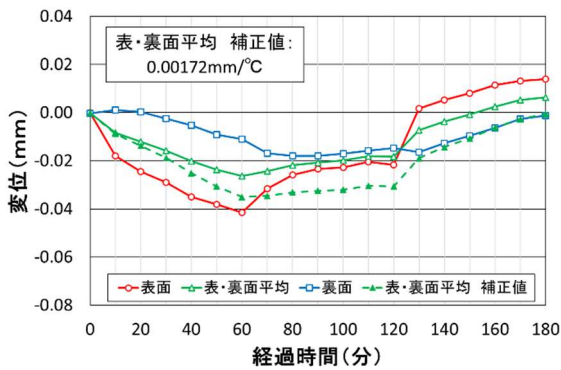


図-18 実験 II ひび割れ幅変動
試験体 A (L=100mm)

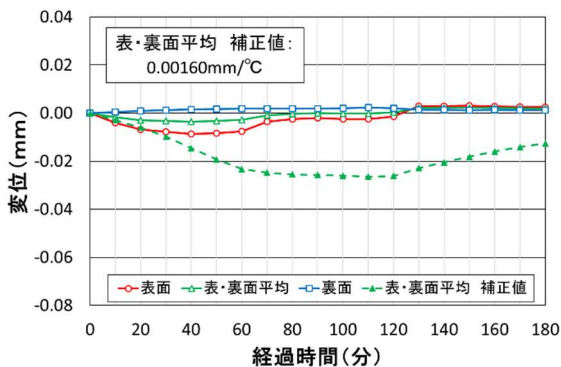


図-19 実験 II ひび割れ幅変動
試験体 B (L=0mm)

図-17, 19 の L=0mm 試験体の表・裏平均補正值から、実験Iと同様に付着損失が無くても一定の変位が生じている。一方、図-18, 20 の L=100mm の試験体の表・裏平均補正值を比較すると、実験 I と同様に拘束力の違いによってひび割れ幅変動も若干変化することがわかる。また、実験 I の結果と比較すると試験体 A, B どちらも実験 II の結果の方が変位は小さくなり、ひび割れ部以外の壁面の温度条件でひび割れ幅の変動は変化するものと考えられた。

3.5 ひび割れ幅の変動と付着損失長さの関係性

ひび割れ幅の変動と付着損失長さの関係性について考察するに当たり、まず、模擬実験に用いたモルタルの線膨張係数を同定した。模擬ひび割れ実験と同一調合のモルタル角柱 (100×100×400mm) をアルミ箔テープで全面シールし、埋込み型変位計により恒温槽内での温度変化に基づいて算定したが、図-21 に示すように、コンクリートの代表値と同じ $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ という結果であった。

図-22 に図-13, 15, 18, 20 の「表・裏面平均補正值の変動」と「仮定に基づいた変動」をまとめたもの示す。仮定値は「温度変位 = $2 \times 10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ (モルタルの線膨張係数) × 付着損失長さ L (100 mm) × 温度差」より算出している。

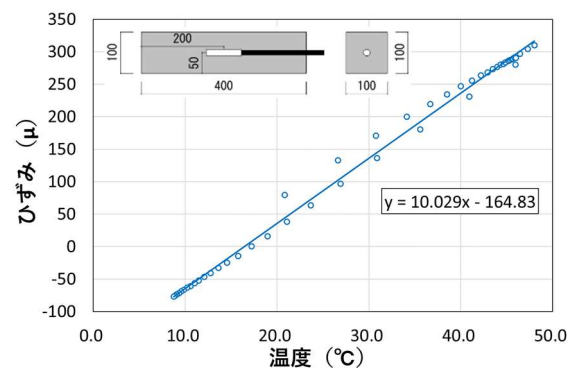


図-21 線膨張係数の測定結果

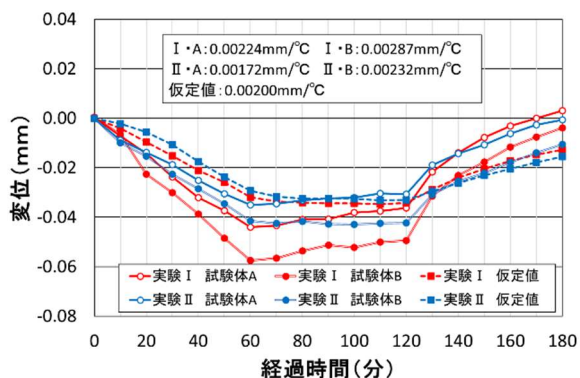


図-22 ひび割れ幅変動 比較グラフ (L=100mm)

表-2 仮定に基づく等価付着損失長さの算定結果

	I・A	I・B	II・A	II・B
L=0mm	31	57	36	80
L=100mm	112	144	86	116

また、表-2は、温度変化に伴うひび割れ幅の変位が、付着損失域のモルタルの自由温度膨張・収縮変位で生じると仮定した場合の各試験体における付着損失長さの算定値を示している。

図-22 から、実験 I の局所的な加熱の場合「表・裏面平均補正值の変動」の方が「仮定に基づいた変動」よりやや大きな結果となっているものの、全般的に両者は良く合致している。表-2 から、付着損失長さ L=100mm の試験体では、それぞれの実験条件で差異はあるものの、算定値は付着損失長さに近い値となっており、拘束の弱い試験体 B の方が大きな値となっている。一方で、付着損失長さ L=0mm の試験体でも、算定値は 31~80mm となっており、付着損失が無い場合でも一程度のひび割れ幅変動が生じることがわかる。

以上を総合すると、RC 外壁の温度変化に伴うひび割れ幅の変位は、ひび割れ部の鉄筋付着損失長さに依存し、結果的に、付着損失域のコンクリートの自由温度膨張・収縮変位に近い変位となるものの、その挙動は複雑であり、配筋条件や拘束条件で左右される可能性も考えられ、定量化にはさらなる検討が必要と思われる。

4. まとめ

本報では、温度変化に伴うひび割れ幅の変位量が鉄筋の等価付着損失長さに依存していると仮定し、両者の関係性について、RC 外壁の模擬ひび割れ試験体を用いて検証した。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) 温度変化に伴うひび割れ幅の変位は、鉄筋付着損失長さに依存していることが確認できた。
- (2) 本検証範囲では、温度変化に伴う RC 外壁のひび割れ幅の変位は、等価付着損失域のコンクリートの自由温度膨張・収縮変位に近い値となった。

参考文献

- 1) 張玉露 他：乾燥収縮ひび割れの開閉挙動に及ぼす壁面温度と部材拘束条件の影響に関する研究，コンクリート工学会年次論文集，Vol.41，No.1，pp.425-430，2019
- 2) 宮地陸矢 他：簡便な収縮ひび割れ幅予測式における鉄筋の付着損失長さの検証，コンクリート工学会年次論文集，Vol.44，No.1，pp.256-261，2022
- 3) 鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針（案）同解説，日本建築学会，pp.78-80，2006
- 4) 橋田浩，辻埜真人：簡易な収縮ひび割れ幅予測法（修正ベース・マレー式）の床スラブへの適用，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.161-162，2016