論文　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

張　玉露[*1]・寺本　篤史[*2]・金澤　健[*3]・大久保　孝昭[*4]

要旨：コンクリート構造物に生じるひび割れの補修工法や材料の合理的な選定のために，ひび割れ挙動に着目した。ひび割れ挙動の時間依存性に対して実構造物における長期間モニタリング並びに数値解析に基づく検証によって，1）ひび割れ挙動に壁面温度が大きな影響を与えること，2）ひび割れ挙動の温度依存性は，壁面温度の変化速度によって異なること，3）ひび割れが発生する場合，周囲部材はひび割れ挙動に影響を与え，拘束の有無によってひび割れの開閉挙動が異なることを明らかにした。本稿で実施した実構造物におけるひび割れ挙動の測定はひび割れ補修工法の選定に有益なデータになると考えている。

キーワード：コンクリート，ひび割れ補修，ひび割れ挙動，温度変化，拘束

1. はじめに

コンクリートの乾燥収縮等によって生じたひび割れの補修を適切に実施することは，コンクリート構造物の長寿命化のための重要な維持管理項目の一つである。

コンクリート構造物のひび割れ補修方法に関して，例えば「建築改修工事監理指針」[1)]に，一般的な補修材の選定方法が記載されている。この指針では，補修材選定フローとして，「ひび割れ部の漏水の有無」，「ひび割れ部の挙動の有無」，「ひび割れ幅」が規定されている。しかし，「ひび割れ部の挙動の有無」に関しては，実際にひび割れ開閉挙動を取得することの労力の大きさから，実測値を使用せず，経験によって判断している場合が多い。即ち，補修材の選定が十分な工学的根拠に基づいて行われているとは言えない。

この結果として，補修後に，補修部から再びひび割れが発生する事例もみられ，コンクリート構造物のひび割れ開閉挙動をより簡便かつ高精度に実測あるいは推定する手法が求められている。

実際に構造物のひび割れ開閉挙動を測定した既往の研究[2), 3)]では，構造物に生じたひび割れの開閉挙動は，壁面の環境要因によって大きな影響を受けることが報告されているが，それぞれの要因を定性的，定量的に整理するまでには至っていない。著者の一人は，既往の研究[4)]において，夏期と冬期の各一週間程度の期間に渡って実構造物に生じた貫通ひび割れの開閉挙動を測定した事例を報告した。この事例によると，ひび割れの開閉挙動は，周辺部材による拘束や，外部環境(温度，湿度)変化等の影響を受けるとしている。なかでも特筆すべき事例として，屋外側壁面が日射の影響を受ける日中において，屋外側のひび割れと屋内側のひび割れは，反対方向に挙動し，壁面には反り変形が生じている結果を報告した。一方で，この既往の研究は夏期から冬期に亘って連続的に測定したものではないため，季節間の温度変動がひび割れ開閉挙動に及ぼす影響に関しては，不明な点が残されている。

ひび割れの開閉挙動には，温度の他にも，含水率変化（降雨）や，対象部材の拘束条件，対象ひび割れの形状（ひび割れ発生要因）など多数の影響要因が考えられるが，本研究では，ひび割れ開閉の最も大きな影響要因と考えられる壁面温度の日変動及び年変動によって生じるひび割れの開閉挙動について検討を行う。

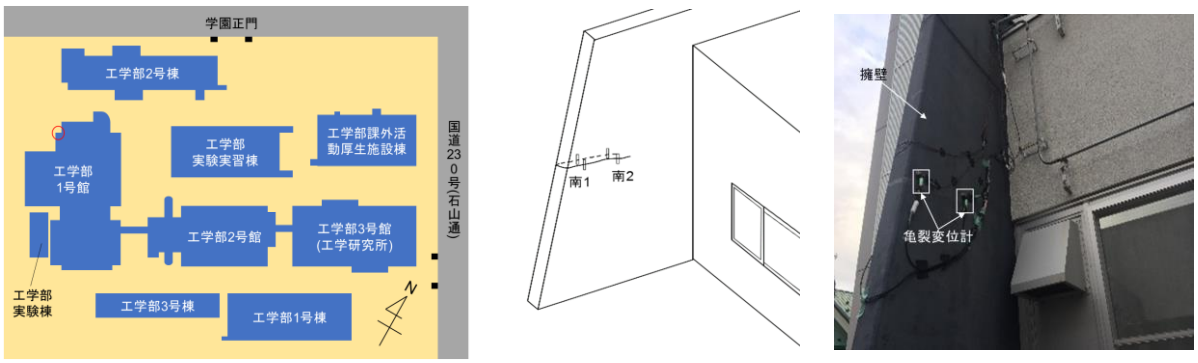
また，モニタリング対象となるひび割れの選定に際しては，極力複雑な要因が含まれないための配慮として，比較的単純な形状を有する乾燥収縮による貫通ひび割れを対象とした。壁面温度とひび割れ開閉挙動の相関について検討する場合，日射条件や気温の日変動，年変動は地域や対象建物によって全く異なることが予想されるため，著者らの研究グループは，日本の各都市におけるひび割れ開閉挙動のデータを蓄積していく計画を持っているが，本研究ではまず，北海道札幌市における構造物を対象としてひび割れ開閉挙動のモニタリングを実施した。

さらに，上記モニタリング結果の合理性を検証するため，簡易な解析モデルを利用して，温度変動や部材の拘束条件がひび割れ開閉挙動に及ぼす影響を定性的に把握することを目的とした。

2. 実構造物のモニタリング

実構造物に生じたひび割れの開閉挙動は気候区分によって異なると考えられるため，最初は，寒冷地域から選

*1 広島大学 工学研究科　博士課程後期　(正会員)
*2 広島大学 工学研究院社会環境空間部門 助教 博(工) (正会員)
*3 北海学園大学　工学部社会環境工学科　講師 博(工) (正会員)
*4 広島大学 工学研究院社会環境空間部門 教授 博(工) (正会員)



a 対象部材の平面位置(○印に示す)　　b 対象ひび割れの位置　　c 実際測定の様子，例：南側

図－1　実構造物におけるひび割れ挙動長期間測定概要(北海学園大学工学部 1 号館)

定することとした。また，対象とした構造物は，壁面に乾燥収縮による貫通ひび割れを有し，かつ長期間のモニタリング測定の許可が得られたもので，その概要は以下のとおりである。

対象建物：北海学園大学工学部山鼻キャンパス 1 号館（**図－1a**）

概要：RC5 階建て

測定期間：2018 年 9 月から（2019 年 1 月現在継続中）

測定箇所：測定対象部材は，対象建物から張り出した擁壁であり，南面から北面に貫通した乾燥収縮ひび割れが生じている（**図－1b**）。東側で対象建物と接合しているため，東側方向でひび割れ挙動は拘束を受けることが予測される。また，上部には拘束材となる梁が存在せず，西側は比較的外部拘束が小さい。

亀裂変位計によるひび割れ挙動の測定は，上記擁壁の南側と北側で行った。**図－1b** に南面の計測位置を示すが，西より外部拘束が小さいと考えられる南 1 と東側建物による拘束が大きいと予想される南 2 で行った。北面での計測は，南 1 の真裏（北 1），南 2 の真裏（北 2）で行っている。実際のモニタリングの様子を**図－1c** に示す。

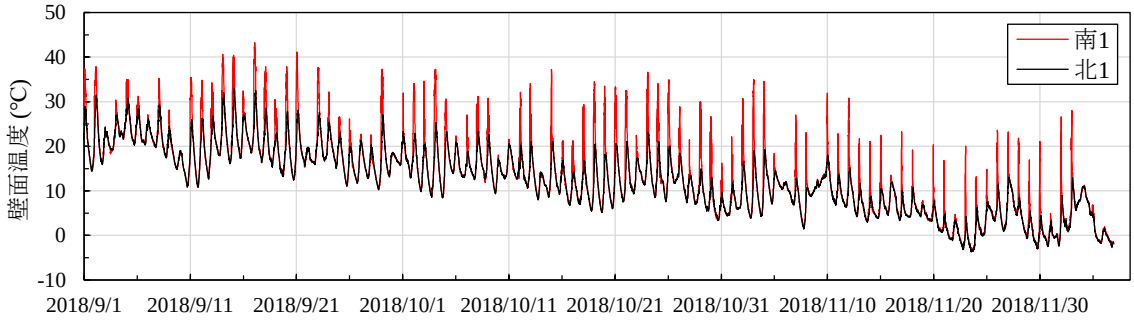
壁面温度の影響を把握するため，変位計設置箇所の極近傍に熱電対を設置し，壁面の温度の経時変化を同時に測定した。

3. 実構造物のモニタリング結果及び考察

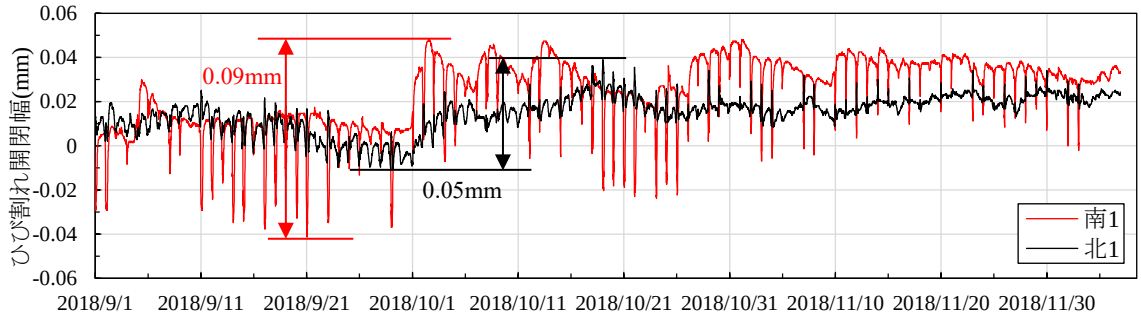
3.1 壁面温度とひび割れ開閉挙動の測定結果

札幌市において，2018/9/1 から 2018/11/30 までの期間に測定した壁面温度およびひび割れ開閉の経時変化の例として，南 1 および北 1 の測定結果を**図－2** と**図－3** に示す。

図－2 より，測定期間中における壁面温度は，細かな日変動を伴いながら 9 月から 11 月にかけて緩やかに低



図－2　壁面温度のモニタリング結果



図－3　ひび割れ開閉挙動のモニタリング結果

下していることが確認できる。また，壁面の方角が壁面温度の日変動に及ぼす影響を確認するため，全測定期間からある一週間（9/10-9/18）の壁面温度の推移を取り出したものが**図－4** である。図より，壁面は気温の日変動の影響を受けながら温度上昇，下降サイクルを繰り返すこと，日光が直射する南面において日中の壁面温度が北面より 10℃程度高くなっていることが確認できる。

また**図－3** は，測定期間中における，南 1 および北 1 地点のひび割れの開閉挙動の経時変化である。初期ひび割れ幅はクラックスケールにより 0.1mm 以下であることを確認している。図中の縦軸は 9/1 の 0 時時点を基準としたひび割れ開閉を示している。図より，いずれのひび割れ幅も刻々と変化していること，南面のほうが北面よりひび割れ開閉挙動の幅が大きいことが確認できる。測定期間中において，ひび割れ開閉幅は南 1 で 0.09mm，北 1 で 0.05mm であった。

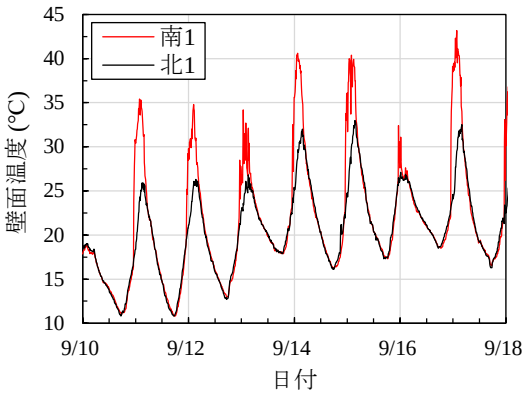
3.2 ひび割れ開閉挙動に及ぼす壁面温度の影響

既往の研究[4)]で指摘されている通り，**図－2**，**図－3** の結果から，ひび割れの開閉挙動は壁面温度と強い相関があることが推察される。そこで，ひび割れ開閉に及ぼす壁面温度の影響を明らかにするため，壁面温度とひび割れ開閉挙動の関係を**図－5** に示す。なお，**図－5** では，日射による壁面温度の日変動の影響を取り除くため，測定期間における午前 7 時時点のデータのみを抽出している。図より，ある程度のばらつきがみられるものの，南面，北面ともに，壁面温度の上昇に伴って，ひび割れ幅が減少する結果が見られた。

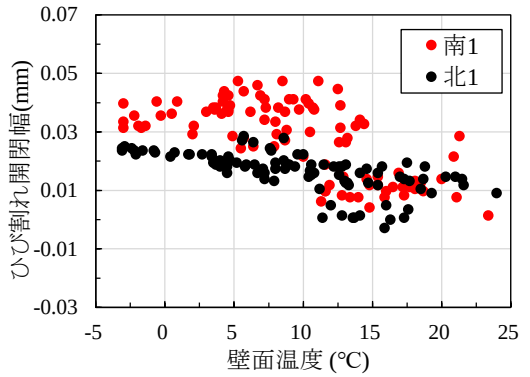
季節変動のように，緩やかに壁面温度が変化する場合，壁面断面内の温度勾配はほとんどないと考えられる。壁内に温度勾配がない理想的な状態を考えた場合，壁内全体の温度上昇によるひび割れの挙動は**図－6** の概念図のようになると考えられる。すなわち，温度の上昇によりコンクリートおよび鉄筋には熱膨張が生じる。このとき，対象壁のひび割れ幅の変動を拘束する部材（外周の柱や梁等）が存在しなければ，壁全体が変形しひび割れは開く方向に挙動すると予測されるが，実構造物のように，周辺部材からも拘束を受ける場合，熱膨張による壁全体の変形は，変形しやすいひび割れ部を埋めるように挙動することが考えられる。

次に，日射によって壁面温度に比較的急速な変動が生じる場合のひび割れ開閉挙動について考察する。**図－7** は，測定期間において，日射の影響が比較的強い 9 月 12 日の壁面温度のデータを抽出したものである。図に示されるように，日射が南面に当たり出す午前 11 時前から，南面の壁面温度が急激に増大し，南面と北面で明らかな温度差が生じていることが確認できる。

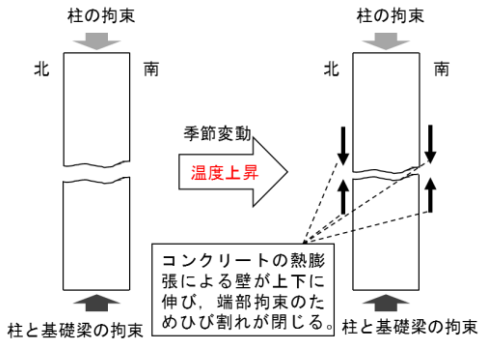
このような壁断面内に比較的大きな温度勾配が生じている際のひび割れの開閉挙動と壁面温度の関係性を調べ



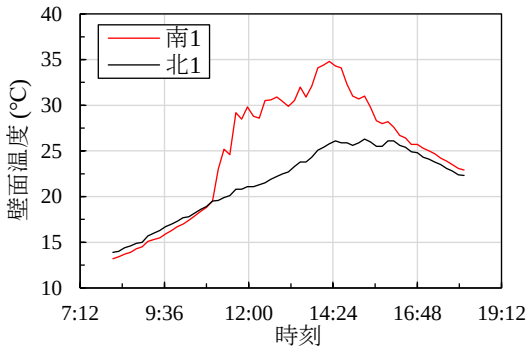
図－4 壁面温度の温度変動(南 1，北 1)



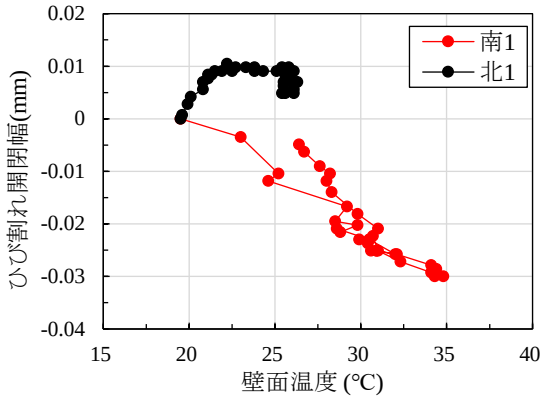
図－5 壁面温度とひび割れ開閉の関係(南 1，北 1)



図－6 断面内に温度勾配が生じない場合温度上昇に伴うひび割れ挙動の概念図



図－7 9 月 12 日の壁面温度の日変動(南 1，北 1)



図－8　9 月 12 日の壁面温度とひび割れ開閉の関係

るため，9 月 12 日に得られた両者の値をプロットしたものが**図－8** である。

図－8 に示されるように，南面は**図－5** と同様に，壁面温度の上昇に伴ってひび割れが閉じるが，北面のひび割れは，南面とは逆に開く傾向が確認できる。すなわち，壁全体がそり変形を起こすようなひび割れ開閉挙動が生じている。この壁全体のそり変形は，壁内の温度勾配に起因するものと推察される。

図－9 に壁内に温度勾配が生じている場合のひび割れ挙動の概念図を示す。南面の温度上昇によって，南面にはひび割れを閉じる方向にコンクリートの変形が生じるのに対して，北面には温度変形の駆動力が生じない。この時，壁面内に存在する鉄筋を介して，南面と北面の膨張量の差異が壁の反り変形を引き起こす。つまり，**図－6** の機構に加えてさらに，南面にはひび割れを閉じる方向の駆動力が，北面にはひび割れを開く方向の駆動力が生じると考えられる。

その後，壁面内の熱の移動や，周辺気温の上昇により，壁面北側の温度が上昇した場合，南北間の温度差に起因するそり変形は低減され，**図－6** の機構によるひび割れを閉じる駆動力が増大し，両者の成分が平衡に達した後，北面のひび割れは閉じる方向に転換する。

以上の考察より，壁面温度がひび割れの開閉挙動に及ぼす影響は，年変動のように温度変化が緩やかな場合と，日射を伴う日変動のように比較的急速な変動の場合で異なることが分かる。

仮にひび割れに補修材が注入されている状況を想定した場合，**図－6** のような断面内に温度勾配が生じない緩やかな温度変動のみが生じるとすると，ひび割れ内の補修材には，一様な圧縮応力もしくは引張応力が生じると考えられる。このとき，補修材と躯体の劣化機構として両者の界面の引張破断を前提とするなら，ひび割れ幅が最大となる時期に補修材の注入を行い，主に圧縮応力が作用するよう配慮した施工が望ましい。

一方，**図－9** のような壁全体にそり変形が生じる挙動を考慮した場合，補修材には圧縮・引張が繰り返し作用し，加えて補修材そのものの温度変化による物性の変化も考慮しなければならない。

補修材に十分な耐久性を期待する場合には，想定するひび割れ開閉挙動を正しく理解し，それに適した機能を有する材料の選定が重要である。

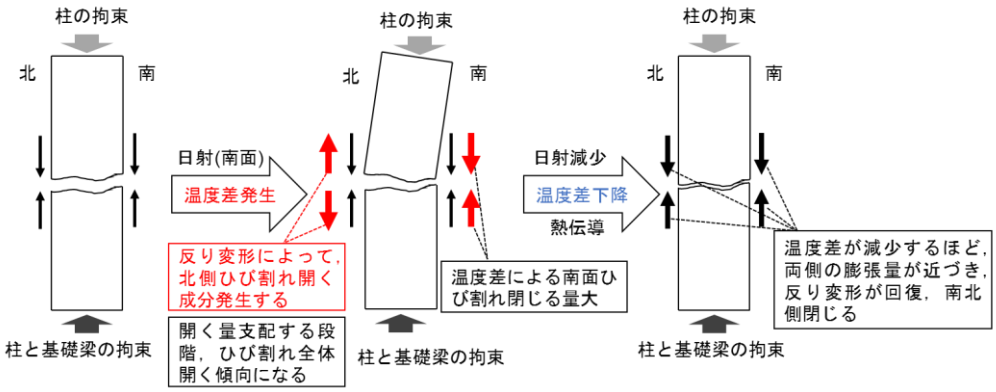
4. 数値解析による検証

本章では，実構造物におけるモニタリング結果を基づいて，数値解析によってひび割れ開閉挙動に及ぼす温度変化および拘束度の影響を考察する。本解析には，3 次元温度応力解析プログラム JCMAC3 を使用した。

4.1 解析モデル概要と解析条件

本解析では，厚さ 150mm を有する柱・梁付き壁において，高さ方向(Z 軸)の中心に初期幅が 0.2mm の模擬貫通ひび割れを導入した。壁面の配筋は，ダブルの鉄筋要素（D10 に相当）を 150mm ピッチで設置した。このとき，鉄筋要素の設置にはモデルの連続性が必要であったため，模擬貫通ひび割れ要素は，厚さが 0.2mm の著しく剛性が小さい(E＝2MPa)要素に置き換えた。上記の模擬貫通ひび割れは，壁部分のみに存在し，柱部分は通常の剛性を使用している。

ひび割れ開閉挙動として，3 章で述べたような機構を



図－9 断面内に温度勾配が生じる場合のひび割れ挙動の概念図

想定した場合，ひび割れ開閉幅はいずれも構造物の寸法の影響を受ける。そこで，解析モデルのひび割れ直行方向の高さは実構造物に近い 3000 mm と設定した。

また，ひび割れ開閉挙動に及ぼす周辺部材の拘束の影響を再現するため，断面積が 600×600 mm の梁・柱を設置した。実構造物において，熱変形に対する周辺部材の拘束度は不明である。特に実構造物の温度膨張による高さ方向（Z 軸）への変形に関しては，実測データがほとんどない。

仮に，梁要素上部の境界条件を完全固定とした場合，実構造物の拘束条件より著しく厳しい状態となり得る。よって今回の解析では，柱要素の剛性は一定（22GPa）とし，梁要素上部を完全固定のうえ，梁そのものの剛性を変動させることで，実構造物のひび割れ開閉挙動の再現を試みた。**図－10** に解析モデルの概要を示す。

コンクリート要素の伝熱・応力物性は，「マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008」[5]を参考に設定した。代表的な値を**表－1** に示す。

4.2 シリーズ 1：壁面温度勾配がひび割れ挙動に及ぼす影響

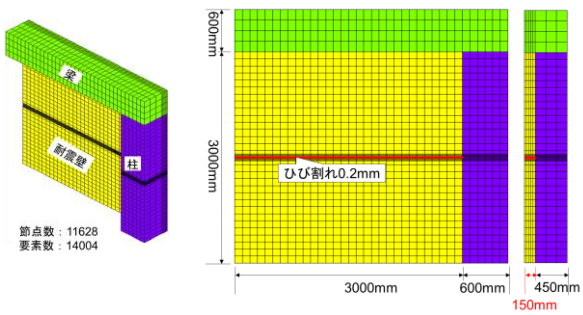
3 章で述べたモニタリング結果を参考に，壁面温度が緩やかに変化する場合と急速に変化する場合の 2 つの条件を想定して，シリーズ 1 の解析を行った。

シリーズ 1 では，**図－11** に示す 2 種類の温度履歴を片側の壁のみに与え，この間の模擬貫通ひび割れの最上部節点と最下部節点の相対変位（以下，ひび割れ開閉）を求めた。壁両側の温度差がほとんど生じない条件としては，外気温の昇温速度を＋0.1℃/h と遅くし，壁両側の温度差が大きくなる条件としては昇温速度を＋5℃/h と速くした。以下，便宜上，温度履歴を与えた側の壁を「南面」その反対側の壁を「北面」と称する。なおシリーズ 1 では，ひび割れ開閉の変動が概ね実構造物と等しくなるよう梁部材の剛性を 5GPa とした。

図-12 は，外気温の昇温速度を＋0.1℃/h とした場合の解析結果のうち，横軸に壁面温度，縦軸にひび割れ開閉をプロットしたものである。図から確認できるように，昇温速度を小さくし，南面と北面との温度差が小さくなるようにした場合，模擬ひび割れの相対変位は，南面，北面ともに閉じる方向に挙動する。これは，**図－5** の結果を再現する結果である。

一方，同様の拘束条件で，南北面に顕著な温度差が発生するように外気温の昇温速度を＋5.0℃/h と変更した場合の解析結果が**図－13** である。図のように，南面の温度のみ急激に増加する場合，南面のひび割れ開閉は壁面温度の上昇に伴い，**図－12** と比較してより大きな傾きをもって閉じる方向に挙動する。一方，北面のひび割れ開閉は，南北面の温度差が大きい初期段階には，ひび割れは開く方向に挙動し，その後，閉じる方向に転じた。この解析結果も**図－8** の結果を概ね再現するものであった。

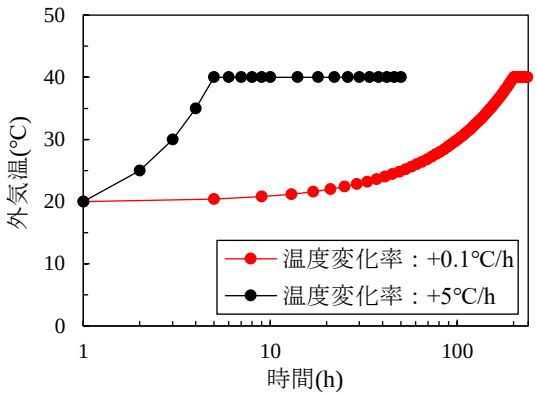
以上の結果より，外部拘束条件が同じ場合であっても，壁面の昇温速度によって発生するひび割れ挙動の正負が反転する可能性があることが確認された。



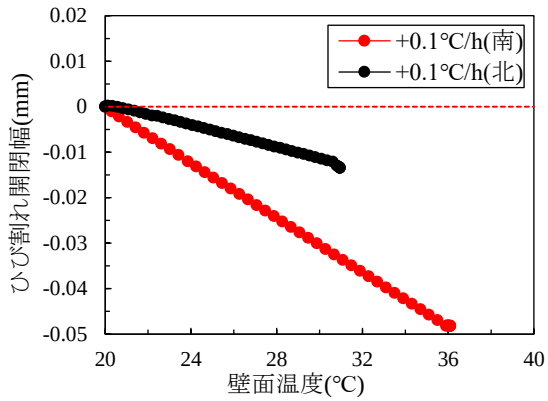
図－10　解析モデル概要

表－1　解析用伝熱・応力物性値

物性	耐震壁	梁	柱	ひび割れ
熱伝導率(W/m･℃)	1.6	1.6	1.6	0.0257
比熱(kJ/kg･℃)	1.02	1.02	1.02	1
密度(kg/m³)	2300	2300	2300	1
ヤング係数(GPa)	22	△	22	0.002
ポアソン比	0.2	0.2	0.2	0.2



図－11　解析用温度履歴



図－12　昇温速度が遅い場合の解析結果

4.3 シリーズ 2：拘束条件がひび割れ挙動に及ぼす影響

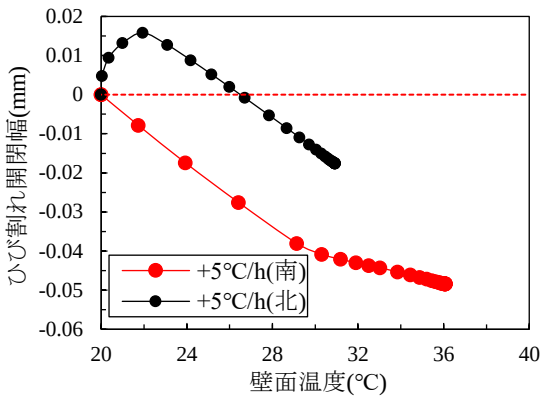
これまでの議論で言及した壁面温度とひび割れ開閉挙動の関係が，どのような構造物・部材でも生じうるのかを検証するために，シリーズ 2 では対象壁の拘束条件を変化させ，壁面温度の変動によるひび割れ開閉挙動に対する拘束度の影響を検討した。

本解析においては，対象壁周囲の梁部材の剛性を変化させることで対象壁の拘束度を制御した。また，温度条件は**図－11** に示す 2 つの温度条件のうち，南北面に顕著な温度差が発生するような昇温速度＋5℃/h を設定した。これは周辺拘束が対象壁のそり変形によるひび割れ開閉挙動に及ぼす影響を確認するためである。

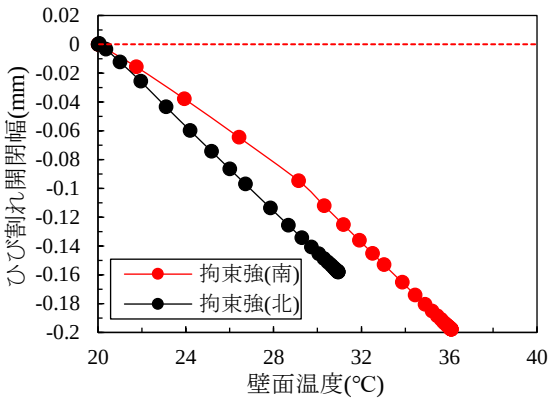
ひび割れ直交方向の拘束度を大きくするため，梁のヤング係数を 5GPa から 22GPa に変更し，同様の解析を実施した。解析結果を**図－14** に示す。**図－14** の結果は，**図－13** と異なり，南北面ともに，ひび割れの開閉は閉じる方向に推移する結果が得られた。

この結果は，梁上部を完全固定したうえで梁のヤング係数を大きくすることで，ひび割れ直行方向上部への変形が著しく抑制され，コンクリート部材の温度上昇による膨張が，ひび割れを閉じる方向にしか作用できないことが原因と考えられる。すなわち，壁面温度によるひび割れの開閉挙動は，周辺の拘束条件の影響を受け，開閉方向が変化することが確認された。一方で，シリーズ 2 で実施したような拘束条件が，現実の建築構造物で存在し得るのか否かについては未確認のため，今後の実測データを増やすことで検証していきたい。

また，本研究では，壁面温度の影響に特化した検討を実施したが，実構造物では，温度のほか乾燥や降雨による含水率の変化も重要な外部影響要因と考えられるため，引き続き，調査対象を拡大していく予定である。



図－13　昇温速度が速い場合の解析結果



図－14　拘束度が大きい場合の解析結果

5. 結論

本研究では，寒冷地である北海道札幌市の実構造物壁面の貫通ひび割れに着目して，ひび割れ挙動の長期間モニタリング及びひび割れ開閉挙動に関する数値解析を実施し，ひび割れ開閉挙動に及ぼす壁面温度並びに拘束の影響について検討した。得られた知見を以下に示す。

[1] 実構造物の貫通ひび割れの開閉挙動は，壁面温度の変化に依存し，壁面そのものの温度変化によるコンクリートの膨張・収縮ならびに，壁断面に生じる温度勾配に起因する壁のそり変形の影響を受ける。

[2] 上記の機構により，ひび割れの開閉挙動は，壁面温度の日変動と年変動とで，逆方向に動く場合がある。

[3] 同じ温度環境においても，対象部材の拘束状態によって，ひび割れの開閉挙動は異なる。

ただし，本稿で計測した壁面は両面とも外気と接する壁面であり，実際の建築物の外壁は，屋外側と室内側に面するため，壁面内の温度差は生じ易い環境にある。今後は地域の影響とともに壁面の条件についても検討を加える必要がある。

参考文献

1) 国土交通省大臣官房官庁営繕部監修：建築改修工事監理指針，財団法人建築保全センター，2004，pp.289-299

2) 田中享二，申洪澈，安藤紀明：エポキシ樹脂注入によるコンクリート・モルタルのひび割れ補修部の疲労試験方法，日本建築学会構造系論文集，Vol.67，pp.21-27，2002

3) 申洪澈，宮内博之,田中享二：エポキシ樹脂注入補修部の疲労耐久性に及ぼす気象劣化の影響，日本建築学会構造系論文集，Vol.69，pp.29-34，2004

4) 大久保孝昭，森濱直之，流田靖博，長谷川拓哉，藤本郷史：実建築物の壁面に生じたひび割れ挙動計測に基づくひび割れ補修のための調査診断に関する考察，日本建築学会構造系論文集，Vol.76，pp.737-744，2011

5) 日本コンクリート工学会：マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008，日本コンクリート工学会，2008