

論文 実構造物の氷点下時におけるひび割れ開閉挙動に関する研究

戸田 滉大*1・寺本 篤史*2・金澤 健*3・大久保 孝昭*4

要旨：本報ではコンクリート構造物に発生したひび割れの補修材の選定を合理的に行う一要因として、ひび割れ挙動に着目し、北海道・広島で実構造物のひび割れ挙動のモニタリング結果を報告する。モニタリング結果から北海道では氷点下でのひび割れ挙動が、一般的な熱膨張による変化とは異なる動きを示すことが明らかとなった。この挙動の要因は、北海道の寒さの厳しい環境に晒されたコンクリート構造物が、凍結・融解により劣化した結果であると考え、文献から得た既往の成果を根拠として挙動の概念図を提示した。本稿におけるひび割れ挙動の特徴は、ひび割れ補修工法の選定に有用であると考えている。

キーワード：コンクリート、ひび割れ補修、ひび割れ挙動、凍結、

1. はじめに

コンクリート構造物のひび割れは日常的に生じている。その抑制・制御に関する研究は数多くなされているが、現在もひび割れの存在しない構造物はほとんどない。

ひび割れは、それそのものが美観の低下をもたらすだけでなく、中性化や塩害、凍害など別の劣化を促進する。そのためひび割れの適切な補修は、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。

ひび割れの補修工法に関して、例えばコンクリート工学会では、補修工法の選定フローを示した「コンクリートのひび割れ調査、補修・補強指針-2009-」を発売している。この指針では、補修材選定フローの分岐項目として「ひび割れ部の挙動の大小」、「適用可能なひび割れ幅」が規定されている。しかし、「ひび割れ部の挙動の大小」に関しては、実際にひび割れ挙動を取得することの労力の大きさから、実測定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、補修材の選定は合理的になされているとはいえず、結果として補修後も補修部から新たなひび割れが発生する事例も多々報告されている。そのため、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方法が求められている。

ひび割れの開閉挙動は、壁面温度の変化、含水率の変化（降雨）、対象部材の拘束条件、ひび割れ発生要因など多数の要因の影響を受ける。これらの複合的な影響でひび割れは挙動するため、地域や構造物の周辺環境によってひび割れ挙動は変化すると考えられる。本研究は、これらの要因の影響度を定量的に評価することで、補修材の適切な選定方法の提案に資することが最終目的である。

筆者らは、昨年度より実構造物のひび割れ開閉挙動に関して理論的な検討と実構造物モニタリングを並行して

実施し、温度（日射）の影響と周辺部材の拘束の影響に関して既報¹⁾で報告した。既報の内容は2章で詳述するが、本論文では温度の影響のうち、特に氷点下時の挙動に着目して考察を行う。

2. 外壁のひび割れ開閉挙動と壁面温度の関係

構造物のコンクリートは温湿度の日変動、年変動に伴って膨張、収縮を繰り返している。そしてこのコンクリートの膨張・収縮は、ひび割れ開閉挙動に大きな影響を与える²⁾。

筆者らの研究グループでは、建築物の外壁に生じた乾燥収縮による貫通ひび割れに着目して、外壁の温度変動がひび割れ開閉挙動に及ぼす影響についてモニタリングおよび数値解析により検討を行ってきた。これまでの研究で外壁の表面温度とひび割れ開閉挙動に関しては以下の知見が得られている。

対象外壁が梁や柱などの周辺の部材に拘束されている場合、壁面温度上昇時にはひび割れ幅は減少し（閉じる）、反対に、温度下降時に増加する（開く）。年変動のように対象部材断面がほぼ一様に緩やかに温度変動する場合、ひび割れは上述の傾向に従って一様に挙動する。

しかし、日射等の影響により外壁の一面のみが急激に温度変動し、部材断面内に温度分布が生じる場合、高温側と低温側で温度膨張ひずみ量が異なるため、部材全体に反り変形が生じる。この挙動の概念図を図-1に示す。

この反り変形により、高温側のひび割れはより閉じる方向に挙動し、低温側のひび割れは開く方向に挙動する。そして熱伝導により部材断面の温度差が解消されると、反り変形も解消され一様に挙動する。

つまり、建築外壁のひび割れ開閉挙動と温度の関係は、年変動と日変動とで異なる。

*1 広島大学 先進理工系科学研究科 (学生会員)

*2 広島大学 先進理工系科学研究科 助教 工博 (正会員)

*3 北海学園大学 工学部社会環境工学科 講師 工博 (正会員)

*4 広島大学 先進理工系科学研究科 教授 工博 (正会員)

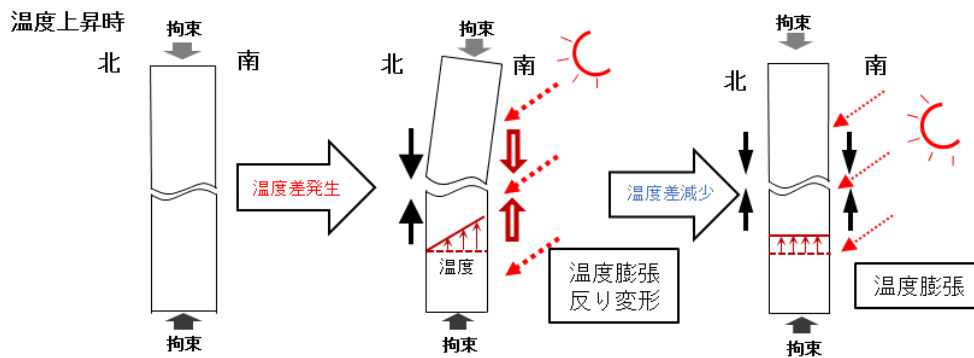


図-1 断面内に温度分布が生じる場合のひび割れ挙動の概念図

上記の知見は、夏から秋にかけて実施した建築物のモニタリングおよび数値解析から得られたものであり、氷点下時の挙動については明らかにされていない。氷点下では、熱膨張に加えてコンクリート中の水分の凍結の影響が懸念されるため、本稿では、冬から夏にかけて行った建築物のモニタリング結果を加え、氷点下時の挙動に着目した検討を行った。

3. 実構造物モニタリングの概要

3.1 北海道における計測概要

寒冷地の代表として北海道札幌市にある RC 建築物の擁壁に生じた乾燥収縮による貫通ひび割れを計測対象とした。北海道の気候の大きな特徴は、本州に比べて冬季の平均気温が低く氷点下を下回る期間が長い。そのため、日射や空調の影響により、外壁の室内側が 0 度以上、屋外側が 0 度以下という極端な温度分布が生じやすい環境といえる。また、積雪量が多いため、日中に融雪した水が壁面を沿ってひび割れに入り込む可能性がある。

写真-1、写真-2 に計測の様子、図-2 に測定部材周辺の平面図を示す。測定期間は 2018 年 8 月から 2019 年 7 月とし、対象の擁壁は、柱梁構造の建築物から張り出した形で、南北両面の壁面が外気に接している。また、南と西方向には開けているため、壁の南面にはおよそ 12 時以降に日射が当たると考えられる。計測対象のひび割れは、2018 年 8 月に計測した時点では 0.1mm 以下であった。

対象のひび割れに対してひび割れをまたぐように亀裂変位計（許容温度範囲-20℃～+60℃）を設置しひび割れ幅の変位量を取得すると同時に、ひび割れ近傍に熱電対を接着剤で固定し、表面を外壁塗装と同系統の色（黒）のビニールテープで覆うことで壁面温度の測定をした。測定箇所は擁壁に発生した貫通ひび割れ 1 本に対して南北面にそれぞれ 2 か所の計 4 か所である。

3.2 広島における計測概要

北海道と比較して氷点下に達する日数が少ない場所の代表として広島県東広島市でひび割れ開閉挙動のモニ

タリングを実施した。測定期間は 2018 年 11 月 1 日から 12 月 31 日である。対象建物は RC2 階建て建築物の 1 階耐震壁であり、対象外壁は柱・梁（基礎梁）で囲まれており、北海道の計測対象部材と比較して他部材からの拘束が大きい。対象ひび割れは壁面のほぼ真ん中に生じており地表面から上部梁に達している。計測対象のひび割れは、2018 年 11 月に計測した時点では 0.55mm 程度であった。測定箇所は写真-3 に示すように、壁の中央付近（記号：上部）と、基礎梁から 950mm 程度（記号：下部）の 2 点である。広島での測定の目的は周辺部材の拘束と気象の影響を確認することである。

拘束の影響については、剛性の大きい基礎梁に近い下部と上部との比較を目的とし、より拘束力の大きい下部でひび割れの開閉量が小さくなると想定した。気象に関しては、東広島市は山に囲まれている盆地であるため瀬戸内海気候の中では氷点下に達する日数と積雪量が比較的多いものの、北海道に比べると極端に少ないため、北海道と広島の結果から冬季のひび割れ挙動の比較を行った。



図-2 平面図（北海道）



写真-1 計測の様子



写真-2 計測概要（北海道）



写真-3 計測概要（広島）

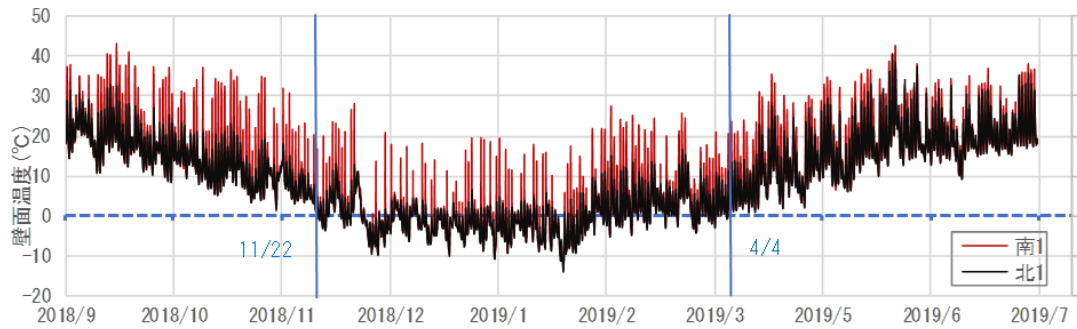


図-3 北海道 壁面温度 (年変動)

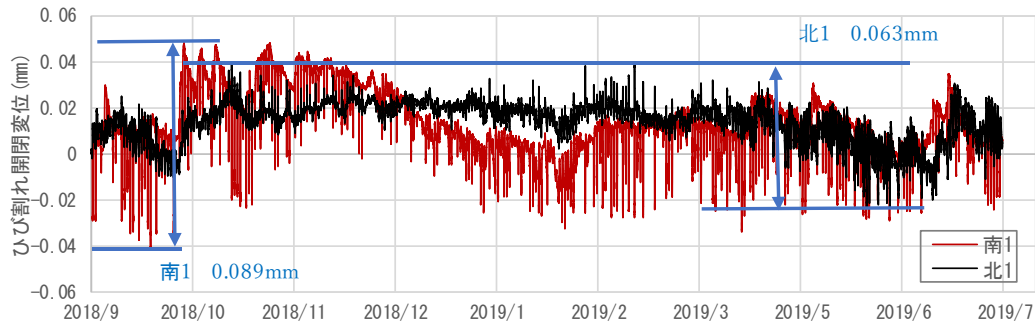


図-4 北海道 ひび割れ開閉変位→図の縦軸も (年変動)

4. モニタリング結果と考察

4.1 壁面温度とひび割れ挙動の年変動・日変動

本報では、計測期間中のある時刻のひび割れ幅を基準として、ひび割れ幅が閉じる場合を(-)、開く場合を(+)とし、「ひび割れ開閉変位」でひび割れ開閉挙動の計測結果を表す。図-3、図-4に、北海道において2018年8月~2019年7月まで行った壁面温度とひび割れ開閉変位の年変動の測定結果をそれぞれ示す。図-4の縦軸のひび割れ開閉変位とは2018年9月1日の午前0時を基準としたひび割れ挙動である。壁面温度は日変動を伴いながら秋季から冬季にかけて緩やかに減少し、11月2日から4月4日の期間は氷点下を記録している。

図-3より、日変動に着目すると、夏季では日射による南北面の温度差が約10°Cであるのに対し、秋季・冬季では20°C近い温度差となっている。このことから2章で述べた断面内の温度分布に起因する反り変形は冬季のほうが大きいと考えられる。秋季・冬季では、南1(赤)と北1(黒)の差が大きいのに対して、夏季は冬季に比べて

その差が小さくなっていることが確認できる。

一例として、図-5、図-6に11月2日と7月8日の壁面温度と2018年9月1日の午前0時を基準としたひび割れ開閉変位の経時変化を示す。どちらの日も、昼に南1のみ壁面温度が上昇しそれに伴って南1のひび割れが閉じる方向に変位している。それに対して、北1は壁面温度が上昇しているものの南1と比べるとその上昇量は小さく、北1のひび割れは南1と反対に開く方向に変位している。つまり、日射による壁面温度の急激な上昇が対象壁に反り変形を生じさせていることが分かる。このことから、図-1に示した概念図のようにひび割れが挙動していることが北海道のモニタリングからも確認できる。さらに、この2日間で発生した反り変形量(北と南の変位幅の差)は11月2日では0.061mm、7月8日は0.036mmであり、秋季・冬季の方が反り変形量が大きくなっていることが確認できた。

次に、広島で2018年11月1日から12月31日まで行ったモニタリング結果を図-7、図-8にそれぞれ示す。

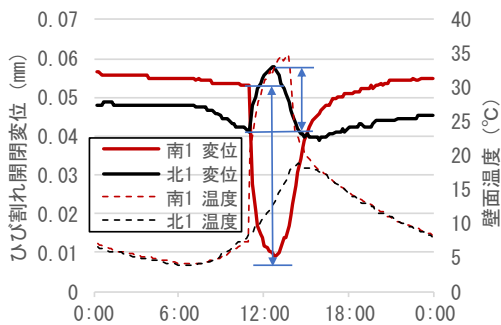


図-5 11月2日 日変動 (北海道)

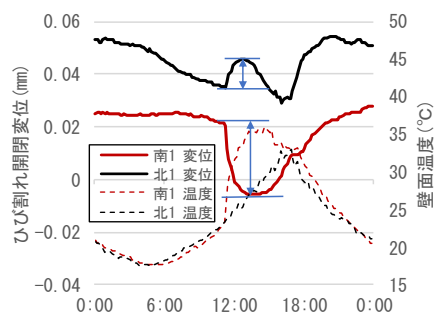


図-6 7月8日 日変動 (北海道)

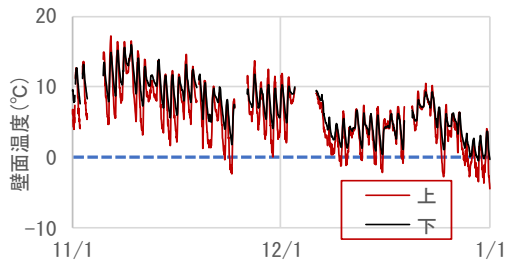


図-7 広島 壁面温度

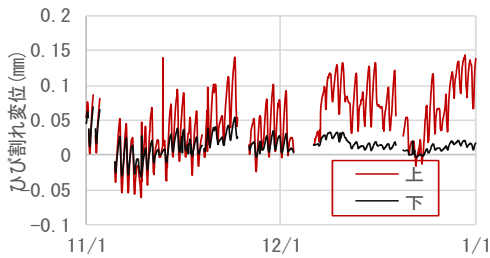


図-8 広島 ひび割れ開閉変位

測定の都合上、一部データがない時期がある。

測定期間が北海道とは異なるため、正確な比較はできないが、北海道と比べると壁面温度は高く、氷点下の日は、測定期間中 14 日間のみであった。また、同一期間中に北海道では氷点下の日が 31 日間あった。

また、図-7 より上部と下部では壁面温度にほとんど差がないにもかかわらず、ひび割れ開閉挙動は明らかに下部の方が小さく、最大で 0.12mm 程度の差異が生じた。

この差は周辺部材からの拘束の程度が影響していると考えられる。このことから、同一のひび割れであっても計測場所によりひび割れ開閉量が異なるため、補修工法の選定に使用するためのデータ収集時には、よりひび割れ開閉量が大きい箇所での計測することが推奨される。

4.2 氷点下のひび割れ挙動

図-9、図-10 に北海道で氷点下を記録した期間（11月22日から4月4日）および広島での全期間の壁面温度とひび割れ挙動の関係をそれぞれ示す。図-8 より2章で述べたように、概ね 0°C 以上では、いずれの地域でも温度の上昇に伴ってひび割れが閉じる方向に推移しているのに対し、北海道のモニタリング結果では氷点下でその傾向が反転している。この傾向は広島の結果では見られないものである。

この現象に関して考察を深めるため、氷点下時期の日変動を取り出したものが図-11 である。計測結果を分かりやすく表現するために南1（左縦軸）と北1（右縦軸）で変位 0mm の位置が異なっている。

① 日中に南面に日射が当たっている時間帯は、南面の壁面温度は 15°C 程度に達しているのに対し、北面では 2°C 程度となっており、南北面で顕著な温度差がみられる。
② その後、日没に伴い南面の温度は急激に低下し、温度

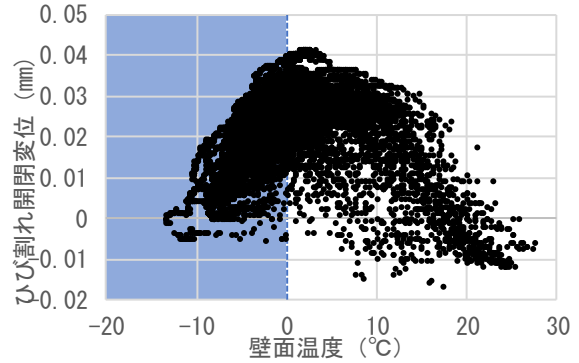


図-9 北海道 壁面温度とひび割れ開閉変位の関係

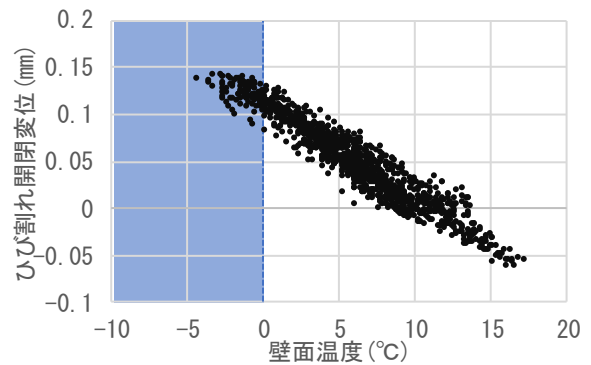


図-10 広島 壁面温度とひび割れ開閉変位の関係

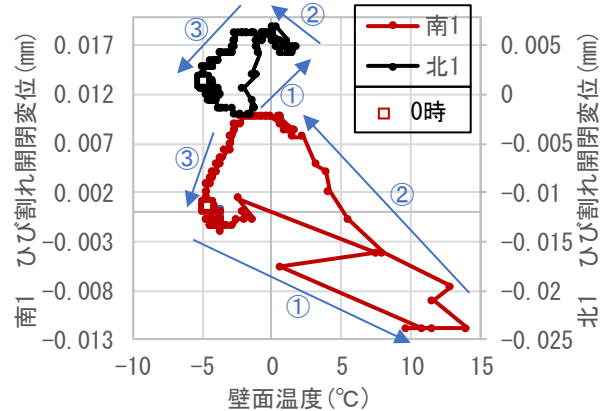


図-11 温度とひび割れ開閉変位の関係 (12/29 北海道)

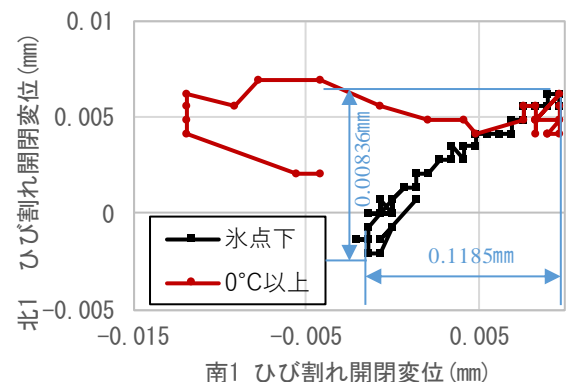


図-12 南北面のひび割れ開閉変位の関係

低下によるコンクリート材料の熱収縮と、壁断面内の温度分布の緩和によりひび割れ幅は大きくなる（開く）方向に変位する。この間、気温そのものの変化はそれほど大きくないため北面では温度変化がほとんどなく、反り変形の緩和によりわずかにひび割れは閉じる方向に推移する。③その後、南北面共に壁面温度は氷点下に達するが、いずれの面でも 0℃を境にひび割れ開閉挙動は閉じる方向に挙動する。

図-12 は図-11 の期間の南北面のひび割れ開閉挙動を比較したものである。29日の午前0時を基準としたひび割れ幅の変位を示している。

昼間の壁面温度が 0℃以上の点は関係性がみられないのに対し、氷点下では明確な正の相関がみられる。つまり、0℃以上の領域では、壁面が反り変形をしているのに対して、氷点下でのひび割れが閉じる挙動は南北面で同時に発生していることが分かる。また、図-11の氷点下の時の挙動を表す黒点の傾きを見ると南面の方が変位幅は大きい。以上の現象は、これまで著者らが測定を実施してきた他の測定地域では見られなかったものであり、氷点下にさらされやすい環境特有の現象の可能性がある。

補修材は、対象ひび割れの開閉挙動を想定して選定することが望ましいが、本研究のように、常温時と氷点下時でひび割れ開閉挙動が反転する可能性があることはこれまでほとんど考慮されていない。一般に、有機系のひび割れ補修材の多くは低温時に剛性が增大し、伸び能力が低下するため、特に氷点下を計測する地域では補修材の評価・選定に新たに考慮する必要がある。

4.3 氷点下のひび割れ挙動の概念図

図-1 に基づくと、壁部材に生じたひび割れ幅が閉じる条件は、壁面に反り変形が生じている場合と、拘束条件でコンクリート材料が膨張する場合とに分けられる。今回の計測では、南北面共に氷点下時に閉じる方向に挙動していることから、反り変形が生じていないとすると、対象壁面のコンクリートが膨張していると推察できる。そこで、筆者らは、氷点下でのひび割れ挙動が図-13に示す概念図で表されると推察している。同図に示すようにコンクリート中の水分凍結による膨張がひび割れを閉じさせると考えている。この根拠に関して、氷点下時の

コンクリート材料の体積変化挙動に関する既往の研究^{3)~6)}で以下に示す。

北海道のひび割れ開閉挙動から、対象外壁のコンクリートが氷点下で温度低下に伴って膨張している（負の線膨張係数を有する）可能性が示唆された。一般に、コンクリート中の水が凍結し、水の体積増加により周辺に膨張圧を生じさせる現象は凍害の機構としてよく知られている。しかし、線膨張係数を取得するための実験の多くは、常温から-20℃の範囲でコンクリート材料が氷点下時に負の線膨張係数を持たないと報告している。

よって、北海道の擁壁では 0℃付近で膨張に転じる変化が生じていると考えられる。この変化は、凍害を対象としたコンクリート・モルタルに繰り返し温度サイクルを与えた研究で確認された。図-14 は Rostasy ら³⁾と鎌田⁴⁾の実験結果の一部を再整理したものである。

Rostasy らの実験は、高炉セメントを用いて W/C=50% のモルタルに凍結融解サイクルをかけた際の温度とひずみの関係である。脱型後材齢 110 日まで水中養生したのち試験中の水分変化を防ぐため PE 箔で試験体を包んで試験を行っている。このことから、実験時の試験体は飽和含水率に近い状態と考えられる。この実験によると、第 1 サイクルでは-15℃付近を境に膨張に転じているのに対し、第 2 サイクルでは膨張に転じる点が 0℃付近に移動している。同様の結果は、同図に示したように鎌田の実験でも得られている。なお、鎌田の実験も Rostasy らと同様に脱型後 20℃水中養生を行い、実験中の試験体の水分変化を防ぐためにネオプレンと不織布から成る防水層を設けているため、実験時の試験体は飽和含水率に近い状態と考えられる。

Rostasy らはさらに凍結融解サイクル試験を行う前後で水銀圧入法を行い、細孔量を測定した結果、試験前は 800Å の細孔量が最も大きいのが、試験後では 800Å の細孔量が減少し 4000Å の細孔量が増加したことを示している。

以上の実験的事実を踏まえ、Rostasy らは、第 1 サイクルでは高炉セメントの使用により平均空隙径が低下し、普通コンクリートより低い温度で凍結現象が開始したのに対し、細孔中での凍結による膨張圧が普通コンクリートより大きくなり、内部損傷が激しくなった結果、平均

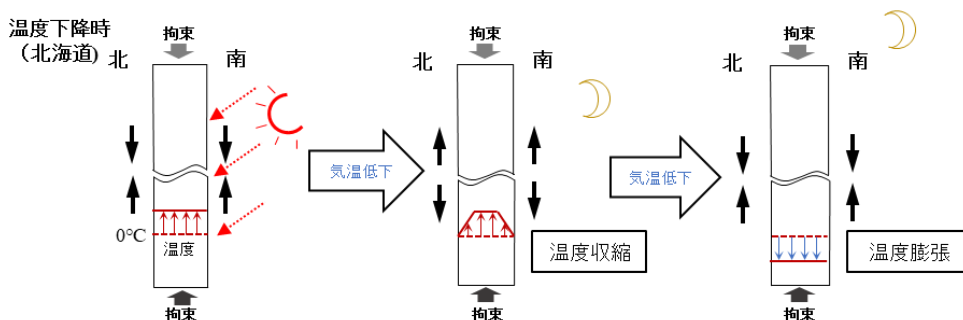


図-13 氷点下でのひび割れ挙動の概念図

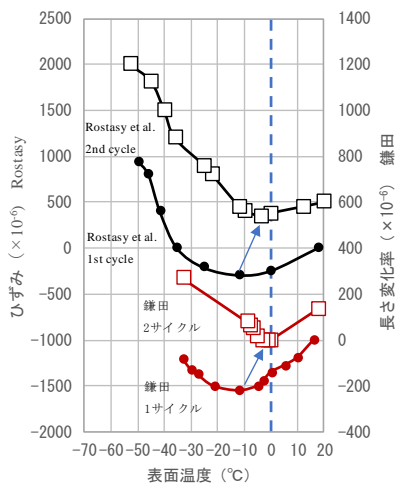


図-13 氷点下のコンクリート・モルタルひずみ挙動

空隙径が増加し、第2サイクル以降は凍結がより高い温度で生じた、と考察している。鎌田⁵⁾も同様の検討により750~7500Å間の細孔量が硬化セメントペーストの耐凍害性との関係が深いとしている。

三浦⁶⁾は、温度負荷サイクルの最高温度と最低温度が残留膨張に与える影響について実験的検討を実施し、最低温度が-70°Cのとき、最高温度を-10°Cとすると残留膨張がほとんど生じないのに対し、最高温度を-3°Cとするとサイクルごとに残留膨張が顕著になると報告している。この結果に基づき、三浦は、“高温時にコンクリートの中で解けた水の移動が起こり、それが冷却時に凍結することによって劣化はさらに進行する”と考察している。

以上より、北海道の擁壁では、何らかの劣化によりコンクリートの細孔空隙が粗大化しており、温度低下時に0°C以下の領域で負の線膨張係数を示した可能性が考えられる。また、三浦らの実験結果を踏まえると、より融解過程が生じやすい南側の方で細孔構造の粗大化が進行しやすいことも考えられる。この推察と符合するモニタリング結果として、図-12で南面の方が壁面温度に対してひび割れ開閉量の変化量が大きいこと、図-4に示すひび割れ変位の年変動でも氷点下時期の変動が北1と比較して大きい点が指摘できる。これらから、氷点下において、我々が想定している挙動は既往の研究でその一部が裏付けられた。しかし、実際に北海道の擁壁で細孔構造の粗大化を確認できていないためさらなる調査が必要である。

5. 結論

本研究では、北海道と広島の2つのひび割れモニタリングの結果から、氷点下時におけるひび割れ開閉挙動について検討した。得られた知見を以下に示す。

- [1] 実構造物に発生したひび割れの開閉挙動は壁面温度の影響を強く受け、壁面で温度差が生じている場合には反り変形の影響を受ける。

- [2] 上記の機構により日変動時と年変動時で、壁面温度とひび割れ開閉挙動は逆の動きを示す場合がある。
- [3] 広島でのモニタリング結果より、同一ひび割れが同じ温度環境下に置かれた場合でも、ひび割れの計測位置により異なるひび割れ開閉挙動を示す。これは周辺部材の拘束度が影響していると推察される。
- [4] 北海道のモニタリング結果より、氷点下において、壁面温度とひび割れ開閉挙動の関係が逆転する結果が得られた。この現象について、既往の文献から挙動の要因を推定したところ、対象壁面のコンクリートの細孔構造は粗大化しており、0°C付近で負の線膨張係数を持つ状態になっている可能性が考えられた。

本研究でモニタリング対象とした北海道のRC擁壁は、壁の両面が外部環境にさらされており、一般的な室内外を間仕切る壁とは異なる温度状態である。そのため、上記の知見が一般性を有するかについてはモニタリング対象を増やした検証を進める必要があることを付記する。

謝辞

本研究は、科研費(若手研究18K13868)の補助を受け実施した。また、計測にあたり元広島大学生・壇上友太氏(現東広島市役所)の助力を得た。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 張 玉露, 寺本 篤史, 金澤 健, 大久保 孝昭: 乾燥収縮ひび割れ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, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.41, No.1, pp.425-430, 2019
- 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 第662号, p737-744, 2011.4
- F. S. Rostasy, U. Schneider und G. Wiedemann: Behaviour of mortar and concrete at extremely low temperatures: cement and concrete research, Vol. 9, pp. 365-376, 1979
- 鎌田 英治: コンクリートの耐凍害性に関する研究, 日本建築学会論文報告集 第166号, 1969.12
- 鎌田 英治: コンクリートの凍害と細孔構造. コンクリート工学年次論文報告集 10-1, 1988
- 三浦 尚, 李 道憲: 低温下におけるコンクリートのひずみ挙動と劣化, 土木学会論文集 第420号, 1990.8