

凝結遅延モルタルを用いた温度ひび割れ抑制工法の実構造物への適用に関する検討

Study on Crack Control Method by Delayed Setting Mortar for Real Construction Application

橋本 学 坂井 吾郎 高木 英知
坂田 昇¹⁾ 佐野 忍²⁾ 小林 聖²⁾

要 約

底版の上に壁状の部材を打ち継ぐ場合、壁状部材には外部拘束によるひび割れが発生することがある。このような外部拘束によるひび割れの抑制を目的として、凝結遅延剤を添加して凝結時間を数日から数週間に大幅に遅延させたモルタルを打継部に敷設し、拘束応力を低減する方法について検討を行っている。著者らはこれまでに、室内試験において本工法のひび割れ抑制効果を確認しており、大幅にひび割れが抑制される可能性を示した。本報では、実構造物において本工法の有効性を検証するとともに、温度応力解析によって実現象の再現解析を行った。その結果、凝結を遅延させたモルタルを打継部に敷設することで、実構造物においてもひび割れの発生が抑制できること、外部拘束による引張りずみが低減することを確認し、本工法の有効性について明らかにした。

目 次

- I. はじめに
- II. 実構造物における施工実験
- III. 温度応力解析による実現象の再現解析
- IV. まとめ

I. はじめに

ボックスカルバートや貯水槽、L型擁壁など、底版の上に壁状の部材を打ち継ぐコンクリート構造物の場合、セメントの水和熱によるコンクリート温度の変化や乾燥収縮などに伴う体積変化が既設底版の拘束によって、壁状部材にひび割れが生じる場合が多い。このひび割れによって、特に貯水槽や地下構造物では漏水などの機能の低下や、劣化因子の侵入による鉄筋腐食を助長するといった耐久性の低下が懸念されるため、その抑制が求められる。

現状における材料的な観点からのひび割れ抑制対策としては、壁状部材に低発熱型のセメントを使用することや、膨張材を使用することなどが挙げられる。ただし、これらは部材全体に対しての対策であるため、コストが増大することが課題であり、より経済的な対策が求められている。

本論文に示すひび割れ抑制工法の基本概念は、底版と壁状部材の打継部に発生する拘束応力を低減することで壁状部材に発生するひび割れを抑制するものである。この工法については、既往の研究^{2),3)}として、打継部に数日間凝結を遅延させたコンクリートを打ち込み、ひび割れの主要因となっている底版からの拘束を数日間低減する研

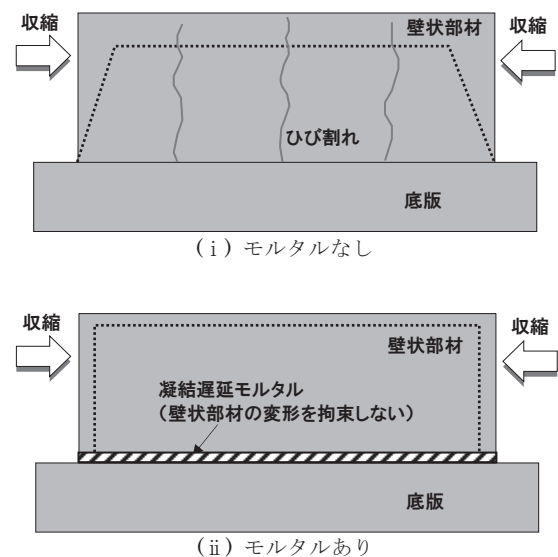


Fig.1 凝結遅延モルタルによるひび割れ抑制工法
(Concept of Crack Control Method by Setting Delay Mortar)

究が行われている。ただし、拘束応力の低減期間が数日であるため、ひび割れ抑制効果が小さいことが課題であった。近年の凝結遅延剤の性能向上により、凝結遅延期間をさらに延長することが可能となったことから、本研究では、さらなる拘束応力の低減を目指し、Fig.1に示すように、打継部に凝結遅延剤を添加して数日から数週間まで大幅に凝結時間を遅延させたモルタル（以下、凝結遅延モルタルと

1) 土木管理本部 Civil Engineering Management Division
2) 九州支店 Kyushu Branch

キーワード: 温度ひび割れ, 打継部, 外部拘束, 凝結遅延

Keywords: temperature crack, constriction joint, exterior restriction, setting delay

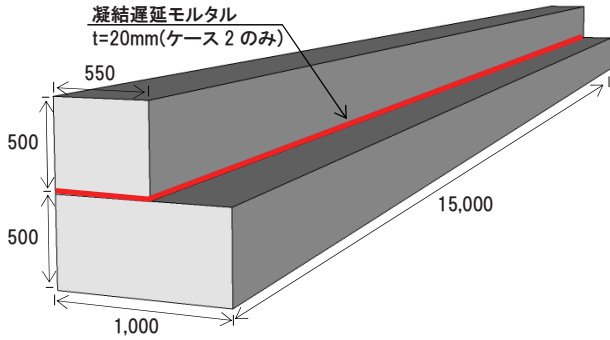


Fig.2 構造物の形状
(Members of Site Experiment)

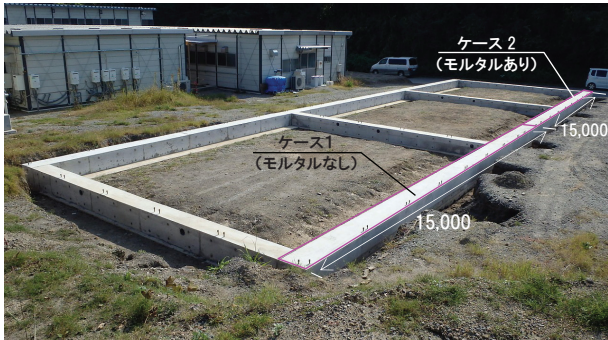


Photo 1 施工実験の対象した構造物の全景
(General Views of Site Experiment)

称す)を薄く敷設することで、従来よりも経済的なひび割れ抑制対策の開発を行っている。既報¹⁾では室内試験において、凝結遅延剤の添加率が多くなるほど凝結が遅延する傾向が確認されたが、ブリーディングの発生及び凝結遅延期間のばらつきが課題であった。ブリーディングについては、増粘剤を使用することで、長期にわたり凝結遅延させた場合でもブリーディングの発生を抑制できることが確認された。また、凝結時間は、セメントを普通ポルトランドセメントから低熱ポルトランドセメントに変更すること及び細骨材として珪砂を使用し、材料自体のばらつきを抑制することで、凝結遅延期間が約90日の場合で、8日程度のばらつきのみとなることを示した。

本報では凝結遅延モルタルを実構造物に適用し、その有効性について確認するとともに、計測データを基とした再現解析を実施することで本工法の有効性について検証を行った。

II. 実構造物における施工実験

1. 実験概要

(1) 構造物の概要

施工実験の対象構造物を Fig.2 及び Photo 1 に示す。図に示すように、底版は高さ $h=500\text{mm}$ 、幅 $W=1,000\text{mm}$ 、長さ $L=15,000\text{mm}$ で、実験の対象とした壁コンクリートは、高さ $h=500\text{mm}$ 、幅 $W=550\text{mm}$ である。検討要因は2ケースとし、底版に壁を直接打ち継ぐ一般的な方法をケース1、底版と壁の打継部に凝結遅延モルタルを厚さ $t=20\text{mm}$ にて敷設する方法をケース2とした。

(2) コンクリート及び凝結遅延モルタルの配合

底版と壁は同一の配合とし、Table 1 に示すとおりである。凝結遅延モルタルは使用材料を Table 2 に示す。配合は既往の検討¹⁾に

Table 1 コンクリートの配合
(Mix Proportion of Concrete)

配合名	W/C (%)	s/a (%)	単用量(kg/m ³)				Ad ^{※1} (C×%)
			W	C	S	G	
27-12-20 N	51.4	45.5	169	329	814	1012	1.5

※1 AE 減水剤

Table 2 使用材料
(Properties of Material)

材料	記号	摘要
水	W	上水道水
セメント	C	低熱ポルトランドセメント,密度:3.22g/cm ³
細骨材	S	天然珪砂4号,密度:2.64g/cm ³
凝結遅延剤	T	ナシカルボン酸塩系
増粘剤	V	ハイポリマー

Table 3 凝結遅延モルタルの配合
(Mix Proportion of Delayed Setting Mortar)

モルタルフロー (mm)	W/C (%)	S/C	単用量(kg/m ³)			V (W×%)	T (C×%)
			W	C	S		
150±50	45	1.8	312	694	1247	0.2	1.25

Table 4 試験項目一覧
(Test Items of Mortar)

試験項目	規格	頻度
モルタルフロー	JIS R 5201(打撃なし)	練上がり直後
凝結試験	JIS A 1147	1週間に2回程度測定
圧縮強度	JIS A 1108	硬化後 28,56,71,91 日



Photo 2 凝結遅延モルタルの練混ぜ状況
(Status of Mixing Mortar)

より定め、Table 3 に示すとおりである。

(3) 施工方法

施工の手順として底版コンクリートを打ち込み、1ヵ月後にケース1では壁コンクリートを底版コンクリートに直接打ち継いだ。壁コンクリートの打込みには、10t級のポンプ車(I社製、ピストン式)を使用した。ケース2は凝結遅延モルタルを打継部に厚さ $t=20\text{mm}$ で敷設し、その翌日に壁コンクリートを打ち込んだ。底版の打継面は打込み後、翌日にレイタンス処理を行い、凝結遅延モルタル及び壁コンクリートを打ち込む直前に、散水により打継面を十分に吸水させた状態とした。凝結遅延モルタルの練混ぜ方法は Photo 2 に示すように、現場にてハンドミキサ(M社製、1200r.p.m)を用い、全材料投入後、120秒間練り混ぜた。打込み後の養生方法は、天端に養生マットを敷設し、散水して湿潤状態を保持した。

(4) 試験項目

(a) コンクリート及び凝結遅延モルタルのフレッシュ性状

施工実験にて実施した凝結遅延モルタルの試験項目一覧を Table

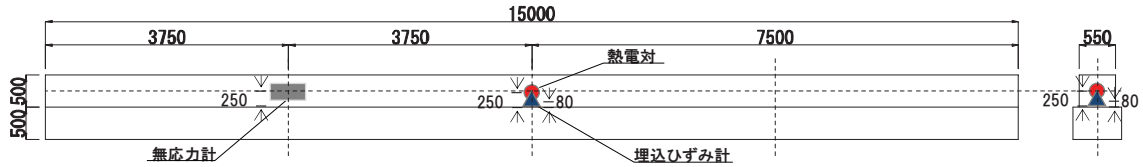


Fig.3 計測機器の設置箇所
(Measuring Locations)

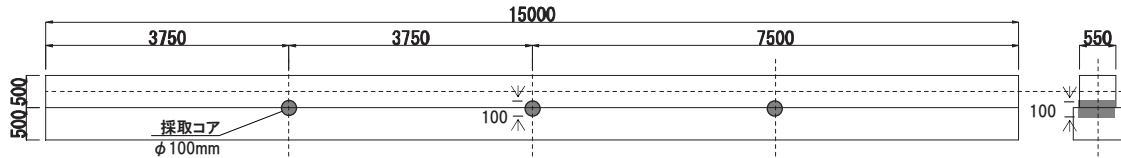


Fig.4 コアの採取位置
(Locations for Core Sampling)

4に示す。モルタルフローは JIS R 5201（打撃なし）に準じて試験を実施し、規格値を $150 \pm 50 \text{mm}$ とした。コンクリートのスランブは JIS A 1101 に、空気量については JIS A 1118 に従って実施した。

(b) コンクリート及び凝結遅延モルタルの硬化性状

凝結遅延モルタルの硬化性状を把握するために、JIS A 1147 に従い凝結遅延モルタルの凝結試験を実施した。凝結試験では、貫入抵抗値が 28N/mm^2 となる終結時間を把握し、終結となった時点硬化開始とみなし、硬化開始時点からの材齢 28 日、56 日、71 日、91 日にて JIS A 1108 に従い、3 本の平均値により圧縮強度を算出した。

(c) 埋設計器による計測

ひび割れ抑制効果を定量的に把握するために、壁コンクリートの中に熱電対、埋込みひずみ計及び無応力計を埋設した。各計測機器の設置位置を Fig.3 に示す。図に示すように、熱電対及び埋込みひずみ計は、各ケースにおいて壁コンクリートの長手方向の中心に設置した。設置高さは、熱電対は壁コンクリートの最高温度を取得することを目的とし、部材の中心である延長 $L=7,500 \text{mm}$ 、高さ $h=250 \text{mm}$ の位置とした。埋込みひずみ計は、壁コンクリートに発生する拘束応力が最も大きくなる打継部付近にてひずみを取得することを目的とし、部材中心にて高さ $h=80 \text{mm}$ の位置に設置した。無応力計は、コンクリートの線膨張係数の測定を目的として、図に示す部材中心からの離れ $3,750 \text{mm}$ 、 $h=250 \text{mm}$ の位置に設置した。

(d) 打継部の付着性能

凝結遅延モルタルの打継部の付着性能を評価するために、ケース 1 及びケース 2 の実構造物から終結から 97 日時点（材齢 139 日）で、ケース 1 及びケース 2 において打継部から $\phi 100 \text{mm}$ のコアを 3 箇所から採取した。採取したコアについては JIS A 1113 に従い、割裂引張試験を実施し、コアの付着性能を評価した。採取したコアの位置を Fig.4 に示す。

2. 実験結果

(1) コンクリート及び凝結遅延モルタルのフレッシュ性状

コンクリート及び凝結遅延モルタルのフレッシュ性状試験の結果を Table 5 に示す。壁コンクリートのスランブ、空気量は 11.0cm 、 5.1% 、コンクリート温度は 28°C であった。モルタルフロー値は $139 \times 131 \text{mm}$ で、練上がり温度は 26.6°C であった。凝結遅延モルタルの打込みは、Photo 3 に示すように一定の間隔で流し込み、コテを用いて均一の厚さ ($t=20 \text{mm}$) となるように敷設した。

Table 5 モルタル及びコンクリートのフレッシュ性状
(Fresh Properties of Mortar and Concrete)

	項目	実測値	規格値
凝結遅延モルタル	フロー値(mm)	139×131	150 ± 50
	練上がり温度($^\circ\text{C}$)	26.6	—
コンクリート	スランブ(cm)	11.0	12 ± 2.5
	空気量(%)	5.1	4.5 ± 1.5
	練上がり温度($^\circ\text{C}$)	28.0	—



Photo 3 モルタルの打込み状況
(Placing of Mortar)

(2) コンクリート及び凝結遅延モルタルの硬化性状

凝結遅延モルタルの凝結時間の結果を Fig.5 に、圧縮強度の結果を Fig.6 に示す。凝結時間については約 40 日と室内試験時に実施した結果と比較して施工実験は 30 日程度早くなる結果となった。これは、既報の通り、凝結遅延モルタルには温度依存性があり、施工した時期は 9 月で日中の最高温度が 30°C 程度まで高くなることから、凝結時間が早まったものと考えられる。

圧縮強度については、終結から 56 日時点（材齢 98 日）で 60N/mm^2 以上を確保しており、室内試験時に実施したものと同等の硬化性状が得られることが確認された。

(3) 埋設計器による計測結果

コンクリート温度の測定結果を Fig.7 に示す。図に示すように、約 0.5 日で最高温度 50°C に達し、その後緩やかに外気温まで低下した。また、ケース 1 及びケース 2 においてコンクリート温度は同等であることから、コンクリート内部の温度は凝結遅延モルタルの有無によらないことが確認された。ひずみの測定結果を Fig.8 に示す。図に示すように、通常施工のケース 1 においては、温度上昇に伴い 70μ 程度の圧縮ひずみが生じ、その後は温度降下に伴い 100μ の引

張ひずみに転じている結果であった。一方、凝結遅延モルタルを敷設したケース 2 においては、ひずみが僅かに上下しているものの、その程度は 20μ 程度の範囲に収まっており、その変動は外気温の変動に伴うもので、拘束によるひずみはほとんど生じていないと考えられる。

(4) ひび割れ抑制効果の確認

壁コンクリートを打込み後、材齢 3 日にて型枠を脱枠し、ひび割れ調査を実施した。ひび割れ発生状況を Fig.9 に示す。図に示すように、通常施工のケース 1 においては、合計 3 本のひび割れが発生し、最初のひび割れは材齢 3 日時点で確認された。ひび割れ幅は最大 0.2mm であった。ひび割れ発生の原因は Fig.8 の計測結果より、材齢 1~2 日にて圧縮ひずみから引張ひずみに転じていることから、温度降下によって発生した応力によるものと考えられる。よって、材齢 3 日にてひび割れが確認されたことは妥当であると考えられる。一方、凝結遅延モルタルを敷設したケース 2 においては材齢 91 日の時点でもひび割れの発生は確認されなかった。この理由として、

Fig.8 のひずみ測定結果からも分かるように、凝結遅延モルタルを敷設した場合には、打継部の凝結遅延モルタルによって縁切りされ壁が自由に体積変化し、拘束によるひずみが抑制されることで発生する拘束応力も小さくなり、結果としてひび割れが抑制されたものと考えられる。

(5) 打継部の付着性能の評価

ケース 1 は、底版と壁の打継目を中心としてコアを採取した。ケース 2 から採取したコアの外観を Photo 4 に示す。ケース 2 については写真に示すように、底版と凝結遅延モルタルの打継目を中心としてコアを採取した。コアの状況から打継部には 20mm の厚さで凝結遅延モルタルが均一に配置されていることが確認された。

コアによる割裂引張試験では、割裂位置は付着性能の低下が最も懸念される底版と凝結遅延モルタルの打継目とした。試験結果を Fig.10 に示す。図に示すように、凝結遅延モルタルを敷設したケース 2 は、通常の施工を行ったケース 1 とほぼ同等の割裂引張強度であることが確認され、凝結遅延モルタルを敷設することによる打継

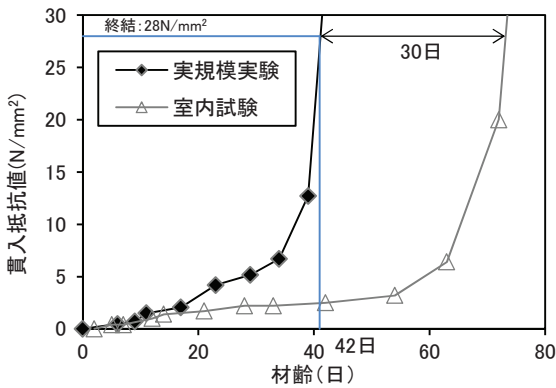


Fig.5 凝結試験結果
(Test Results of Setting Time)

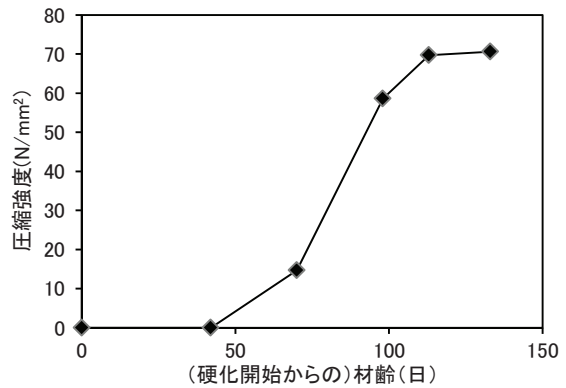


Fig.6 凝結遅延モルタルの圧縮強度試験結果
(Test Results of Compressive Strength of Mortar)

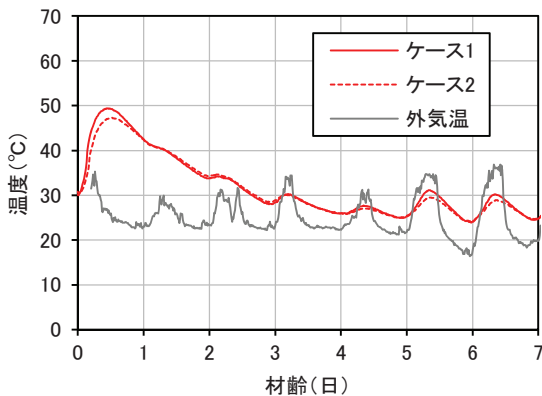


Fig.7 温度計測結果
(Temperature Changes in Concrete)

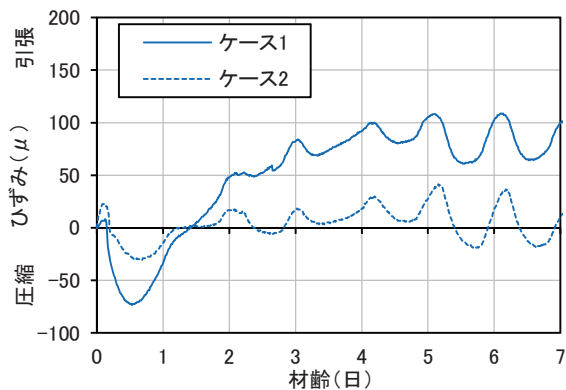


Fig.8 ひずみ測定結果
(Measurement Result of Concrete Strain)

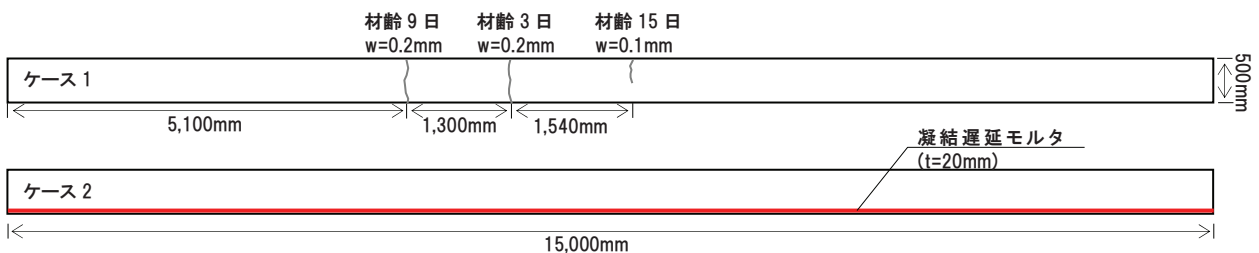


Fig.9 ひび割れの発生状況
(Situation of Cracks of the Wall Concrete)

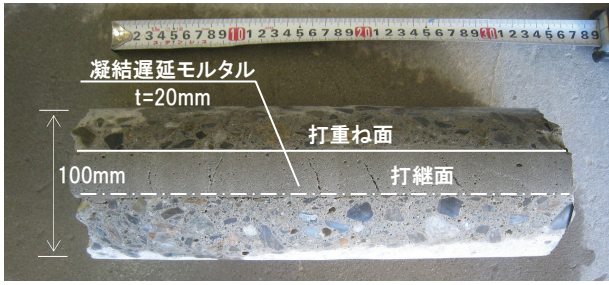


Photo 4 コアの外觀
(Appearance of Cored Specimen)

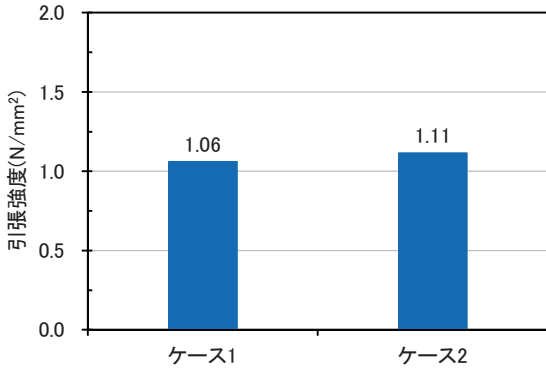


Fig. 10 割裂引張試験結果
(Test Results of Splitting Tension)

部の付着性能の低下がないことを確認した。

Ⅲ. 温度応力解析による実現象の再現解析

本工法の妥当性について、埋設計器にて計測したデータを三次元有限要素法による温度応力解析で検証した。

1. 解析モデル及び解析条件

(1) 解析モデル

解析モデルを Fig. 11 に示す。対称性を考慮した長手方向に 1/2 部をソリッド要素によりモデル化した。なお、熱伝導解析では地盤の影響を考慮して周辺地盤についてもモデル化した。

(2) 解析条件

解析に用いた入力値一覧を Table 6 に示す。実測値があるものは実測値に基づき、それ以外は「マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008」³⁾に従って設定した。ただし、断熱温度上昇量やその速度に関する係数については、Fig. 12 に示すように壁コンクリート内の温度履歴が実測値と合うように逆解析的に決定した値を用いた。また、コンクリートの線膨張係数についても壁コンクリート内に設置した無応力計にて実測した温度とひずみとの関係から線膨張係数を算出した。境界条件については実際の施工条件に合せて設定した。

2. 解析結果

ケース 1 及びケース 2 で測定したひずみと解析結果の比較を Fig. 13 に示す。ケース 1 については実測値の引張ひずみの終局値が 100 μ 程度であるのに対して、解析結果においても同様の結果となった。ケース 2 については、初期の圧縮ひずみとその後の引張ひずみがともに低減されており、外気温の変動による影響のみを受けていることが解析においても確認された。

次に、解析による算出した壁コンクリート下端中心部におけるひび割れ指数の結果を Fig. 14 に示す。ひび割れ指数は、ケース 1 では

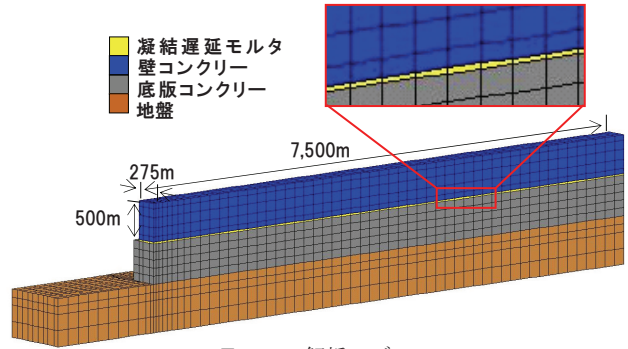


Fig. 11 解析モデル
(Analytical Model)

Table 6 解析条件
(Analytical Condition)

項目	単位	設定値	
		コンクリート	モルタル
打込み温度	℃	30.8	30.8
終局断熱温度上昇量	℃	43.0	-
断熱温度上昇速度	-	2.0	-
比熱	kJ/kg℃	1.15	1.15
熱伝導率	W/m℃	2.70	2.70
密度	Kg/m ³	2,343	2,343
圧縮強度	N/mm ²	JCI に準拠	1.0 \times 10 ⁻⁶
引張強度	N/mm ²	JCI ³⁾ に準拠	
弾性係数	N/mm ²	JCI ³⁾ に準拠	
ポアゾン比	-	0.2	0.2
線膨張係数	12 時間まで	1/℃	5.8
	24 時間まで	1/℃	15.3
	硬化後	1/℃	9.6
乾燥収縮	\times 10 ⁻⁶	考慮せず	
自己収縮	\times 10 ⁻⁶	考慮せず	
境界条件	W/m ² ℃	木製型枠:14 養生マット:8	

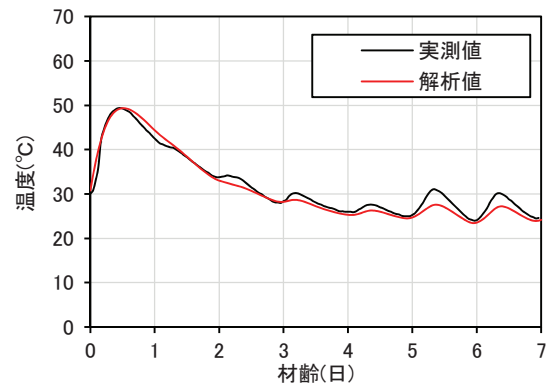


Fig. 12 温度履歴の比較 (壁中心部)
(Comparison of Temperature History)

2.5 日にて最小ひび割れ数 0.99 となり、壁コンクリートの打設後 3 日にて発生したひび割れと同時期となることが確認された。一方で、ケース 2 については、ひび割れ指数は 2.0 以上となることから、ひび割れが発生する確率は非常に低く実現象を再現できており、解析結果からも本工法の妥当性を示すことができた。

Ⅳ. まとめ

本研究で得られた結果を以下に示す。

- ① 実規模の構造物を対象とした施工実験を実施し、打継部に凝結

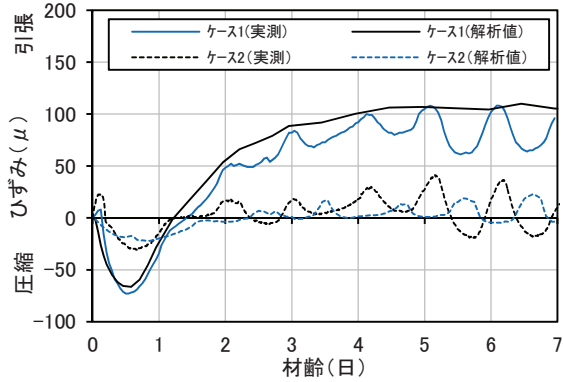


Fig.13 ひずみの解析値と実測値の比較
(Comparison of the Analysis and Measured Values of Strain)

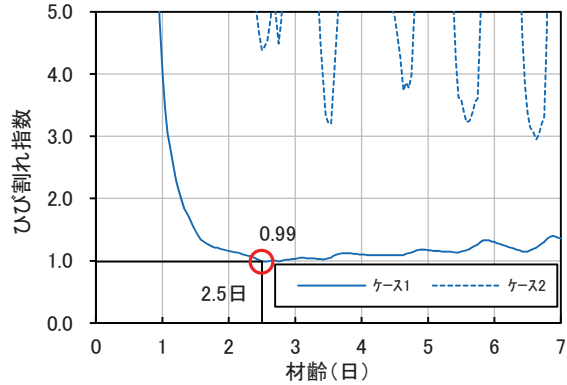


Fig.14 ひび割れ指数の比較
(Comparison of Crack Index)

遅延モルタルを敷設することでひび割れが防止できることを確認した。

- ② 本工法を適用した実構造物からコアを採取し、割裂引張試験により附着性能を確認した結果、通常施工の場合と同程度であることが確認された。
- ③ 構造物にて計測したデータから、凝結遅延モルタルを敷設することで打継部に発生するひずみを大幅に低減できることが確認された。
- ④ 本工法を適用した構造物について再現解析を実施した結果、温度や発生ひずみ等の実測値を精度良く再現することができた。また、再現解析結果から本工法の有効性についても実証することができた。

今回の実規模の施工実験において、本工法の有用性を実証することができた。今後は実構造物への適用を視野に入れ、凝結遅延モルタルの敷設方法の検討、施工性の改善等の検討を行う予定である。

謝 辞

本検討は九州大学との共同研究の一環として実施し、研究の遂行に際しましては、九州大学園田佳巨教授、佐川康貴准教授、玉井宏樹助教に多大なご指導を頂きました。ここに紙面を借りて感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 小林聖, 佐野忍, 坂田昇, 横関康祐, 坂井吾郎: 凝結遅延モルタルを用いた温度ひび割れ抑制工法の開発, 鹿島技術研究所年報, 第61号, 2013.9, pp.83-90.
- 2) 竹下治之, 横田季彦, 森時昭, 田中恭一: 凝結遅延性コンクリートを用いた温度応力の抑制に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.6, 1984, pp.285-288.
- 3) 竹内徹, 長瀧重義: 超遅延剤を用いたコンクリートの特性, コンクリート工学, Vol.37, No.11, 1999.11, pp.9-19.
- 4) 日本コンクリート工学協会: マスコンクリートのひび割れ制御指針, 2008.

Study on Crack Control Method by Delayed Setting Mortar for Real Construction Application

Manabu Hashimoto, Goro Sakai, Hidetomo Takagi, Noboru Sakata¹⁾, Shinobu Sano²⁾ and Satoru Kobayashi²⁾

When the wall is placed on the slab, cracking in the wall due to restriction from the existing slab is more likely to occur. To reduce such cracks, the authors examined ways of reducing confined stresses by using a delayed-setting mortar with a condensation time extended from a few days to several weeks. In this paper, the effectiveness of this method in actual construction was confirmed, and reproduction analysis of actual phenomena by thermal stress analysis was carried out. The results of the study showed that cracking did not occur even in the actual construction conditions by using the delayed-setting mortar, due to less external restraint strain, and the effectiveness of this method was verified.