

# 論文 凝結遅延モルタルを用いた壁状構造物のひび割れ抑制手法の実験的研究

佐野 忍<sup>\*1</sup>・小林 聖<sup>\*2</sup>・佐川 康貴<sup>\*3</sup>・園田 佳巨<sup>\*4</sup>

**要旨:** スラブ状の部材の上に、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可能性が高い。このような外部拘束によるひび割れを抑制することを目的として、打継ぎ部に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敷設し、拘束応力を低減する方法について検討を行った。実規模の構造物を想定した温度応力解析を行い、本工法の有効性を検証するとともに、凝結遅延させたモルタルの配合選定を行い、その配合を用いて模擬実験を実施した。実験の結果、凝結遅延させたモルタルを打継ぎ部に敷設することで拘束応力が低減され、ひび割れが抑制されることを確認した。

**キーワード:** ひび割れ, 打継ぎ部, 拘束応力, 凝結時間, 凝結遅延剤

## 1. はじめに

ボックスカルバートや貯水槽、L型擁壁など、スラブ状の部材の上に、壁状の部材を打ち継ぐ場合、図-1に示すように、壁状部材には外部拘束が発生してひび割れが生じる場合が多い。このひび割れによって、貯水槽や地下構造物では漏水が生じたり、劣化因子が侵入して鉄筋腐食が助長され、早期に構造物の耐久性が低下する可能性が高くなるため、その抑制が求められている。

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、膨張材を使用するなどが挙げられる。ただし、これらは部材全体に対しての対策となるため、コストが増大することが課題となっている。

既往の研究として、打継ぎ部に数日間凝結を遅延させたコンクリートを設置し、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究が行われている<sup>1)</sup>。しかし、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。本研究では、凝結遅延期間を数日から数週間まで大幅に遅延させた材料を開発し、適用範囲の拡大を目指した。さらに拘束応力を低減するために、図-2に示すように打継ぎ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目指した。

本論文では、まず、この概念の成立性を評価するため、スラブ状部材に壁状部材を打ち継ぐことを想定した構造物のモデルを用いて温度応力解析を行い、拘束応力の抑制効果について検証を行った。なお、本来は鉄筋の拘束についても検討すべきだが、今回は打継ぎ部の拘束に着

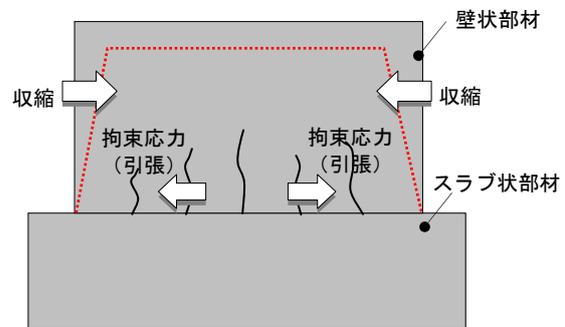


図-1 打継ぎ部における拘束応力発生状況

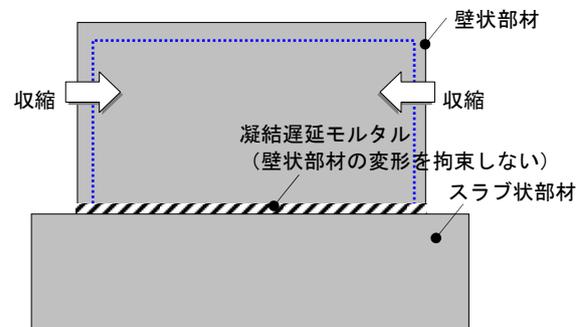


図-2 凝結遅延モルタルによるひび割れ抑制手法

目し、鉄筋の影響は考慮しないこととした。また、凝結遅延モルタルの配合選定を行うにあたり、凝結遅延剤の添加率と凝結時間の関係や、その他のフレッシュ性状および硬化性状の把握を行った。さらに、その凝結遅延モルタルを用いて打継ぎ部を模擬した試験により、ひび割れ抑制効果の確認を行った。

## 2. 温度応力解析によるひび割れ抑制効果の検証

本工法の成立性を評価するために、スラブ状部材に壁状部材を打ち継ぐ構造物のモデルを用いて温度応力解析

\*1 鹿島建設(株) 九州支店 土木営業部 (正会員)

\*2 鹿島建設(株) 技術研究所 土木材料グループ 修士(工学) (正会員)

\*3 九州大学大学院 工学研究院 社会基盤部門 准教授 博士(工学) (正会員)

\*4 九州大学大学院 工学研究院 社会基盤部門 教授 博士(工学) (正会員)

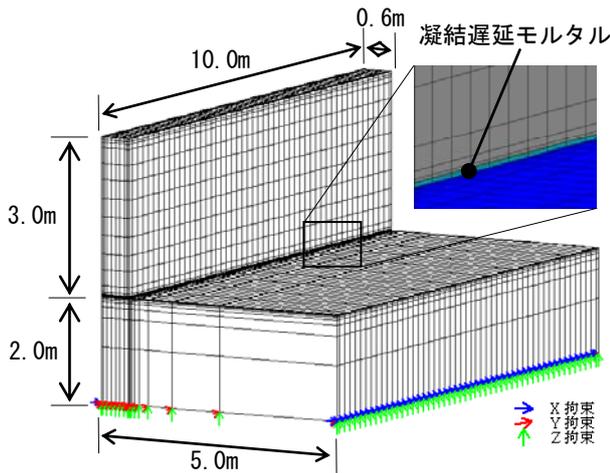


図-3 解析モデル

表-1 解析ケース

ケース	凝結遅延モルタル	凝結遅延期間
1	なし	—
2	あり (2cm)	28 日

表-2 解析条件

項目	単位	設定値
打込み温度	(°C)	外気温+5°C
比熱	(kJ/kg°C)	1.15
熱伝導率	(W/m°C)	2.7
密度	(kg/m³)	2414
圧縮強度(材齢 28 日)	(N/mm²)	33.2※
引張強度(材齢 28 日)	(N/mm²)	2.55※
ヤング係数(材齢 28 日)	(N/mm²)	30※
ポアソン比	—	0.2
線膨張係数	(1/°C)	10×10 <sup>-6</sup>
乾燥収縮	(×10 <sup>-6</sup> )	考慮せず
自己収縮(材齢 28 日)	(×10 <sup>-6</sup> )	112※

※：履歴は JCI マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008 に準じた

を行い、拘束応力の抑制効果について検証を行った。

### 2.1 解析条件

温度応力解析のモデルを図-3 に示す。図に示すように、スラブの上に壁状部材を構築するマスコンクリート部材を想定した。スラブ厚は 2.0m、壁厚は 0.6m、壁の高さは 3.0m とし、スパンは 10m とした。解析ケースは表-1 に示すように、凝結遅延モルタルを敷設しないケース 1 と、凝結時間を 28 日まで遅延させた凝結遅延モルタルを 2cm 敷設するケース 2 の 2 種類とした。なお、拘束条件としては、スラブの底面のみを拘束し、その他は無拘束とした。解析条件を表-2 に示す。構造物の配合については、ここではスラブおよび壁の配合は水セメント比 55%、セメント種類は普通ポルトランドセメント、単位水量は 165kg/m³、単位セメント量は 300kg/m³ とした。同一配合の供試体における材齢 28 日の圧縮強度を実測

値とし、引張強度、ヤング係数、自己収縮およびそれらの履歴はマスコンクリートのひび割れ制御指針 2008<sup>3)</sup> (以下、マスコン指針と称する) に準じた。コンクリートの断熱温度上昇はマスコン指針に示されている式(1)を適用した。

$$Q(t) = Q_{\infty} [1 - \exp\{-r(t - t_{0,Q})\}] \quad (1)$$

ここで、 $Q(t)$ ：材齢  $t$  日までの断熱温度上昇量(°C)、 $Q_{\infty}$ ：終局断熱温度上昇量(°C)、 $r$ ：断熱温度上昇速度に関する係数、 $t$ ：材齢(日)、 $t_{0,Q}$ ：発熱開始材齢(日)を表す。

打継ぎ部に敷設するモルタルは、使用するコンクリートの水セメント比以下とする必要があることから、一般的なコンクリートの水セメント比が 50%程度であることを考慮し、凝結遅延モルタルの水セメント比は 45%と設定した。圧縮強度については、材齢 28 日まで強度発現しないと想定し、解析計算の都合上、 $1.0 \times 10^{-6} \text{N/mm}^2$  と設定した。材齢 28 日以降は同一水セメント比のコンクリートと同様の強度発現をするものとし、ヤング係数はマスコン指針に準じて算出した。

施工時期は、コンクリートの温度が最も高くなり、温度ひび割れの発生確率の高い夏期とした。外気温は気象庁のデータより、2008 年から 2011 年の東京都の月平均気温を使用した。リフトスケジュールは、最も平均気温が高い 8 月に壁の打込み日となるように、スラブを 7/1 に打ち込み、1 カ月後の 8/1 に壁を打ち込むスケジュールとした。境界条件は、材齢 5 日まで湿潤養生とし、その後は外気とした。

### 2.2 温度応力解析結果

ケース 1 (凝結遅延モルタルなし) の温度および主応力の分布図を図-4 に示す。着目点は、温度は部材中心、主応力は打継ぎ部に近い位置とし、材齢は 56 日とした。

着目点の温度履歴を図-5 に示す。図に示すように、コンクリートが打ち込まれてから材齢 20 時間で最高温度の約 55°C に達し、その後は徐々に外気温まで降下する。なお、凝結遅延モルタルの有無以外は両ケースとも条件が同じであるため、コンクリートの温度履歴については同じとなった。

壁状部材に発生する主応力(引張応力)の履歴図を図-6 に示す。図に示すように、凝結遅延モルタルを敷設しない場合では、コンクリート打込み直後から引張応力が発生することが確認され、材齢 7 日でひび割れ指数は 0.90 まで低下する結果となった。一方、凝結遅延モルタルを敷設する場合は、材齢 28 日まで凝結遅延モルタルが未硬化であるため、その間は引張応力が大幅に低減され、28 日後は壁状部材の温度変化がほとんど収束しているため、若干の応力上昇のみであることが確認された。

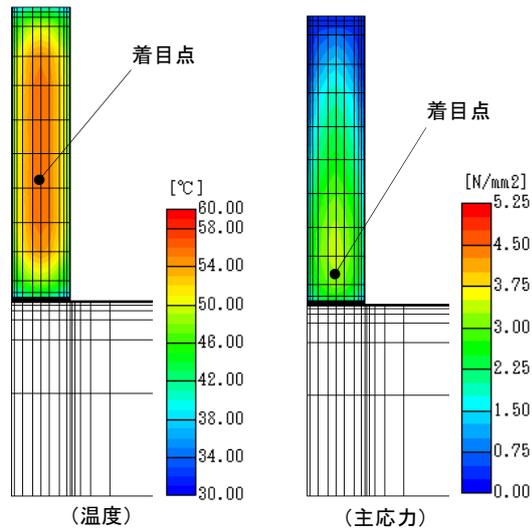


図-4 温度および主応力の分布図（中央断面図）

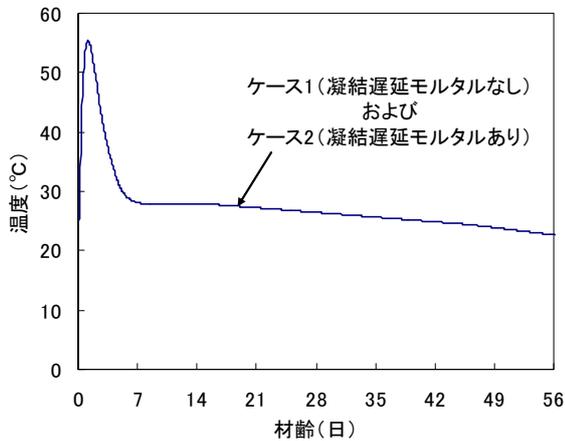


図-5 温度履歴

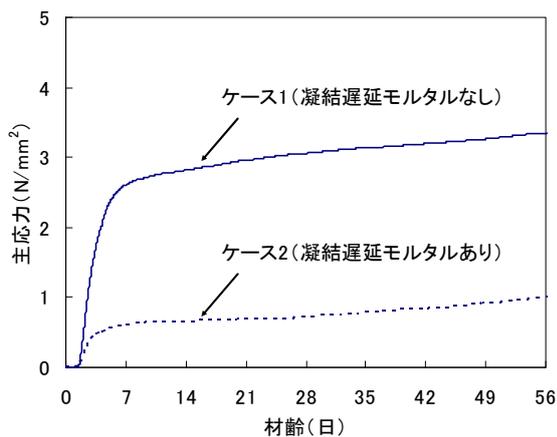


図-6 材齢と主応力の関係

また、ひび割れ指数においては、全材齢において1.85以上となることが確認された。

以上の結果より、凝結遅延モルタルを敷設することによって壁状構造物が一定期間縁切りされることで壁部材に作用する応力が大幅に低減され、ひび割れ抑制効果が

表-3 使用材料

材料	記号	摘要
水	W	上水道水
セメント	C	普通ポルトランドセメント、 密度：3.16g/cm <sup>3</sup>
細骨材	S1	砕砂、密度：2.65g/cm <sup>3</sup> 、粗粒率：2.74
	S2	山砂、密度：2.61g/cm <sup>3</sup> 、粗粒率：1.61
凝結遅延剤	T	遅延性の混和剤(オキシカルボン酸塩系)

表-4 凝結遅延モルタルの配合

W/C (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				T (C×%)
	W	C	S1	S2	
45	295	656	1115	197	2.0
					3.0
					4.0

表-5 フレッシュ性状確認試験項目

項目	方法	試験頻度
モルタルフロー	JIS R 5201	練上り直後
凝結試験	JIS A 1147	5, 7, 14, 21, 28, 35 日※
ブリーディング率	JSCE-F 522-2007	3 時間, 20 時間以上, 2, 5, 7 日

※終結付近の材齢は適宜追加

得られることが確認された。

### 3. 凝結遅延モルタルの配合検討

凝結遅延剤の添加率と凝結時間の関係や、その他のフレッシュ性状および硬化性状の把握を行うことを目的に、モルタルによる室内配合実験を実施した。

#### 3.1 モルタルへの遅延性付与に関する実験

##### (1) 検討ケース

凝結遅延剤の添加率を要因としてケースを設定し、凝結遅延剤の添加率がセメント量に対して 2.0%、3.0%、4.0%の 3 ケースについて検討を行った。

##### (2) 使用材料および配合

凝結遅延モルタルの使用材料を表-3 に、配合を表-4 に示す。セメントは普通ポルトランドセメントを使用し、細骨材は砕砂および山砂を質量比で 85:15 の割合でブレンドして使用した。凝結遅延モルタルの配合は解析と同様に水セメント比 45%とし、砂とセメントの質量比は 2 とした。

##### (3) 試験項目

試験項目を表-5 に示す。フレッシュ性状の確認試験として、モルタルフロー試験と凝結試験およびブリーディング率の測定を行った。モルタルフロー試験は JIS R 5201 を参考とし、打撃無し試験結果を評価した。凝結試験の頻度は材齢 5, 7, 14, 21, 28, 35 日とし、終結付近においては適宜試験材齢を追加した。凝結を遅延させたコンクリートはブリーディングが多くなるため<sup>2)</sup>、ブ

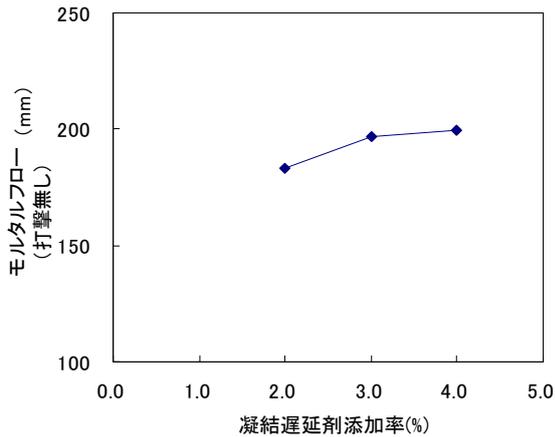


図-7 凝結遅延剤の添加率とモルタルフローの関係

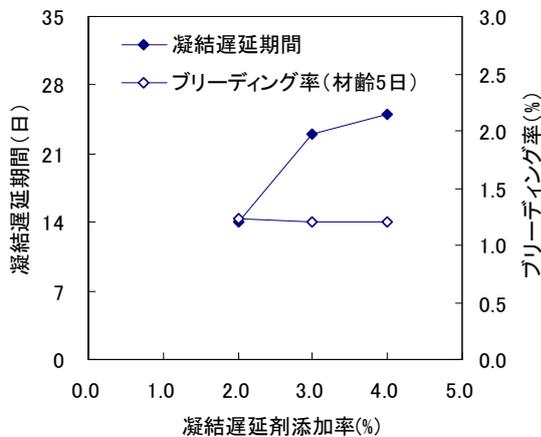


図-8 凝結遅延剤の添加率と凝結遅延期間およびブリーディング率の関係

ブリーディング率の測定頻度は3時間と20時間以降に加え、長期的なブリーディング特性を把握するため、材齢2, 5, 7日において測定を行った。各試験は20℃に設定された室内で行った。なお、本論文においては、練上がりから凝結試験により終結が確認された日までの期間を凝結遅延期間と称することとした。

#### (4) 試験結果

凝結遅延剤の添加率とモルタルフローの関係を図-7に示す。モルタルフローは、凝結遅延剤の添加率の増加に伴い大きくなる傾向が確認された。値としては200mm程度であり、十分な施工性が得られると考えられる。

凝結遅延剤の添加率と凝結遅延期間の関係を図-9に示す。図に示すように、凝結遅延剤の添加率の増加に伴い、凝結遅延期間が延長する傾向が確認された。凝結遅延剤を2.0%添加することで材齢14日まで凝結遅延し、さらに凝結遅延剤を4.0%まで増加することで、材齢25日まで凝結遅延する結果が得られた。

ブリーディング率の測定結果を図-8に併せて示す。ここではブリーディング率の測定試験においてブリーディングが終了したと考えられる材齢5日の値を示す。図

表-6 凝結遅延モルタルの配合

W/C (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				T (C×%)
	W	C	S1	S2	
50	256	513	1308	231	2.0
45	236	526	1341	237	
40	216	540	1377	243	

に示すように、今回の配合においては、ブリーディングが発生することが確認され、凝結遅延剤の添加率に関わらず1.2%程度であった。

### 3.2 凝結遅延モルタルのブリーディング低減に関する実験

凝結遅延モルタルにブリーディングが発生した場合、継ぎ部のモルタル硬化後の最終的な付着性能が低下し、構造的および耐久性に脆弱部となる可能性がある。そこで、ブリーディングが発生しない配合の検討を行った。

#### (1) 検討ケース

前述した試験結果により、水セメント比が45%、砂とセメントの質量比が2の配合においては、ブリーディングが発生した。そこで、ブリーディングを抑制するために細骨材の単位量を増加することとし、砂とセメントの質量比を3とした。遅延剤の添加率は2.0%とし、水セメント比がブリーディングに及ぼす影響を確認するために、水セメント比を要因としてケースを設定し、水セメント比が50%、45%、40%の3ケースについて検討を行った。フレッシュ性状については、いずれのモルタルフロー値も200±50mmの範囲内であり、良好な性状であることを確認している。なお、今回は凝結遅延期間およびブリーディング率のばらつきを確認するために、同配合において5回試験を実施した。

#### (2) 使用材料および配合

使用材料は表-3と同様とした。配合を表-6に示す。

#### (3) 試験項目

試験項目は表-5のフレッシュ性状確認試験に加えて、硬化性状の確認試験としてφ50×100mmのテストピースにより圧縮強度試験を行った。ここでは、モルタルフロー試験はJIS R 5201に準じ、試験結果を評価した。圧縮強度の試験材齢は、凝結試験により終結が確認されてから28日後とした。テストピースの養生は20℃に設定された室内で行い、所定の材齢まで封緘養生を行った。

#### (4) 試験結果

水セメント比とブリーディング率の関係を図-9に示す。なお、図中にモルタルフロー値を記載した。図に示すように、水セメント比が40%では、全ての試験においてブリーディング率が0%であった。一方、水セメント比45%ではブリーディングが発生しない場合もあったが、最大で1.2%の場合もあり、ばらつくことが確認された。また、水セメント比50%も同様にブリーディングが発生

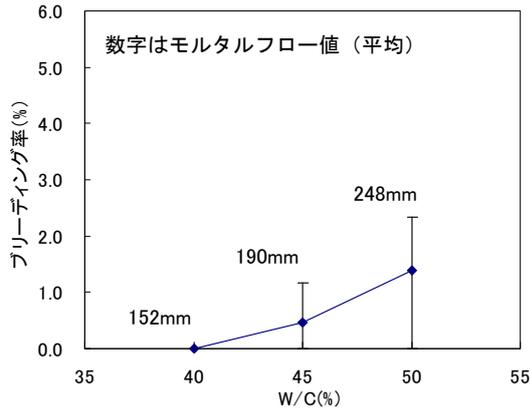


図-9 水セメント比とブリーディング率の関係

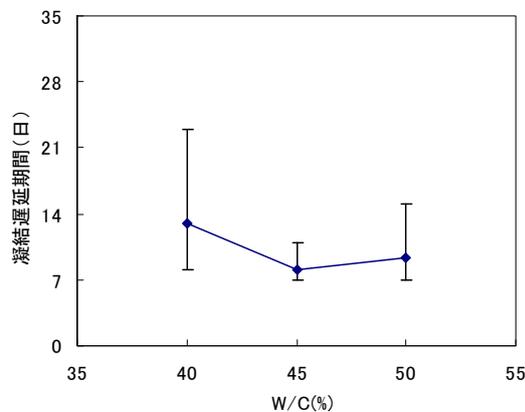


図-10 水セメント比と凝結遅延期間の関係

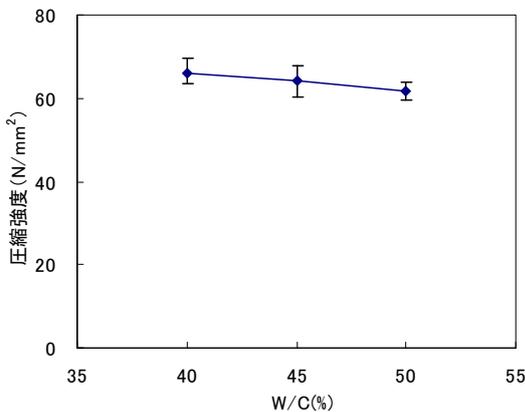


図-11 水セメント比と圧縮強度の関係

しない場合もあったが、最大で2.3%の場合もあり、水セメント比が大きくなるに従い、ブリーディング率がばらつくとともに、その範囲が大きくなる傾向が確認された。水セメント比と凝結遅延期間の関係を図-10に示す。図に示すように、凝結遅延期間は、水セメント比40%では、8日から23日の範囲で、水セメント比45%では、7日から11日の範囲で、水セメント比50%では、7日から15日の範囲でばらつく結果となった。この理由としては、セメントの種類やセメント量、細骨材の種類、細骨材量、

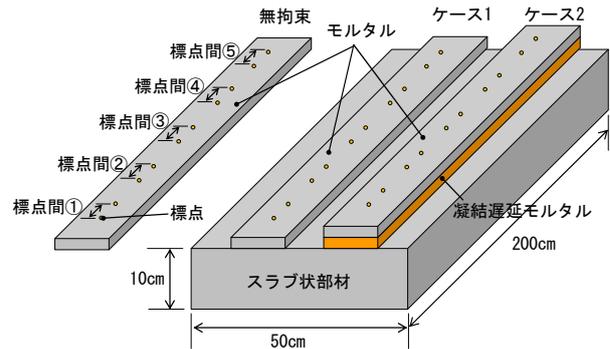


図-12 打継ぎ部の模擬実験の試験体概要

表-7 モルタルおよび凝結遅延モルタルの配合

配合	W/C (%)	単位量(kg/m³)				T (C×%)
		W	C	S1	S2	
モルタル	50	256	513	1308	231	—
凝結遅延モルタル	45	236	526	1341	237	2.0

水セメント比が大きくなることに伴うブリーディングの増加が影響を及ぼしていると考えられるが、これらについては今後検討する必要がある。

水セメント比と圧縮強度の関係を図-11に示す。圧縮強度は平均値をプロットした。図に示すように、水セメント比が大きくなるに伴い、圧縮強度が若干低下する結果となった。凝結遅延期間やブリーディング率が大きくばらついているが、終結から28日経過した時点での圧縮強度においては、凝結遅延期間やブリーディング率の違いは影響しないと考えられる。

#### 4. 打継ぎ部の模擬実験

実際に打継ぎ部に凝結遅延モルタルを用いて拘束応力低減効果を確認するために、打継ぎ部を模擬した実験を実施した。

##### 4.1 実験概要

試験体の概要を図-12に示す。図に示すように、幅50cm×長さ200cm×厚さ20cmの模擬スラブの上に、通常の打継ぎ処理によりスラブにモルタルを打ち継ぐケース1と、凝結遅延モルタルを2cm敷設した後にモルタルを打ち重ねるケース2を行った。モルタルの寸法は幅10cm×長さ200cm×厚さ2cmとし、模擬スラブの配合は27-8-20Nとした。モルタルおよび凝結遅延モルタルの使用材料は表-3と同様とし、配合を表-7に示す。モルタルは水セメント比を50%、砂とセメントの質量比を3とし、凝結遅延モルタルは水セメント比を45%、砂とセメントの質量比を3、凝結遅延剤の添加率を2%とした。

試験体作製の手順は、まず模擬スラブを打ち込み、翌日ウォータージェットで打継ぎ面を目粗しし、材齢28日まで20℃、80%R.H.の室内で養生した。その後、模擬スラブ上に型枠を設置し、ケース1は直接モルタルを打

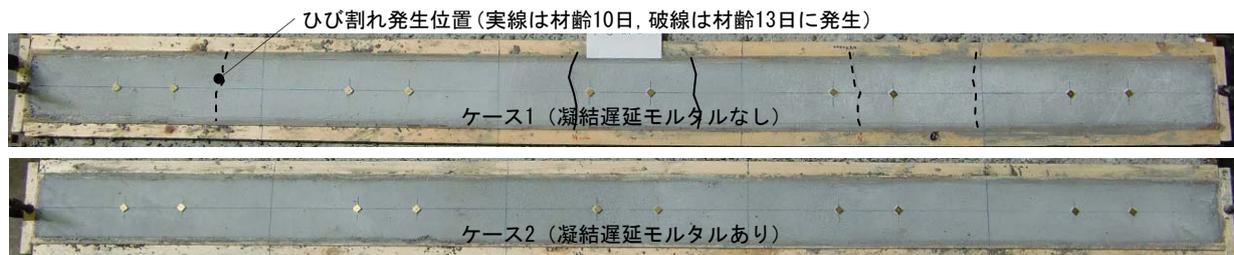


図-13 ひび割れ発生状況

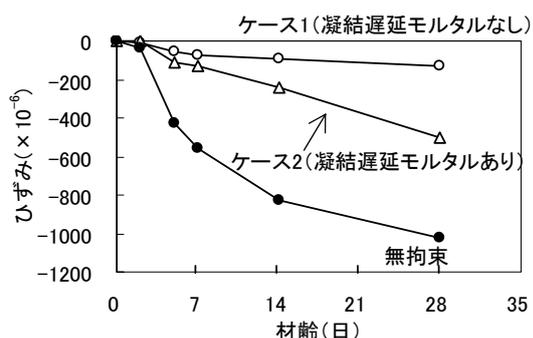


図-14 材齢と収縮ひずみの関係

ち継ぎ，ケース2は凝結遅延モルタルを敷設後，直ちにモルタルを打ち重ねた。モルタル打込み後，翌日まで湿布養生し，その後は外気に曝した。定期的にモルタル表面を観察し，ひび割れ発生状況を確認した。また，モルタル表面の10箇所に標点を貼付し，コンタクトゲージを用いて5つの標点間の収縮量の測定を行った。

#### 4.2 実験結果

ひび割れ発生状況を図-13に示す。図に示すように，ケース1（凝結遅延モルタルなし）では，材齢10日に2本，材齢13日にさらに3本，合計5本のひび割れが確認された。一方，ケース2（凝結遅延モルタルあり）では，ひび割れは確認されなかった。

収縮ひずみの測定結果を図-14に示す。ここでは比較用として，無拘束状態のモルタル単体の収縮ひずみを併せて図に示す。なお，収縮ひずみは5つの標点間の平均値を用いた。図に示すように，ケース1（凝結遅延モルタルなし）は材齢28日の時点で約  $170 \times 10^{-6}$  となった。一方，ケース2（凝結遅延モルタルあり）は材齢28日の時点で約  $500 \times 10^{-6}$  となり，ケース1よりも収縮ひずみは大きくなった。以上の結果より，無拘束状態のモルタルが約  $1000 \times 10^{-6}$  収縮していることから，ケース1では約  $830 \times 10^{-6}$  分の収縮に伴う拘束応力がモルタルに作用しているのに対し，ケース2では約  $500 \times 10^{-6}$  となり，凝結遅延モルタルにより拘束が低減されていることが確認されたが，完全に無拘束状態とはならないことが示唆された。今後は打継ぎ部における拘束度の絶対値や経時の変化などの把握が必要である。

#### 5. まとめ

本研究で得られた結果を以下に示す。

- (1) 温度応力解析において，打継ぎ部に凝結遅延モルタルを模擬した層を設けることで，壁部材に作用する応力が大幅に低減されることが確認された。
- (2) 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は確認されたが，凝結遅延期間およびブリーディング率がばらつくことが確認された。
- (3) 打継ぎ部を模擬した試験により，打継ぎ部に凝結遅延モルタルを敷設することで拘束応力は低減されるが，完全無拘束状態ではないことが示唆された。

本工法の概念は，打継ぎ部を凝結遅延モルタルにより縁切りすることにより，壁部材に発生する拘束応力が低減するとしており，温度応力解析でも優位な結果が得ることができた。ただし，鉄筋による拘束の影響や，凝結遅延モルタルの凝結遅延期間やブリーディングのばらつきや，打継ぎ部の拘束度および耐久性の詳細把握など，課題は残っている。

今後はばらつき抑制のための配合検討を進める。また，実規模試験体において応力やひずみを経時的に測定することで実現象を把握する。さらに，この結果を解析にフィードバックすることで拘束応力の低減効果を定量的に評価していく予定である。

**謝辞：**本研究の遂行に際しまして，九州大学濱田秀則教授，玉井宏樹助教，鹿島建設株式会社の坂田昇氏，横関康祐氏，坂井吾郎氏に多大なご協力を頂きました。ここに紙面を借りて感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 竹下治之ほか：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，pp.285-288，1984
- 2) 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，pp.9-19，1999.11
- 3) 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