論文 凝結遅延モルタルの敷設状態が温度応力低減効果に及ぼす影響に関 する一検討

村田 慶彦^{*1}·佐野 忍^{*2}·玉井 宏樹^{*3}·園田 佳巨^{*4}

要旨:スラブ状の既設部材の上に壁状の部材を打継ぐ構造物においては壁部材に温度応力に起因したひび割 れが生じる可能性が高く、材料的な観点から様々な抑制対策が提案されている。本研究では、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したモルタルを打継ぎ面に敷設し、拘束応力を低減する方 法について実構造物において実証実験を行い、有用性を検証した。また、実構造物をモデルとした温度応力 解析を行うとともに、適切な敷設条件に関する検討を行った。その結果、凝結遅延モルタルを打継ぎ面に一 定の厚さで全面に敷設することにより、拘束応力を低減できることを確認した。

キーワード:ひび割れ,打継ぎ面,拘束応力,温度応力解析,凝結遅延モルタル

1. はじめに

マスコンクリート構造物では、発生する水和熱が多い ため、温度応力が大きくなる。特にボックスカルバート や擁壁といったスラブ状の既設部材の上に壁状の部材を 打継ぐ構造物においては、外部拘束によりひび割れが生 じる可能性が高い(図-1参照)。このひび割れは,壁状 部材を貫通するものであり、コンクリート構造物の性能 に大きな影響を及ぼすため、その抑制が必要となってい る。現状の材料的な観点における抑制対策としては、水 和反応による発熱量を減らす低熱・中庸熱セメントの使 用、膨張材の使用により発生する引張ひずみの低減、使 用するセメント量の低減などが上げられている。しかし, これらの対策は、材料の変更によるコスト増加や、施工 性の低下につながる場合があるため,構造物や施工環境, 施工条件によっては、使用が難しい。一方、外部拘束を 低減させる,いわば構造的な観点によるひび割れ抑制対 策として, 打継ぎ面に凝結時間を一定期間遅延させたモ ルタル(以降,凝結遅延モルタルと称す)を敷設するこ とで外部拘束を低減させる工法¹⁾(図-2参照)がある。 この工法が温度ひび割れ抑制対策として有用であれば, 施工箇所もごく少なく、コスト面からも施工性の面から も優れた工法だと言える。しかし、凝結を遅延させる期 間が短いなどの理由により、現状では技術的に確立され ていない。著者らは、既往の研究で凝結遅延モルタルの 配合に関する検討を実施するとともに、打継ぎ部に凝結 遅延モルタルを敷設した場合に温度応力を低減できる可 能性を解析により示している^{2),3)}。

本研究では、まず、スラブ状の既設部材の上に壁状の



図-2 凝結遅延モルタルによるひび割れ抑制手法

部材を打継ぐ実構造物を対象に,凝結遅延モルタルの敷 設による温度応力低減効果の実証実験を行い,本工法に おける有用性の検証を行った。また,実構造物をモデル とした温度応力解析を行い,本工法の拘束応力低減効果 を解析的に検討し,さらに,適切な敷設条件に関する検 討を行った。

2. 実構造物における実証実験

まず,ボックスカルバートの壁と底版の打継ぎ部に凝 結遅延モルタルを敷設することによるひび割れ抑制効果 を確認するために実規模の構造物による実証実験を実施 した。

*1	九州大学大学院	工学府建設シ	/ステム工学専奨	女 (学	生会員)	
*2	鹿島建設(株)	九州支店 🖞	二木営業部 (正	会員)		
*3	九州大学大学院	工学研究院	社会基盤部門	助教	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 構造物の形状および寸法

2.1 施工概要

構造物の形状を図-3 に示す。図に示すように、底 版コンクリートは幅 6.6m×長さ 31.6m×高さ 0.7m で あり、そこに高さ 1.6m×長さ 31.6m×壁厚 0.6m の壁 コンクリートを打継ぐこととした。なお、今回は壁の 中心部分に目地を設置して分割し、2 つのケースを試 した。検討ケースを表-1に示す。側壁1は通常の打 継ぎ方法による施工, 側壁2は, 打継ぎ部の全面に凝 結遅延モルタルを 20mm の厚さで敷設し、直ちに壁コ ンクリートを打継ぐ施工とした。凝結遅延モルタルの 敷設の際は、目標敷設厚さを鉄筋に予めマーキングし ておくことで敷設厚さを管理することとした。また, 底版コンクリートは5月に施工し、凝結遅延モルタル と壁コンクリートは1ヶ月後の6月に施工した。なお、 底版の打継ぎ部は打込み直後に遅延剤を塗布し、翌日 に高圧水で目粗しを行った。壁コンクリートは材齢3 日で脱枠した。

2.2 使用材料および配合

使用材料を表-2 に、底版コンクリートの配合を表 -3に、壁コンクリートの配合を表-4に、凝結遅延モ ルタルの配合を表-5 に示す。底版コンクリートは 27-8-20N、壁コンクリートは 40-15-20N とした。凝結 遅延モルタルは別途検討を行った結果、凝結遅延剤を セメントの質量に対して 1.25%添加し、20℃の養生環 境では 100 日程度、30℃の養生環境では 80 日程度の凝 結終結時間である配合とした。

2.3 試験項目

底版および壁コンクリートにおいては、フレッシュ 性状確認試験として、スランプ試験と空気量試験を行 った。凝結遅延モルタルにおいては、モルタルフロー 試験と凝結時間試験を行った。モルタルフロー試験は JIS R 5201 を参考とし、打撃無しの試験結果を評価した。 凝結時間試験は、JIS A 1147 に従い、凝結試験用の供試 体を構造物の直近に置き、1 週間に 2 回の頻度で試験を 行った。終結付近においては適宜試験材齢を追加した。 凝結遅延モルタルの敷設状況は、脱型後に目視により確 認した。

各側壁の中心部分には熱電対を設置し、コンクリート の打込み直後から温度計測を行った。ひび割れ発生状況

表-1 検討ケース				
ケース	部位	凝結遅延モルタル敷設厚さ		
1	側壁 1	—		
2	側壁 2	20mm		

表−2	馊用材	朴

水 W 上水道水	
N 普通ポルトランドセメント,	
密度:3.16g/cm ³	
セメント BR 高炉スラグセメントB種,	
ビバンド BB 密度:3.04g/cm ³	
」 低熱ポルトランドセメント,	
L 密度: 3.22g/cm ³	
S1 砕砂, 密度: 2.77g/cm ³ , 粗粒率:	3.10
細骨材 S2 海砂, 密度: 2.58g/cm ³ , 粗粒率:	2.50
S3 天然珪砂 4 号,密度: 2.64g/cm ³	
粗骨材 G 砕石, 密度: 2.77g/cm ³ , Gmax: 201	nm
増粘剤 V バイオポリマー	
AE 減水剤 AD 一般品(標準型 I 種)	
凝結遅延剤 T 遅延性の混和剤(オキシカルボン酸	塩系)

表-3 底版コンクリートの配合

スランプ	空気量	W/C	s/a	単位量(kg/m ³)					
(cm)	(%)	(%)	(%)	W	BB	S1	S2	G	AD
8.0	4.5	52.5	-	166	316	334	619	911	3.16

表-4 壁コンクリートの配合

スランプ	空気量	W/C	s/a		単位	量(kg	g/m^3	
(cm)	(%)	(%)	(%)	W	Ν	S1	S2	G
15	4.5	43	47	16 9	393	_	_	972

表-5 凝結遅延モルタルの配合

	W/C	肖位量(kg/m ³)				V	Т
モルタル	W /C	S/C	+1	±(Kg	,,	•	1
フロー(mm)	(%)		W	L	S3	$(W \times \%)$	(C×%)
200 ± 50	45	1.8	312	694	1247	0.2	1.25

については,脱型後から材齢7日まで毎日観察し,その 後はひび割れの進行が収束するまで定期的にひび割れ幅 を測定した。

2.4 試験結果

底版コンクリートおよび壁コンクリートにおいては, 所定のスランプおよび空気量を確保していることを確認 した。凝結遅延モルタルにおいては,モルタルフロー試 験により,モルタルフローが 180mm であり,所定のフ



図-7 ひび割れ発生状況(側壁2)

レッシュ性状を満足していることが確認された。

凝結時間試験の結果を図-4 に示す。図には事前に室 内で実施した凝結遅延剤の添加率と凝結終結時間の関係 を示した。図に示すように、凝結終結時間は約35日であ り、養生環境が30℃の場合と同等の結果となった。気象 庁のデータより、施工時期の外気温の平均は20℃以上で あったことから、今回の結果は妥当であると考えられる。

コンクリート温度の測定結果を図-5 に示す。図に示 すように、コンクリートの打込みから1日後には70℃程 度まで上昇し、その後は温度が低下した。側壁1および 側壁2においてほぼ同じ値となっており、凝結遅延モル タルの有無がコンクリートの温度変化に与える影響はほ とんど無いことが確認された。

ひび割れ発生状況を図-6 および図-7 中の赤線で示 す。なお、ひび割れ発生状況は材齢28日時点のものであ る。側壁2には凝結遅延モルタルの敷設状況を併せて図 示した。図より、通常の打継ぎ方法の場合では5本のひ び割れが発生し、ひび割れ幅は0.06mmから0.2mmであ った。一方、凝結遅延モルタルを敷設した場合では、通 常の打継ぎ方法と同様に5本のひび割れが発生したが、 ひび割れ幅は0.04mmから0.15mmであった。さらに、 凝結遅延モルタルが均一に敷設されていると考えられる 箇所においては、ひび割れが発生しておらず、凝結遅延 モルタルが偏在している付近ではひび割れが発生してい ることが確認された。凝結遅延モルタルの敷設状態が、 拘束応力の低減効果に及ぼす影響は大きいと考えられる。

ここで、材齢と合計ひび割れ幅の関係を図-8に示す。 図に示すように、通常の打継ぎ方法では最終的な合計ひ び割れ幅が 0.63mm になっているのに対し、凝結遅延モ



ルタルを敷設した場合では、最終的な合計ひび割れ幅が 0.45mm となった。この結果より、凝結遅延モルタルを 敷設することにより、打継ぎ部の拘束応力が低減され、 ひび割れ幅が抑制されたことが確認された。今回の条件 ではひび割れ幅を 15%程度抑制することが可能であった が、今後は凝結遅延モルタルの敷設方法も含めた検討を 行うことで、ひび割れ抑制効果を向上させることが必要 である。

3. 実構造物による実証実験のシミュレーション

前章で実施した実証実験によって,ひび割れが抑制さ れることが確認されたが,同時に,凝結遅延モルタルの 敷設状態によってはひび割れが十分に抑制されないこと が確認された。ここでは,まず,実証実験の構造物をモ デルとした温度応力解析を行い,凝結遅延モルタルの有 無による拘束応力の抑制効果を調べ,さらに,凝結遅延 モルタルの敷設状態が温度応力低減効果に及ぼす影響に ついて検討した。なお,本研究では,FEM ベースで自作 の温度応力解析プログラムを利用した。

3.1 解析モデルおよび解析ケース

温度応力解析のモデルを図-9 に示す。図に示すよう に、力学的対称性を考慮して実構造物の側壁部の長さ方 向 1/2 部を固体要素を用いてモデル化した。また、凝結 遅延モルタルを敷設する場合は、スラブ部材と壁状部材 の間に図中黄色で示すように凝結遅延モルタルの要素を 全面に設定することとした。

解析ケースを表-6 に示す。実験における側壁 1 を模 擬した凝結遅延モルタルを敷設しないケース,実験にお ける側壁 2 を模擬した凝結遅延モルタルを全面敷設した ケース,凝結遅延モルタルの敷設厚さをパラメータとし たケース,図-7 に示すように実験では理想的に全面に 一定厚さで敷設できず偏在したが,その偏在を表現した ケースの計7ケースを設定した。なお,ケース7に用い たモデルは図-10に示す通りである。なお,凝結遅延時 間は28日で全て一定とした。

3.2 解析条件

(1) 熱伝導解析における解析条件

熱伝導解析における解析条件を表-7 に,使用した外 気温データを図-11 に示す。図に示した解析で使用する 外気温データは,実証実験を行った期間中に対象構造物 近辺で測定されたものを採用した。

境界条件は,壁状部材の側面において熱伝達率を材齢 7日まで8W/mm²℃,7日以降は14W/mm²℃とすること で養生状態を再現した。その他,構造物と外気の境界面 においては,14W/mm²℃と一定とし,地中における境界 面,モデルの対称性を考慮した面では断熱境界とした。 打設後のコンクリートの水和反応による発熱は、「マスコ ンクリートのひび割れ制御指針2008」⁴⁾を参考にし,式 (1)による断熱温度上昇式から単位時間に発生する熱量 を算出した。

 $Q(t) = Q_{\infty} [1 - \exp\{-r(t - t_{0,Q})\}]$ (1)
ここに、 Q(t): 材齢 t 日までの断熱温度上昇量(°C)、 Q_{∞} :終局断熱温度上昇量、r: 温度上速度に関する定数、

t:材齢(日), $t_{0.2}$:発熱開始材齢(日)とする。

(2) 応力解析における解析条件

応力解析における解析条件を**表**-8に示す。表におけ る弾性係数に関しては、クリープの影響を考慮して最高 温度に達するまでは 0.42, それ以降においては 0.65 を補 正係数 ϕ として掛けた。また、若材齢時期におけるコン クリートの圧縮強度 $f'_{c}(t_{e})$ は、「マスコンクリートのひ び割れ制御指針 2008」を参考に、式(2)により経時変化を 再現した。

$$f'_{c}(t_{e}) = \frac{t_{e} - S_{f}}{a + b \cdot (t_{e} - S_{f})} \cdot f'_{c}(t_{n})$$
(2)

ここに, t_e は有効材齢(日), S_f は硬化原点に対する有 効材齢(日), t_a は管理材齢(日), a, bはセメント種類と



図-9 解析モデル

表-6 解析ケース						
5.7	凝結遅延モ	(#: #.				
リース	敷設厚さ(mm)	敷設面積	頒為			
1	なし	実験における 側壁1に相当				
2	20		実験における 側壁2に相当			
3	5	令玉				
4	10	山上				
5	50					
6	100					
7	20	偏在 (図ー10 参照)	側壁2の実際 のモルタル敷 設状態を再現			



図-10 偏在再現モデル (ケース7)

長−7 熱伝導解析における解析条件

	項目					
部材	熱伝導率 (₩/m℃)	密度 (kg/m ³)	比熱 (kJ/kg℃)	打設開 始温度 (℃)		
スラブ	2.7	2400	1.15	24.7		
壁状部材	2.7	2400	1.15	29.7		
地盤	1	1800	2.6	24.7		



管理材齢に応じた係数である。本解析で仮定したスラブ と壁状部材の圧縮強度の経時変化を図-12に示す。また、 線膨張係数の経時変化に関しては、実証実験における実 測値と水和反応に伴う物性の変化を考慮し、線膨張係数

衣一6 心力府们における府州未什					
項目	種別	解析条件			
猫性区粉	スラブ	$E(t) = \phi \times 6300 \times f_c'(t_e)^{0.45}$			
(N/mm ²)	壁状部材	$E(t) = \phi \times 6300 \times f_c'(t_e)^{0.45}$			
	スラブ	[JCI 指針 2008]			
圧縮強度		管理材齢:28.00[日]			
(N/mm^2)		[JCI 指針 2008]			
		管理材齢:28.00[日]			
線膨眶 低粉	スラブ	8.7			
$(10^{-6})^{\circ}$ C)	辟状部材	温度降下開始時点まで7.8か			
(10 / 0)	至小п羽	ら 8.7 へ経時変化,以降 8.7			

表-8 応力解析における解析条件

は図-13のように仮定した。

拘束条件は,対称性を考慮した面と地盤の地中におけ る境界面において法線方向の自由度を固定,地盤の底面 においては,全方向の自由度を固定することとした。

(3) 凝結遅延モルタルに仮定した特性

本解析において,凝結遅延モルタルの熱伝導解析にお ける解析条件は壁状部材と同じとした。応力解析におけ る解析条件については,材齢28日までは,硬化しないこ とを模擬するために,圧縮強度を極めて小さい値(1.0× 10⁻⁶N/mm²)とした。材齢28日以降は,同一水セメント 比のコンクリートの圧縮強度発現と同様の形で強度が増 していくというモデル化を行った。なお,線膨張係数は 10×10⁻⁶/℃で一定値と仮定した。

3.3 温度応力解析結果

(1) 実測値との比較

まず,熱伝導解析における解析結果を図-14に示す。 図に示すように、コンクリートの温度は、打設後24時間 程度で最高温度である70℃程度まで上昇し、材齢7日程 度で温度が20℃程度で収束することが確認できた。この 期間内の温度差は約50℃と非常に大きく、これにより大 きな温度応力が発生すると考えられる。また、解析値は 実測値とほぼ同様な傾向を示すことが確認できた。次に, ケース1とケース2の解析により得られた最大主応力分 布図を図-15に示す。この図から確認できるように、通 常の打継ぎを行った場合は、大きな拘束応力が発生する ことが確認された。一方,ケース2の凝結遅延モルタル を打継ぎ部に全面敷設した場合は、ほとんど拘束応力が 発生していないことが確認された。また、ケース1とケ ース2の解析により得られた壁状部材の中央部底面にお ける応力履歴の実測値との比較図を図-16に示す。図に 示すように、温度降下が収束する材齢7日程度で応力の 増加も収束していることが確認できた。また、ケース1 とケース2の応力履歴を比較すると、凝結遅延モルタル の敷設により応力が 2.5N/mm²程度低減できていること がわかる。ケース2における主応力は0.5N/mm²以下で あり、このコンクリートの引張強度が 3.0N/mm²程度で



あることから,凝結遅延モルタルを敷設した場合におい ては,ひび割れ発生の危険性がほとんど無いと言える。 このことから凝結遅延モルタルの敷設は,温度ひび割れ 抑制対策として有効であるということが示された。

(2) 敷設状態が温度応力に及ぼす影響

まず、ケース1~6の結果より、凝結遅延モルタルの 敷設厚さと発生する主応力の関係を図-17に示す。なお、 主応力の着目点は壁のスパン中央の下端とした。図に示 すように、凝結遅延モルタルの敷設厚さが5mmの場合 はわずかであるが低減効果を確認することができた。ま た、敷設厚さが20mm以上の場合は主応力がほぼ一定値 に収束することから、本構造物においては最適な敷設厚 さは20mm程度であると考えられる。今後は、壁部の寸 法と敷設厚さの関係について検討し、適切な敷設厚さに ついて言及していく必要がある。

次に、凝結遅延モルタルを全面に敷設できなかった場 合を想定し、凝結遅延モルタルを一部欠損させたモデル により実施したケース7の解析結果を図-18に示す。な お、ケース7は実験後に確認された側壁2の右半分の偏 在状態を想定したケースとなっている。この図より、欠 損させた箇所の近辺で応力集中が起こり、引張強度であ る 3.0N/mm²を上回る大きな応力が発生していることが 確認された。以上より、温度応力に起因して発生するひ び割れを抑制するためには、打継ぎ面全面に凝結遅延モ ルタルを敷設することが条件となることが明らかとなっ た。今後は、全面に一定の厚さで凝結遅延モルタルを敷 設する方法を検討する必要がある。

4. 結論

本研究において、得られた成果は以下の通りである。

- (1) 実規模構造物における実証実験により、凝結遅延モ ルタルは打継ぎ部の拘束応力を抑制できることが確 認されたが、凝結遅延モルタルが均一に敷設されて いない箇所にはひび割れが発生した。
- (2) 解析的検討により、本研究で対象とした構造物において、敷設厚さ20mmを打継ぎ面全面に敷設することにより、温度応力を大きく低減できることが明らかになった。
- (3) つまり、一定の敷設厚さ20mmで打継ぎ面全面に敷設することが、温度応力により発生するひび割れを抑制するための条件であることが解析により明らかにされた。

今後,施工においては,一定厚さで全面敷設する敷設 方法の検討が必要である。また,解析においては,鉄筋 の影響や,ひび割れ発生後の応力解放の影響など考慮す ることで,より定量的な解析手法の構築を行うことが課 題である。



図-17 敷設厚さによる応力低減効果の比較



謝辞:本研究の遂行に際しまして, 鹿島建設株式会社の 坂田昇氏, 小林聖氏, 九州大学の佐川康貴准教授に多大 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

- 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, pp.285-288, 1984
- 2) 佐野忍,小林聖,佐川康貴,園田佳巨: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,コンクリート工学年次論文集,Vol.35, pp.1261-1266, No.1, 2013
- 小林聖ほか:打継ぎ部の拘束応力抑制を目的とした 凝結遅延モルタルの配合検討,土木学会第68回年 次学術講演概要集,pp.503-504,2013
- 4) 公益社団法人 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, 2008