

論文 壁状構造物の温度ひび割れに及ぼす散水・保温養生の影響

石田 知子^{*1}・近松 竜一^{*2}・十河 茂幸^{*3}

要旨：施工時の温度ひび割れの低減を目的とした効果的な養生方法を選定するため、壁厚が異なる壁状構造物を対象として、普通ポルトランドセメントを用いた設計基準強度が 30N/mm² 程度のコンクリートを使用した場合において、散水・保温による養生時の温度が温度ひび割れの低減効果に及ぼす影響について解析的に検討した。その結果、打込み直後からの散水を行った場合は壁厚が 0.5m 程度以下の場合、保温養生を行った場合は壁厚が 1.5m 程度以上の場合に、表面・中心ともに温度ひび割れの低減効果が期待できることが明らかとなった。

キーワード：温度ひび割れ，散水養生，保温養生，貫通ひび割れ，表面ひび割れ

1. はじめに

セメント水和熱に起因したひび割れ（以下、温度ひび割れと称する）に対する施工時に実施できる制御対策としては、散水によって躯体表面を冷却することにより温度上昇量を低減する方法や、保温性の高い型枠で覆い、表面部からの熱の逸散を少なくすることで部材内の温度差を小さくする等の養生方法が挙げられる。また、既往の研究結果¹⁾からも明らかなように、コンクリートの強度発現および耐久性の確保の観点から、コンクリート表面からの乾燥を防止し湿潤状態を保つことは重要であるとされている。そのため、型枠脱型後に散水により湿潤状態を保つ養生対策が実施される場合もある。

これらの養生対策の温度ひび割れに対する影響は、対象とする部材に発生する温度応力が、地盤や既設リフトによる外部拘束に起因するものか、部材内の温度差による内部拘束に起因するものかによって異なる。そして、養生方法が不適切な場合には、反って温度ひび割れの発生を助長する可能性も考えられる。

本稿では、施工時の温度ひび割れの低減対策として、より効果的な養生方法を選定するため、壁厚が異なる壁状構造物を対象として、散水および保温養生による躯体表面の養生時の温度が温度ひび割れの低減効果に及ぼす影響について、解析的に検討した結果について述べる。

2. 検討概要

2.1 検討ケース

検討を行った養生方法および養生期間を表 - 1 に示す。また、各種養生方法の概要を図 - 1 に示す。温度解析の結果、壁厚が最も大きい 2.0m では、およそ材齢 2 日程度で最高温度に達することから、散水養生は打込み直後から 2 日間実施することとした (Case1)。また、保温養生は、側面に保温性の高い型枠を 7 日間設置することと

表 - 1 養生方法および養生期間

ケース	養生方法	養生期間
Case1	散水養生	コンクリートの打込み直後 ～材齢 2 日まで
Case2	保温養生	コンクリートの打込み直後 ～材齢 7 日まで (材齢 8 日で脱枠)
Case3	散水養生	型枠の取外し後 (材齢 8 日) ～7 日間

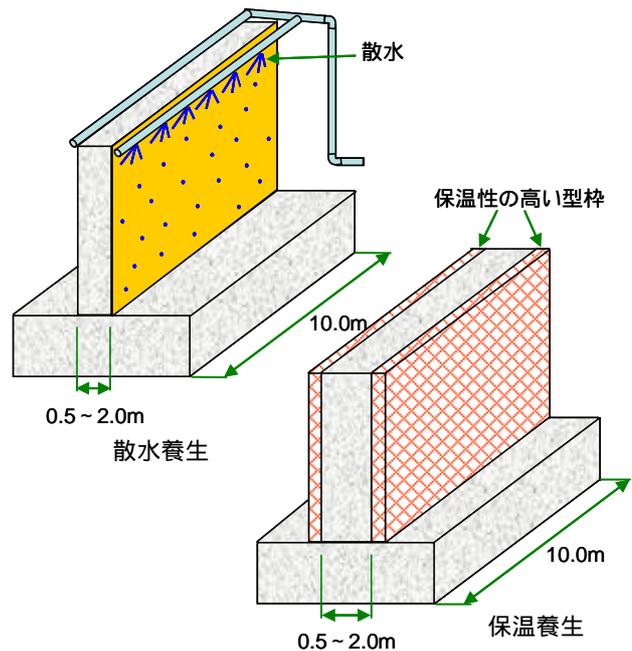


図 - 1 養生方法の概要

した (Case2)。さらに湿潤養生を継続するために、脱枠後に散水を 7 日間実施する場合についても検討した (Case3)。

2.2 解析条件

対象とした壁状構造物は、壁厚を 0.5m～2.0m の範囲で 5 水準 (0.5,0.7,1.0,1.5,2.0m) に変化させ、壁長は 10m

*1 (株)大林組 技術研究所土木材料研究室主任 工修 (正会員)

*2 (株)大林組 技術研究所土木材料研究室グループ長 工博 (正会員)

*3 (株)大林組 技術研究所副所長 工博 (正会員)

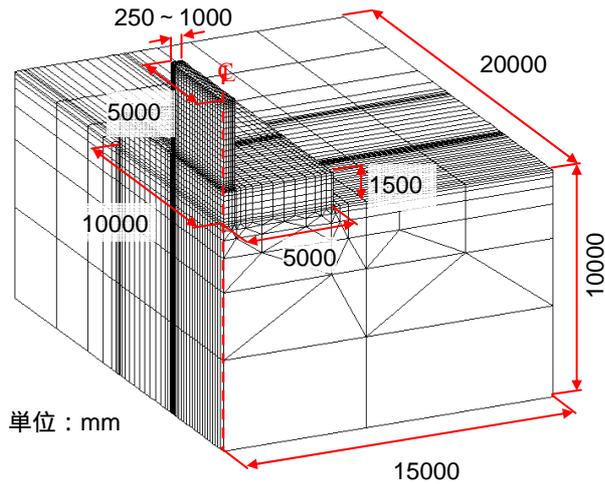


図 - 2 解析モデル

表 - 2 コンクリートの解析条件

項目	単位	条件
単位水量	kg/m ³	175
単位セメント量	kg/m ³	320
打込み温度		23.0
断熱温度上昇量		$Q(t) = Q_{\infty} (1 - e^{-\lambda t}) = 47.9 (1 - e^{-1.311t})$
熱伝導率	W/m	2.7
比熱	kJ/kg	1.15
単位容積質量	kg/m ³	2300
熱伝達率	W/m ²	散水養生: 14, 保温養生: 2
圧縮強度	N/mm ²	$f'_c(t) = \frac{t}{4.5 + 0.95 \times t} \times 1.11 \times 36.4$
引張強度	N/mm ²	$f_t(t) = 0.44 \times \sqrt{f'_c(t)}$
有効ヤング係数	N/mm ²	$E_c(t) = \phi \times 4.7 \times 10^3 \times \sqrt{f'_c(t)}$ = 0.73 (材齢 3 日まで) = 1.00 (材齢 5 日以降)
ポアソン比	-	0.2
線膨張係数	$\mu /$	10.0

とした。温度応力解析は 1/4 断面の解析モデルを用い、3次元 FEM により行った。解析で用いた解析モデル図を図 - 2 に示す。

コンクリートは、普通ポルトランドセメントを用いた設計基準強度が 30N/mm² 程度の配合とし、水セメント比は 54.7%とした。解析上の各養生の効果は、散水養生は水温が外気温に比べ 5 低いと仮定し、散水期間中の外気温を 5 低減することで考慮した。その際、散水に伴う散水面からの気化潜熱は考慮しないこととした。保温養生については、型枠境界面の熱伝達率を 2W/m² と小さく設定することで考慮した。また、湿度の影響については考慮しないこととした。

コンクリートの熱特性および力学的特性などの解析条件については、土木学会・コンクリート標準示方書〔施工編〕(2002 年制定)²⁾、コンクリート標準示方書〔構造性能照査編〕(2002 年制定)³⁾および自己収縮委員会報告書⁴⁾を参照した。本検討で用いたコンクリートの主な解析条件を表 - 2 に示す。なお、圧縮強度については、強

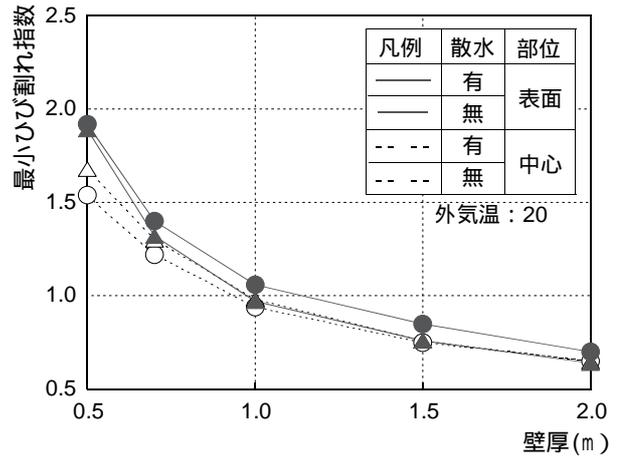


図 - 3 壁厚と最小ひび割れ指数の関係(Case1)

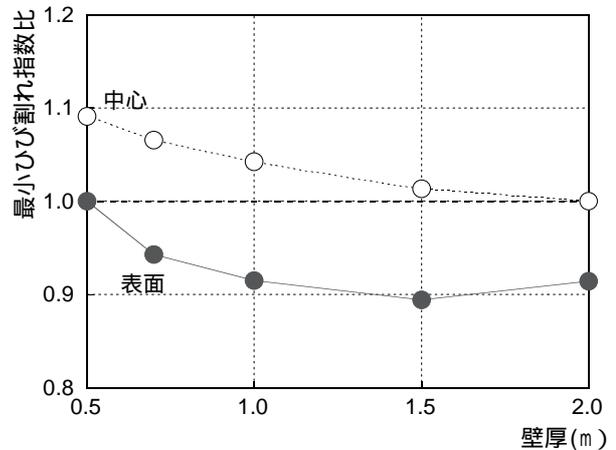


図 - 4 壁厚と最小ひび割れ指数比の関係(Case1)

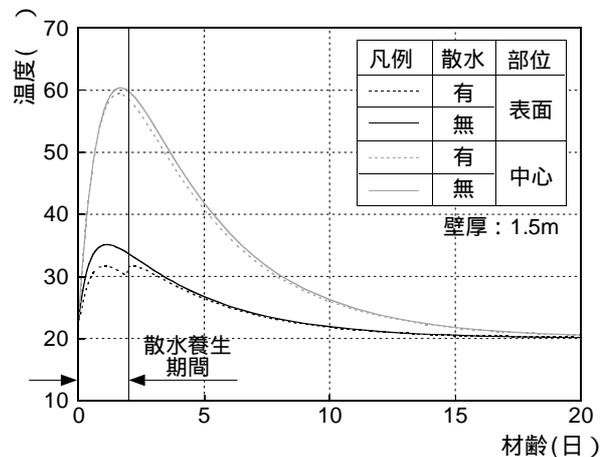


図 - 5 中心部と表面部の温度の履歴図 (Case1)

度発現の温度依存性を積算温度により考慮した。また、散水期間以外の外気温は、20 一定とした。

3. 検討結果

本検討での養生効果は、コンクリートの引張強度を最大引張主応力度で除した値であるひび割れ指数と、その値が最小となる最小ひび割れ指数を指標として検討した。また、式(1)に示す養生を実施した場合の最小ひび割れ指数 (I_{cr,cu}) に対する養生を実施しない場合の最小ひ

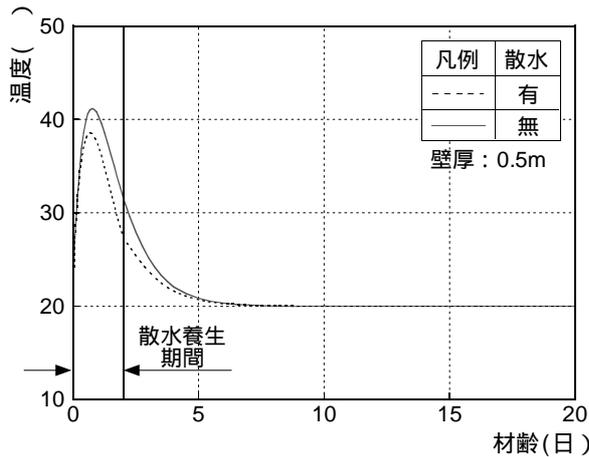


図 - 6 中心部の温度の履歴図 (Case1)

び割れ指数 (I_{cr}) の比である最小ひび割れ指数比 (R_{Icr}) についても指標として用いた。

$$R_{Icr} = \frac{I_{cr,cu}}{I_{cr}} \quad (1)$$

本検討では、地盤や既設リフト等の外部拘束による影響を顕著に受ける断面中心部と、部材内の温度差による内部拘束による影響を受けやすい表面部についても着目した。

3.1 打込み直後から散水養生を実施した場合

打込み直後から散水養生により冷却した Case1 の効果について、壁厚と構造物の断面中心および表面の最小ひび割れ指数の関係を図 - 3 に示す。また、壁厚と最小ひび割れ指数比との関係を図 - 4 に示す。

部材内の温度差による内部拘束による温度応力が卓越する表面部については、壁厚が 0.5m を超えると、散水しない場合と比較して最小ひび割れ指数が小さくなる傾向を示した。これは、図 - 5 に示した壁厚を 1.5m とした場合の中心部と表面部の温度の履歴図に見られるように、散水養生を実施しても中心部の温度はおおよそ 0.9 程度しか低下しないのに対し、表面部の温度は 3.5 程度低下することから、散水を実施することで中心部と表面部の内外温度差が大きくなるためであると考えられる。また、この傾向は中心部の温度が散水による表面からの熱の逸散の影響を受けにくい壁厚が大きい場合において、より顕著になると考えられる。

一方、中心部については、壁厚が 2.0m 以下の場合、最小ひび割れ指数が大きくなった。これは、図 - 6 に示した壁厚を 0.5m とした場合の中心部の温度の履歴図に見られるように、散水による表面からの熱の逸散の影響により中心部の温度上昇量が低減され、発生する温度応力が小さくなった影響によるものと考えられる。

3.2 打込み直後から保温養生対策を実施した場合

打込み直後から保温養生対策を実施した Case2 について、壁厚と構造物の断面中心および表面の最小ひび割れ

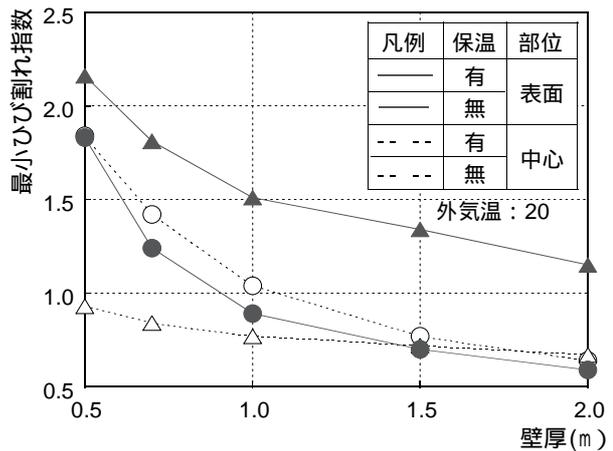


図 - 7 壁厚と最小ひび割れ指数の関係(Case1)

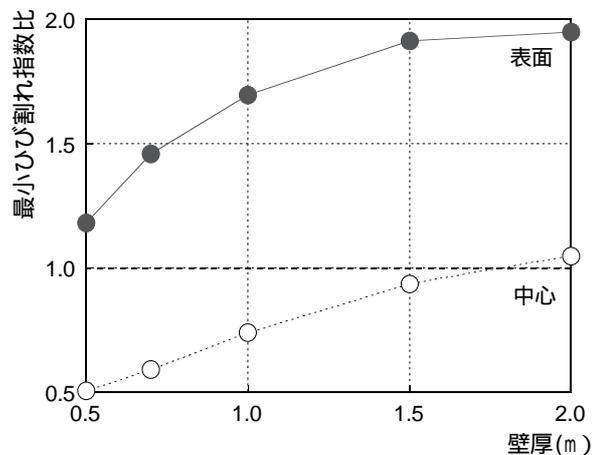


図 - 8 壁厚と最小ひび割れ指数比の関係(Case1)

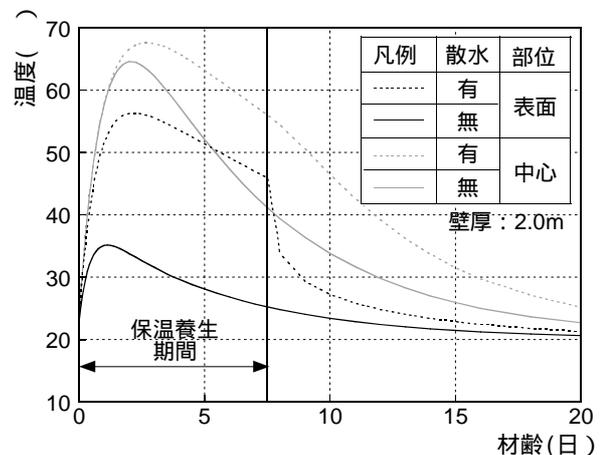


図 - 9 中心部と表面部の温度の履歴図(Case2)

指数の関係を図 - 7 に、また、壁厚と式(1)に示した最小ひび割れ指数比との関係を、図 - 8 に示す。なお、表面の最小ひび割れ指数については、保温養生を終了する材齢 7 日までの最小ひび割れ指数を抽出した。以降、保温養生を終了する材齢 7 日までを保温養生終了前とし、それ以降を保温養生終了後とする。

保温養生を行った場合、保温養生終了前の表面の最小ひび割れ指数は、全ての壁厚において、表面と中心の断面内の温度差が低減され、最小ひび割れ指数が大きくな

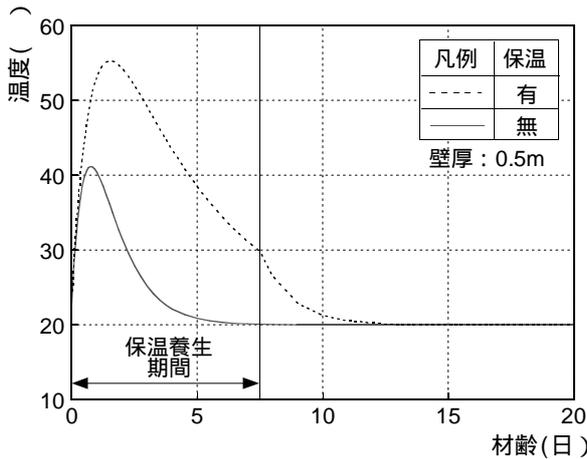


図 - 10 中心部の温度の履歴図(Case2)

る傾向が認められた。またその効果は、壁厚が大きくなるにつれ大きくなる傾向を示した。これは、散水養生を実施した Case1 の場合とは逆に、図 - 9 に示した壁厚を 2.0m とした場合の中心部と表面部の温度の履歴図に見られるように、保温養生を実施しても中心部の温度はおよそ 3 程度しか上昇しないのに対し、表面部の温度は保温効果により 21 程度と大きく上昇することから、保温を実施することで中心部と表面部の内外温度差が小さくなるためであると考えられる。一方、中心部の最小ひび割れ指数に着目すると、壁厚が 1.5m を下回ると、保温養生を実施した場合は養生を実施しない場合に比べて、最小ひび割れ指数は小さくなった。この原因としては、図 - 9 に示した壁厚を 2.0m とした場合の中心部の温度は、保温養生を実施することで 3 程度の上昇で留まっているのに対し、図 - 10 に示した壁厚を 0.5m とした薄い壁厚の場合は、保温養生による中心部の温度上昇の影響が大きく、最高温度が保温養生を実施しない場合に比べ 14 程度高くなり、外部拘束による温度応力が増大したことが挙げられる。

さらに、図 - 10 に示した壁厚が 0.5m と薄い部材の中心部の温度の履歴図では、養生終了後の温度の急激な低下が認められる。この温度の低下により、図 - 11 に示した応力の履歴図に見られるように、外部拘束の影響による温度応力が増大している。したがって、壁厚が 1.5m を下回ると、保温による中心部の温度上昇に加え、保温養生終了による中心部の温度の急激な低下により外部拘束による温度応力が増大し、保温養生を実施した場合は養生を実施しない場合に比べて最小ひび割れ指数が小さくなったと考えられる。

表面部の最小ひび割れ指数について、保温養生終了前と終了後の関係を図 - 12 に、式(1)により算出した最小ひび割れ指数比の保温養生終了前と終了後の関係を図 - 13 にそれぞれ示す。いずれの壁厚においても、保温養生終了前に比べて保温養生終了後に最小ひび割れ指数

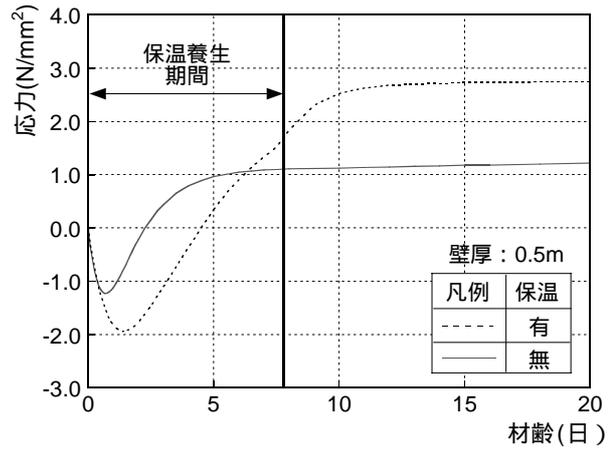


図 - 11 中心部の応力の履歴図(Case2)

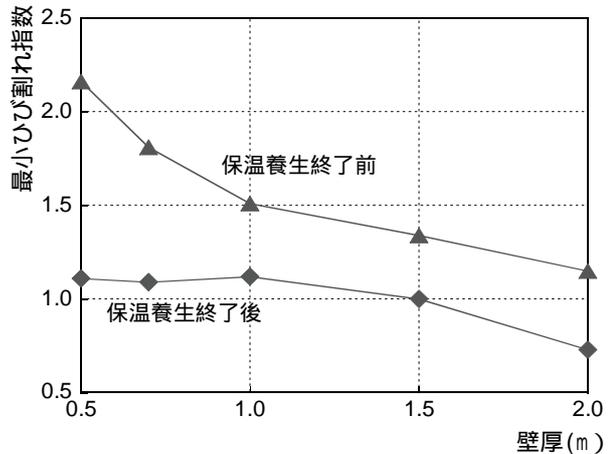


図 - 12 保温養生終了前と終了後の表面の壁厚と最小ひび割れ指数の関係(Case2)

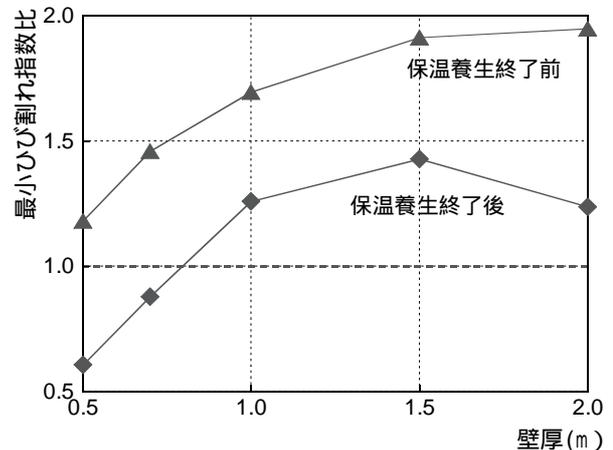


図 - 13 保温養生終了前と終了後の表面の壁厚と最小ひび割れ指数比の関係(Case2)

は小さくなる傾向を示した。また、保温養生終了後の最小ひび割れ指数比は、壁厚がおよそ 0.8m 程度以下になると 1.0 を下回り、保温養生をすると養生をしない場合に比べ、表面部のひび割れ指数は小さくなる傾向を示した。保温養生終了後に最小ひび割れ指数を示した表面部位のひび割れ指数の履歴図を図 - 14 に示す。いずれの壁厚においても、ひび割れ指数は材齢 2 日から 4 日前後において低下した後上昇し、養生終了直後に急激に小さく

なっている。これは、図 - 9 の温度履歴図に示したように、保温養生の終了により表面の温度が急激に低下し、特に壁厚が厚い 1.5m 程度以上の部材については、内部拘束による温度応力が増加したためであると考えられる。また、壁厚が 1.5m を下回る薄い部材については、前述のように保温養生の終了に伴い中心部を含めた部材全体の温度が低下することから、内部拘束による温度応力に加え外部拘束による温度応力が増加し、ひび割れ指数が低下したものと考えられる。

壁厚が厚い場合には、保温養生の終了直後に表面の温度低下に伴う内部拘束による温度応力の影響により、ひび割れ指数が急激に低下する傾向を示した。このことから、壁厚が 2.0m の部材を対象として、保温養生期間を変化させた場合、保温養生期間と表面部の最小ひび割れ指数の関係について検討を行った。表面部のひび割れ指数が最小となる部位について、各保温養生の終了材齢におけるひび割れ指数の履歴図を図 - 15 に示す。また、保温養生の終了材齢と最小ひび割れ指数の関係を図 - 16 に示す。図 - 14 に示したひび割れ指数の履歴図では、保温養生の終了を遅くするほど、養生終了時のひび割れ指数の低下が小さくなる傾向を示した。これは、材齢が経過するに従い、部材内部の温度が低下し、表面との温度差が小さくなるためと考えられる。したがって、中心部の温度低下が遅い壁厚が厚い部材ほど、養生期間を長くする必要があると考えられる。また、養生終了材齢を 20 日以上とした場合、材齢 4 日程度までの初期に発生するひび割れ指数が、養生終了直後に発生するひび割れ指数よりも小さくなる結果を示した。このため、図 - 16 に示した保温養生の終了材齢と最小ひび割れ指数の関係では、保温養生の終了時期を遅くするほど最小ひび割れ指数が大きくなる傾向を示した。しかしながら、材齢初期に最小ひび割れ指数となる保温養生の終了材齢が 20 日以降については、最小ひび割れ指数は変わらない結果となった。したがって、保温養生の終了時期については、最適値が存在すると考えられる。

3.3 型枠脱枠後から散水養生を行った場合

脱枠後の湿潤対策として散水により冷却した場合の Case3 の効果について、壁厚と構造物の断面中心および表面の最小ひび割れ指数の関係を図 - 17 示す。壁厚と式 (1) に示した最小ひび割れ指数比との関係を図 - 18 に示す。

表面部の最小ひび割れ指数は、いずれの壁厚の場合も脱枠前にひび割れ指数が最小となるため、中心部の温度が既に下がり始めている材齢 8 日以降における脱枠後の散水養生による冷却の影響はほとんど認められない。これに対して、中心部のひび割れ指数は、壁厚が 1.5m 以下の場合には、散水しない場合に比べてひび割れ指数が

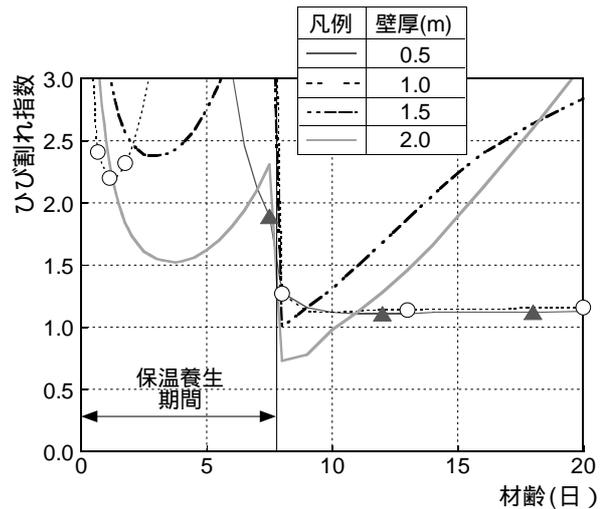


図 - 14 各壁厚の表面部のひび割れ指数の履歴図(Case2)

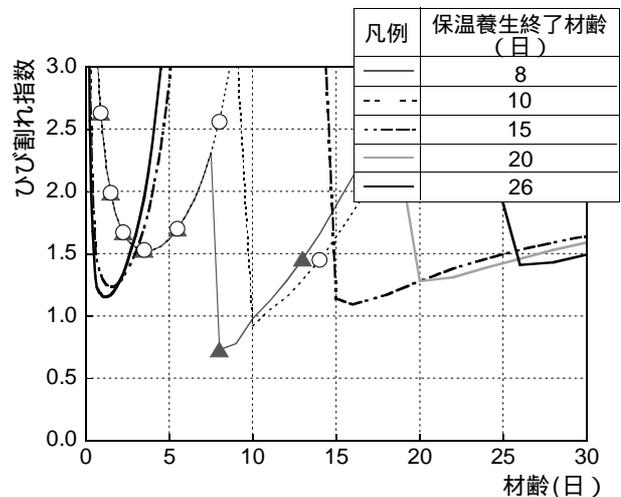


図 - 15 各保温養生終了材齢における表面部のひび割れ指数の履歴図(Case2)

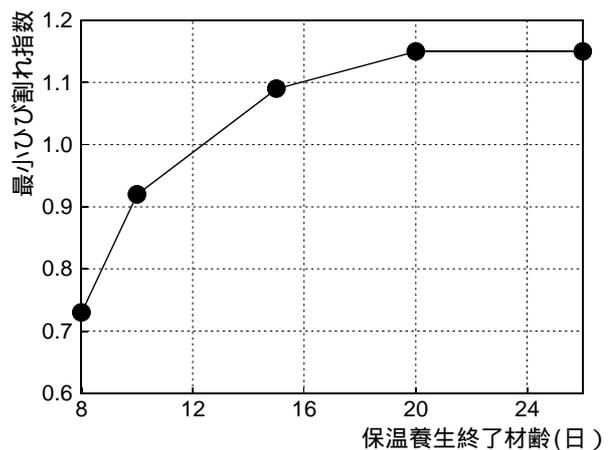


図 - 16 保温養生の終了材齢と最小ひび割れ指数の関係 (Case2)

低下する傾向を示した。これは、図 - 19 に示した部材中心の温度の履歴に見られるように、壁厚が薄い場合、部材内の温度が降下する過程において散水すると中心部の温度が急激に低下し、それに伴い外部拘束による温度応力が増大した影響によるものと考えられる。したがっ

て、脱枠後の散水養生は、乾燥によるひび割れ低減に効果がある反面、温度ひび割れの発生を助長する可能性が高いと考えられる。そのため、水温を高めに設定するなど、表面部の温度を急激に低下させないような処置が必要であると考えられる。

4. まとめ

壁厚が異なる壁状構造物を対象として、普通ポルトランドセメントを用いた設計基準強度が 30N/mm^2 程度のコンクリートを使用した場合において、散水および保温養生による養生時の温度が温度ひび割れの低減効果に及ぼす影響について解析的に検討した。その結果明らかとなった知見を、以下にまとめる。

- (1) 打込み直後からの散水により表面を冷却する場合、壁厚が 2.0m より薄くなると中心部の温度低減に伴う外部拘束による温度応力の低減効果が期待できる。しかしながら、壁厚が 0.5m より厚くなると内部拘束に伴う温度応力により、表面ひび割れの発生の可能性が大きくなる。したがって、打込み直後からの散水により、表面および内部ともに温度ひび割れの低減効果が期待できるのは、壁厚が 0.5m 程度以下の場合である。
- (2) 打込み直後からの熱伝達率が 2W/m^2 の断熱性の高い型枠を使用して保温する場合、壁厚が 1.5m より薄くなると、中心部の温度が上昇し外部拘束による貫通ひび割れの発生を助長する可能性が考えられる。また、壁厚に関わらず、中心温度が最高温度となる材齢の前後までは、保温により内部拘束に伴う表面ひび割れに対するひび割れ指数の向上は期待できる。しかしながら、保温養生終了時の表面部の温度の急激な低下により反ってひび割れの発生を助長する場合も考えられる。そのため、養生終了時期については、十分に配慮する必要がある。したがって、打込み直後からの保温により、表面および内部ともに温度ひび割れの低減効果が期待できるのは、壁厚が 1.5m 程度以上で、養生終了時期に配慮した場合である。
- (3) 脱枠後の湿潤対策として散水を実施する場合、壁厚が 2.0m より薄くなると外部拘束に伴う温度応力により貫通ひび割れの発生を助長する可能性がある。そのため、水温を高めに設定するなどの処置が必要である。

参考文献

- 1) 中沢隆雄, 吉田紘久, 広瀬一憲, 菊村忠由: 養生条件の相違がコンクリートの強度に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.9, No.1, pp.151

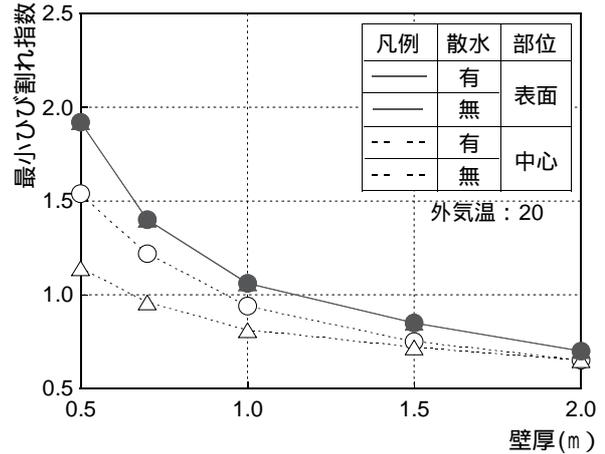


図 - 17 壁厚と最小ひび割れ指数の関係(Case3)

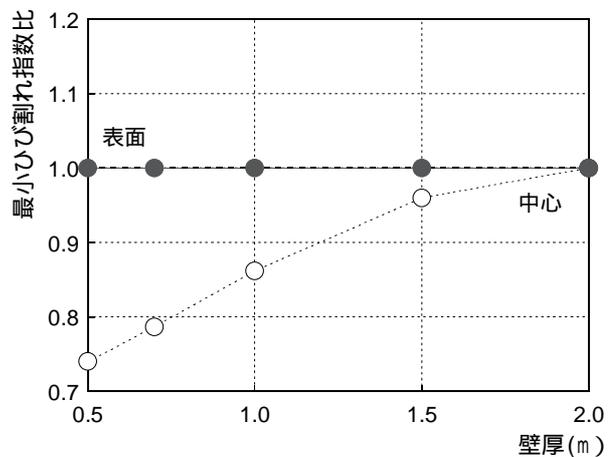


図 - 18 壁厚と最小ひび割れ指数比の関係(Case3)

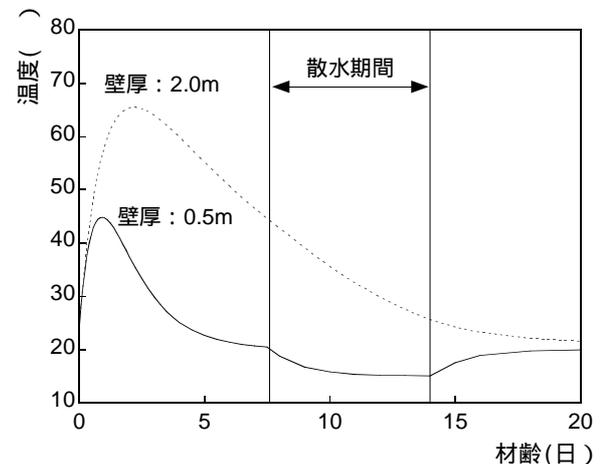


図 - 19 中心部の温度の履歴図(Case3)

~ 156, 1987

- 2) 社団法人 土木学会: コンクリート標準示方書【施工編】(2002年制定), 2002
- 3) 社団法人 土木学会: コンクリート標準示方書【構造性能照査編】(2002年制定), 2002
- 4) 社団法人 日本コンクリート工学協会: 自己収縮研究委員会報告書, 1996.11