

論文 開削工法における埋戻しが壁体の温度ひび割れに及ぼす影響

片野 啓三郎*1・石田 知子*2・近松 竜一*3・十河 茂幸*4

要旨：地盤を開削して地下にコンクリート構造物を構築する場合、工程を短縮するためにコンクリートを打設した後できるだけ早期に埋戻しをすることが求められる。地盤の埋戻しは部材表面からの熱の逸散を抑制し、湿潤な地盤による埋戻しは乾燥を抑制するため強度発現の増進に寄与するが、一方で、その保温効果により部材内部の温度勾配が大きくなり、埋戻しの時期によっては温度ひび割れに悪影響を及ぼす可能性がある。そこで、季節と埋め戻し時期をパラメータとして、埋戻しが温度ひび割れに及ぼす影響を解析により評価した。その結果、外気温より埋戻し材の温度が低い夏季には埋戻しをできるだけ遅く、逆に冬季には早く埋戻す方が、ひび割れの抑制に効果的であることが明らかになった。

キーワード：マスコンクリート、温度ひび割れ、温度応力解析、地下構造物、埋戻し

1. はじめに

地下構造物を施工する際、躯体コンクリートを地盤に埋め戻す場合がある。このとき、工期短縮の観点から、コンクリートの打込み後できるだけ早期に埋戻しを行うことが望まれる。しかしながら、部材の背面を埋め戻す場合、埋戻しによって生じるコンクリートの温度変化がひび割れの発生に影響を及ぼす可能性が考えられる。以下、温度応力に起因するひび割れを温度ひび割れと呼称する。

壁部材における温度ひび割れは、外部拘束による温度応力の影響が大きいが、内部拘束による温度応力の影響も無視できない。部材の断面内で大きな温度勾配が生じると、これによる応力が外部拘束による温度応力に加わり、ひび割れが生じる場合がある。壁部材では、打込み後の最高温度をできるだけ抑制して温度降下量を小さくするとともに、部材内の温度勾配を減じることも重要である。

構造物の埋戻しは、埋戻し材である地盤の温度と、コンクリート温度との兼ね合いにより、温度勾配が小さくなる場合と逆に大きくなる場合がある。この温度勾配により、埋戻しが温度ひび割れの発生に及ぼす影響は異なるが、このような影響を考慮した事例は少ない。そこで、本研究では、壁状構造物を埋め戻す場合を想定し、埋戻しがコンクリートの温度ひび割れに及ぼす影響を解析的に検討した。

2. 解析概要

2.1 解析モデル

対象構造物は、図-1 に示す円筒形コンクリート構造物とし、特に埋戻しによる影響を受けるとされる側壁に着目した。なお、解析モデルは、構造物の対照性から 1/4 モデルとした。

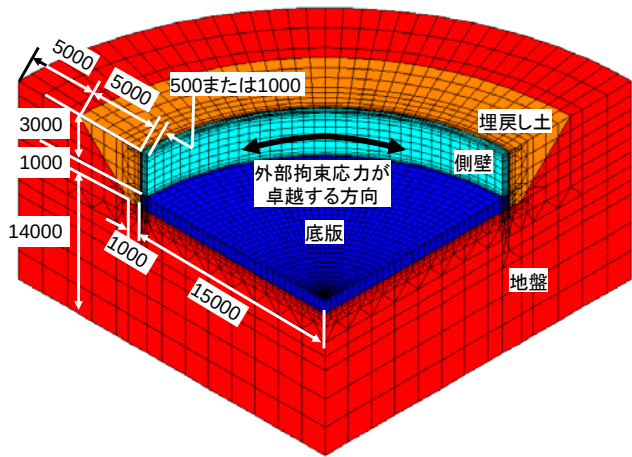


図-1 解析モデル（単位：mm）

表-1 検討ケース

検討ケース	壁厚 (m)	施工時期	埋戻しの有無および時期
Case1-1	0.5	夏季 (7月1日～ 9月30日)	側壁打込み5日後
Case1-2			側壁打込み7日後
Case1-3			側壁打込み14日後
Case1-0			埋戻しなし
Case2-1		冬季 (12月31日～ 3月31日)	側壁打込み5日後
Case2-2			側壁打込み7日後
Case2-3			側壁打込み14日後
Case2-0			埋戻しなし
Case3-1	1.0	夏季 (7月1日～ 9月30日)	側壁打込み5日後
Case3-2			側壁打込み7日後
Case3-3			側壁打込み14日後
Case3-0			埋戻しなし
Case4-1		冬季 (12月31日～ 3月31日)	側壁打込み5日後
Case4-2			側壁打込み7日後
Case4-3			側壁打込み14日後
Case4-0			埋戻しなし

*1 (株)大林組 技術研究所 生産技術研究部 修士(工学) (正会員)

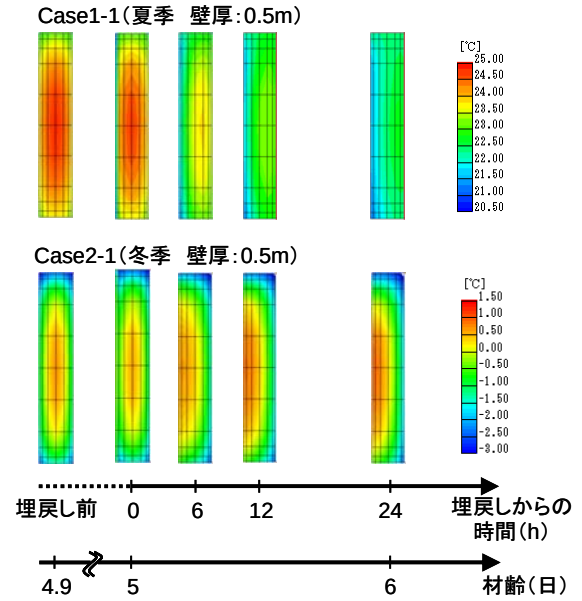
*2 (株)大林組 技術研究所 生産技術研究部 副主査 博士(工学) (正会員)

*3 (株)大林組 技術研究所 生産技術研究部 主任研究員 博士(工学) (正会員)

*4 (株)大林組 技術研究所 副所長 工学博士 (正会員)

表-2 解析に用いた主な物性値

	項目	単位	条件
コンクリート	セメントの種類	-	高炉セメント B 種
	単位セメント量	kg/m ³	300
	熱伝導率	W/m・℃	2.7
	比熱	kJ/kg・℃	1.15
	単位体積重量	kg/m ³	2400
	打込み温度 (側壁)	℃	27.6 (夏季) 10.0 (冬季)
	断熱温度上昇式	$T(t)=K\{1-\exp(-\alpha \times t)\}$ $=45.0\{1-\exp(-1.192 \times t)\}$ (夏季) $=47.0\{1-\exp(-0.493 \times t)\}$ (冬季) ただし、 $T(t)$: 材齢 t 日における断熱温度上昇量 (℃)	
	圧縮強度	$f_c(t)=t/(6.2+0.93 \times t) \times 1.15 \times 25.5$ ただし、 $f_c(t)$: 材齢 t 日における圧縮強度 (N/mm ²)	
	引張強度	$f_t(t)=0.44 \times f_c(t)^{0.5}$ ただし、 $f_t(t)$: 材齢 t 日における引張強度 (N/mm ²)	
	有効ヤング係数	$E_c(t)=4700 \times f_c(t)^{0.5}$ ただし、 $E_c(t)$: 材齢 t 日におけるヤング係数 (N/mm ²)	
おおよび埋戻し材	ポアソン比	-	0.2
	熱膨張係数	×10 ⁻⁶ /℃	10
	自己収縮ひずみ	$\varepsilon_s(t)=\gamma \times \varepsilon_{\infty} \times \beta(t)$ $\varepsilon_{\infty}=3070 \exp\{-7.2 \times (W/C)\}$ $\beta(t)=1-\exp\{-a(t-t_s)^b\}$ $a=3.72 \times \exp\{-6.83 \times (W/C)\}$ $b=0.251 \times \exp\{2.49 \times (W/C)\}$ ただし、 $\varepsilon_s(t)$: 凝結の始発から材齢までのコンクリートの自己収縮ひずみ (×10 ⁻⁶) ε_{∞} : 自己収縮ひずみの最終値 (×10 ⁻⁶) t_s : 凝結の始発日 (=0.35) W/C : 水セメント比 (=0.55) γ : 係数 (=1.3)	
	熱伝導率	W/m・℃	2.2
	比熱	kJ/kg・℃	0.8
	単位体積重量	kg/m ³	1600
	初期温度	℃	日平均気温-5 (夏季) 日平均気温+5 (冬季)



※断面左側から埋戻しを行う
図-2 埋戻し前後の温度分布

2.2 検討ケース

本研究で考慮した検討ケースを表-1 に示す。対象とする構造物の壁厚は、0.5m および 1.0m とした。施工時期は夏季および冬季とした。背面の埋戻しは、側壁コンクリートの打込み後材齢 3 日で型枠を取外した後に早期に埋戻す場合と、内部温度が外気温との平衡状態に達する時期と推定される比較的遅い時期の埋戻しを行う場合を想定した。また、比較検討対象として埋戻しを行わない場合についても検討を行った。

2.3 解析条件

コンクリートは、使用実績が多い高炉セメントB種を用いた設計基準強度が 21N/mm²程度の配合とし、水セメント比は 55.0%とした。コンクリートの打込み工程は、底版コンクリートの打込みから 30 日後に、側壁コンクリートを打込むものと

した。また、外気温は、夏季と冬季の温度差が大きい地域を選定し、札幌市における月別平均気温 (1979 年～2000 年) の旬別平年値 (気象庁発表) を用いた。なお、気温の日変動および日射の影響は考慮しないものとした。コンクリートの打込み温度は、夏季においては日平均気温+5℃、冬季においては外気温にかかわらず 10℃とした。また、埋戻し材の初期温度は、夏季においては日平均気

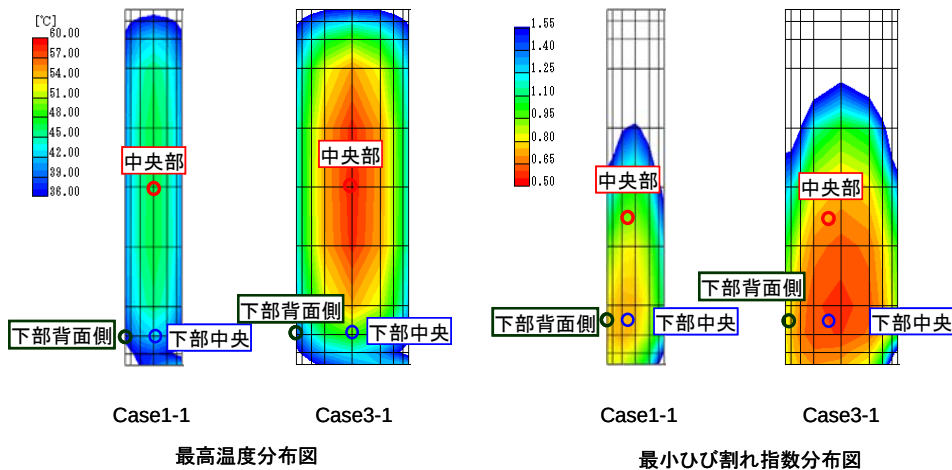


図-3 最高温度および最小ひび割れ指数の分布

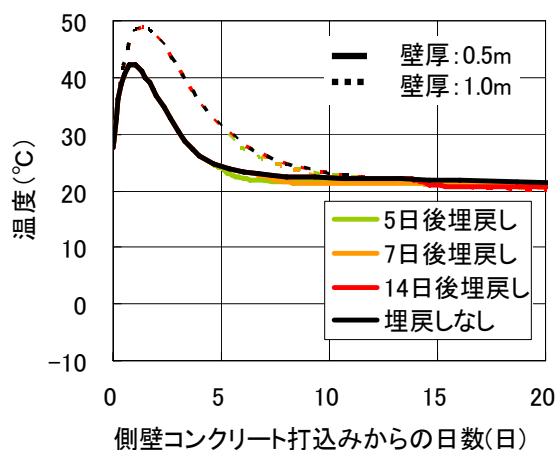


図-4 下部中央における温度の履歴（夏季）

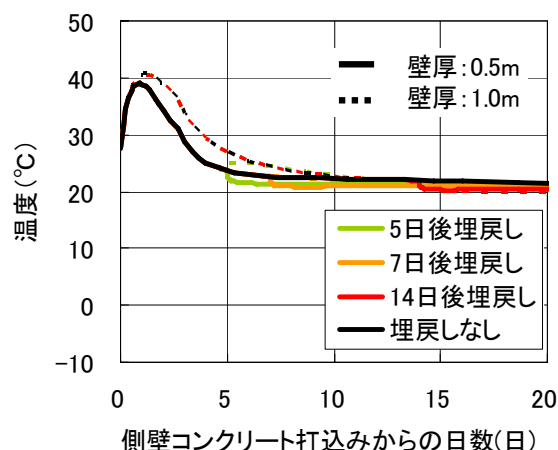


図-5 下部背面側における温度の履歴（夏季）

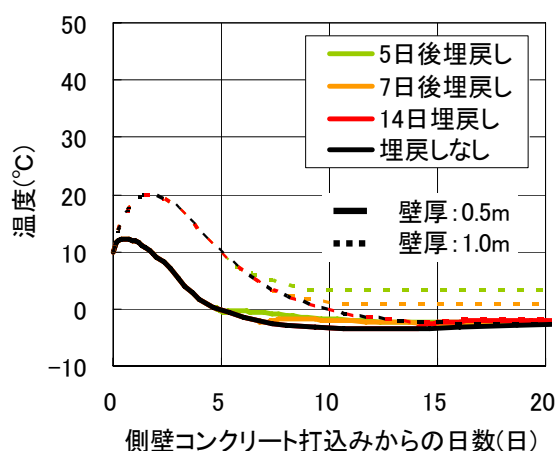


図-6 下部中央における温度の履歴（冬季）

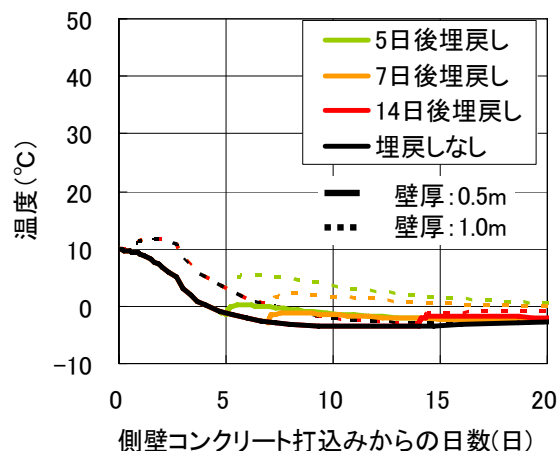


図-7 下部背面側における温度の履歴（冬季）

温-5℃、冬季においては日平均気温+5℃と仮定した。

コンクリート、埋戻し材および地盤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〔設計編〕（2007年制定）¹⁾、および自己収縮研究委員会報告書²⁾を参照した。本研究で用いたコンクリート、埋戻し材および地盤の主な解析条件を表-2に示す。なお、解析期間は、側壁コンクリートの打込みから60日後までとした。

3. 解析結果および考察

本研究では、側壁のコンクリート温度、温度応力、およびひび割れ指数を評価指標とした。なお、貫通ひび割れに着目しているため、図-1に示す底版の拘束応力が卓越する方向における温度応力およびひび割れ指数について評価した。ひび割れ指数（Icr）の定義式を式(1)に示す。

$$I_{cr} = \frac{f_t(t)}{\sigma_t(t)} \quad (1)$$

ただし、Icr：ひび割れ指数

$f_t(t)$ ：材齢tにおける引張強度(N/mm²)

$\sigma_t(t)$ ：材齢tにおける引張応力解析値(N/mm²)

また、部材が経験するひび割れ指数の最小値を最小ひび割

れ指数と呼称する。

3.1 コンクリート温度に及ぼす埋戻しの影響

壁厚が0.5mで、夏季および冬季に施工し、側壁コンクリートの打込み5日後に埋戻しを行う case1-1, case2-1 について、埋戻しの前後における温度およびひび割れ指数の分布図を図-2に示す。図-2より、埋戻し材の温度を日平均気温-5℃と仮定した夏季においては、埋戻しを行う背面側からコンクリートの温度が降下し、埋戻し材の温度を日平均気温+5℃と仮定した冬季においては、背面側からコンクリートの温度が上昇することがわかる。

夏季に施工し、側壁コンクリートの打込み5日後に埋戻しを行う case1-1, case2-1 の部材断面の最高温度および最小ひび割れ指数の分布を図-3に示す。図-3より、壁厚にかかわらず、最高温度は部材の中央部において最高となり、最小ひび割れ指数は中央下部において最小となった。

夏季に施工する case1-0～case1-3, case3-0～case3-3 および冬季に施工する case2-0～case2-3, case4-0～case4-3 の温度の履歴を図-4～図-7に示す。着目点は、図-3において部材中で最小ひび割れ指数を示す下部中央、埋戻し材と接する下部背面側とした。

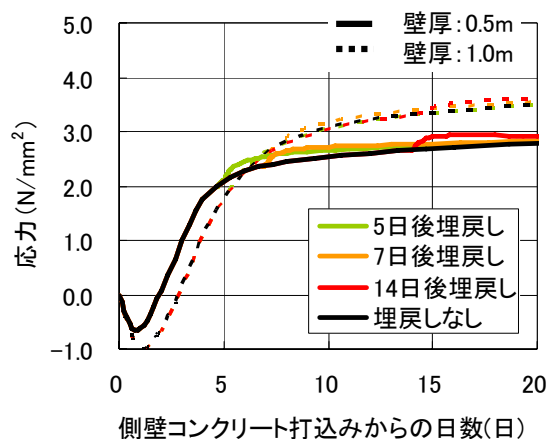


図-8 下部中央における温度応力の履歴（夏期）

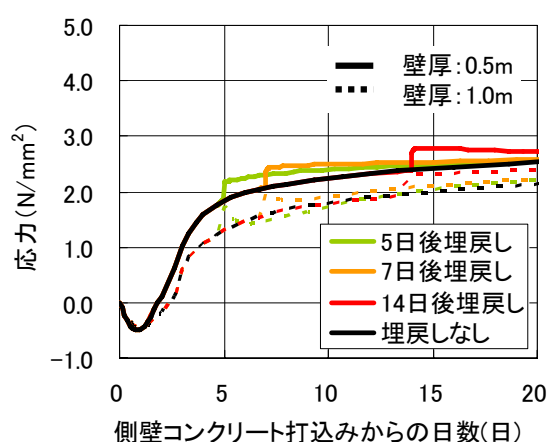


図-9 下部背面側における温度応力の履歴（夏期）

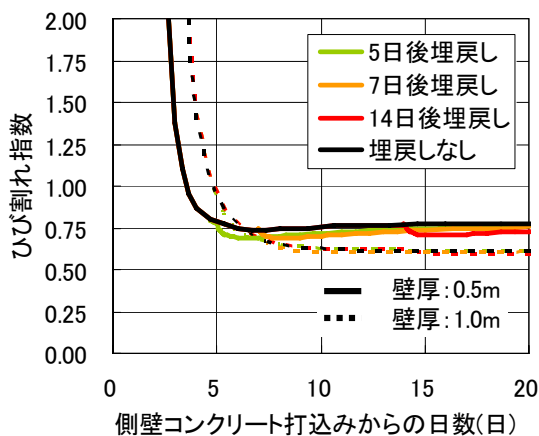


図-10 下部中央におけるひび割れ指数の履歴（夏期）

夏季に施工する場合、図-4 より、部材の下部中央では、埋戻しを行った直後に、外気温よりも埋戻し材の温度が 5°C 低いためにコンクリート内部の温度が低下する。また、図-5 より、部材の下部背面側でも、下部中央と同様に、埋戻しによって温度が低下する。一方、冬季に施工する場合、図-6 および図-7 より、埋戻しを行った直後にコンクリート内部の温度が上昇する。これは、外気温よりも埋戻し材の温度が 5°C 高いことに加え、埋戻しを行うことにより背面からの放熱

表-3 最小ひび割れ指数の解析結果

検討ケース	壁厚 (m)	施工時期	埋戻しの有無および時期	最小ひび割れ指数	材齢 (日)	最小ひび割れ指数比
case1-1	0.5	夏期	5日後	0.69	6.0	0.93
case1-2			7日後	0.69	7.7	0.93
case1-3			14日後	0.71	14.7	0.96
case1-0			なし	0.74	6.7	1.00
case2-1		冬期	5日後	0.85	58.3	1.00
case2-2			7日後	0.85	90.0	1.00
case2-3			14日後	0.85	8.0	1.00
case2-0			なし	0.85	8.0	1.00
case3-1	1.0	夏期	5日後	0.57	53.0	1.06
case3-2			7日後	0.57	55.0	1.06
case3-3			14日後	0.57	56.7	1.06
case3-0			なし	0.54	53.3	1.00
case4-1		冬期	5日後	0.82	19.7	1.17
case4-2			7日後	0.81	13.7	1.16
case4-3			14日後	0.70	13.3	1.00
case4-0			なし	0.70	13.3	1.00

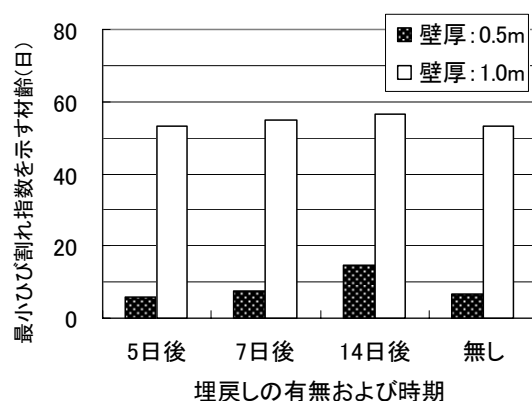


図-11 最小ひび割れ指数を示す材齢（夏期）

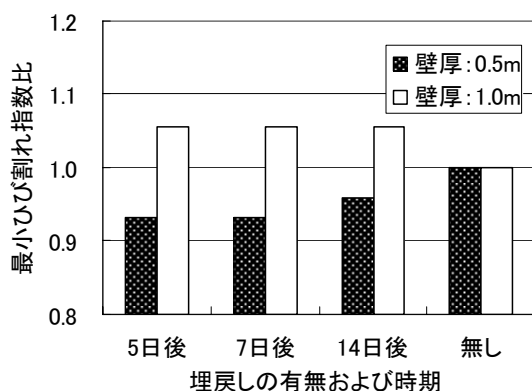


図-12 最小ひび割れ指数比（夏期）

が少なくなるためであると考えられる。ただし、施工時期にかかわらず、下部背面側における埋戻しによる温度変化は、下部中央に比べて大きいことから、埋戻し材に近いほど、埋戻しがコンクリートの温度変化に及ぼす影響が大きくなることがわかる。

3.2 埋戻し時期が温度ひび割れに及ぼす影響（夏季）

夏季に施工する case1-0～case1-3, case3-0～case3-3 の温度応

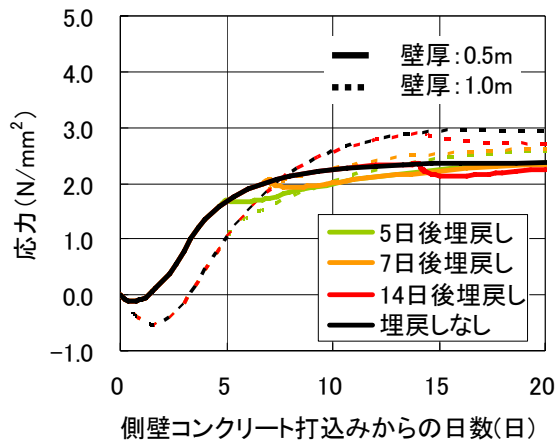


図-13 下部中央における温度応力の履歴（冬季）

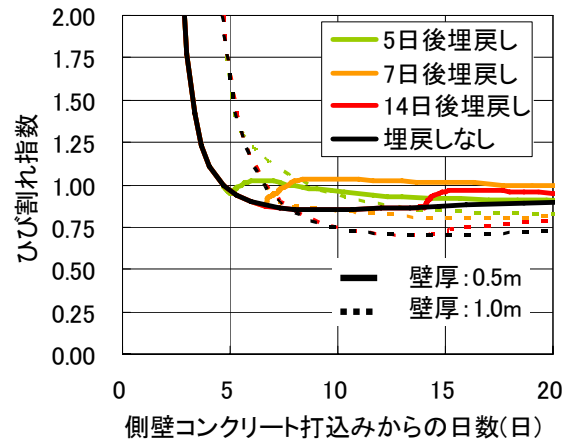


図-14 下部中央におけるひび割れ指数の履歴（冬季）

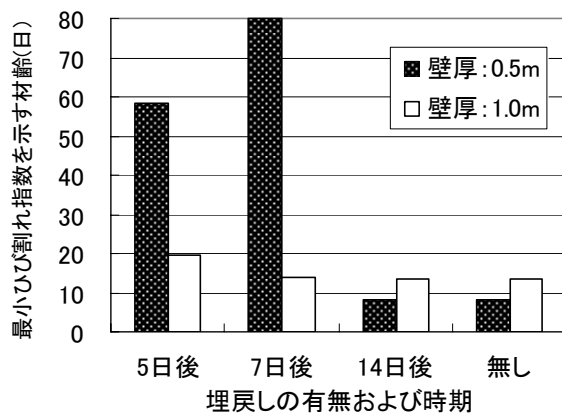


図-15 最小ひび割れ指数を示す材齢（冬季）

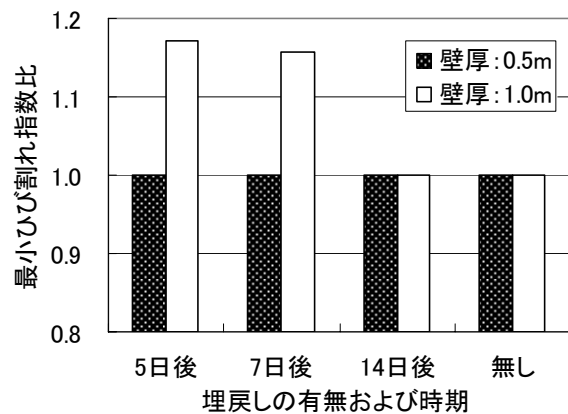


図-16 最小ひび割れ指数比（冬季）

力の履歴を図-8 および図-9 に示す。着目点は、図-4～図-7 と同様に、下部中央および下部背面側とした。

図-8 より、部材の下部中央では、埋戻しを行った直後のコンクリートの温度変化に伴い、埋戻しを行わない場合と比較してコンクリート内部にはたらく引張応力が増加することがわかる。また、図-9 より、部材の下部背面側では、下部中央と同様に、埋戻しによって引張応力が増加する。また、この傾向は、図-4～図-7 と同様、埋戻し材に近いほど、埋戻しがコンクリートの温度応力の変化に及ぼす影響が大きくなる。しかしながら、埋戻しの影響にかかわらず、下部中央における引張応力が最も大きく、ひび割れ指数についても、図-3 より、部材の下部中央において最小となった。

ここで、ひび割れ指数については、同一断面内で最小を示す下部中央に着目する。各検討ケースにおける側壁の最小ひび割れ指数、および最小ひび割れ指数を示すときの材齢を表-3 に示す。また、埋戻しを行わない場合の最小ひび割れ指数に対する埋戻しを行う場合の最小ひび割れ指数の比を最小ひび割れ指数比として定義し、併せて表-3 に示す。次に、夏季に施工する case1-0～case1-3、case3-0～case3-3 の下部中央におけるひび割れ指数の履歴を図-10 に示す。また、最小ひび割れ指数を示すときの材齢および最小ひび割れ指数比を図-11 および図-12 に示す。

図-10 より、埋戻しを行った直後の温度変化および温度応力の変化に伴い、ひび割れ指数は減少する。すなわち、夏季に施工する場合、埋戻しは温度ひび割れを助長する傾向があることがわかる。

表-3 および図-11 より、壁厚 0.5m で、埋戻しを行わない case1-0 では、材齢 6.7 日において最小ひび割れ指数を示した。これに対し、埋戻しを行う case1-1～case1-3 では、埋戻しを行ってから 0.7～1 日後に最小ひび割れ指数を示し、埋戻しを早期に行うほど最小ひび割れ指数が小さくなった。つまり、埋戻しを行わない場合、ある時期で最小ひび割れ指数を示した後、ひび割れ指数は横ばい状態となるが、このときに埋戻しを行うと、外気温より温度の低い埋戻し材によって部材の温度が低下し、引張応力が増加することにより、埋戻し直後に最小ひび割れ指数を示すと考えられる。さらに図-12 より、コンクリートの引張強度が十分に発現していない若材齢の時期に埋戻しを行うと、最小ひび割れ指数は小さくなる。したがって、埋戻し材の温度が外気温より低い夏季に施工を行う場合、できるだけ遅い時期に埋戻しを行うことが温度ひび割れの抑制対策として効果的であると考えられる。

また、図-10 より、壁厚が 1.0m の場合、埋戻し直後のコンクリート温度が低下しひび割れ指数が減少するものの、その程度は壁厚が 0.5m の場合より小さい。これは、壁厚が厚い

と、部材の中心部は外部からの温度変化の影響を受けにくくなるためであると考えられる。また、図-11 および図-12 より、壁厚が 1.0m の場合、最小ひび割れ指数を示す材齢は埋戻しの時期にかかわらず 53～57 日ではほぼ一定であり、最小ひび割れ指数もほぼ同等であった。したがって、壁厚が比較的大きく、夏季に施工する場合、材齢 5～14 日の時期での埋戻しは、温度ひび割れに大きな影響を及ぼさないと考えられる。

3.3 埋戻し時期が温度ひび割れに及ぼす影響（冬季）

冬季に施工する case2-0～case2-3、case4-0～case4-3 の部材の下部中央における温度応力およびひび割れ指数の履歴を図-13 および図-14 に示す。また、最小ひび割れ指数を示すときの材齢および最小ひび割れ指数比を図-15 および図-16 に示す。図-6、図-13 および図-14 より、埋戻しを行わない場合、コンクリート温度が最高温度から外気温と同程度まで降下した時点で最小ひび割れ指数を示した。埋戻しを行った直後の温度変化に伴い、温度応力は減少し、ひび割れ指数は増加する。すなわち、冬季に施工する場合、埋戻しは温度ひび割れを抑制する傾向があることがわかる。

表-3、図-14 および図-15 より、壁厚 0.5m の場合、埋戻しを行わない case2-0 では、材齢 8 日において最小ひび割れ指数を示した。これに対し、材齢 8 日より早期に埋戻しを行う case2-1 および case2-2 では、材齢 20 日程度までは埋戻しを行わない case2-0 の場合よりひび割れ指数が大きいが、その後およそ 60 日を越える長期材齢で最小ひび割れ指数を示し、最小ひび割れ指数は埋戻しを行わない case2-0 の場合と等しかった。一方、材齢 8 日より遅い時期に埋戻しを行う case2-3 では、埋戻しを行わない case2-0 と同じ材齢 8 日で最小ひび割れ指数を示し、その値も case2-0 と等しかった。材齢 8 日より早期に埋戻しを行うと、外気温より温度の高い埋戻し材によって部材の温度が上昇し、最小ひび割れ指数を示す時期が遅くなるが、その後の温度降下によって、最小ひび割れ指数は埋戻しを行わない場合と同程度まで減少するものと考えられる。また、材齢 8 日を過ぎてから埋戻しを行うと、埋戻し以降のひび割れ指数は増加するが、結果的に埋戻し以前に経験した最小ひび割れ指数が最小となり、埋戻しを行わない場合と同等になる。したがって、壁厚 0.5m で埋戻し材の温度が外気温より高い冬季に施工を行う場合、埋戻しおよび埋戻しを行う時期は、温度ひび割れに大きな影響を及ぼさないと考えられる。ただし、湿潤な埋戻し材によって埋戻しを行う場合はコンクリート表面の乾燥を抑制できると考えられるため、できるだけ早い時期に埋戻しを行うことがひび割れの抑制対策として効果的であると考えられる。

表-3 および図-15 より、壁厚 1.0m の場合、埋戻しを行わない case4-0 では、材齢 13.3 日において最小ひび割れ指数を示した。これに対し、材齢 13.3 日より早期に埋戻しを行う case4-1 および case4-2 では、材齢 19.7 日および 13.7 日で最小ひび割れ指数を示し、埋戻しを行わない case4-0 より大きい最小ひび

割れ指数を示した。これは、壁厚が厚い場合では埋戻しを行った時点でコンクリート温度が比較的高いため、埋戻し材の保温効果が顕著に現れたものと考えられる。さらに、7 日後に埋戻しを行う case4-1 より 5 日後に行う case4-2 の方が大きい最小ひび割れ指数を示すことから、できるだけ早い時期に埋戻しを行うことが温度ひび割れの抑制対策として効果的であると考えられる。一方、材齢 13.3 日より遅い時期に埋戻しを行う case4-3 では、壁厚が 0.5m の場合と同様に、埋戻しを行わない case4-0 と同じ材齢 13.3 日で最小ひび割れ指数を示し、その値も case4-0 と等しかった。

4. まとめ

本研究では、コンクリートの打込み後に背面への埋戻しを行う地下構造物の側壁を対象とし、埋戻しが温度ひび割れに及ぼす影響を検討した。なお、本検討においては、埋戻し材の温度を、夏季の場合は外気温より 5℃低く、冬季の場合は外気温より 5℃高く設定し、温度および温度応力に着目して解析を行った。また、本研究においては、埋戻し材の保湿作用はコンクリートの強度発現を増進すること、埋戻しに伴って発生する土圧は、本研究で検討対象とした円周方向の応力に対しては圧縮側に作用することから、これらの要因は温度ひび割れに対して悪影響を及ぼさない考え、考慮しなかった。本検討の範囲内で得られた知見を以下に示す。

- (1) 埋戻しによるコンクリートの温度変化に伴い、対象構造物を夏季に施工する場合、コンクリートに発生する温度応力は、埋戻しを行った直後に増加し、冬季に施工する場合は減少する傾向にある。
- (2) 対象構造物を夏季に施工する場合、埋戻しを行うことによって部材の最小ひび割れ指数は減少し、その傾向は埋戻しを行う時期が早いほど顕著である。ただし、壁厚が 1.0m 程度の場合は、埋戻しが部材の最小ひび割れ指数に影響を及ぼさない。したがって、壁厚が 1.0m 程度より薄い場合には、できるだけ遅い時期に埋戻しを行うことが温度ひび割れの抑制対策として効果的である。
- (3) 対象構造物を冬季に施工する場合、埋戻しを行うことによって部材の最小ひび割れ指数は増加する。壁厚が 0.5m 程度の場合は、長期的に埋戻しを行わない場合と同程度までひび割れ指数が減少するため、最終的に最小ひび割れ指数には影響を及ぼさないが、壁厚が 1.0m 程度より厚い場合には、できるだけ早い時期に埋戻しを行うことが温度ひび割れの抑制対策として効果的である。

参考文献

- 1) 社団法人土木学会：2007 年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕，2007
- 2) 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