

報告

[1192] 沈埋函コンクリート施工時の温度応力計測結果について

小泉哲也*1・三橋郁雄*2・住吉正信*3・信田佳延*4

1. はじめに

臨港道路・鉄道併用の大阪南港トンネルは、沈埋工法を採用して建設が進められている。沈埋函体は、外周鋼板とコンクリートがずれ止めによって一体化された鋼-コンクリート合成構造であり、比較的マッシブな断面を有しながら鉄筋量が少ない特徴を有している。そのため、セメントの水和熱による温度ひびわれが発生する可能性が大きいと推定され⁽¹⁾、これに対処する観点から、コンクリート材料として低発熱セメントが用いられている。また、工事期間を通じて温度ひびわれの発生を抑制するため、施工管理の一環として、施工当初の函体製作時にコンクリートの温度、ひずみ、応力、鋼材のひずみなど温度ひびわれに関係する項目の計測管理を実施した。

本報告では、主として、低発熱セメントを使用した沈埋函コンクリート施工時の壁及び上・下床版における温度計測結果を報告するとともに実測結果と解析結果との対比から、温度応力の予測精度に関する検討結果を述べる。

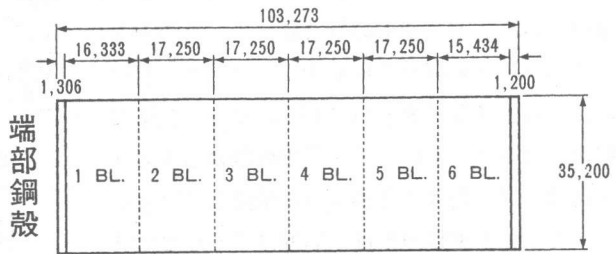
2. 施工概要

2. 1 構造物及び施工方法の概要

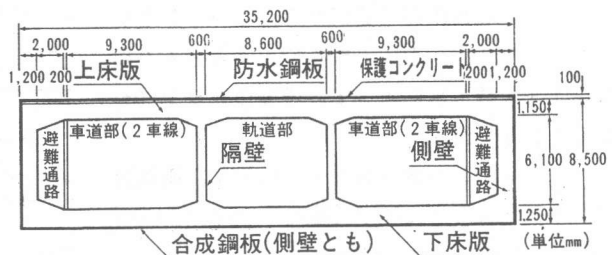
本トンネルは、沈埋部約1,025 mを長さ約103 mの函体、10函体で構成する。1函体の形状及び寸法は図-1に示すとおりであり、上床版は1.15m、側壁は1.2 mの厚さを有するマッシブな断面となっている。

コンクリート施工は、函体を6ブロックに分け、それぞれのブロックについて下床版、壁、上床版の順に打設されている。

本報告で対象とする函体のコンクリート施工期間は、4月から10月までの約6か月であり、各ブロックでの下床版施工から壁施工壁施工から上床版施工までのコンクリートの打設間隔は、それぞれ約40日、約50～70日であった。



a. 平面図(1函当り)



b. 標準断面図

図-1 沈埋函の形状及び寸法

- * 1 運輸省第三港湾建設局神戸港工事事務所建設専門官, 工修 (正会員)
- * 2 運輸省第三港湾建設局神戸港工事事務所所長, 工修
- * 3 大阪南港トンネル沈埋函製作建設共同企業体工事事務所所長
- * 4 鹿島技術研究所第二研究部主任研究員, 工修 (正会員)

表-1 使用材料

使用場所		上・下床版		側壁	
種類					
セメント		低発熱型高炉B種 比重=2.96		低発熱型高炉B種 比重=3.02	
水		堺市工業用水			
細骨材	海砂(70%)	岡山県 豊島産	合成比重= 2.56	岡山県児島産 比重=2.57、FM=2.70	
	砕砂(30%)	兵庫県 男鹿島産	FM=2.65	兵庫県赤穂産 比重=2.57、FM=3.18	
粗骨材		兵庫県男鹿島産 比重=2.63		岡山県神島産 比重=2.62	
混和材		石灰石粉			
混和剤		高性能AE減水剤(ナフタリン系)			

2. 2 コンクリートの配合及び物性

(1) 使用材料及び配合

使用材料の一覧を表-1に示す。側壁及び上・下床版ともにセメントは、中庸熱ポルトランドセメントベースの低発熱高炉B種セメントを用いている。セメントの性質は、表-2のとおりであり、汎用高炉B種セメントに比べ、水和熱が70%程度以下のものである。また、側壁に使用したセメントは、上・下床版用のものより水和熱が20%程度小さいものを使用している。このセメント選定理由は、側壁のほうが温度及びわれ発生に対して厳しい条件にあることを考慮したことによる。

また、充填性確保の観点から、ワーカビリティ向上のため、石灰石粉を使用するとともに高性能AE減水剤によって、所要のスランプを得ることとした。

コンクリートの配合を表-3に示す。側壁及び上・下床版ともに呼び強度は、300 kgf/cm²(保証材令91日)である。

(2) 強度、弾性係数及び断熱温度上昇

表-4にコンクリート圧縮強度、引張強度(割裂試験による)及びヤング係数を示す。これらの値は、いずれも標準養生供試体による試験結果である。

コンクリートの断熱温度上昇曲線は、図-2に示すとおりである。ここで、側壁コンクリー

表-2 使用セメントの性質

a. 物理的性質

種別	比重	粉末度 cm ² /g	凝結時間		安定性	圧縮強さ(kgf/cm ²)				水和熱(cal/g)		
			始発 h-m	終結 h-m		3日	7日	28日	91日	7日	28日	91日
側壁用	3.05	4580	3-10	5-10	良	57	109	307	470	38.0	46.2	50.6
上・下床版用	3.01	4080	4-39	5-49	良	82	154	349	—	51.8	62.9	—
汎用高炉B種	3.04	3730	2-41	4-02	良	133	210	436	586	69.3	85.2	94.8

b. 化学的性質

種別	igloss	insol	CaO	MgO	SO ₃	R ₂ O
側壁用	0.2	0.0	51.3	3.4	1.6	0.5
上・下床版用	0.9	0.3	51.0	4.5	3.4	0.4
汎用高炉B種	1.0	0.2	55.4	3.7	2.0	0.4

表-3 コンクリート配合

	呼び強度 強度 (kgf/cm ²)	呼び強度 保証 材令 (日)	粗骨材 最大径 (mm)	スランプ (%)	空気量 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)					
								水 W	セメント C	混和材 M	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤
上・下床版	300	91	20	12	4	55	43	154	280	20	765	1065	4.48
側壁				18				156	284	30	758	1061	4.54

表-4 コンクリート強度及び弾性係数

a. 上・下床版

	材 令 (日)							
	1	2	3	4	7	14	28	91
圧縮強度(kgf/cm ²)	20	51	91	125	218	278	316	390

b. 側壁

	材 令 (日)							
	1	2	5	8	19	28	92	
圧縮強度(kgf/cm ²)	83	110	171	217	270	288	375	
引張強度(kgf/cm ²)	6.0	11.2	16.3	19.7	22.8	26.4	31.9	
ヤング係数 (×10 ⁴ kgf/cm ²)	14.9	18.0	23.1	23.4	27.5	29.6	34.1	

コンクリートの最高温度上昇量は約22℃、コンクリート温度が環境温度にほぼ等しくなる材令14日までの温度降下量は約23℃となっている。これに対し、解析結果では、最高温度に達する材令に1日程度の相違があるものの、最高温度上昇量は約22℃、材令14日での温度降下量は約20℃と実測値と概ね一致した結果が得られた。また、温度降下速度も実測値に近い値が得られている。

3. 2側壁コンクリート温度変化

図-5～図-7は、側壁でのコンクリート温度計測結果と解析結果との比較を示したものである。この内、図-5は、春期施工（5月19日）、図-6、図-7は夏期施工（それぞれ、7月2日、7月29日施工）の結果を示している。

図-5によると、実測値、解析値（②式による）ともに最高温度上昇量約17℃、温度降下量約18℃であり、一致した結果となっている。図-5における結果と同様、図-6においても、実測値と解析値（②式による）とで大きな差は認められず、コンクリートの最高温度上昇量は、ともに約18℃、コンクリート温度が環境温度にほぼ等しくなる材令10～14日までの温度降下量は約16（実測）～17.5℃（解析）となっている。

図-7は、今回対象とした施工期間を通じ温度ひびわれ発生条件が最も厳しい気温条件下での結果を示したものである。すなわち、コンクリート施工当日の外気温、コンクリート打ち込み温度が高かったこと（それぞれ31～35℃、30.5～31.5℃）、最高温度に影響する打設後3日までの間での外気温が施工当日と同様であったこと、これに対し、温度降下量に影響する打設後4～10日での外気温が平均25℃程度と低かったことなどである。したがって、実測結果では、最高温度上昇量約23℃、温度降下量約27～28℃と温度ひびわれ発生の可能性が高い結果となった。ただし、この場合でも①式による解析では、最高温度上昇量約20.5℃、温度降下量約24℃と概ね実測値と同様の結果が得られている。以上のとおり、ほぼ満足される精度で温度変化が予測できることが示され

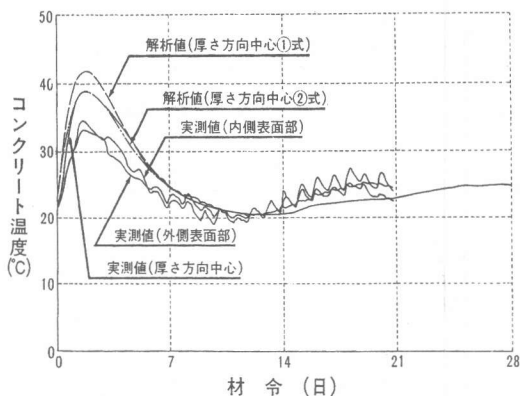


図-5 温度計測結果及び解析値（側壁）

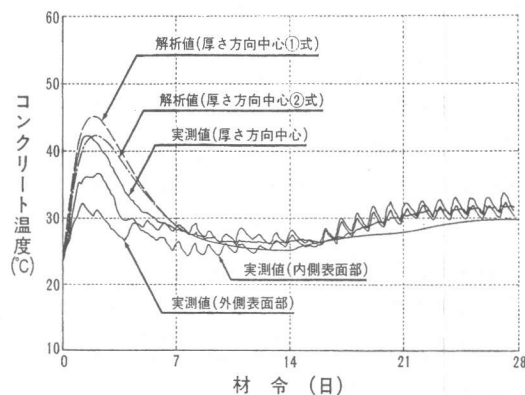


図-6 温度計測結果及び解析値（側壁）

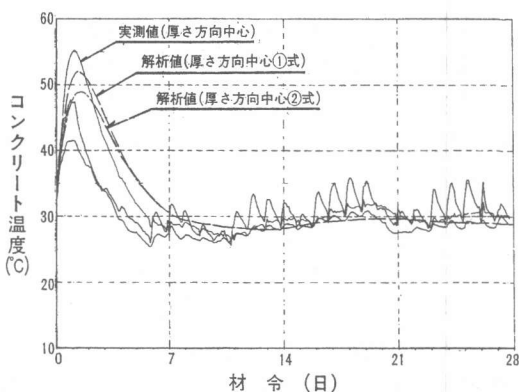


図-7 温度計測結果及び解析値（側壁）

表-6 温度応力解析方法及び入力値

項目	対象	側壁	
		春期打設	夏期打設
解析方法		C P法	
解析モデル		図-5(②式)	図-7(①式)
圧縮強度 (材令91日) (kgf/cm ²)		375	
圧縮強度の発現	a	3.5	
	b	1.26	
引張強度の発現	c	0.07436	
	d	1.0327	
弾性係数	a	14900	
	b	0.5244	
E(t) = a · a (f _c (t)) ^b (kgf/cm ²)	a	0.733(材令日 ²)	
	b	0.00011t	
線膨張係数 (1/°C)		0.00011t	
拘束係数		0.6	

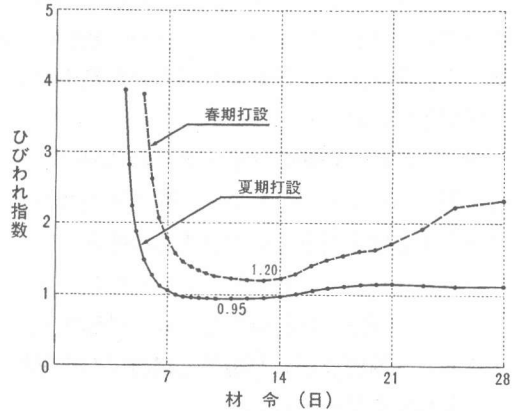


図-8 温度ひびわれ指数算定結果

た。また、使用するコンクリートの比熱、熱伝導率、表面熱伝達率を把握することで、より精度を高めることが可能と考えられる。クリートの温度変化を予測することが可能である。

4. 温度ひびわれ指数及びひびわれ調査結果

4. 1 温度ひびわれ指数の算定

温度解析結果を基に、側壁について温度ひびわれ指数を算定した。解析方法及び入力値は表-6のとおりである。ここで、各強度・ヤング係数の発現は、品質管理試験結果を回帰したものであり、積算温度は考慮していない。また、線膨脹係数及び外部拘束度は、コンクリート無応力計、ひずみ計の計測結果⁽²⁾に基づいた。算定結果は、図-8に示すとおりである。

春期打設(図-5に対応)の場合、最小ひびわれ指数は約1.2(材令13日)であった。これに対し、夏期打設における最も厳しい条件下(図-7に対応)では、ひびわれ指数の最小値は、約1.0(材令11日)であった。いずれの場合も材令7~14日にかけて、温度ひびわれ指数が低下することが示されている。

図-9に、夏期打設(図-6に対応)の場合のコンクリート有効応力計の計測結果を示す。これによると、コンクリート応力度の値自体は解析値及びコンクリートの引張強度に比べて小さいものの、材令7日前後から14日の間でひびわれにつながる引張応力度が示されていること、また、材令16日程度でひびわれが発生している状況が示されていることなど、解析結果と同様の傾向が得られている。

4. 2 ひびわれの状況

図-10に側壁のひびわれ発生状況を示す。

図中の数値は、それぞれのひびわれの最大ひびわれ幅を示している。ひびわれの調査時期は、コンクリート打設後約2か月(夏期打設の場合)~4か月(春期打設の場合)である。最大ひびわれ幅、平均ひびわれ幅及び平均ひびわれ間隔は、0.20mm、0.14mm及び2.4m(春期打設の場合)、0.25mm、0.16mm及び

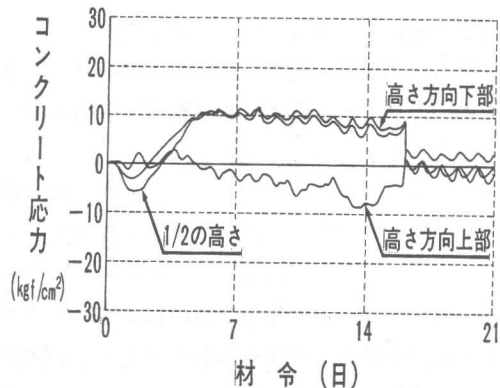


図-9 コンクリート応力計測結果

1.3 m (夏期打設)程度であった。また、外周鋼板には、約1.7 m間隔で鋼殻の補強リブが設置されており(これによるコンクリート断面の欠損率は17.5%)、リブが誘発目地的な効果を果たすことにより、リブ付近にひびわれが集中する傾向が示された。

現時点では、鋼殻の拘束がひびわれ幅に与える影響は明らかでないため、一般の鉄筋コンクリート構造物を対象とした万木らの報告⁽³⁾

$$W_{av}(\text{mm}) = 0.337 - 0.18Fs - 0.114p$$

Fs : 温度ひびわれ指数, p : 鉄筋比(%)
を参照し、温度ひびわれ指数と鋼材比から平均ひびわれ幅を算出すると、

春期打設 : 0.05mm (鋼殻考慮, 鋼材比0.99%)

0.14mm (鉄筋のみ, 鋼材比0.16%)

夏期打設 : 0.08mm (鋼殻考慮, 鋼材比0.99%)

0.18mm (鉄筋のみ, 鋼材比0.16%)

となる。なお、温度ひびわれ指数として、前述の値から、鋼殻リブによる断面減少率だけ低減した値を用いた。上記の結果からは、ひびわれ幅に対して鋼殻による拘束の影響は顕著には認められない。これは、鋼殻リブの間隔が比較的密であり、そこにひびわれが集中したことによるためと思われるが、温度応力度及びひびわれ分散性に対する鋼殻の拘束の影響については、さらに検討が必要と考えられる。

5. おわりに

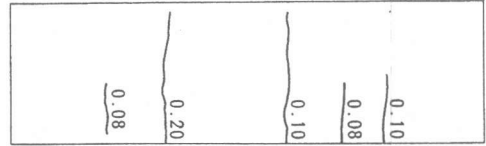
今回の施工を通じ、温度ひびわれの発生は事前の予測範囲内であることが確認されたほか、本検討により、コンクリート温度変化、温度ひびわれ発生の特徴など、低発熱セメントを使用した場合の沈埋函コンクリートにおける温度応力ならびにその予測精度について、施工の次ステップをより合理的に実施するための資料が得られた。同時に、鋼-コンクリート合成構造特有の問題である鋼殻の拘束と温度応力の関係(外部拘束度、ひびわれ分散性、鋼殻に対する日射の影響など)などの課題が明らかとなった。これらの点については、現在詳細な検討を実施中であり、別の機会を利用して報告したいと考えている。

最後に、本検討に当たっては、大阪南港トンネル沈埋函コンクリート施工法の検討委員会(委員長:園田恵一郎大阪市立大学教授)の関係各位に深く感謝の意を表する次第である。

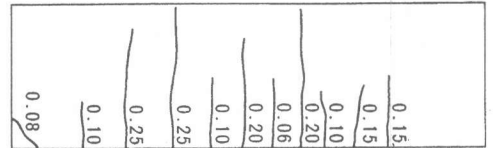
< 参 考 文 献 >

- (1) 小泉, 安井ら「日本初の道路・鉄道併用沈埋トンネル」, コンクリート工学, 1993. 6. (預)
- (2) 横田, 小泉ら「沈埋函コンクリートの側壁部における拘束度に関する一考察」(別報), コンクリート工学年次講演報文集, 1993. 6
- (3) 万木正弘ら「壁状構造物に発生する温度ひびわれの実態とひびわれ幅予測」, コンクリート構造物の体積変化によるひびわれ幅制御に関するJCIコロキウム論文集, 1990. 8
- (4) 日本コンクリート工学協会「マスコンクリートの温度ひびわれ制御指針」1986. 3

春期打設(打込み温度=20~22.5°C)



夏期打設(打込み温度=30.5~31.5°C)



(数字は最大ひびわれ幅, mm)

図-10 ひびわれ発生状況