

合成構造沈埋函におけるマスコンクリート温度応力の実測結果について

横田季彦¹・小島朗史²・小泉哲也³・渋山晴夫⁴・住吉正信⁵

¹正会員 工博 日本国土開発株式会社 技術本部 技術開発研究所 (〒243-03 神奈川県愛甲郡愛川町中津4036-1)

²正会員 運輸省港湾技術研究所 (〒239 横須賀市長瀬3-1-1)

³正会員 工修 運輸省港湾技術研究所 (〒239 横須賀市長瀬3-1-1)

⁴正会員 運輸省第三港湾建設局 (〒651 神戸市中央区海岸通)

⁵正会員 鹿島建設株式会社 建設総事業本部 大阪支店 (〒550 大阪市西区阿波和座1-3-15)

大阪南港トンネルは沈埋工法によって建設されている。この沈埋函は鋼・コンクリート合成構造方式を採用しているが、部材寸法が1mを超えるマスコンクリートであるため、製作時においては温度応力によるひび割れの発生が懸念された。このため、温度応力の低減を目的として低発熱セメントを使用するなどの対策を講じるほか、各種計測器を用いて温度応力計測を実施し、計測結果の次施工へのフィードバックを行った。本報文では、全10函のうち施工時期が異なる2号函および5号函における温度応力計測結果と温度ひび割れの調査結果について述べ、鋼・コンクリート合成構造におけるマスコンクリート温度応力挙動の特徴について検討を行ったものである。

Key Words : *immersed-type tunnel, steel-concrete composite structures, mass concrete, thermal stresses, external restraint, ratio of restriction*

1. はじめに

大阪南港トンネルは、大阪都心部と埋立地である南港地区とを結ぶ臨海道路・鉄道併用の海底トンネルであり、海底部約1025mが沈埋工法によって建設されている^{1)・2)}。この沈埋函の構造形式としては、表面部の外周鋼板と内部のコンクリートとがジベル等の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方式が採用されており、RC構造方式を用いた従来の構造物に比べて鉄筋量が少なく、工期が短い等の特徴を有している。また、部材寸法が1mを超えるマッシブなコンクリート構造物である沈埋函は、製作時において、セメントの水和熱に起因する温度応力が問題となり、特に壁式構造である沈埋函の側壁部については温度応力のうち、外部拘束応力によってひび割れの発生が懸念された。このような観点から、本工事に先立ち種々の事前検討を行い、適切なコンクリート配合の決定、低発熱形セメントの使用、養生方法の改善等の温度応力低減対策を実施した。しかしながら、本沈埋函のような比較的部材寸法が大きな鋼・コンクリート合成構造における温度応力の検討結果はほとんどなく、外周鋼板および各種補剛材が外部拘束度に及ぼす影響も明確にさ

れていない。

本報告は、このような現状に対して、施工時期が異なる2号函および5号函の製作時における温度応力計測結果およびひび割れ調査結果をもとに、大規模な鋼・コンクリート合成構造におけるマスコンクリート温度応力の発生特性について検討を行ったものである。

2. 沈埋函の概要

大阪南港トンネルにおける沈埋トンネル部は約1kmであり、長さ約103m、高さ8.6m、幅35.2mの沈埋函10函より構成されている。沈埋函の部材寸法は、下床版部が1.25m、側壁部が1.2m、隔壁部が0.6m、および上床版部が1.15mであり、中央の軌道部と両サイドの車道部とから成る3連のボックスカルバート形状となっている。また、下床版部および側壁部は、外周部の鋼殻と内部コンクリートとがずれ止めによって一体化されたオープンサンドイッチ形式の合成構造方式であり、上床版部は通常のRC構造方式である。沈埋函の標準断面を図-1に、トンネルの基本条件を表-1に示す。

沈埋函の製作は全長を6分割して行い、1ブロック

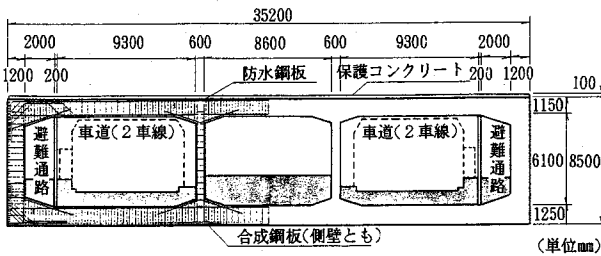


図-1 沈埋函の標準断面

表-1 沈埋トンネルの基本条件

種別	細目	仕様	備考
道路	道路規格	第4種第1級	
	設計速度	60 km/hr	
	車線構成	往復分離 4車線	幅員3.25m×4車線
	計画交通量 大型車混入率	25,900 台/日 35 %	
鉄道	軌道構成	複線	第3軌条方式
	電気方式	直流 750 V	
	軌間	1,435 mm	
	車両編成 設計速度	6 両 70 km/hr	
航路	航路限界	DL +51.10 m	OP +51.50 m
	主航路水深	DL -13.00 m	
	対象最大船舶	45,000 D/T	
	最小土被り厚	1.5 m	

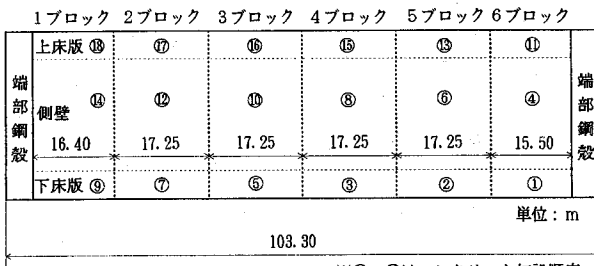


図-2 コンクリート打設順序

当たりの標準長さは、生コンプラントの1日当たりの出荷能力、現場における打設能力、型枠支保工の転用性および経済性をもとに約17mとした。また、ブロック内では、下床版部、壁部および上床版部の3部位に分けコンクリートの打設を行い、それぞれの打継ぎ間隔は、下床版打設から壁部打設までが約40日、壁部打設から上床版部打設までが約60日であった。図-2に、本沈埋函におけるコンクリート打設順序を、写真-1および写真-2に施工状況を示す。

沈埋函の製作は、製作ヤードの制約等から全10函の製作を4サイクルに分割して行った。すなわち、1～3号函の製作、4～6号函の製作、7,8号函の製作および9,10号函の製作の4期であり、平成7年度までに全函の製作は完了した。また、製作が完了した沈埋

函はその後順次沈設され、平成8年3月に全函の沈設が終了し、トンネルは貫通した。



写真-1 沈埋函製作状況



写真-2 沈埋函完成時

3. 事前検討

(1) 検討概要

事前検討として、沈埋函製作時における側壁部コンクリートの温度応力によるひび割れ発生の可能性を予測し、適切な温度応力低減対策を策定することとした。すなわち、室内試験レベルでの配合試験および断熱温度上昇試験を実施するとともに、これらの実験データを用いて温度応力解析を行い、コンクリートの使用配合および使用材料を選定した。なお、温度応力解析時における温度ひび割れ指数の目標値は、同種の同規模構造物である多摩川沈埋トンネルにおける実績から1.2以上とした。

また、室内試験で選定した配合を用いたコンクリートの施工性の確認と、選定された配合の発熱挙動の確認等を目的とし、実大寸法の試験函体を製作して検討を行った。沈埋函における温度応力検討フローを図-3に、試験函体の概要を図-4に、それぞれ示す。

(2) 検討結果

a) 室内試験における検討

実施工に先立ち、側壁コンクリートの示方配合および使用セメントの選定を行った。示方配合を選定する際の選定条件は表-2に示すとおりであり、使用セメントは温度応力の低減目的から中庸熟セメントをベースとした低発熱形高炉セメントB種を用いた。また、スランプは施工性およびポンプ圧送性を考慮して18cmとし、最大水セメント比は、本沈埋函は海洋構造物であるものの、躯体外周部が鋼板で覆われており直接海水の影響を受けないことから55%とした。これらの配合条件をもとに、セメントの銘柄、単位セメント量、コンクリートの練り上がり温度、石粉の有無を変化させ配合検討を行った結果、所定のワーカビリティを得るためには、単位セメント量を 280kg/m^3 以上とし、石灰石粉を 30kg/m^3 混入すればよいことが分かった。

選定された示方配合において、セメントの銘柄を変化させた断熱温度上昇試験の結果を図-5に、使用したセメントの物理試験結果を表-3に示す。

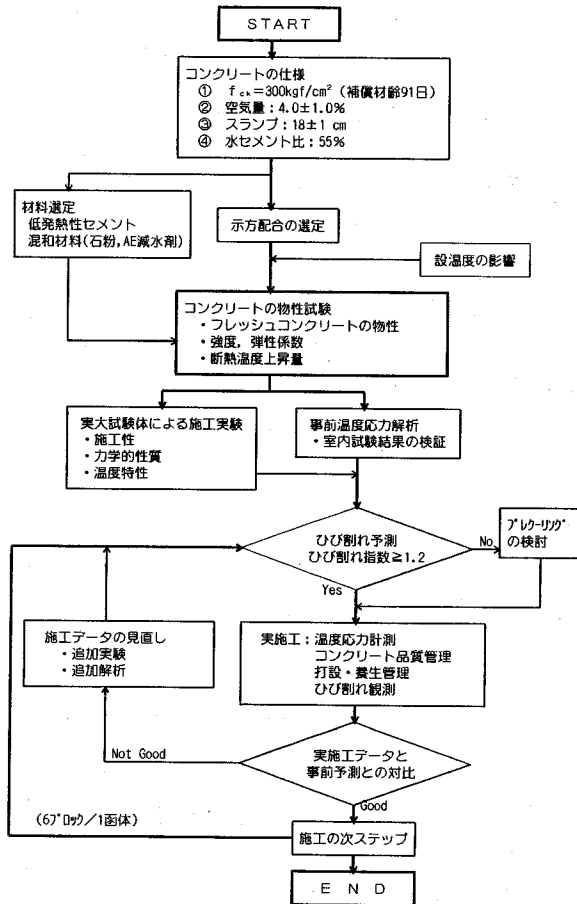


図-3 温度応力検討フロー

これらの図表に示すように、セメントの銘柄によって成分等が異なったため、物理試験結果および断熱温度上昇試験の結果がかなり異なった。また、これらの試験値をもとに温度応力解析を行った結果、最も発熱量の少ないC₃セメントを使用すれば、夏期打設時においても、温度ひび割れ指数を1.2以下にできることが分かった³⁾。

b) 試験函体による検討

沈埋函の隅角部をモデル化した実大寸法の試験函体を製作した施工実験を行った結果、側壁部コンクリートの温度上昇量は約10℃となり、型枠脱型後の目視観察においても、温度応力によるひび割れの発

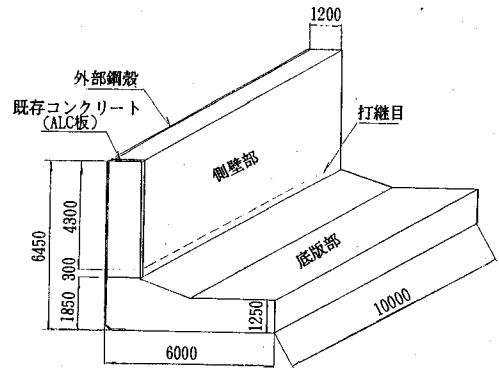


図-4 試験函体の概要

表-2 配合選定条件

	下床版・上床版・隔壁*	側壁・隔壁**
セメントの種類	低発熱型高炉セメントB種	
呼び強度	300 kgf/cm ²	
呼び強度保証材齢	91日	
最大水セメント比	55%	
細骨材率	43%	
スランプの範囲	12 ± 2.5 cm	18 ± 2.5 cm
石灰石粉の混入量	20 kg	30 kg
空気量の範囲	4.0 ± 1.0%	
最大骨材寸法	20 mm	
混和剤の種類	高性能AE減水剤	
塩化物量の上限值	0.30 kg/m ³	

隔壁*: 5号函, 隔壁**: 2号函

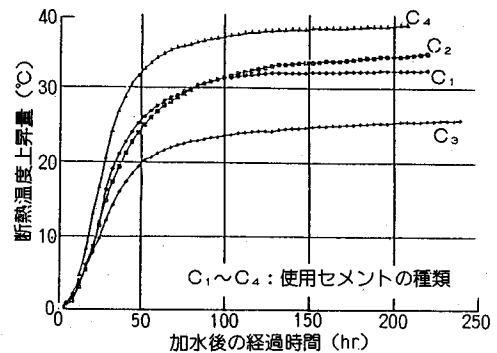


図-5 断熱温度上昇試験結果

生は認められなかった。また、室内実験で得られた配合で十分な施工性が確保できることも分かった。

表-3 使用セメントの物理試験結果

試験項目	品 質				
	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	
比 重	3.01	3.01	3.05	2.99	
比表面積(cm ² /g)	4090	4060	4580	5250	
凝 結	始発(時-分)	4-43	4-35	3-10	3-07
	終結(時-分)	5-58	5-40	5-10	4-07
安定性(煮沸法)	良	良	良	良	
水和熱 (cal/g)	7日	51.9	51.6	38.0	64.4
	28日	61.0	64.8	-	72.0
フロー値	262	268	272	-	
圧縮強度 (kgf/cm ²)	3日	89	75	57	123
	7日	161	146	109	234
	28日	349	348	307	470
スラグ混入率(%)	58	58	56	59	

4. コンクリートの配合および使用材料

沈埋函製作時におけるコンクリートの配合を表-4に、使用材料を表-5に示す。これらの表に示されるように、側壁部コンクリートの配合および使用材料は前述した事前検討結果をもとに決定し、下床版部および上床版部コンクリートにおけるそれらは、側壁部に比べて温度応力によるひび割れの発生の可能性が低いこと、比較的打設が容易なこと、等を考

慮して決定した。なお、隔壁部コンクリートに関しては、1~3号函の製作時において、長期的な乾燥収縮に起因すると考えられるひび割れの発生が多く認められたことから、4号函の製作以降は、上・下床版部と同様のものを用いた。また、側壁部コンクリートは全函を通じて同一ブランドを使用した。他の部位に関しては、使用した生コンプラントの違いによって、使用材料および配合が若干異なった。

5. 計測概要

(1) 計測項目

2号函および5号函製作時における温度応力の計測項目は、コンクリート温度、コンクリートひずみ、コンクリート応力および鋼材ひずみ、等であり、それぞれ表-6に示す計測器を用いた。

(2) 計測断面および計器埋設位置

a) 計測断面

本沈埋函における温度応力計測断面は、温度応力によるひび割れの発生が最も問題となる側壁部を主とし、上床版、下床版および隔壁についても計測を行った。なお、側壁部および隔壁部における計測断面は、日射により外部鋼殻が熱せられひび割れ発生に対して危険側となるP側(南面側)を対象とした。図-6に計測断面を示す。

表-4 使用コンクリートの配合

使用部位	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	水セメント比 W/C (%)	空気量 (%)	細骨材率 s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)					
						水 W	セメント C	細骨材 S	石粉	粗骨材 G	A E減水剤 A
下床版 上床版 隔壁*	25	12	55.0	4.0	43.0	154	280	765	20	1065	4.48
側 壁 隔壁**	25	18	54.9	4.0	43.0	156	284	758	30	1061	4.54

隔壁*: 5号函, 隔壁**: 2号函

表-5 使用材料

部 位	材 料	使 用 材 料
下床版 上床版 隔 壁*	セメント	低発熱形高炉セメントB種 ($\rho=2.96$)
	粗 骨 材	兵庫県男鹿島産砕石 ($\rho=2.63, FM=6.65$)
	細 骨 材	岡山県堅場産海砂70%, 兵庫県男鹿島産砕砂30% ($\rho=2.56, FM=2.65$)
	石 粉	石灰石粉 ($\rho=2.70$)
	混 和 剤	高性能A E減水剤
側 壁 隔 壁**	セメント	超低発熱形高炉セメントB種 ($\rho=3.05$)
	粗 骨 材	岡山県神島産砕石 ($\rho=2.62, FM=6.71$)
	細 骨 材	岡山県堅場産海砂70%, 兵庫県赤穂産砕砂30% ($\rho=2.57, FM=2.68$)
	石 粉	石灰石粉 ($\rho=2.72$)
	混 和 剤	高性能A E減水剤

* 5号函, ** 2号函

表-6 使用計器

計測項目	計測内容	使用計器
コンクリート温度	セメントの水和熱によるコンクリート温度履歴および部材内部の温度分布の測定.	CC熱電対
コンクリートひずみ	コンクリートの温度変化, 乾燥収縮, 外部および内部拘束応力およびクリープ等によってコンクリート部材中に生じるひずみの測定.	埋込み型ひずみ計 (KM-100B)
コンクリート応力	コンクリート部材中に発生する応力の測定.	コンクリート有効応力計 (GK-60-202)
鋼材ひずみ	外部鋼殻および鉄筋に生じるひずみの測定.	鋼殻ひずみ計, 鉄筋計 (GS-10F) (GR-19)
コンクリートの熱膨張係数	外力を受けない状態でのひずみの測定結果から, コンクリートの熱膨張係数を算定.	無応力計 (KM-100B, KMF-51)

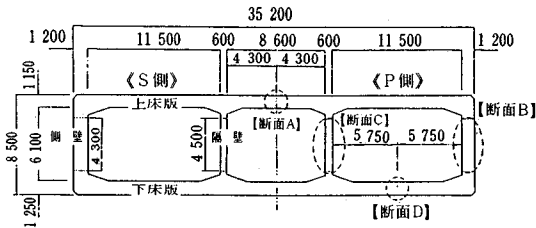


図-6 計測断面

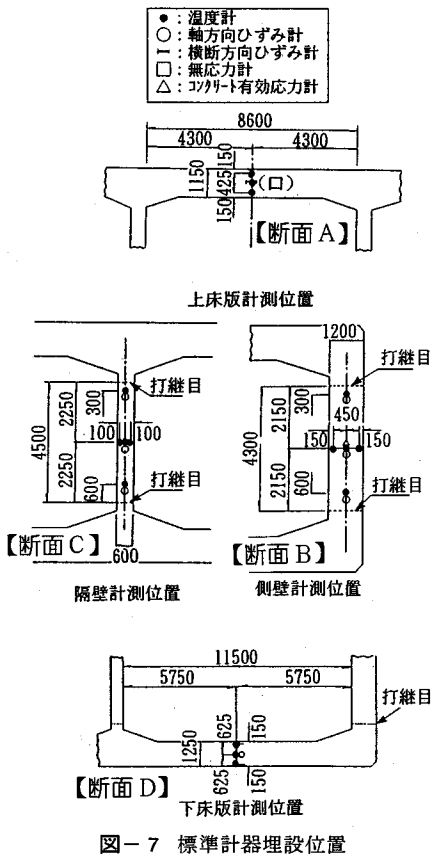


図-7 標準計器埋設位置

b) 計器埋設位置

各部位における標準計器埋設位置を図-7に示す。各計測位置における計測器の設置方向は応力発生方向を考慮して沈埋函軸方向を基準としたが、側壁部による拘束が予測される上床版部および下床版部は、軸方向と併せて、沈埋函横断方向にも計測器を設置した。

6. 計測結果および考察

(1) コンクリート温度の検討

側壁部コンクリートの経時変化の一例を図-8に、2号函および5号函の温度計測結果一覧を表-7に、これをもとに整理した温度特性を図-9に示す。これらの図表から、側壁部コンクリートは打設後1.1~2.2日で最高温度となり、その後材齢5~6日までは比較的急激に温度は低下し、それ以降は緩やかに温度降下を示して、材齢12日前後で外気温とほぼ同様となる。側壁部コンクリートの温度上昇量は13.4~23.9℃の範囲にあり、外気温および打設温度の上昇に伴って高くなるのが分かる。また逆に、最高温度到達材齢は、外気温の上昇とともに短くなっている。したがって、放熱条件がほぼ同じである同一部位の比較では、外気温が高い場合は温度上昇量が大きく、温度上昇速度も早くなるため、部材内の温度勾配が大きくなり、温度ひび割れが発生しやすい状況となることが分かる。

下床版部および上床版部のコンクリート温度の経時変化の一例を、図-10および図-11に示す。これらの図に示すように、下床版部および上床版部はともに部材厚さが1m以上であるが、コンクリートの温度履歴は異なっている。すなわち、下床版部は放熱が主として上方向のみとなるため、内部温度

の降下が緩やかとなるのに対して、上床版部は放熱が上下2方向となるため、温度低下速度が幾分大きくなっている。

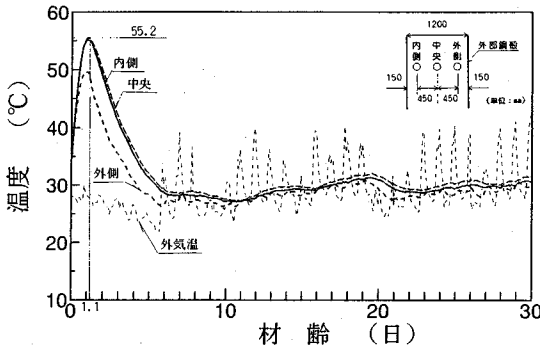


図-8 側壁部コンクリートの温度の経時変化

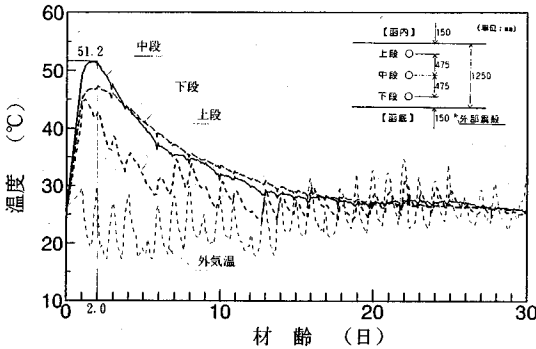


図-10 下床版部コンクリートの温度の経時変化

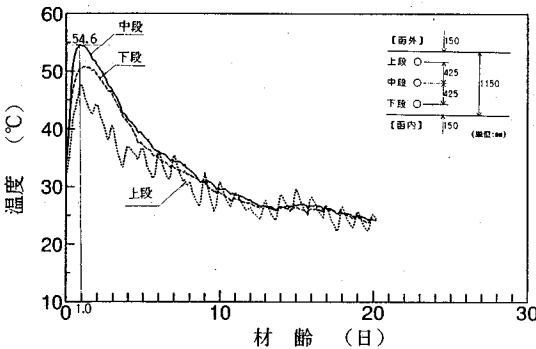


図-11 上床版部コンクリートの温度の経時変化

(2) コンクリートひずみの検討

側壁部コンクリートの計測結果の一例として、2号函3ブロックにおける計測結果を図-12に示す。同図中には、側壁部コンクリートの実際の変形挙動を示す実ひずみと、実ひずみからコンクリートの温度変化に伴う自由変形ひずみを差し引くことによって求めた有効ひずみを併せて示した。

同図から、側壁部における実ひずみはコンクリート温度の上昇とともに引張（伸び）側で発生し、

最高温度到達後、実ひずみは減少し、材齢5日前後で圧縮（縮み）側に移行する。一方、有効ひずみはこれとは逆に、コンクリート打設直後に圧縮側

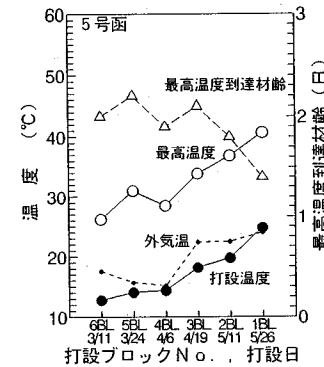
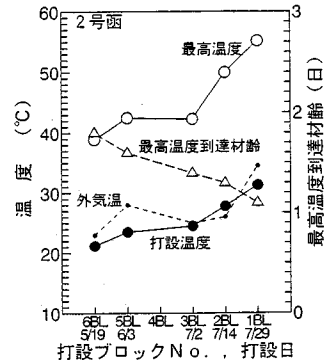


図-9 側壁コンクリートの温度特性

表-7 側壁コンクリートの温度特性一覧表

函体 No.	ブロック No.	打設日 (月/日)	外気温 (°C)	打設温度 (°C)	最高温度 (°C)	最高温度到達材齢 (日)	温度上昇量 (°C)
2	6	5/19	23.0	21.2	38.9	1.8	17.7
	5	6/3	28.0	23.5	42.5	1.6	19.0
	3	7/2	25.0	24.5	42.3	1.4	17.8
	2	7/14	26.0	27.8	50.0	1.3	22.2
	1	7/29	34.5	31.3	55.2	1.1	23.9
5	6	3/11	17.6	12.8	26.2	2.0	13.4
	5	3/24	15.7	14.1	31.0	2.2	16.9
	4	4/6	15.2	14.4	28.5	1.9	14.1
	3	4/19	22.4	18.2	33.9	2.1	15.7
	2	5/11	22.5	19.8	36.9	1.8	17.1
	1	5/26	24.0	24.8	40.7	1.4	15.9

で発生し、温度降下に伴い引張側に転じており、外部拘束応力の典型的な挙動と同様な傾向を示している。また、同図において、材齢6日前後でひずみが大きくシフトしており、この時期に壁部にひび割れが生じたものと考えられる。

上床版部におけるひずみ挙動の一例として、2号函3ブロックにおける計測結果を図-13に示す。同

図に示すように、上床版における有効ひずみの挙動は、前述した側壁部におけるそれが外部拘束応力の典型的な挙動を示したのと異なり、断面内でバランスした分布を示している。すなわち、上段部では圧縮ひずみが増加し、中段部はひずみの変動が小さく、下段部においては引張ひずみが増加する傾向となっている。

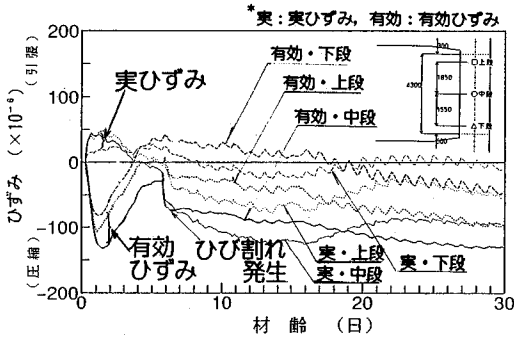


図-12 側壁部におけるひずみの経時変化

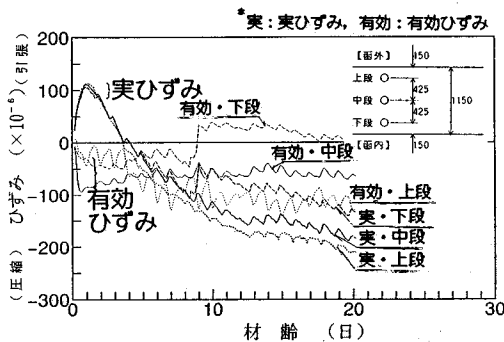


図-13 上床版部におけるひずみの経時変化

(3) 拘束度の検討

外部鋼殻による拘束の程度を評価することを目的とし、ひずみおよび温度の計測結果をもとに次式⁴⁾によって拘束度を算定した。

$$R = \frac{\alpha_c - \alpha_r}{\alpha_c} \quad (1)$$

ここに、 R : 拘束度

α_c : コンクリートの熱膨張係数 ($1/^\circ\text{C}$)

α_r : 各計測位置での実ひずみ変化率 ($1/^\circ\text{C}$)

なお、上式におけるコンクリートの熱膨張係数 α_c は、沈埋函側壁部に埋設した無応力計による実ひずみと温度変化量との関係から求めた。図-14に無応力計による計測結果を示す。

5号函の側壁部および隔壁部における拘束度の算定結果を表-8に、側壁部高さ方向の拘束度分布を

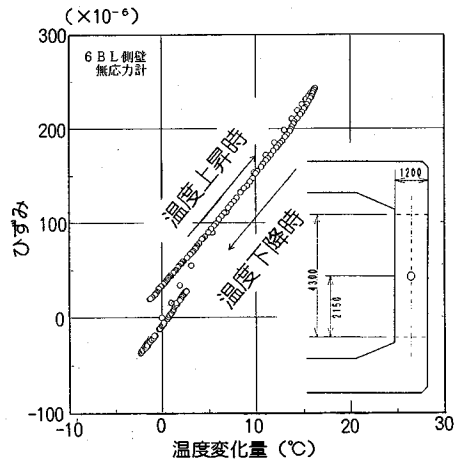


図-14 無応力計における計測結果

表-8 5号函壁部の拘束度の算定結果

ブロック No.	部位	位置	ひずみ変化率 α_r $\times 10^{-6}$ ($1/^\circ\text{C}$)	拘束度 R
6	側壁	中段	5.63	0.56
		隔壁 中段	7.50	0.28
3	側壁	上段	8.50	0.33
		中段	5.83	0.54
		下段	4.19	0.67
3	隔壁	上段	6.19	0.41
		中段	4.67	0.55
		下段	2.86	0.73
2	側壁	上段	7.79	0.39
		中段	5.33	0.58
		下段	4.52	0.64
2	隔壁	上段	5.36	0.49
		中段	4.76	0.54
		下段	4.29	0.59
1	側壁	中段	6.80	0.46
		隔壁 中段	3.69	0.65

図-15および図-16に示す。これらの図中には、沈埋函の1ブロック当たりの寸法をもとに、ACI図表値⁵⁾から求めた拘束度分布も併せて示した。なお、ACI図表値における補正係数 M は、被拘束体である側壁部の断面積および弾性係数を 5.16m^2 および $2.0 \times 10^5 \text{kgf/cm}^2$ とし、拘束体である下床版部の有効断面積および弾性係数を 7.87m^2 および $2.5 \times 10^5 \text{kgf/cm}^2$ として次式によって算定した。

$$M = \frac{1}{1 + \frac{A_c E_c}{A_r E_r}} \quad (2)$$

ここに、 M : 拘束度の補正係数

A_c : 被拘束体の断面積 (m^2)

E_s : 被拘束体の弾性係数 (kgf/cm²)

A_R : 拘束体の断面積 (m²)

E_R : 拘束体の弾性係数 (kgf/cm²)

これらの図表に示されるように、本沈埋函の側壁部における拘束度は、側壁上段部で0.33~0.50、中段部で0.50~0.60、下段部で0.65~0.70程度となり、それぞれACI図表値に比べて約20%程度大きめの値となっている。温度応力によるひび割れの発生が懸念される側壁部の拘束度は、中段部で0.1~0.15、側壁下段部で約0.1程度大きくなった。補正係数Mの取り扱いによってACI図表による拘束度分布は変動することが予測されるものの、溝渚らがRC構造方式の同規模の同種構造物で実測した⁹⁾拘束度が、側壁中段部で0.47、下段部で0.52となり、ACI図表値と同等の値となっていることから判断すれば、合成構造沈埋函の側壁部における拘束度は同種のRC構造物に比べて幾分大きくなるものと考えられる。

このように、本沈埋函の側壁部における拘束度がACI図表値や他の計測結果に比べて大きくなった原因としては、合成構造特有の外部鋼殻、補剛材お

よびずれ止めによる拘束の付加が考えられる。

図-17は側壁厚さ方向の拘束度分布を示したものである。同図から、壁厚方向の拘束度分布は温度変化量が最も大きな中央部で最大となり、函体内側と函体外側(外部鋼殻側)との比較では、内側の方が幾分拘束度が大きくなった。これは、本沈埋函の場合、スターラップ筋を直接鋼板に溶接しており、この効果で壁厚方向全体に拘束が付加されたこと、部材内で温度勾配がある場合は、温度変化量が大きな内側の方が拘束度が大きく算定されることによるものと考えられる。また、同一ブロック内での拘束度の分布に関しては、図-18に示すように、既設ブロック側(←4BL側)の拘束度が若干大きくなっており、打設ブロック間の鉛直打継目による拘束の影響が考えられる。

上床版・軌道部における拘束度の算定結果を図-19に示す。同図に示す拘束度は、沈埋函横断方向におけるひずみ実測値をもとに算定したものである。同図から、上床版部の拘束度は既設ブロックとの打継目近傍で0.5程度で、ブロック中央以降では0.2~

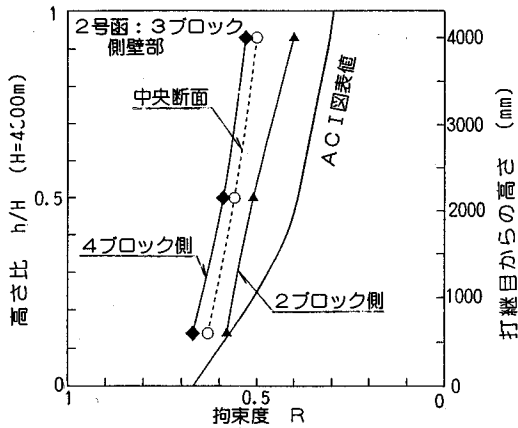


図-15 2号函側壁部における拘束度の分布

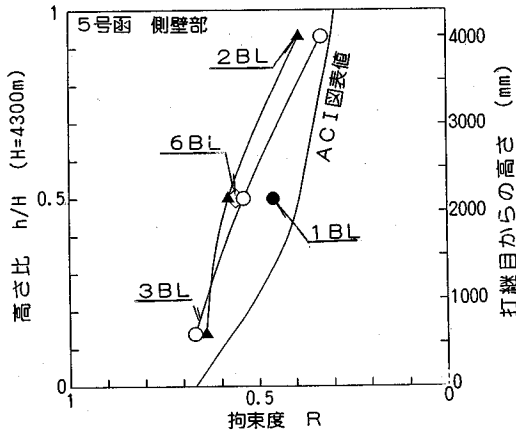


図-16 5号函側壁部における拘束度の分布

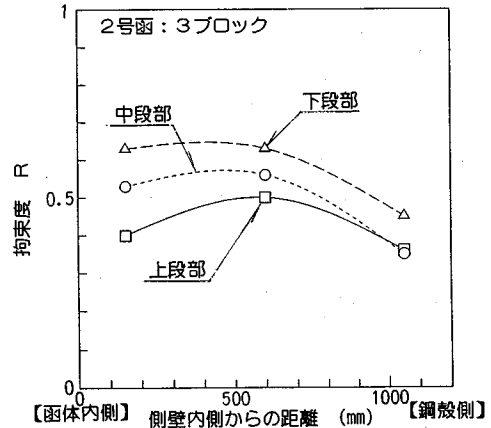


図-17 拘束度の壁厚方向の分布

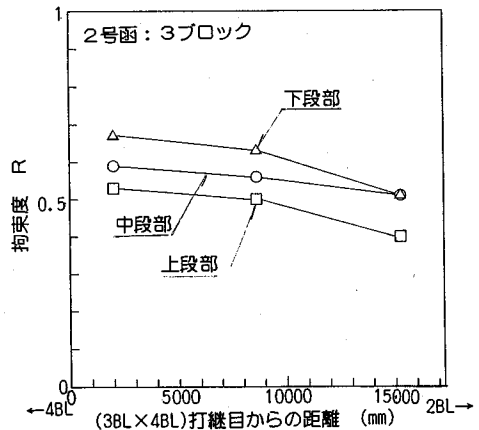


図-18 拘束度のブロック長方向の分布

0.3程度となり、既設ブロックからの距離が離れるに従って小さくなるのが分かる。前述したひずみ挙動と併せて考えると、合成構造沈埋函の上床版部は、部材厚さ方向では内部拘束応力が卓越し、ブロック長さ方向では既設ブロックによる外部拘束応力が卓越した状態で温度応力が発生するものと考えられる。

(4) コンクリート応力の検討

沈埋函側壁部におけるコンクリート応力の経時変化の一例を図-20に示す。同図に示されるように側壁部における応力履歴は外部拘束応力の典型的な挙動を示している。すなわち、側壁中段部および下段部は、コンクリート温度打設後、コンクリート温度の上昇に伴い圧縮応力が発生し、最高温度到達以降は圧縮応力は減少して引張応力に転じるようになる。一方、側壁上段部はまず引張応力が発生した後、やがて圧縮応力に移行する傾向となる。また、材齢16日前後においてコンクリート応力が大きく変動しており、この時期にひび割れが発生したのと考えられる。しかしながら、この時期の側壁下段部および中段部での引張応力の計測値は約 9kgf/cm^2 であり、しかも最高温度到達後、引張応力が若干減少する時期であること、さらに材齢16日程度でのコンクリートの引張強度が 20kgf/cm^2 以上であると考えられることから、計測された引張応力は実際の発生応力に対して小さいものと考えられる。図-12に示した同計測位置におけるひずみ挙動によれば、側壁部におけるひび割れ発生時期は材齢6日前後と考えられ、材齢6日前後ですでに側壁部にひび割れが発生したため、中央断面では、その後の発生応力の増加がほとんどなかったものと考えられる。他方、ひび割れ発生位置以外では、ひび割れの発生によって応力が一端解放された後、再び引張応力が増加し、材齢16日前後で他の場所でひび割れが生じたものと考えられる。このような側壁部でのひび割れ発生状況は、後述するひび割れ発生状況からも推測できる。

(5) 鋼殻ひずみの検討

2号函1ブロックにおける鋼殻ひずみの経時変化を図-21に、側壁コンクリートの実ひずみおよび外気温と併せて示す。なお、同図中の鋼殻上段でのひずみは、上床版部の鋼殻ひずみであり、計測時点においては鋼殻単体のひずみ挙動を示すものである。同図から、鋼殻ひずみは、外気温および側壁コンクリートに追従した挙動を示すことが分かる。また、コンクリート打設後6日において日除けシートを除去した場合、鋼殻上段部におけるひずみの増分が約 140×10^{-6} であるのに対し、鋼殻中段部および下段部におけるひずみの増分は約 50×10^{-6} である。一方、こ

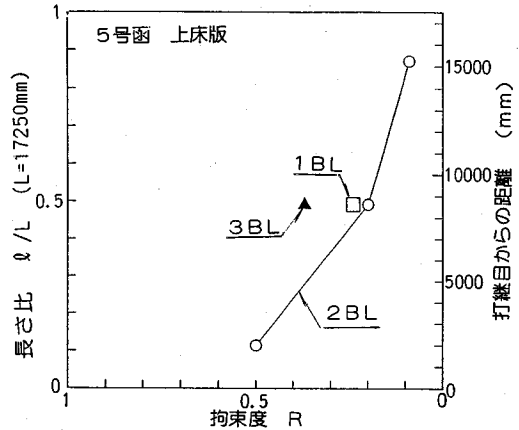


図-19 上床版における拘束度の分布

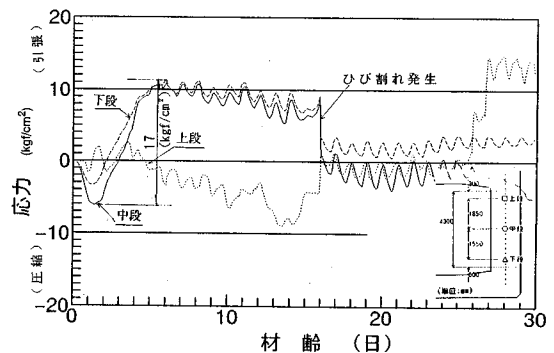


図-20 側壁部における応力の経時変化

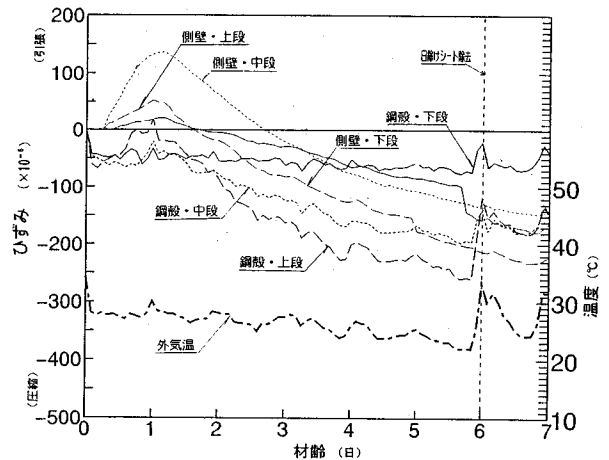


図-21 鋼殻ひずみの経時変化

これらのひずみ変動時期に対応する外気温の変動は約 12°C であるため、鋼殻の各計測位置における見掛けの熱膨張係数はひずみの増分と温度変化量とから算定することができる。いま、鋼殻上段部における見

掛けの熱膨張係数は $11.7 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ であり、鋼材の一般的な熱膨張係数と同等となる。他方、鋼殻中段部および下段部におけるそれは、 $4.2 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 程度であり、表-7に示した側壁下段部におけるひずみ変化率とほぼ同程度となっており、外部鋼殻と内部コンクリートとが一体化されて挙動していることが分かる。

7. ひび割れ発生状況

(1) 壁部におけるひび割れ発生状況

2号函3ブロックおよび5号函3ブロックにおける壁部のひび割れ発生状況を図-22に示す。同図に示すように、側壁部では型枠脱型時に1ブロック当たり2~4本のひび割れが発生し、その後2~3週間までに新たに3,4本のひび割れが発生した。これらのひび割れは、すべて水平打継目から鉛直に発生しており、温度応力によるものと考えられる。施工時期の違いに関しては、4月中旬打設の5号函3ブロックに比べて、7月上旬に打設した2号函3ブロックの方が、ひび割れ発生本数が多く、総ひび割れ幅も大きくなっており、外気温が高いとひび割れが発生しやすい傾向にあることが分かる。なお、側壁部における最大ひび割れ幅および平均ひび割れ幅は、それぞれ0.20~0.25mmおよび0.14~0.16mmの範囲であった⁷⁾。これら側壁部におけるひび割れ発生パターンとしては、まず

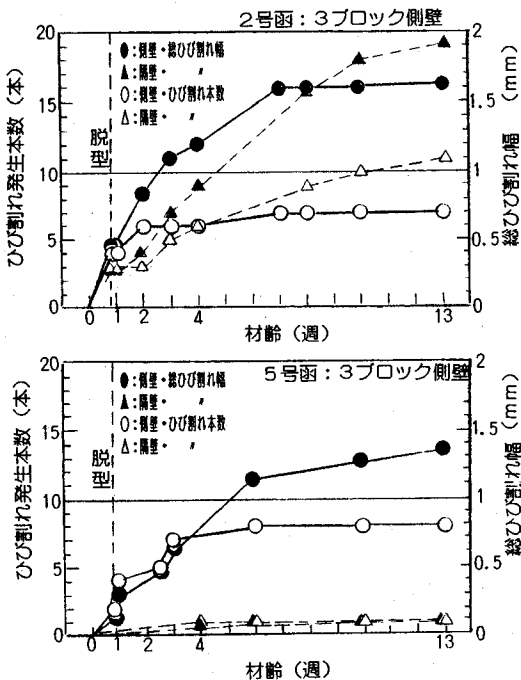


図-22 壁部におけるひび割れ発生状況

ブロック中央部にひび割れが発生し、その後、中央部のひび割れと鉛直打継目との中間で、ほぼ鋼殻の鉛直補剛材の位置に順次ひび割れが発生した。本沈埋函における鉛直補剛材のウェブ高は200mmであり、部材厚さに対する断面欠損率が約20%にもなるため、鉛直補剛材がひび割れ誘発目地的な役割を果たし、この位置でひび割れが発生したものと考えられる。

一方、隔壁部に関しては、2号函と5号函とではひび割れ発生状況は大きく異なっている。これは、側壁部コンクリートと同様の配合 (SL:18cm) を用いた2号函製作時においては同図に示すように、長期的な乾燥収縮によると考えられるひび割れの発生が多く認められたことから、5号函の施工では、隔壁部のコンクリートを下・上床版部と同一 (SL:12cm) とした効果と考えられる。

(2) 上床版部におけるひび割れ発生状況

本沈埋函のようなボックスカルバート形状のRC構造物においては、側壁部における温度ひび割れの検討を行うのが一般的であり、事前検討も側壁部のみを対象とした。しかしながら、実工事では、当初検討を行わなかった上床版部においても、ひび割れの発生が認められた。上床版部におけるひび割れの発生挙動は、通常のRC構造物でのひび割れ発生挙動と幾分異なっており、鋼・コンクリート合成構造の構造的影響によるものと考えられる。以下に上床版部におけるひび割れ発生状況を示す。

上床版部におけるひび割れ発生状況を調査した結果、夏期施工時となった2号函5ブロック (7月中旬打設) から2ブロック (9月中旬打設) においてひび割れ

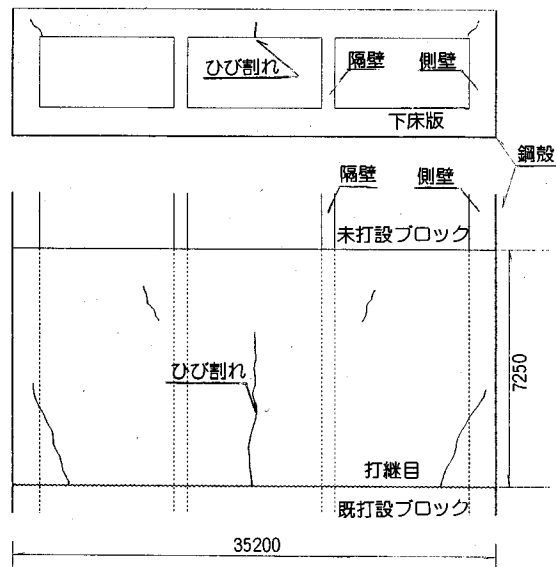


図-23 上床版におけるひび割れ発生パターン

の発生が認められた。これらのひび割れはいずれもひび割れ幅が0.1mm程度で、しかも1ブロック当たりの発生本数も3~5程度であった。上床版におけるひび割れ発生パターンを図-23に示す。同図から、上床版軌道部では既打設ブロックとの打継目からほぼ直角にひび割れが発生し、両サイドの車道部では打継目から側壁部方向へ斜め方向のひび割れが発生しており、上床版部は既打設ブロックと両サイドの側壁によって拘束を受けることが分かる。

8. 結論

大阪南港トンネル沈埋函の製作に際して実施した温度応力計測およびひび割れ調査により得られた結果を要約すると、以下のとおりである。

(1) 合成構造沈埋函の側壁部における拘束度は、製作函体および打設ブロックで若干異なるものの、側壁中段部で0.50~0.60、下段部で0.65~0.70の範囲となり、同種のRC構造形式における実測値およびACI図表値に比べて、側壁中段部で0.10~0.15、下段部0.10程度大きくなる。

(2) 側壁部壁厚方向の拘束度分布は、鋼殻内側にスターラップ筋が直接溶接されているため、鋼殻による拘束が壁厚方向全体に付加され、温度変化量が大きな中心部で大きく、函体内側と外側との比較では、内側の方が幾分か大きめの値となった。

(3) 側壁部のブロック長方向の拘束度の分布に関しては、既打設ブロック側の拘束度が若干大きくなり、鉛直打継目による拘束効果が認められた。

(4) 上床版部における拘束度は既打設ブロックとの打継目の近傍では0.5程度となり、中央部以降では0.20~0.30程度となる。

(5) 側壁部における鉛直補剛材部は約20%の断面欠損となり、ひび割れ誘発目地の役割を果たすため、この位置近傍にひび割れが生じる。

(6) 上床版部は、既打設ブロックおよび両側壁によって拘束を受けるため、中央部の軌道部では既打設ブロックとの打継目から垂直方向にひび割れが発生し、両サイドの車道部では、打継目から側壁に向かい斜め方向のひび割れが生じる。

9. おわりに

本温度計測によって、鋼・コンクリート合成構造方式沈埋函における温度応力に関して、拘束度、ひ

び割れ発生挙動等の基礎的データを得た。今後は、これらのデータを現状の温度応力解析に反映させた合成構造における温度応力の算定方法、すなわち、合成構造における温度応力解析時における拘束度の取り扱い方法、鉛直補剛材による断面欠損部の評価方法、ひび割れ検討時におけるひび割れ制御鋼材の取り扱い方法等について更に検討を行い、合成構造における温度応力解析の精度を高めたいと考える。

謝辞：本沈埋函の設計・施工にあたり、大阪南港トンネル技術検討委員会・本委員会(委員長：長尾義三、日本大学教授)、構造専門委員会および沈埋函コンクリート施工検討委員会(委員長：園田恵一郎、大阪市立大学教授)での審議を頂いた。また、本温度応力計測の計画の立案、計測データの整理、ならびにひび割れの調査に際しては、鹿島建設技術研究所の信田佳延、岩井稔両氏に多大の協力を得た。ここに記して感謝の意を表す次第である。

参考文献

- 1) 高橋浩二：わが国初の道路・鉄道併用沈埋トンネル、大阪南港海底トンネルの計画と設計、トンネルと地下、Vol.21, No.6, pp.7-14, 1990.6.
- 2) 片岡真二：鉄道・道路併用沈埋トンネル計画、大阪港海底トンネル、建設の機械化、pp.8-15, 1991.3.
- 3) 小泉哲也、安井征人、渡辺英夫、田中樹由：日本初の道路・鉄道併用沈埋トンネル、臨海交通施設 大阪南港トンネルの設計・施工、コンクリート工学、Vol.31, No.6, pp.22-32, 1993.6.
- 4) 田沢栄一、飯田一彦：硬化時温度応力の発生メカニズムについて、マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集、日本コンクリート工学会、pp.101-104, 1982.9.
- 5) ACI Committee 207: Effect of Restraint, Volume Change, and Reinforcement on Cacking of Concrete, ACI MANUAL OF CONCRETE PRACTICE, 1983, PART 1. (訳文：万木正弘、小谷一三、中矢喜章、大友忠典共訳、コンクリート工学、Vol.13, No.2, 1975.2, pp.43-49; 同 vol.13, No.3, 1975.3, pp.55-64; 同 vol.13, No.4, 1975.4, pp.35-41)
- 6) 溝渕利明、渡辺幸之、松岡彰、清水徹：沈埋函体コンクリートの施工時の温度応力についての検討、コンクリート工学年次論文報告集、11-1, pp.475-480, 1989.6.
- 7) 小泉哲也、三橋郁雄、住吉正信、信田佳延：沈埋函体コンクリートの施工時の温度応力計測結果について、コンクリート工学年次論文報告集、15-1, pp.1131-1136, 1993.6.

(1995.11.20 受付)

TEMPERATURE CHANGES AND THERMAL STRESSES OBTAINED DURING CONSTRUCTION OF IMMERSED-TYPE TUNNEL

Suehiko YOKOTA, Roshi OJIMA, Tetsuya KOIZUMI,
Haruo SHIBUYAMA and Masanobu SUMIYOSHI

Osaka Nanko Tunnel is being built using immersed-tube elements. The elements are composite structures of steel and concrete, the concrete of which is classifiable as mass concrete, as it is more than 1 m thick. Consequently there was concern that thermal stresses occurring during fabrication could lead to cracking in the concrete. This paper deals with the results obtained from the measurement of thermal stress. The ratio of restriction was calculated using measured values, and, by means of comparisons with existing measured data and data published by American Concrete Institute, the determination of the ratio of restriction in steel-concrete composite structures was studied.