

合成構造方式沈埋函製作における軽量超低発熱コンクリート打設試験 とひび割れ制御対策

- 衣浦港中央ふ頭地区道路(トンネル)沈埋函製作工事 -

田口 智* 佐藤 善高**
太田 信之*** 八名 善信*
池田 泰敏*

要 旨

本工事では、過密配筋を有し、鋼とコンクリートの合成構造をなす沈埋函に、発熱抑制と単位容積質量低減のため、これまでに施工例のない人工軽量骨材と超低発熱高炉セメントとを組み合わせたコンクリートを打設しなければならなかった。そこで円滑な施工を行うため、事前にコンクリートのフレッシュ性や硬化後の単位容積質量の経時変化、プロクタ - 貫入抵抗、断熱温度上昇量、実物大模型への打設など各種試験を行い、その特性を把握した。さらに、マスコンクリートとなる側壁部での温度応力によるひび割れが懸念されたため、本施工では、遮光シート、鋼殻クーリングなどの対策を行い、コンクリートおよび鋼殻の温度上昇を防止した。

1. はじめに

衣浦海底トンネルは、日本初の本格的な沈埋式海底道路トンネルとして昭和48年に建設された。図 - 1 に示すように、衣浦港のほぼ中央に位置し、碧南市と半田市を結ぶ幹線道路として、地域の発展に大きく貢献してきた。しかし、近年の港湾取扱貨物量の増大と背後道路の整備の進展に伴い、交通量が増大し、最近では1日の平均交通量は1万台を超え、朝夕のラッシュ時には慢性的な渋滞が発生している。このような背景から、円滑な交通流動を確保するには、現在の2車線から4車線化すること

が必要とされたため、本工事で既設の海底トンネルに隣接して、新たに海底トンネルを建設する運びとなった。

本トンネルは延長447.77mの沈埋トンネル部とその両端の換気塔(立抗)と陸上トンネル部から構成される(図 - 2)。本沈埋函の特徴としては、鋼とコンクリートとの合成構造となっている他に、下床版および側壁の外側に用いられる鋼板を防水機能のみでなく、外側主鉄筋と同様の強度部材として評価していることが挙げられる。また、部材厚が1.0~1.1mのマスコンクリートであるため、温度応力によるひび割れを防止するために超低発熱高炉セメントを用いている。本工事は沈埋函4函のうち、半田側の2函を製作する工事であり、1998年3月に竣工(写真 - 1)し、同4月に衣浦港内に曳航・仮置きされた。

本沈埋函は、施工の初期段階において、浮上・曳航時の所要の乾舷量と沈設時の安定性の確保のために、1号函の上床版部が人工軽量骨材コンクリート(以下、軽量骨材コンクリート)に変更となった。しかし、沈埋函本体部に軽量骨材コンクリートを使用した例はなく、さらに、軽量骨材と超低発熱高炉セメントという組み合わせのコンクリートについては過去の事例が無かったため、施工にあたっては、いくつかの技術的課題が挙げられた。



図 - 1 新衣浦トンネル位置図

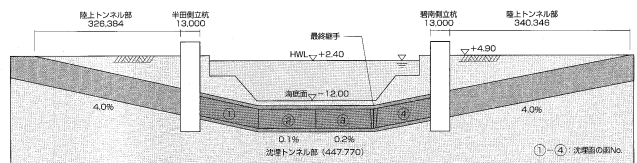


図 - 2 沈埋トンネル部縦断図

* 名古屋支店 ** 土木部 *** 大阪支店

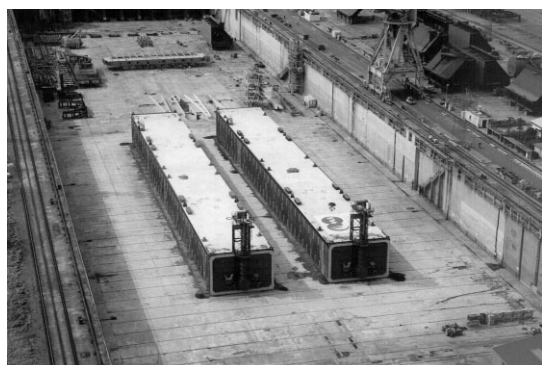


写真 - 1 沈埋函全景

本報告はこれらの課題に対して行った軽量骨材コンクリートに関する実験的検討結果とマスコンクリート(側壁部)のひび割れ制御対策結果についてとりまとめたものである。

2. 軽量超低発熱コンクリート性能確認試験

2.1 概要

(1) 施工にあたっての技術的課題

当初、本コンクリートの施工にあたっては以下に述べるとような事項が懸念された。

1) 超低発熱高炉セメントB種と軽量骨材を組合わせた配合は実構造物に使用された例がなく、また、軽量骨材コンクリートとしては、このような高強度(設計基準強度 30N/mm²)の実績が少ない。

2) 本沈埋函は、函体製作終了後、浮上・曳航・据付作業となり、函体浮上時に所要の乾舷を確保しなければならないため、コンクリート単位容積質量の適切な管理が求められる。しかし、軽量骨材コンクリートの単位容積質量は、運搬、ポンプ圧送等による変動が大きい上、このように大きな断面部材に関する単位容積質量の経時変化についての十分なデータがない。

3) 本沈埋函は鋼とコンクリートとの合成構造となっており、さらにスタッドジベルや鉄筋等が密に配置されているため、コンクリートの充填性が重要な課題となる。一方、軽量骨材コンクリートは、単位容積質量が小さいためその変形性能が小さく、また、運搬およびポンプ圧送によりスランプが低下する等の特性があり、これらは充填性を確保する上で問題となる。また、軽量骨材コンクリートの場合、締固め作業におけるパイプレータのかけすぎは骨材の浮き上がりを生じさせ、品質上問題となる。このような鉄筋等が密に配置された部材への充填性、および締固め作業による材料分離等の机上における検討には限界がある。

4) スランプの経時変化は、軽量骨材コンクリートを用いた場合、大きいとされている。スランプロスにより規格値を外れた場合、本工事ではその対策として流動化剤を添加し流動化させるが、流動化コンクリートとした場合、品質上問題が発生しないか事前に確認する必要がある。

5) 上床版に使用される軽量骨材コンクリートは、下床版や側壁部に使用される普通コンクリートに比べ、これらと同一強度を確保するために単位セメント量が大きくなり、温度応力によるひび割れが懸念される。このひび割れを検討するにあたり、軽量骨材コンクリートの熱特性に関するデータがない。

(2) 試験項目

前項で述べた問題を解決するために、本コンクリートの特性に関するデータの取得を目的として、事前性能確認試験を実施した。試験項目を以下に示す。

- 配合試験(流動化剤添加試験を含む)
- フレッシュ性状経時変化試験(室内、実機レベル)
- 硬化コンクリート単位容積質量経時変化実験
- プロクター貫入抵抗試験
- 断熱温度上昇試験
- 実物大模型打設実験

2.2 コンクリートの仕様

(1) 品質規格

軽量骨材コンクリートの品質規格を表 - 1 に示す。上床版の単位容積質量()は函体完成時に乾舷量10cmを満足するように =1.90t/m³と設定している。下床版、側壁部コンクリートの単位容積質量は =2.30t/m³である。

表 - 1 コンクリートの品質規格

設計基準強度 (N/mm ²)	スランプ (cm)	空気量 (%)	単位容積質量 (t/m ³)	最大骨材寸法 (mm)
30	18±2.5	5±1.5	1.90±0.05	15

(2) 配合および使用材料

配合および使用材料を表 - 2、3 に示す。超低発熱高炉セメントは中庸熱ポルトランドセメントおよび高炉セメントB種よりも水和熱が小さく、今回使用したセメントは、高比表面積値を有する高炉スラグ60%と初期発熱量の小さい高ビーライト系セメント40%を混合させたものである。

表 - 2 配合

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	石粉 F	細骨材		粗骨材 (軽量) G
					S 1	S 2	
45.0	43.3	163	362	30	568	144	614

表 - 3 使用材料

セメント (C)	超低熱型高炉セメントB種 比重3.04 比表面積 4,740cm ² /g	
細骨材	(S1)	愛知県瀬戸産山砂 表乾比重2.56 吸水率1.76% 粗粒率2.81
	(S2)	長良川産川砂 表乾比重2.58 吸水率1.76% 粗粒率2.81
粗骨材 (G)	人工軽量骨材 最大骨材寸法15mm 絶乾比重1.25 実績率63.5% 24時間吸水率 9.7% 出荷時吸水率 28±2%	
石 粉 (F)	JIS A 5008 比重2.71	
高性能AE減水剤 (SP)	ポリカルボン酸エーテルと架橋ポリマーの複合体	
空気調整剤 (AE)	変成ロジン酸化合物系イオン界面活性剤	
流動化剤 (R)	ナフタリンスルホン酸化合物	

2.3 性能確認試験結果

(1) フレッシュ性状の経時変化

軽量骨材コンクリートにおけるスランプなどのフレッシュ性状の経時変化は、環境温度、配合等に加えて骨材の吸水に起因するものが大きい。特に、ポンプ圧送する場合には、その影響が顕著である。

フレッシュ性状の経時変化を把握すること、打設時スランプの規格値を満足しない場合に流動化剤を添加し、流動化コンクリートとした時の特性を把握することを目的として、室内(小型ミキサ)および実打設を模擬(実機ミキサ)した実験を行った。

小型ミキサにより製造したコンクリートは、混練後室内に静置し、混練直後とその後30分毎に試験を行い、流動化剤添加後に再び規格値を外れた時点で試験終了とした。試験は2回実施した。

図-3にフレッシュ性状(スランプ、空気量、単位容積質量)の経時変化を示す。両ケースとも流動化後のスランプは30分以内に大きく低下することがわかり、施工において流動化剤を使用する場合には、添加後速やかに施工することが品質管理上重要であることがわかる。また、流動化剤はメーカー指定の添加量で所定のスランプを回復することができ、強度的(91日圧縮強度)にも無添加のものと同じであった。

製造・運搬・ポンプ圧送によるフレッシュ性状の経時変化を、実機レベルで把握するために行った同様の試験結果を図-4に示す。試験はアジテータ6車について製造直後、運搬後(およそ製造30分後)、圧送後に行った。いずれのケースもスランプおよび空気量は減少し、それに伴って単位容積質量は増加しており、変化量の大きいケースでは0.06(t/m³)程度増加した。これは、この試験が後述の実物大模型打設実験と並行して実施されたため、ポンプ車内にコンクリートが10~20分滞留したことも大きな原因の一つと考えられる。室内試験と実機試験とを

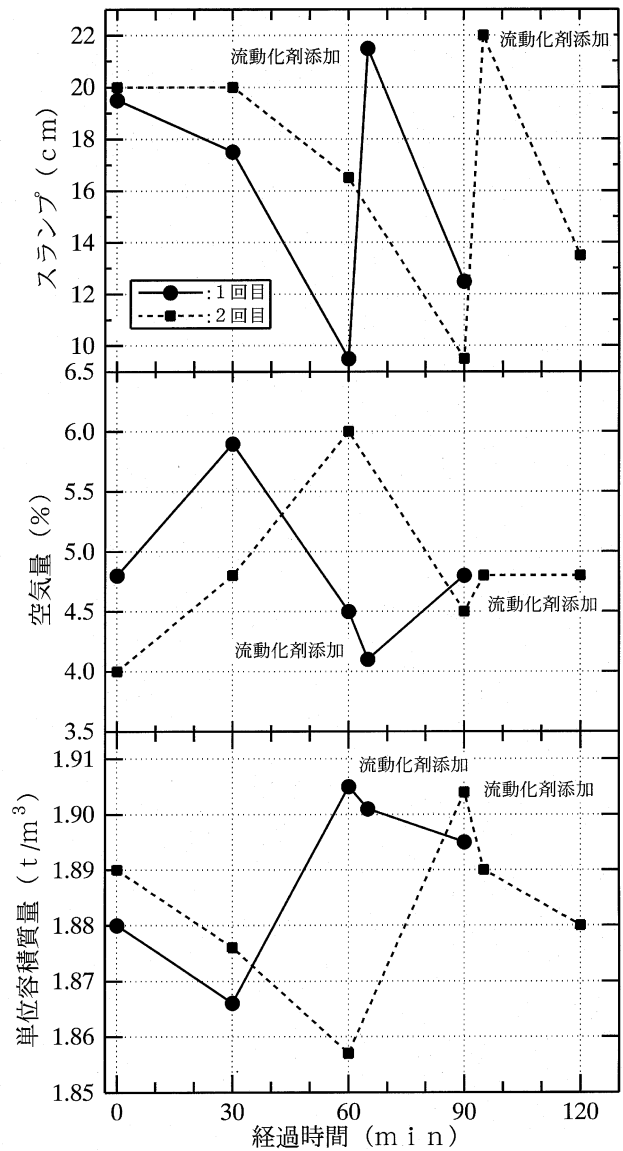


図 - 3 フレッシュ性状の経時変化

合わせみると、ポンプ圧送後の変化を考慮して出荷時の品質を管理し、運搬後は速やかに打設しなければならないことがわかった。

(2) 硬化コンクリートの単位容積質量経時変化実験

本沈埋函のような大きな断面部材の場合、表面積に対する体積の比率が大きくなるため、通常用いられる気乾状態における単位容積質量の推定式は適用が難しいと考えられる。よって、本沈埋函と同部材厚を有する供試体を作成し、実施と同じ履歴を受けるように環境条件を変えて、重量測定を行い、単位容積質量の経時的な変化を調べた。

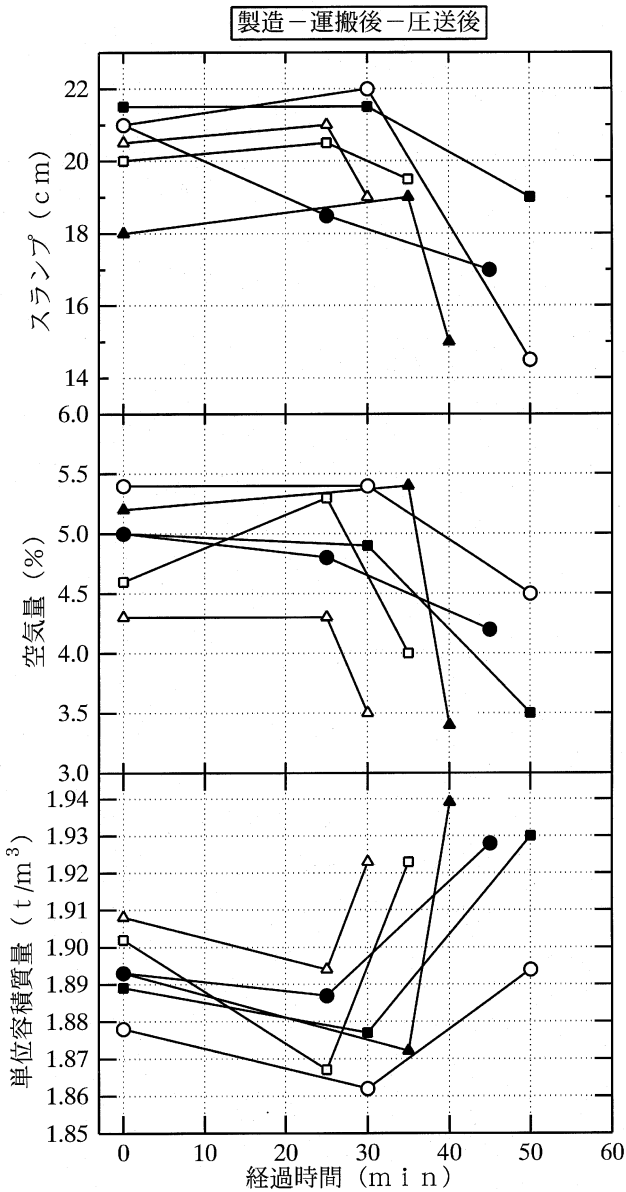


図 - 4 運搬および圧送のフレッシュ性状への影響

実験用供試体の形状寸法は、 $15 \times 30\text{cm}$ および実物と同じ部材厚とした $40 \times 40 \times 96\text{cm}$ の2種類とした。図 - 5 に気乾状態での単位容積質量の経時変化を示す。体積に対する比表面積比率が大きい $15 \times 30\text{cm}$ の供試体は乾燥による影響が大きく、単位容積質量は5ヶ月で約7%減少した。一方、実構造物に近い状態を再現した供試体の乾燥による影響はほとんどなく、フレッシュコンクリートの値とほぼ同じとなった。この供試体については10ヶ月後まで測定を継続したが、重量に変化は見られなかった。よって、本沈埋函への単位容積質量に対する硬化後の乾燥による影響はないため、フレッシュコンクリ

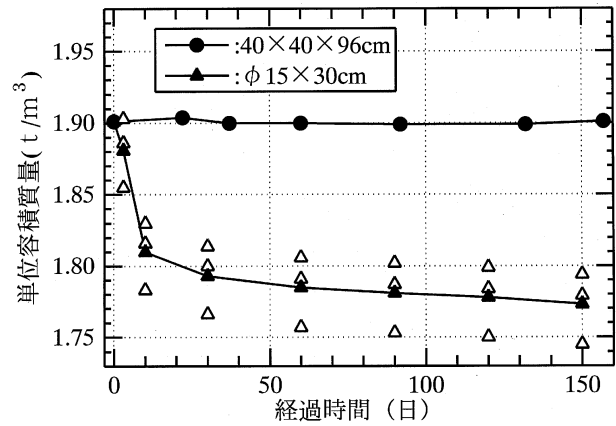


図 - 5 単位容積質量の経時変化

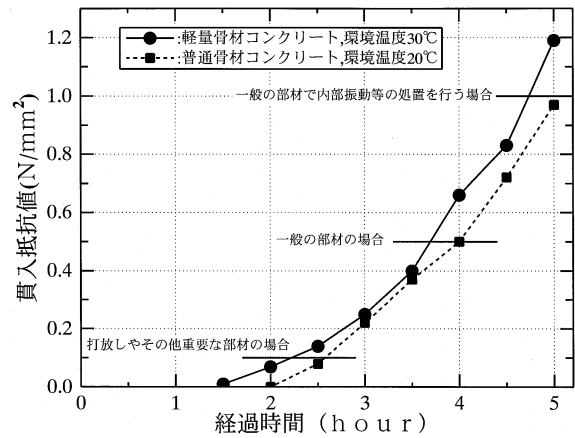


図 - 6 プロクター貫入抵抗値の経時変化

ートの品質管理試験で規格値を満足させる必要があると判断した。

(3) プロクター貫入抵抗試験

コールドジョイント防止の観点から許容の打継ぎ時間を把握し、その結果に基づいて打設計画(打設区画割等)を策定するため、プロクター貫入抵抗試験(JIS A 6204-1995 附属書1)を行った。貫入抵抗値の経時変化を普通コンクリートの結果と併せて、図 - 6 に示す。試験日の外気温は異なるが、両者に大きな差異は見られない。そこで、打継ぎに許容される限度は図中に示すように提案されていることから¹⁾、実施工における許容打継ぎ時間は、安全側の2時間と設定した。

(4) 断熱温度上昇試験

軽量骨材と超低発熱高炉セメントの組み合わせによるコンクリートの熱特性を把握し、マスコンクリート温度応力解析の基礎データの取得を目的として、断熱温度上昇試験を実施した。試験は一般的に断熱温度上昇試験に

用いられる断熱型熱量計によって行い、水セメント比2種類(W/C=45,50%)と打設温度2種類(20、30)の計4ケースについてそれぞれ2回行った。材齢とコンクリート温度との関係を図-7に示す。打設温度20では材齢7日、打設温度35では材齢5日で温度上昇がほぼなくなった。また、打設温度20の方が35に比べて温度上昇量は大きくなった。

試験結果を基礎データとして、温度応力によるひび割れの検討を行った。検討は、3章で示す普通骨材コンクリートの解析と同様に、ひび割れ指数による評価を行った。その結果、ひび割れ指数の最小値は1.0程度で、発生確率は約50%と予測されたが、実施工の上床版においてひび割れは確認されなかった。



写真-2 ハンチ部実物大模型

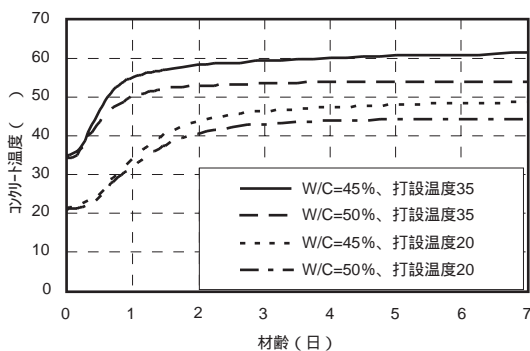
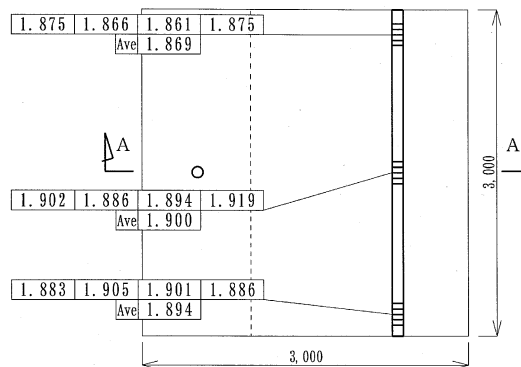


図-7 断熱温度経時変化

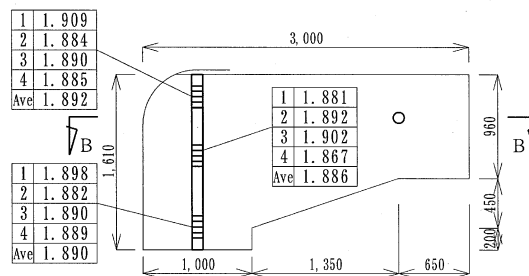
(5) 実物大模型打設実験

鉄筋、鋼殻補剛材およびスタッドジベルが密に交錯した場所への充填性とバイブレータによる軽量骨材の浮き上がりによる分離やその他コンクリートに及ぼす影響を、最も鉄筋量の大きくなるハンチ部の実物大模型打設実験により調査した。模型は高さ約1.6m、長さ・幅ともに3.0mであり、脱枠後の供試体を写真-2に示す。模型は2体とし、締固め時間の違いによる骨材の浮き上がり状況と表面仕上げ方法の違いによるひび割れ防止効果を調査した。また、鉛直・水平方向にコアボーリングを行い、1枚当り厚さ約5cm(直径10cm)にスライスし、それぞれの寸法および重量を測定した。

図-8にボーリング調査による単位容積質量の水平および鉛直分布を示す。部分的な単位容積質量のパラツキは見られず、均等に充填されていることがわかる。また、これらのボーリング位置の近くで、同様にコアボーリングを行い、厚さ約20cmにカットし、圧縮強度試験(材齢91日)を実施したが、すべて規格値を満足する値であり、この結果からも充填性および均一性が確認された。



B-B断面(水平ボーリングコア)



A-A断面(鉛直ボーリングコア)

図-8 単位容積質量の分布

バイブレータの締固め時間はそれぞれ10秒と20秒としたが、いずれも表面への顕著な骨材の浮き上がりは見られなかった。また、別の小型供試体において60秒のケースも実施したが、これも同様の結果であった。表面仕上げはタンパによるたたきとコテによる押さえで行ったが、ともに表面ひび割れは生じなかった。これより、実施工においてもこれらを併用して表面仕上げを行うこととした。

3. マスコンクリート（側壁部）の温度応力によるひび割れ制御対策

3.1 事前検討結果

(1) 検討方法

側壁部温度ひび割れの検討は、土木学会「コンクリート標準示方書・施工編」に基づいて、温度ひび割れ指数による評価を行った。解析は、(社)日本コンクリート工学協会(JCI)の「マスコンクリートの温度・応力・ひびわれ幅計算用パソコンプログラム」を使用し、2次元FEMによる温度解析、CP法(コンペーンションプレーン法)による温度応力解析を行った。

(2) 主な計算条件

1) 配合

側壁部の配合を表-4に示す。上床版と同様に、マスコンクリートの温度応力によるひび割れを防止するため、超低発熱高炉セメントを用いている。

表-4 配合

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	石粉 F	細骨材 S	粗骨材 G
52.0	45.0	156	284	30	758	1,061

2) 外気温および打設温度

打設時期は月別平均外気温が最も高くなる8月上旬を想定して外気温を27.5と設定し、打設温度はこれに5を加えた32.5とした。また、既設コンクリート部は、側壁打設時に約1ヶ月が経過していることより外気温に等しいと仮定した。

3) 断熱温度上昇特性

セメントメーカー試験値より、単位セメント量284(kg/m³)における断熱温度上昇特性を求めたものを表-5に示す。なお、断熱温度上昇量の回帰式は、「コンクリート標準示方書」に基づいて(1)式を用いた。

$$Q(t) = Q(1 - e^{-\gamma t}) \quad (1)$$

Q(t) : 材齢 t 日における断熱温度上昇量()

Q : 終局断熱温度上昇量()

γ : 温度上昇速度に関する定数

t : 材齢 t (日)

表-5 断熱温度上昇特性値

打設温度(°C)	Q _∞	γ
10	31.0	0.281
20	27.6	0.512
30	26.0	0.809
32.5	25.4	0.876

4) コンクリートの材料特性

計算に用いたコンクリートの材料特性を表-6に示す。

表-6 コンクリート材料特性値

項目	物性値
比熱	0.2(kcal/kg・°C)
熱伝導率	2.0(kcal/m・hr・°C)
単位容積質量	2,300(kg/m ³)
熱伝達率	12(kcal/m ² ・hr・°C)

5) コンクリートの力学特性

「コンクリート標準示方書・施工編」に準じて表-7のように設定する。

表-7 コンクリート物性値

項目	物性値
圧縮強度	$f_c'(t) = \frac{f_c'(91) \times t}{6.2 + 0.93t} \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad ※$
引張強度	$f_t(t) = 0.35 \times (f_c'(t))^{0.5} \text{ (N/mm}^2\text{)}$
有効ヤング係数	$E_c(t) = \Phi(t) \times 4700 \times (f_c'(t))^{0.5} \text{ (N/mm}^2\text{)}$ Φ(t):補正係数 材齢3日までΦ=0.73,5日以降Φ=1.0
線膨張係数	$10 \times 10^{-6} \text{ (}^\circ\text{C)}$

※中庸熱ポルトランドセメントに対する式で代用

(3) 解析結果

側壁中心部のコンクリート温度および温度応力の経時変化を図-9に示す。図中には超低発熱高炉セメントの発熱抑制効果を確認するために、普通ポルトランドセメントの計算結果も示す。なお、普通ポルトランドセメントの断熱温度上昇特性値は土木学会「コンクリート標準示方書・施工編」に準じて設定した。表-8に打設温度32.5に対する計算結果を示す。図表より超低発熱高炉セメントを使用した場合、コンクリート内部温度の最大値は約44となり、10日以降は外気温(27.5)に等しくなった。また、表面部は内部より小さな値となり、最大で34程度となった。

表-8 主な計算結果

打設温度	32.5°C
内部温度最大値	43.9°C(材齢1日)
表面温度	34.1°C(材齢1日)
内部温度と表面温度の差	9.8°C

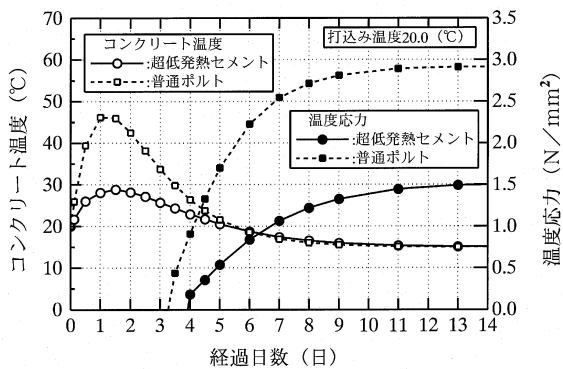
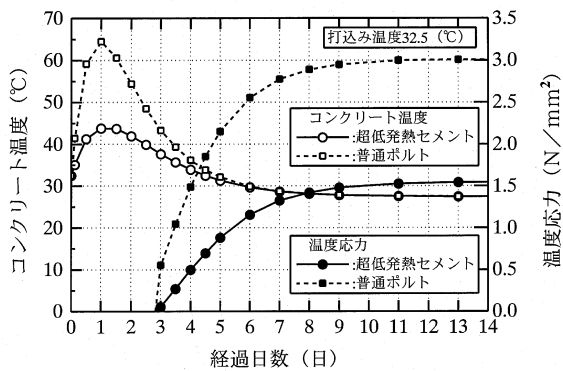


図 - 9 コンクリート温度および温度応力の経時変化

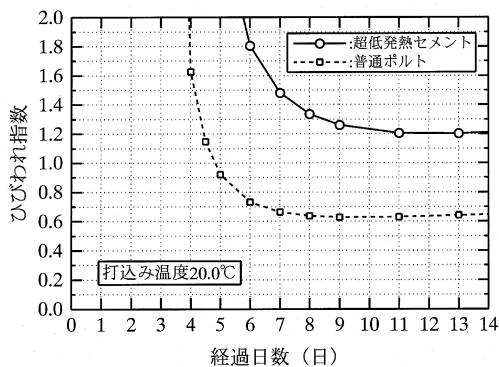
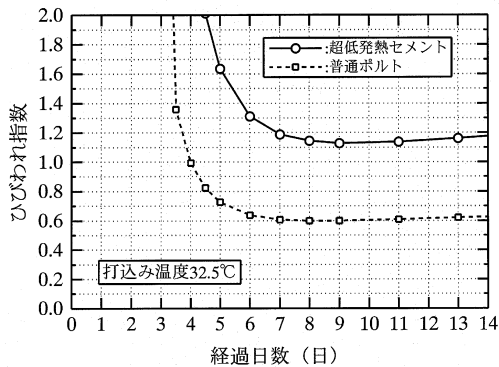


図 - 10 ひび割れ指数の経時変化

ひび割れ指数(コンクリート引張強度 / 温度応力)の経時変化を図 - 10 に示す。打込み温度32.5 における超低発熱高炉セメントの場合、ひび割れ指数は材齢9日で最小となり、中心部で1.1程度となった。ひび割れ指数は、超低発熱高炉セメントを使用することで、普通ポルトランドセメントを用いるより、大きく改善されたことがわかる。しかし、温度ひび割れ指数と発生確率との関係において発生確率が35%となり、この解析結果にさらに乾燥収縮など他の要因が複合的に作用する事を考えると、側壁部にひび割れの発生する可能性がある判断された。

3.2 ひび割れ防止対策

以上の結果を踏まえ、ひび割れ防止のため以下のような対策を行った。

(1) 配合上の対策

配合上の対策として、セメントに普通ポルトランドセメントでなく、超低発熱型セメントを用いた。超低発熱高炉セメントは、高ビーライト系で高炉スラグの混入されたものであり、その効果は、図 - 9 および図 - 10 に示す普通ポルトランドセメントとの解析結果の比較において、最高温度で20 小さく、ひび割れ指数で0.5 大きくなることより明らかである。

(2) 施工における対策

施工中および施工前後には以下の対策を実施した。

打設時のコンクリート温度を低くするため、早朝(朝6:00頃)に打設を開始した。

鋼殻が直射日光により熱せられ、コンクリートに悪影響を及ぼさないように、打設日を含む前後1週間は日除けシート(ブルーシート)を敷設した(写真 - 3)。

打設後、若材齢時の水和熱によるコンクリート内部温度の上昇を抑えるために、孔あけ加工した塩ビパイプ(25)を側壁上部に設置し、散水した。

型枠脱枠後、コンクリート表面の乾燥収縮によるひび割れ防止と初期強度発現を促進させるために、鋼殻と同様に塩ビパイプにより散水養生を行った。養生期間は工程に支障がない限り2週間とした。



写真 - 3 日除けシート敷設および散水養生状況

3.3 観測結果

(1) 鋼殻温度測定結果

日除けシートおよび鋼殻散水の冷却効果を調べるために、図-11に示す冷却設備で鋼殻の表面温度を計測した。計測は、本体に下床版のみが打設されている状態で、日射の影響を最も受ける夏場に行った。図-12に示すように、コンクリートが打設されている部分をB部、鋼殻のみをA部とし、それぞれに対策なし、日除けシート対策、鋼殻散水対策、日除けシート+鋼殻散水対策の4カ所を2週間にわたり測定した。

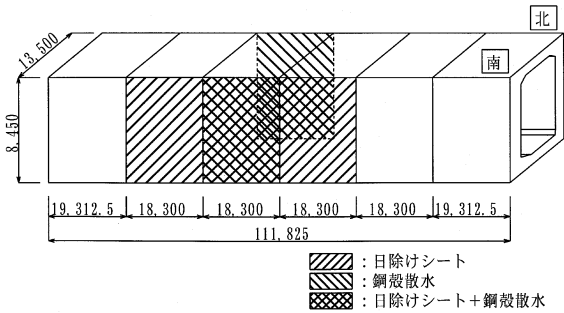


図-11 冷却設備設置位置図

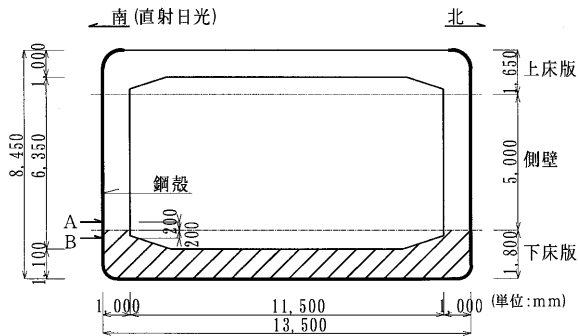


図-12 計測位置図

図-13にA・B部における外気温と冷却対策を施した各部分の測定温度の比較を示す。図中の実線は外気温=計測温度を表す。以下に測定結果および各対策の効果を述べる。

対策なしで、直射日光を受けると、鋼殻の温度は平均で5~10 上昇し、最大で14 上昇するケースも見られた。

日除けシートによる対策は、直射日光を受ける鋼殻に対し、1~4 程度(10 のケースもあった)冷却する効果はあるが、外気温まで下げることができなかった。

鋼殻散水による対策は、データ数は少ないが、直射日光を受ける鋼殻に対し7~9 冷却する効果があり、外気温まで下げることができた。

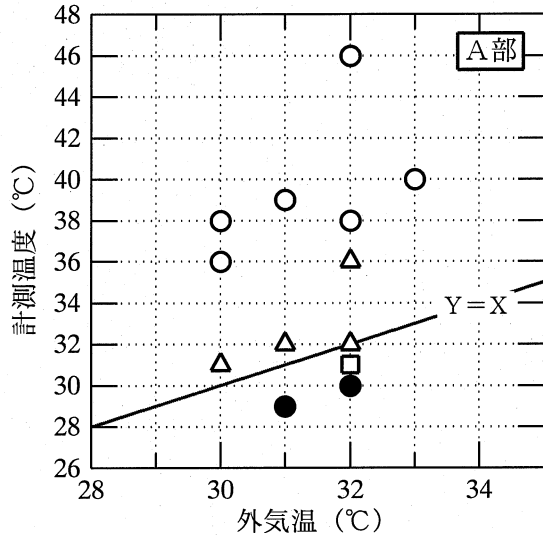
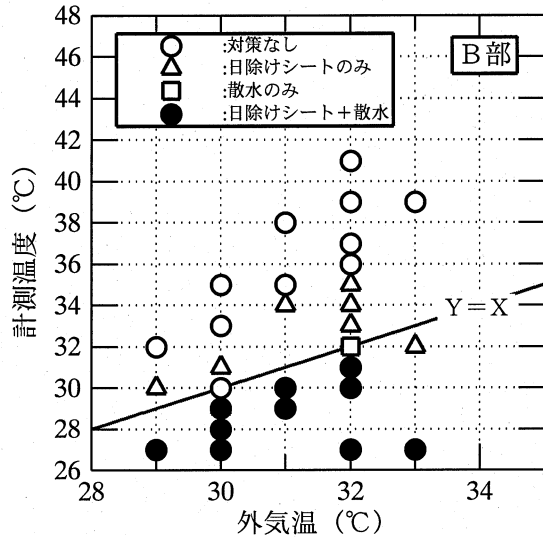


図-13 外気温と計測温度の関係

日除けシート+鋼殻散水対策は、最も効果があり、外気温より1~6 冷却することができた。

直射日光を受けない部分においても、鋼殻散水による効果を調べたが、外気温(鋼殻温度)に対し1~5 の冷却効果があった。

コンクリートが内部に充填されていない部分(A部)は、充填されている部分(B部)に比べ、1~2 温度が高くなった。

日除けシートと散水対策は、鋼殻の冷却効果があり、コンクリート温度上昇の抑制が見込めるため、温度応力によるひび割れ防止に効果的である。しかし、外気温の条件によっては、散水養生を長期間行うと、コンクリートの温度低下速度を大きくし、逆に温度ひび割れを発生させやすくするので養生期間の設定に注意が必要である。

(2) ひび割れ観測結果

1) ひび割れ幅調査

側壁部におけるひび割れ幅調査は、3ブロック打設終了後(8月下旬)から開始し、6ブロック打設終了後(10月上旬)まで計4回実施した。調査方法は、取り扱いが容易で暗部においても使用できるルーペによる方法を採用した。

表 - 9 に幅0.15mm以上のひび割れの調査結果を示す。表中には、後述するひび割れ深さも併記している。また、図 - 14 に側面図の一部を示す。これらは、両函において幅0.15mm以上のひび割れが最も数多く発生した1号函1ブロックと2号函4ブロックの側面図である。図中には幅0.15mm以上のひび割れをすべて示し、印で囲んである部分は0.20mm以上のひび割れである。

ヘアクラック(0.1mm以下)を含む全発生本数は、1、2号函に違いは見られなかったが、0.20mm以上のひび割れは2号函、特に函中央部に集中した。一般的には、鉄筋量が多いほど鉄筋ひずみおよびひび割れ幅は小さくなり、鉄筋により温度ひび割れ幅が制御されることが確認されており、今回のケースでも鉄筋量の多い1号函(側壁平均鉄筋量は1号函307kg/m³、2号函124kg/m³)で発生が少なかったのは、これが一因であると考えられる。

表 - 9 調査結果

函	BL	No.	NUM	最大ひび割れ幅(mm)	ひび割れ深さ(cm)	長さ(m)
1	1	1	1-1S-1	0.25	17.0	0.9
		3	1-3S-1	0.15	5.5	0.0
2	1	3	2-1N-1	0.30	4.0	1.2
		4	2-1S-1	0.25	6.5	1.2
	3	5	2-3N-1	0.15	4.5	0.0
		6	2-3S-1	0.15	3.8	0.0
	4	7	2-4N-1	0.35	10.8	3.3
		8	2-4N-2	0.35	5.5	4.2
		9	2-4N-3	0.25	3.0	3.0
		10	2-4N-4	0.25	4.5	1.5
		11	2-4S-1	0.25	8.8	1.8
		12	2-4S-2	0.15	4.0	0.0
	5	13	2-4S-3	0.25	3.3	2.1
		14	2-5N-1	0.25		2.1
		15	2-5S-1	0.25		2.1
	6	16	2-5S-2	0.15	2.0	0.0
17		2-6S-1	0.20	4.5	2.1	

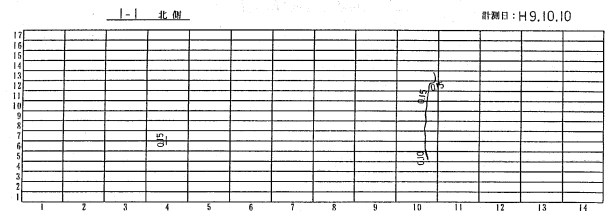
※表中の長さは、幅0.2mm以上の延長を表す。

※2号函5BLは、作業の都合上深さの測定はしていない。

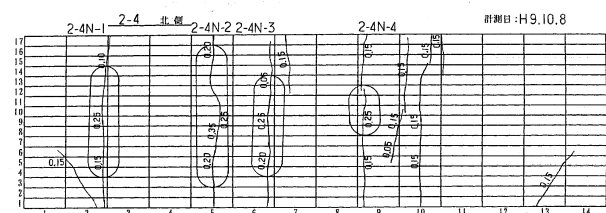
ひび割れ発生の原因として、ほとんどのひび割れ形状が壁の鉛直方向に発生していることから、セメントの水和熱に伴う温度応力、これに加えて乾燥収縮等が複合的に作用してひび割れが進行したものと考えられる。

2) ひび割れ深さ調査

ひび割れの進行がある程度収束したと考えられる時期(11月中旬)に超音波探査によるひび割れ深さ調査を行った。測定は直角回折法を用いて行った。測定状況を写真 - 4 に示す。この方法は、2基(送信側と受信側)の小型センサーでひび割れを挟んで、ひび割れに近い位置から等間隔に遠ざける。そして、センサーの間隔がある位置に達すると、送信側から送られた直接波がひび割れの先端で直角の回折波を発生させ、これを受信側センサ



1号函1BL(上図北側, 下図南側)



2号函4BL(上図北側, 下図南側)

図中1目盛: 縦0.3m, 横1.3m

図 - 14 ひび割れ調査結果



写真 - 4 ひび割れ深さ測定状況

ーが受け取る。この位置での両センサーの間隔から、ひび割れ深さを推定する方法である。

表 - 9 に示すように、計測されたひび割れ深さの最大値は17cmであり、平均すると3～5cm程度であった。図 - 15 にひび割れ幅とひび割れ深さの関係を示すが、幅が大きいほど深さが大きい傾向は見られるものの、相関は小さい。ひび割れ深さが、鉄筋到達時の値であるか、実際の最深部の値であるかは断言できないが、多くの値が鉄筋かぶり厚（約7cm）よりも小さいため、貫通ひび割れの可能性は少ないと考えられる。

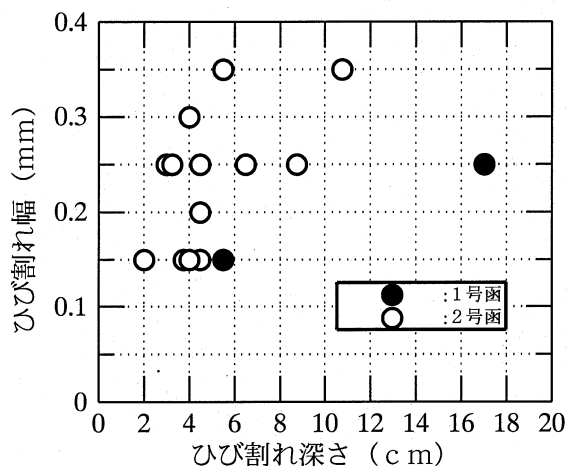


図 - 15 ひび割れ幅とひび割れ深さの関係

今回は、検討時より、許容ひび割れ幅の設定を日本コンクリート工学協会編「コンクリートのひびわれ調査・補修指針」²⁾より、補修の要否に関するひび割れ幅の限度を0.20mmと設定した。従って、ひび割れ深さの調査結果に関わらず、0.20mm以上のひび割れは、エポキシ樹脂を注入して補修した。

4. おわりに

世界的にも例のない沈埋函への軽量超低発熱コンクリートの打設であったが、各種の事前検討により、その特性、特殊性を関係者が認識して施工に臨むことで、無事製作を完了することができた。本文中には述べていないが、石灰石微粉末の影響等で非常に粘性の高いコンクリートとなったため、過密配筋（300～700kg/m³）中への打設は施工性が悪かった。したがって、本施工でのスランプは18cmであったが、さらに円滑に打設を進めるためには、材料分離等の検討を行った上で、より大きなスランプ、または高流動コンクリートによる施工を検討する必要がある。

ひび割れ制御対策においては、各対策の効果のある程度定量的に把握することができた。また、それらの対策によって夏場の施工であったにも関わらず、ひび割れの発生を最小限に抑えられた。

謝 辞

軽量骨材コンクリートの適用にあたって、貴重な助言を頂いた早稲田大学工学部関教授、清宮教授、運輸省港湾技術研究所構造部福手室長、また、データの収集に関しては中京アサノコンクリート東海工場の方々他多数の関係者の御協力を頂いた。ここに誌上を借りて厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会編：コンクリート便覧、1996. 2
- 2) 日本コンクリート工学協会編：コンクリートのひびわれ調査・補修指針、1980. 5