揚排水用大口径ポンプのコンクリート製 ケーシングに関する研究

——コンクリート打設時の熱応力
およびポンプ稼働時の発生応力——

高田 光憲^{*1}・関本 恒^{*2}・山内 英治^{*3}・伊奈 義直^{*4}

概要 揚排水用大口径ポンプに用いるコンクリート製ケーシングの設計・施工上の技術課題——コンクリートのひびわれ制御、密実なコンクリートの打設——を解決するため、建屋構造物を含む縮尺 1/4.6 のモデルを用い、各種の応力測定ならびに FEM 解析を行うとともに、実大部分モデルを用いたコンクリート充填試験を実施した。その結果、設計面からは、高い応力が発生する部材の位置、保有耐力、鋼板製ケーシングの荷重分担度および円周・半径方向配筋の有効性などが把握できた。同時に、硬化時の熱応力および加圧時の応力が FEM 解析によって把握できることが検証でき、今後、この手法を用いて、より経済的な機場の計画・設計を行うことが可能になった。また施工面からは、鋼板製ケーシング下部のコンクリートの充填にモルタル注入が有効であることを実証できた。

キーワード：大口径ポンプ、コンクリート製ケーシング、モデル試験、FEM 解析、水和熱、加圧試験、充填性

1. ま え が き

近年、公共治水事業の広域化および産業構造の大規模化に伴い、自然排水の困難な地域の強制排水用のポンプ設備はますます大型化の傾向にあり、機場の総排水量は 50~300 m³/s、ポンプの単機揚水能力は 10 m³/s (呼称口径 2000 mm 相当)~50 m³/s (呼称口径 4600 mm 相当) にも達するようになってきた。このため、① 建設コストが低減できる、② 吸込および吐出流路設計の自由度が大きい、③ ポンプ据付面のエリアが有効に使える、などの理由により、ポンプのケーシングを従来の鋳鉄 (鋼) 製に代えて機場の躯体建屋構造と一体としたコンクリート製とする方法が採用されるようになってきた。この方法は、作用する水力学的圧力をコンクリート躯体で支持するので、コンクリートケーシング形式と呼ばれている (図-1 参照)。

しかし、このコンクリート製ケーシングは、部材寸法が大きくかつ形状が複雑な水利構造物であるため、設計上はいかに的確に発生応力を把握してひびわれを制御するか、ま

た、施工上はいかに密実なコンクリートを打設するかが重要な技術課題となる。

本報告は、呼称口径 4600 mm のコンクリートケーシング形二床式立軸渦巻斜流ポンプを対象に実施した縮尺 1/4.6 のモデル試験 (① モデル製作時のコンクリートの水和熱による温度の分布および熱応力測定試験、② モデル完成後のポンプ稼働時作用水圧に相当する内水圧による加圧試験) 結果およびその FEM によるシミュレーション解析結果、ならびに施工面の観点から実施した防水工・型わく兼用の鋼板製内張りケーシング下部への

図-1 コンクリートケーシング形ポンプをもつ揚排水機場の一例

*1 三菱重工業 (株) 高砂製作所ポンプ部ポンププラント設計課主務

*2 三菱重工業 (株) 高砂研究所構造研究室

*3 (株) 大林組神戸支店土木部工事課長

*4 正会員 (株) 大林組東京本社土木本部設計部

コンクリートの充填性試験結果についてまとめるとともに、これらの結果に基づき、大型揚排水ポンプ機場の設計・施工の際に必要な技術的課題についての検討結果を述べたものである。

2. 縮小モデル試験

2.1 試験目的と項目

大型揚排水ポンプ機場のコンクリート製ケーシング（二次コンクリート）は、機場建屋（一次コンクリート）と一体となってポンプ稼働時の外力に抵抗する大型水理構造物であり、設計上は各部材に発生する応力に対するひびわれ制御に細心の注意を要する。

そのため、

- 1) コンクリート硬化時およびポンプ稼働時における各部の発生応力の把握
- 2) 上記の各状態に対する FEM 計算の精度の検討およびその設計への適用法の把握

を目的として、二次コンクリートおよびその周辺の一次コンクリートからなる呼称口径 4 600 mm のコンクリートケーシング形ポンプを対象に、縮尺 1/4.6 のモデルを用いて、

- 1) コンクリート硬化時の温度分布および熱応力測定
 - 2) 加圧時の応力測定
- の各項目の試験を行うとともに、
- 3) 上記各状態に対する FEM シミュレーション計算を行った。

試験モデルの形状・寸法を図-2 に、試験工程を表-1 に示す。

なお、今回の加圧試験では、表-1 に示したとおり、鋼板製ケーシングがある場合の弾性試験を行った後、鋼

板製ケーシングを取り外し、鋼板製ケーシングがない場合の破壊試験を行った。これは現在、防水・型わく兼用のため、流水面に内張りされている鋼板製ケーシングに関して、① その剛性寄与度の把握、および② 将来考えられる鋼板製ケーシングをなくした場合の問題点の把握、を目的にしたものである。

2.2 モデルの設計と製作

モデルの配筋は、想定機場の試設計結果（三次元

図-2 試験モデルの形状・寸法

Studies on the Concrete Casing of Large Aperture Pump used to Lift-up or Drain Water

By M. Takada, H. Sekimoto, E. Yamauchi, Y. Ina

Concrete Journal, Vol. 23, No. 8, pp. 24~32, Aug. 1985

Synopsis Rainwater drainage pumps tend to increase in size lately. Concrete casings are often used in such large pumps to cut the construction costs. In the present experiment, intended to solve the technical problems in the design of concrete casings, a 1/4.6-scale model, including the building structure was fabricated, and various stresses were measured and analyzed by the finite element method. As a result, the position of members at which high stress occurs, ultimate strength, effects of steel plate casing on stress generated in concrete, and usefulness of reinforcing bars arranged in circumferential and radial directions could be understood, and useful data for designing were obtained. At the same time, it was verified that the thermal stress in the hardening process and stress during pressurization can be determined by FEM, and it will be possible in the future to plan and design the construction more economically by employing this technique.

Keywords : model test, FEM analysis, large aperture pump, concrete casing, heat of hydration, pressure test, concrete filled ability

表-1 試 験 工 程

年 月	58 年 6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月
ベースコンクリート打設	●					
一次コンクリート打設		●				
鋼板製ケーシング据付		↔				
二次コン 1 回目打設			●			
〃 2 回目 〃			●			
〃 3 回目 〃				●		
温度・熱ひずみ計測		←		→		
鋼板製ケーシングあり加圧テスト				●		
〃				●		
〃					●	
鋼板製ケーシング取外し					↔	
鋼板製ケーシングなし加圧テスト						●

表-2 試験時水圧の設定

	FEM 計 算 値		設定試験水圧
	上 床 版	隔 壁	
弾性限荷重	想定実機試験設計計算結果 圧 力 $P=1.25 \text{ kgf/cm}^2$ の時 最大引張応力 7.2 kgf/cm^2 ひびわれ発生限界時の加圧力 P_e は引張強度を 20 kgf/cm^2 と仮定して $P_e = \frac{20}{7.2} \times 1.25 = 3.5 \text{ kgf/cm}^2$	想定実機試験設計計算結果 圧 力 $P=1.25 \text{ kgf/cm}^2$ の時 最大引張応力 9.9 kgf/cm^2 ひびわれ発生限界の加圧力 P_e は引張強度を 20 kgf/cm^2 と仮定して $P_e = \frac{20}{9.9} \times 1.25 = 2.5 \text{ kgf/cm}^2$	2.5 kgf/cm ²
終局耐力	想定実機試験設計計算結果 圧 力 $P=1.25 \text{ kgf/cm}^2$ の時 モデルに発生するモーメント $0.53 \text{ tf} \cdot \text{m}$ 今、使用鉄筋を $A_s = D10 @ 200 = 3.57 \text{ cm}^2$ SD30 とすると、道路橋示方書による終局曲げモーメント M_u は $M_u = 2.22 \text{ tf} \cdot \text{m}$ 終局曲げモーメントとなる圧力 P_p は $P_p = \frac{2.22}{0.53} \times 1.25 = 5.23 \text{ kgf/cm}^2$	想定実機試験設計計算結果 圧 力 $P=1.25 \text{ kgf/cm}^2$ の時 モデルに発生する軸引張力 14.1 tf 今、使用鉄筋を $A_s = D10 @ 75 (2 \text{ 列}) = 19.02 \text{ cm}^2$ SD30 とすると、鉄筋が降伏応力に達する終局軸引張力は $P_u = 3000 \times 19.02 = 57.06 \text{ tf}$ 終局軸引張力となる圧力 P_p は $P_p = \frac{57.06}{14.1} \times 1.25 = 5.06 \text{ kgf/cm}^2$	5.0 kgf/cm ²

FEM 計算により加圧時に発生する各部の部材力を求め断面算定を行った結果)を利用して、① 使用鉄筋は D10 とする、② かぶり厚は 5 cm とする、の条件の下で定めた。配筋状況は写真-1 に示したとおりであり、特徴は従来の格子状配筋と異なり、前記 FEM 計算に基づき応力の流れに沿った方向、すなわち周方向および半径方向に配筋したことにある。この方法によれば、鉄筋量は従来の約 25% 節約できる。

なお、加圧試験時の試験水圧としては、表-2 に示す FEM 計算結果を利用して、① 弾性試験時水圧 $P_{\max} = 2.5 \text{ kgf/cm}^2$ 、② 破壊試験時水圧 $P_{\max} = 5.0 \text{ kgf/cm}^2$ と設定した。

次に、モデルの製作は、表-1 の試験工程に示した各項目順に実施した。二次コンクリートの打設を 3 回に分けたのは、想定機場の打設割りを勘案したものである。使用したコンクリートの配合を表-3 に示す。なお、実

写真-1 1/4.6 縮小モデル製作状況 (一次コンクリート部配筋状況 4.6×4.2×3 mH)

機では、鋼板製ケーシング下部にコンクリートの流動性不良から空隙が発生する問題があるので、今回の試験では同部の充填性を高めるために、二次コンクリートに流

表-3 コンクリートの配合

使用箇所	設計基準強度 $\sigma_{ck}(\text{kgf/cm}^2)$	粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランプの 開 (cm)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単 位 量 (kg/m ³)				
						水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤
ベースコンクリート	240	15	12	55	42.0	184	335	730	1032	0.834
一次コンクリート	240	15	12	55	42.0	184	335	730	1032	0.834
二次コンクリート	240	15	8	55	45.0	177	322	796	993	0.805

注：1) 混和剤は標準型 AE 減水剤（ボゾリス No. 70）を使用。

2) 二次コンクリートは流動化剤（NP-10）を用い、スランプ 18 cm として打設する（使用量 1.1~1.5 kg/m³）。

3) 水セメント比 55% は、水密性を考慮して決定した。

表-4 使用計器および測定器

(a) 計 器

	計 器	型 式	測定内容	測定 点数	主要測定 断
硬化時温度分布・熱応力	温度計	CA 熱電対	コンクリート内部温度，外気温	62	0°, 90°, -45°
	ひずみ計	KM-100 F (東京測器)	熱ひずみ	27	0°, 90°, -45°
	有効応力計	GK-100 (東横エルメス)	コンクリート応力	4	0°, 90°, -45°
	無応力計	KMD-A (東京測器)	コンクリートの線膨張係数を算出	1	—
加圧時応力	鉄筋計	KS-10 S (東京測器)	鉄筋応力	75	0°, 45°, 90°, 180°, 導流壁部
	コンクリート表面ゲージ	PL-30-11-MB (東京測器)	コンクリート表面の応力	42	0°, 45°, 90°, 180°
	表面ゲージ	WFCA-3-1 L (東京測器)	鋼板ケーシングの応力	40	0°, 180°
	変位計	CDP-5 (東京測器)	変 位	16	0°, 90°, 180°, 270°

(b) 測定器

測定器	型 式	使用台数	
		硬化時	加圧時
デジタルひずみ測定器	TDS-301 (東京測器)	1	1
スイッチボックス	ASW-324 B (東京測器)	4	5
熱電対用スイッチボックス	ASW-32 T (東京測器)	2	2
デジタルカセットレコーダ	RM-1 HA (東京測器)	1	—
計 算 機	YHP-9845 B (横河ヒューレット トパッカー)	—	1

動化剤を使用した。

2.3 試験方法と測定内容

表-4 に示す計器および測定器を用いて、① コンクリート硬化時には内部温度、ひずみ、外気温などを、② 加圧時には変位、ひずみなどを測定した。同表に示すとおり、総計測点数は 267 点である。測定位置の代表例として、図-3 に 90° 断面の計器配置図を示す。

なお、加圧試験は、上部カバー、下部カバーおよび吐出口カバーを所定位置に取り付けた後、上部カバーに設けた加圧用器具を介して水圧ポンプにより加圧することにより実施した。

2.4 材料試験

試験結果の評価にまた FEM 計算の入力定数として用

図-3 90° 断面の計器配置図

図-4 テストピース測定結果に基づく
積算温度-ヤング率関係

いるため、コンクリートの圧縮強度、引張強度、ヤング率などの物理的性質を試験により求めた。試験結果として、若材令時のヤング率を求めるための積算温度とヤング率の関係を図-4 に、線膨張係数を求めるための無応力計による温度とひずみの関係を図-5 に示す。

2.5 硬化時の温度分布および熱応力

(1) 温度上昇

温度測定結果として、代表点のコンクリートの内部温度の経日変化を図-6 に、また、0°, 90°, -45° 断面の各コンクリート打設割ごとの最高温度上昇量とその時の材令を表-5 に示す。コンクリートの温度は、打設後約

図—5 無応力計による温度-ひずみ関係

表—5 断面別の最大温度上昇測定値

		0° 断面		90° 断面		-45° 断面	
		材 令 (h)	上昇量 (°C)	材 令 (h)	上昇量 (°C)	材 令 (h)	上昇量 (°C)
一次コン	①	16	37.1	16	37.4	16	39.7
	③	13.5	14.0	17.5	14.5	12	14.7
	④	10	24.0	10	18.2	12	24.7
	②	10	10.1	10	10.9	10	12.4

図—6 温度の経日変化

半日で最大値を示し、約3日後に外気温に近づいた。また、コンクリートの最大温度上昇量は予測どおり部材厚の大きさに従い、同一断面内では、二次コン ③、二次コン ①、二次コン ②、一次コンの順に、断面別には、0° 断面、90° 断面、-45° 断面の順にそれぞれ大きくなった。なお、二次コン ② については、吸込水路の影響で、90° 断面より 0° 断面の方が大きくなった。

なお、図—6 には、軸対称および三次元 FEM による計算結果を併記した。計算に用いた諸条件を表—6 に示す。三次元 FEM 計算値は、実験値とその傾向（最大温度上昇量、最大温度上昇時材令、外気温に近づく勾配・材令）が非常に良く一致する。また、軸対称 FEM 計算値は、0° 断面では良い一致を示すが、軸対称形状から外れる 90° および -45° 断面では、最大温度上昇量に 20~30% の差を生ずる。

(2) 熱 応 力

コンクリートの熱応力は、コンクリートの内部ひずみにコンクリートの有効ヤング率を乗じて求めた。有効ヤング率はコンクリートのクリープを考慮に入れたもので図—4 に示した積算温度とヤング率の関係から求まる瞬間ヤング率の 2/3 とした²⁾。熱応力測定結果として、代表点の経日変化を図—7 に示す。同図に示した測定点はコンクリート表面近傍に位置しているが、通常スラブな

どで見られる表面の状況²⁾と逆の傾向、すなわち図—6 に示した温度の経日変化と対応して材令初期に圧縮応力が生じ、温度降下とともに引張応力に変わってゆく傾向を示した。この傾向は他の計測点でも見られた。これは、断面内の温度差が少ないため内部拘束（温度差）応力が小さく、外部拘束（境界拘束）応力が卓越するためである。

なお、図—7 には、(1) で述べた計算温度に基づく軸対称 FEM による計算結果を併記した。計算に用いた諸条件は表—6 に示した。FEM 計算値において材令初期に圧縮応力となり、材令2日以降に引張応力に変化するパターンは実験値とよく一致する。なお、実測温度に基づく外部拘束応力は FEM 計算値とよく一致する。

2.6 加圧時の応力

今回は、鋼板製ケーシングがある場合の弾性試験、ない場合の破壊試験を実施したことは先に述べた。鋼

表—6 硬化時温度分布，熱応力の計算条件

項 目 (単 位)	使用定数	備 考
*1 温度 分布 解析	断熱温度上昇式 ^{*3} $T = T_0(1 - e^{-\alpha t})$ (°C)	59.2(1 - e ^{-2.16t}) 一次コンクリート 47.9(1 - e ^{-1.82t}) 二次コンクリート① 53.9(1 - e ^{-2.16t}) " ② 47.9(1 - e ^{-1.82t}) " ③
	熱伝導率 K (kcal/m·hr·°C)	2.0
	比 率 C (kcal/kgf·°C)	0.24
	単位体積重量 γ (tf/m ³)	2.241 実 測 値
	熱伝達率 (kcal/m ² ·hr·°C)	3.5~20 型わくの有無，表面の状態から決定
*2 応力 解析	初期温度 (°C)	27~33.5 実 測 値
	ヤング率 E (kgf/cm ²)	— 実測値 (図—4)
	ポアソン比 ν	1/6
	線膨張係数 α (/°C)	8×10 ⁻⁶ 実測値 (図—5)

注：*1 ベースコンと地盤との間は断熱条件
 *2 ベースコン底面をすべて固定
 *3 セメント種類，単位セメント量，打設温度の影響を考慮に入れメーカー値¹⁾を参考に定めた。

* $\sigma_{t \max} = R \cdot E \cdot \alpha \cdot \Delta T$
 $\sigma_{t \max}$: 外部拘束応力
 R : 外部拘束係数 (0.45...部材の長さで決まる文献値³⁾)
 E : コンクリートヤング率 (2.07×10^5 kgf/cm²)
 α : コンクリート線膨張係数 (8×10^{-6} /°C)
 ΔT : 降下温度 (= 最大上昇温度 - 最終安定温度)

図—7 熱応力の経日変化

図—8 加圧時応力分布

板製ケーシングがある場合の結果は、最大圧力 2.5 kgf/cm² まで圧力と計測値の関係は直線であり、予想通り弾性状態であった。鋼板製ケーシングがない場合の結果は、当然のことながら、ある場合に比べ、同じ圧力での計測値は大きくかつ非弾性的性状を呈する。以下、鋼板製ケーシングがない場合の結果を中心に述べることにし、両者の差異は (3) で述べる。

(1) 応力分布

想定実機の試設計結果によれば、コンクリートに大きな引張応力が発生するのは、上床版の上面の上部カバー取付部近傍の円周方向、上床版の下面の隔壁との接続部の半径方向および隔壁の鉛直方向であり、今回の加圧試験においても同様の結果が得られた。代表断面のコンクリート応力分布を図-8に示す。各応力は、コンクリートひずみ計および鉄筋計の測定結果をコンクリート応力に換算したものである。

同図には、軸対称および三次元 FEM による計算結果を併記した。計算に用いた諸条件を表-7に示す。計算値は実験値と、定性的にも定量的にも良く一致する。ただし、上床版内周側の円周方向応力については、上部カバー取付金物の剛性の影響から、引張ひびわれの発生に対し計算値が安全側の値を与える。なお、上床版のみを対象に、隔壁部を固定と考える中空円板による簡易解析値は、内周側、外周側とも安全側の値を与える。

(2) 弾性限荷重と終局耐力

加圧力と鉄筋計の計測値との関係が非線形性を表す荷重をもって定義した弾性限荷重を図-9に示す。今回の計測範囲内で最大応力が発生する位置は、上床版内周側の周方向については 45° 断面、上床版の隔壁接続部の半径方向については 180° 断面、隔壁については 90° 断面となった。

次に、上記の弾性限荷重と鉄筋降伏荷重をもって定義した終局耐力に関して、表-2 に示した予測値と実験値

表-7 加圧時応力の計算条件^{*2}

			ヤング率*1 (kgf/cm ²)	ポアソン比
コンクリート	一次コンクリート		2.51×10 ⁵	0.167
	二次 コンクリート	①	2.62×10 ⁵	0.167
		②	2.17×10 ⁵	0.167
		③	2.41×10 ⁵	0.167
鋼板製ケーシング・カバーなど金物類			2.1×10 ⁶	0.3

注：*1 実測値

*2 境界条件……ベースコン底面をすべて拘束

表-8 弾性限荷重と終局耐力に関する予測値・実験値対比
(圧力単位：kgf/cm²)

	弾性限荷重		終局耐力	
	予測値	実験値	予測値	実験値
上床版	3.5	1.8~2.0	5.2	5.9~6.7
隔壁	2.5	2.7	5.1	4.9

との対比結果を表-8に示す。上床版の隔壁接続部の実験値が応力集中あるいは打継強度の低下から弾性限荷重の予測値を下回る以外は、表-2 に示した FEM 計算結果に基づく手法を用いて弾性限荷重および終局耐力を推定できることが分かる。

今回想定した機場の設計最大圧力は $P=1.25 \text{ kgf/cm}^2$ であり、ほぼ 4 倍程度の保有耐力があることを確認できた。

図-9 測定弾性限荷重

表-9 鋼板製ケーシング有無による発生ひずみ比

部 位	方 向	範 囲*	平 均
A	θ	0.62~1.09	0.96
D	θ	-0.60~-1.67	-1.03
B	R	0.69~1.44	1.12
E	R	1.24~1.63	1.48
C	R	1.19~1.35	1.27
F	R	1.11~1.48	1.30
G	Z	1.26~1.37	1.32

注：* ケーシングなし／ケーシングあり

(3) 鋼板製ケーシングの剛性寄与度

弾性同一圧力下において鋼板製ケーシングのない場合の発生ひずみがある場合の値で除して求めた両者の弾性剛性比を表—9に示す。鋼板製ケーシングの有無による弾性剛性差は20~30%となった。この値は、コンクリートに鋼板を加えた等価剛性とコンクリートのみの剛性比(引張剛性比1.19~1.25, 曲げ剛性比1.14~1.34)とほぼ同程度であり、妥当な値である。

3. 施工性試験

3.1 試験目的

鋼板製ケーシング下部のコンクリートには、コンクリートの流動不良あるいはブリー징の問題などから空隙が残る恐れがあり、従来、エア抜き用孔あるいはグラウト用孔を設けて充填性能の向上が図られてきた。

しかし、これらの孔の適正数、開口径あるいは適性位置を予測することは難しく、コンクリート充填後の空隙調査あるいは孔の補修には多大な労力と費用を要しているのが実状である。

本試験では上記の孔数の低減・除去の可能性を検討するために、実大部分モデルを用いて各種モルタルおよびコンクリートの流動性および充填性の比較を行った。

3.2 使用充填材種類と試験方法

使用した充填材は、①無収縮性モルタル、②アルミニウム粉末入りモルタル、③普通コンクリート、および④流動化コンクリートの4種類である。各充填材の配合および現場試験結果を表—10に示す。

試験は、実機を模擬し、所定の位置に空気孔、L形材および妻部を設けた、図—10に示す形状・寸法の型わくを用い、モルタルはポンプで、コンクリートはアジテータ車から直接型わく内に打ち込み、打込み中の流動状

図—10 型わく形状・寸法

表—10 使用充填材

(a) 各充填材の配合

① 無収縮性モルタル

フロー値 (s)	W/ (C+T) (%)	T/ (C+T) (%)	S/ (C+T) (%)	単位量 (kgf/m³)			
				水 W	セメント C	タスコン T	細骨材 S
30~50	43	11	100	369	764	94	858

* Pロートによる値

② アルミニウム粉末入りモルタル

フロー値 (s)	W/C (%)	S/C (%)	単位量 (kgf/m³)				
			水 W	セメント C	細骨材 S	混和剤 (ホゾリス No. 8)	アルミニウム粉末
30~50	49	100	403	824	824	2.06	82.4×10 ⁻³

③ 普通コンクリート

最大寸法 (mm)	スランパ (cm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kgf/m³)					
				水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	AE減水剤 (ホゾリス No. 70)	
20	12	55.0	43.5	174	316	776	1030		0.790

④ 流動化コンクリート

③に流動化剤(NP-10)を1.1l/m³添加し、スランパを12cm→18cmとする。

(b) 各充填材の現場試験結果

	フロー値 (s)	ブリージング率 (%)		膨張率 (%)		圧縮強度 (kgf/cm²)	
		3時間	24時間	3時間	24時間	7日	28日
無収縮性モルタル	41	0.9	0	1.6	0	334	464
アルミニウム粉末入りモルタル	44	0.7	0	9.2	4.7	312	415

	スランパ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)	ブリージング率 (%)	圧縮強度 (kgf/cm²)	
					7日	28日
普通コンクリート	12.0	4.9	9.5	2.4	233	352
流動化コンクリート	16.5	5.0	10.0	1.6	241	365

表—11 施工性試験結果

	無収縮性モルタル	アルミニウム粉末入りモルタル	普通コンクリート	流動化コンクリート
充填率	79.5	94.9	57.0	73.0

況および充填状況を目視観察するとともに、硬化後(材令7日)の表面状況を観察した。

3.3 試験結果

硬化後の表面状況を観察し、各充填材ごとの充填率(コンクリート表面が上部型わくと十分接している部分の面積の全体面積に対する割合)を求めると表—11のとおりとなった。

同表から、①アルミニウム粉末入りモルタルは、ブリージングによって発生する空隙を膨張によって補うため、施工初期に追いつけなかった空隙が残るのみで、他の充填材に比べ十分な充填性を示した、②無収縮性モルタルは十分な充填性がみられるが、ブリージングによる

1 mm 程度のわずかな空隙が残るため、充填率はアルミニウム粉末入りモルタルに比べ低くなった、③普通コンクリートおよび流動化コンクリートともエア抜き孔設置部は良好な充填性を示したが、コンクリート投入部はバイブレータによる気泡が型わく上面に残留し、硬化後もほとんど強度のないレイタンス状の硬化物が残った、④そのため、過度の締固めを防ぐ意味から流動化コンクリートを使用することは、普通コンクリートに比べ施工上効果的であることが確認できた。

4. 実機的设计・施工に対する提言

4.1 設計に対する提言

(1) 硬化時の熱応力

コンクリート硬化時の水和熱により発生する熱応力対策は、材料、配合、施工、設計の各方面から種々考えられる。

今回は主に、対策の前提となる熱応力を精度良く算出する手法について検討した。その結果、①発生する温度分布は計算条件を適切に与えた三次元 FEM 計算により精度よく求まる、②熱応力についても FEM 計算の適用は可能である、③コンクリート製ケーシングの特性上、周方向応力は境界拘束により発生するものが卓越し、この応力は降下温度に基づく簡易計算により FEM と同精度で求まる、などの熱応力推定に関する知見が得られた。

今後、実機レベルでの試験、計算を通しさらにデータを蓄積するとともに、有効な熱応力対策を立案したい。

(2) 加圧時の応力

コンクリートケーシング形ポンプの設計に際して考慮する必要のある荷重は、先に述べた硬化熱あるいは乾燥収縮などの自己拘束型の荷重とコンクリート自重、建屋荷重、機器重量、水の重量および水圧、外気の温度変化地震荷重、群集荷重、作業荷重などの外的な作用荷重とに大別される。

今回は主に、外的作用荷重の中でとくに重要なポンプ稼働時の水圧に関して、発生応力の特性とその算出手法、把握した応力に基づく配筋計画その他について検討した。その結果、①FEM 計算の解析精度は良好であり、引張応力が大きくなる上床版、隔壁などの応力を充分シミュレートできる、②発生応力の流れに沿った放射状配筋は、従来の格子状配筋に比べ、構造安全性、経済性ともに優れている、③上床版と隔壁との接続部に配置するハンチ筋には大きな応力が発生する、したがって、応力の流れを円滑にするために半径方向鉄筋と同程度の量のハンチ筋の配置が望ましい、④隔壁は完全な引張部材であるため、十分な鉄筋の配置が必要である、⑤鋼板製ケーシングの剛性寄与度は 20~30% である、などの知見が得られた。

今後、加圧力以外の荷重に対する検討を行うとともに実機の安全性に対する総合的評価手法を確立したい。

4.2 施工に対する提言

コンクリートケーシング形ポンプの施工に関し、今回の縮小モデルの製作を通じて種々の知見が得られた。その中で特に重要と思われる 2 点について以下に述べる。

縮小 1/4.6 モデル製作時、二次コンクリート部分には充填性を高めるために流動化コンクリートを使用した。鋼板製ケーシングを撤去しコンクリート表面を観察した結果、鋼板製ケーシング下部には空隙が多数見られ、充填性を高めるための使用材料および施工方法の検討が必要となり、3 章で述べた施工性試験を行った。その結果、アルミニウム粉末入りモルタルの充填率は 95% となり、他の材料に比べ十分な充填性を示すことが判明した。今後、同箇所の施工においてはアルミニウム粉末入りモルタルの有効活用が望まれる。

次に、現状のわが国のコンクリート製ケーシングには防水・型わく兼用の鋼板製ケーシングを内張りするのが普通であるが、諸外国では内張りをせずにコンクリートを表面に露出させている例もあり、コスト低減のためには、ぜひとも鋼板製ケーシングを使わない方法の検討が必要である。今回の研究では、鋼板製ケーシングを取り除いた場合のコンクリート打継面からの漏水防止あるいはコンクリート表面の流水・流砂による摩耗防止などに関しての結論を得るには至っていないが、今後、さらに検討を加えていきたい。

5. あとがき

最近、コンクリート構造物においては、海砂の使用による鉄筋腐食、反応性骨材の使用によるアルカリ骨材反応、あるいは RC のマスコン化による温度ひびわれなどの問題が大きくクローズアップされ、いかに適切に設計を行うか、また材料選定を含めて、いかに入念に施工を行うかが重要な課題となってきた。

このような時期に、部材寸法が大きくかつ形状が複雑なコンクリートケーシング形ポンプに関する各種の試験および解析を行い、今後の大型揚排水ポンプ機場の計画・設計・施工の一助となるデータが得られたことは幸いであった。ご指導・ご助力を戴いた関係各位に深く感謝する次第である。

参考文献

- 1) 三菱鉱業セメント：第 14 回品質会議資料，三菱鉱業セメント中央研究所所内資料，1983.10
- 2) 芳賀・十河・中川：大型機械台基礎コンクリートのマスコン対策について，大林組技術研究所報，No. 25，pp. 20~25，1982.8
- 3) 小野・櫛田：マスコンクリートの外部拘束度に関する一考察，土木学会第 36 回年次学術講演会，V-23，1981

(投稿：昭和 60 年 2 月 28 日受付)