

[166] モデレート・プレストレス導入による温度ひびわれ防止効果について

清水 昭男 (熊谷組原子力開発室)
 秦 昌樹 (熊谷組 技術研究所)
 正会員 ○伊藤 洋 (熊谷組原子力開発室)
 西岡 吉弘 (熊谷組原子力開発室)

1. はじめに

近來、コンクリート構造物はますます長大化しており、それに伴って従来マスコンクリートとされていなかった構造物においても、セメントの水和熱に起因する温度応力によるひびわれが品質保障上(耐久性、水密性)無視できない問題となっている。このような温度ひびわれの設計面からの防止対策として、低いレベルのプレストレス(モデレート・プレストレス)を導入したマスコンクリート構造物が西ドイツ等で施工されており、十分な効果をあげている。¹⁾

本研究は、このような観点から、主に壁体構造物を対象とした新たな温度ひびわれ制御工法として、静的破砕剤を利用したモデレート・プレストレス導入法を開発し、²⁾実際の構造物を利用しての現場実験を行ったものである。その結果、本工法のひびわれ制御に対する有用性が確認されたのでここに報告する。また、プレストレス導入による温度ひびわれ防止効果の評価法についても若干の検討を加える。

2. 実験概要

2.1 構造物の概要

現場実験に利用したN排水機場新設工事は、A地区の排水調整を行うための排水機場(容量60^t/sec)を新設する工事の一部であり、図-1にその概要を示す。実験は図中斜線で示した二次スクリーン壁のNo.1を利用して行った。またNo.2、No.3の壁はNo.1と同一構造形状をなしており、No.2壁では基本的なひびわれ発生メカニズムを調べるため、特に対策工を行わない状態で諸計測が実施されている。打設は昭和59年6月12日午前6時から9時にかけて、No.1、No.2壁とも同時に行い、No.3壁については、正午までに行った。打設温度は25℃で、型枠は厚さ2mmのメタルフォームを使用している。また、使用したセメントは普通ポルトランドセメントであり、コンクリートの配合は表-1に示すとおりである。

つぎに、本工法を実施した壁(No.1)の構造寸法および鋼棒の設置状況を図-2に示す。壁は厚さ1m、長さ15m、高さ3.9~4.7mで、既設コンクリートスラブ(厚さ1.5m)の上に打ち継がれる。鉄筋は長手

方向に配筋筋がD19で300mm間隔、かぶり100mmで配置されている。鋼棒の詳細は2.2緊張方法(後述)

で述べるが、同図に示したように、壁体断面中央部に底部より300mmピッチで6本、型枠設置前に設置した。なお、写

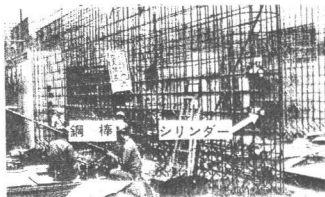


写真-1 鋼棒の設置状況

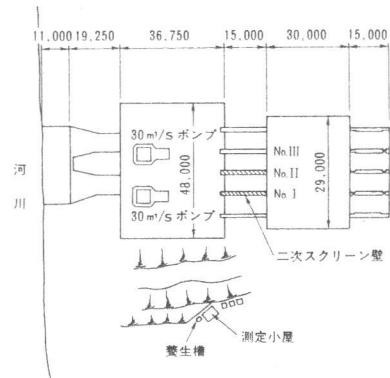


図-1 N排水機場(単位: mm)

表-1 コンクリートの配合

呼び強度	粗骨材の最大寸法	スラン	空気量	W/C	s/a	単位量 (kg/m ³)				
(kgf/cm ²)	(cm)	(%)	(%)	(%)	(%)	W	C	S	G	AE
210	25	8	4	59.8	43.0	159	266	804	1092	0.086

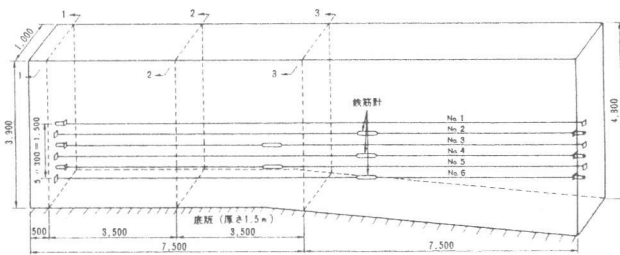
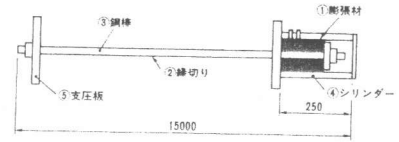


図-2 壁の構造寸法および鋼棒の設置状況(単位: mm)

真-1は鋼棒設置状況を示したものである。

2.2 緊張方法

本工法に用いる緊張方法は、従来のジャッキを用いた方法と異なり、静的破砕剤の膨張圧を利用することを特徴とする。この鋼棒の概要を図-3に示す。鋼棒は同図に示したように、①膨張剤(CAB)、②縁切り、③鋼棒、④シリンダー、⑤支圧板より構成されている。まず①の膨張材は、場所打ちコンクリートの静的破砕剤(CAB)でCaOを主成分とし、打設コンクリートの水和に伴う温度上昇に伴って膨張圧を発生するという特徴がある(後述図-7参照)。②縁切りは、③鋼棒とコンクリートとの付着あるいは摩擦によるプレストレスの損失を小さくするため、塩ビ製シース内側にグリースを塗ったものである(アンボンド・シース)。④シリンダーは膨張圧に耐え得る肉厚を有する鋼管で、その内側には周面摩擦を低減するためグリースが塗られ、さらにその内側には黄銅薄板が巻かれている。また、鋼管の外側には、径方向膨張圧が周囲のコンクリートに悪影響をおよぼさないよう緩衝材が巻かれている。このような鋼棒により、1本あたり5~20t程度の緊張力を得ることが可能となる²⁾。



①膨張材：場所打ち余盛コンクリート破砕剤 CAB
②縁切り：アンボンド
③鋼棒：丸鋼(φ28)
④シリンダー：鋼管(外径φ127、肉厚t=10)
⑤支圧板：鋼板(200×200、肉厚t=22)

図-3 鋼棒概要(単位：mm)

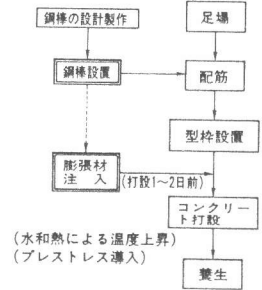


図-4 施工フロー

鋼棒の設置は、上述したように、壁体中心部に設置され、鋼棒端部のシリンダーおよび支圧板は完全にコンクリート内に埋殺しとなる。施工順序は、図-4の施工フローに示すように構造寸法およびプレストレス導入レベルに合わせて製作された鋼棒を鉄筋組立時に設置し、コンクリート打設前(1~2日前)に膨張材を注入することになる。コンクリート打設後の施工管理は特に必要としない。プレストレスの導入は、上述した膨張材の性質より、コンクリートの打設後セメントの水和熱による温度上昇に伴って行われる。導入速度は、コンクリート温度によって異なるが、概ね材令0.5日程度から導入開始され、材令2~3日で最終的な値の大半が導入される。²⁾

2.3 測定項目と測定方法

Ⅱ-1、Ⅱ-2壁の測定において、図-2に示した1-1、2-2、3-3の各断面位置に配置された計器類の種類とその位置を図-5に示す。計測は熱電対、モールドゲージ、有効応力計、無応力計により、各々温度、コンクリートひずみ、コンクリート応力、線膨張率を測定する。鋼棒の緊張力は図-2に示したように、鋼棒に直列に設置した鉄筋計により測定される。また、コンクリートの強度試験は、現場養生された円柱供試体を用いて行われる。ひびわれの観察は巻尺とルーペを用いて行い、Ⅱ-1~Ⅱ壁のひびわれ幅、ひびわれ長さを測定する。

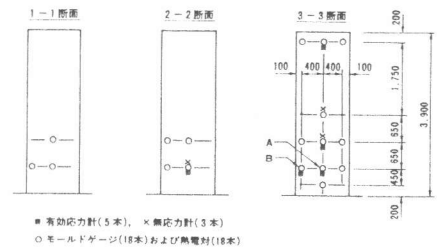


図-5 計器設置位置(単位：mm)

3. 実験結果および考察

3.1 実験の結果とその考察

現場実験によって得られた代表的な結果を示しつつ、本工法のひびわれ制御効果について検討する。まず、壁体中心部(A)と表面部(B)の温度履歴をⅡ-1壁(対策工)およびⅡ-2壁(無対策)について示したのが図-6である。4点いずれも打設22時間で最高温度に達し、中心部ではⅡ-1壁が49.9℃、Ⅱ-2壁が50.8℃、表面部ではⅡ-1壁が40.2℃、Ⅱ-2壁が39.7℃となっている。その後材令2週でいずれも約20℃まで降下し、その後

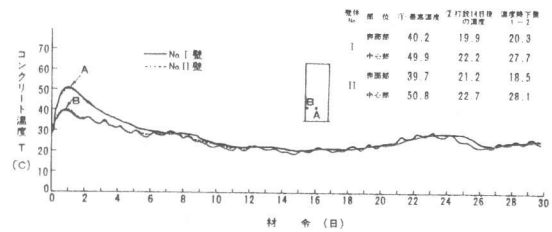


図-6 コンクリート温度の経時変化

は外気温とともに変動している。両壁ともほぼ同様の温度履歴を示している。図-7は、No. I 壁における鋼棒の緊張力の経時変化を示したものであるが、緊張力P（膨張力）はコンクリート打設9時間後より発現し、材令2日で約10t程度導入され、その後は緩やかに増加を続けている。No. II 壁のひびわれ発生時（材令12日）におけるこれら3本の緊張力の平均値は $\bar{P}=10.7t$ であり、6本を合計すると64tとなる。つぎに、図-8は、No. I、No. II 壁の中心部（A）における応力およびひずみの経時変化を、図-9は表面部のそれらを各々示したものである。これらの図より、応力 σ_c および拘束ひずみ ϵ_c ともに最高温度上昇時（材令22時間）に圧縮側の最大値を示し、その後引張側に転じていることが認められる。中心部と表面部の引張応力・ひずみに着目すると、応力・ひずみともに中心部の方が大きくなっていることが認められる。また、No. I と No. II 壁のそれらを比較すると、両者にあまり差は見られず、コンクリートに導入されたプレストレス量は $0.5 \sim 1.0 \text{ kg/cm}^2$ 程度と思われるが、材令12日の早朝に無対策No. II 壁の応力が急減し、ひずみが急増している。これは、この時点でNo. II 壁にひびわれが発生したことを示唆しているものと思われ、材令14日のひびわれ調査（後述）においてもNo. II 壁の中央部にひびわれが確認されている。つぎに、ひびわれ調査の結果得られたひびわれ発生状況を図-10に示す。打設14日の時点では、No. II、No. III の無対策壁において壁スパン中央部付近に幅約0.1mmのひびわれが発生しているが、対策工を行ったNo. I 壁ではその発生は認められていない。打設49日後では、No. I 壁でも幅0.1~0.18mmのひびわれが確認されたが、No. II、No. III 壁においては、ひびわれ幅は0.4~0.5mmに増大し、さらにひびわれ長さも全断面にわたっている。本工法を実施したNo. I 壁の方が無対策のNo. II、III 壁に比べ、ひびわれ幅・長さとも50~70%低減されていることがわかる。

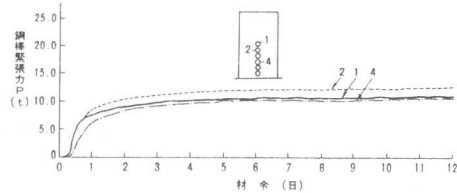


図-7 鋼棒緊張力の経時変化

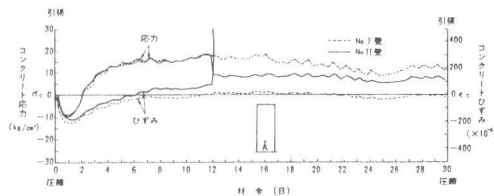


図-8 壁体中心部におけるコンクリート応力およびひずみ

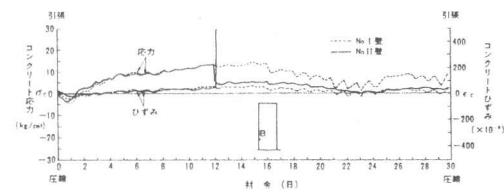


図-9 壁体表面部におけるコンクリート応力およびひずみ

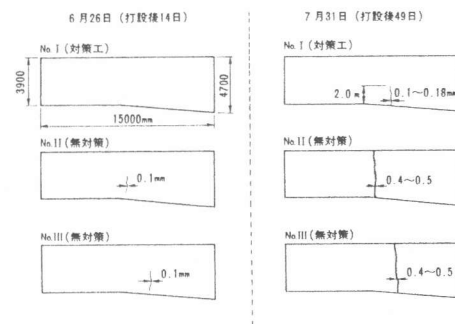


図-10 ひびわれ発生状況

3.2 修正ACI式による評価および考察

3.1 では可視的に対策工のひびわれ制御効果が確認できたが、ここではACIの鉄筋によるひびわれ制御式を基にモデレートプレストレスリングによるひびわれ制御効果の定量的評価を試みることにする。ACI式は底版拘束体に対し、壁体が打ち継がれているとし、この底版中央部の最大拘束モーメントM、鉄筋によるモーメント M_{Rh} および内部応力によるモーメント M_o の釣合いを考えるものであり、次のように表すことができる³⁾

$$M_{Rh} + M_o = M \quad (1), M_{Rh} = A_b \cdot N_h \cdot f_s \cdot \frac{h}{2} \quad (2)$$

$$M_o = 0.2 \cdot f'_t \cdot B h^2 \cdot \frac{L'}{2h} \quad (3), M = 0.2 \cdot f'_t \cdot B h^2 \quad (4)$$

$$f_s = (w \times 10^6) / [10.85 \sqrt{d_c \cdot A}] \quad (5)$$

$$L' = w / [1500 \cdot (K_R \cdot C_T \cdot T_E - f'_t / E_c)] \quad (6)$$

ここに、 A_b :鉄筋の断面積(300mmピッチで両表面に配置)、

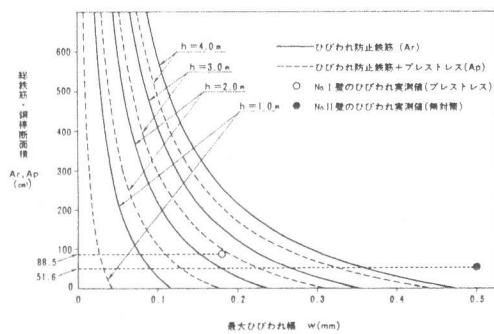


図-11 ひびわれ幅と鉄筋量の関係

N_h : 鉄筋の本数、 f_s : ひびわれ幅を許容値内におさめるための鉄筋応力の制限値、 h : ひびわれ高さ、 f'_t : コンクリートの引張強度 (23.7 kg/cm^2)、 B : 部材幅 (1.0 m)、 L' : ひびわれ間隔、 d_c : 鉄筋中心までのかぶり (10 cm)、 A : 鉄筋を取囲むコンクリートの有効面積 ($2d_c \times$ 鉄筋間隔、 600 cm^2)、 w : 最大ひびわれ幅、 K_R : 拘束度 (0.93)、 C_T : 線膨張率 ($9.1 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$)、 T_E : 有効温度降下量 (28°C)、 E_c : コンクリートの有効弾性係数 ($1.2 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$) である。()内の数値は、後述する計算に用いた値で、実測値を基に決めたものである。

つぎに、式(1)にモデレートプレストレスによる抵抗モーメント M_p を含めたモーメントのつり合いを考えると式(6)のように表すことができる。

$$M_{R_h} + M_o + M_p = M \quad (6), \quad M_p = P_p \cdot N_p \cdot \frac{h_p}{2} \quad (7)$$

ここに、 P_p : 鋼棒 1 本あたりの緊張力 (10.7 t)、 N_p : 鋼棒の本数 (6 本)、 h_p : 鋼棒の配置された高さ、である。従って、式(1)~(7)より、ACI法(鉄筋のみ)による必要総鉄筋断面積 A_r 、および本工法(鉄筋+鋼棒(プレストレス))によるそれ A_p は、 $h = h_p$ として各々、次のように求めることができる。

$$A_r = A_{b1} \cdot N_h \quad (8), \quad A_{b1} = [0.4 \cdot f'_t \cdot B \cdot h \cdot (1 - L'/2h)] / (N_h \cdot f_s) \quad (9)$$

$$A_p = A_{b2} \cdot N_h + A'_p \cdot N_p \quad (10), \quad A_{b2} = [0.4 \cdot f'_t \cdot B \cdot h \cdot (1 - L'/2h) - P_p \cdot N_p] / (N_h \cdot f_s) \quad (11)$$

ここに、 A'_p : 鋼棒 1 本あたりの断面積 (6.2 cm^2) である。

これらを用いて、ひびわれ幅 w を $0.1 \sim 0.5 \text{ mm}$ 、およびひびわれ高さ h を $1.0 \sim 4.0 \text{ m}$ と変えて A_r および A_p を計算したものが図-11である。図中、鉄筋のみによる場合の A_r は実線で、本工法併用の場合の A_p は破線で示してある。また \mathcal{M} I 壁(対策)と \mathcal{M} II 壁(無対策)のひびわれ実測結果も同時に示しており、用いられた総鉄筋断面積は、各々 $A_r = 5.16 \text{ cm}^2$ 、 $A_r = 88.5 \text{ cm}^2$ であった。実線 A_r と破線 A_p を比較すると、全体に破線で示した本工法併用の場合の方が小さく、鉄筋量が低減され、特にひびわれ幅 w が小さいほどその効果が大きいことがわかる。また、実測値と計算値を $h = 4.0 \text{ m}$ の場合を基準にして比較すると、対策を行った \mathcal{M} I 壁では実測ひびわれ幅は計算値のそれより小さく、無対策の \mathcal{M} II 壁では逆にやや大きくなっており、本工法によるひびわれ低減効果が計算値より大きく表われている。さらに実測結果を基に具体的に考えてみると、鉄筋のみで \mathcal{M} II 壁のひびわれを \mathcal{M} I 程度に制御しようとするれば、 $h = 4.0 \text{ m}$ より、 A_r は約 260 cm^2 となり、断面積で 200 cm^2 以上の鉄筋がさらに必要となる。しかし、本工法を併用すると、鉄筋量はわずか 37 cm^2 程度の増加によって、ひびわれ高さは約 50% ($3.9 \rightarrow 2.0 \text{ m}$)、ひびわれ幅は約 70% 程度 ($0.5 \rightarrow 0.18 \text{ mm}$) 低減されることになる。ここで提案した式は簡単な力のつり合いより求めたもので、不確定な要因を多く含むひびわれ制御予測を確実に実行するには、さらに多くの実データが必要と思われるが、本工法による、つまりモデレートプレストレス導入によるひびわれ幅低減効果は十分期待できることを示唆しているものと言えよう。

4. まとめ

主に壁体構造物を対象として、モデレートプレストレス導入を基本とした新たな温度ひびわれ防止工法を開発し、そのひびわれ制御効果を確かめるため、本工法を適用した実構造物壁による現場実験を行った。その結果、静的破砕剤によるプレストレス導入は十分可能であり、モデレートプレストレス導入によって温度ひびわれがかなり低減されることがわかった。本実験においては、対策を行った壁のひびわれ長さ、幅はともに無対策壁のそれと比べて $50 \sim 70\%$ 低減された。また、モデレートプレストレス導入効果を考慮した修正 ACI 式を提案し、その定量的評価を試みたが、特に小さいひびわれ幅制御においてその有用性が大きく、ひびわれ幅低減抵抗力としての作用効果を十分期待できることが認められた。従来、ACI法(鉄筋によるひびわれ制御)では、 0.3 mm 以下のひびわれ幅制御は鉄筋量が膨大となって不経済であったが、モデレートプレストレスを併用することにより、一層効果的、かつ経済的なひびわれ制御が可能となるものと考えられる。

参考文献

- 1) 成井他: モデレートプレストレスによるマスコンクリートのひびわれ制御, コンクリート工学, Vol. 21, №1, PP.56-61, 1981. 1
- 2) 清水他: 静的破砕剤を利用したモデレートプレストレス導入法に関する基礎的実験, 土木学会第 39 回年次学術講演概要集 V, PP.95-96, 1984.
- 3) ACI 207 委員会報告(万木他訳), マッシュなコンクリートのひびわれに対する拘束、体積変化の影響, コンクリート工学, Vol. 13, №2-4, 1975.