

VERIFICATION OF NEWLY ADOPTED COMPOSITE SEGMENT'S PERFORMANCE AGAINST INTERNAL HYDRAULIC PRESSURE

“Shirako River-Underground Regulation Pond” is the key underground flood control reservoir planned for a rainfall of 50 mm/hr. The type of the structure is tunnel type constructed by slurry type TBM, the total length is about 3.2 Km, the inner diameter is 10.0m, and the volume of the reservoir is about 212,000m³.

Key Words : *underground regulation pond, slurry type TBM, internal hydraulic pressure, composite segment*

(1) 白子川の現況

白子川は練馬区の大泉井頭公園を源とし、埼玉県和光市と板橋区の都県境を経て、新河岸川へと注ぐ、河川延長約10km、流域面積約25km²の一級河川である(図-1).

白子川流域は、昭和30年代頃から急速に都市化した。そのため、雨水が地下に浸透せず、地表面を流れて一気に河川に流入する「都市型水害」が頻発している。水害による被害軽減を確実に図るため、河道の拡幅や調節池の整備を推進していく必要がある。

白子川では、現在、1時間50mmの降雨に対応する整備を進めている。しかし、中流域の埼玉県施工区間（東埼玉橋～芝屋橋区間の約1.4km）については、当面の間、整備の見込みがない状況である。このことから、その上流の比丘尼橋付近に白子川調節池群を整備し、下流の洪水に対して安全を確保するとともに、調節池から上流に向けて護岸の整備を行っている。白子川調節池群は、図-2に示す3つの施設から構成される。このうち、比丘尼橋上流、下流調節池については、平成14年度までに完成している。

白子川地下調節池は、白子川における 1 時間 50mm の降雨に対応する基幹的な施設であり、延長約 3.2km、内径 10m、貯留容量 212,000m³のトンネル式の地下調節池である。

シールドトンネルは、都道目白通りの地下約35mの深さを掘進した後、石神井川と都道環状八号線の交差部付近に設置する立坑に到達する。なお、発進立坑については平成10年に完成している（図-3）。

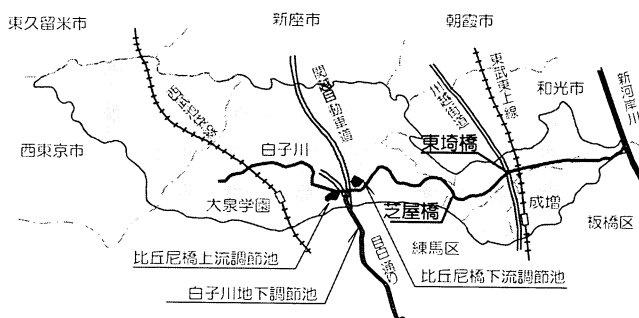


图-1 自子川流域图

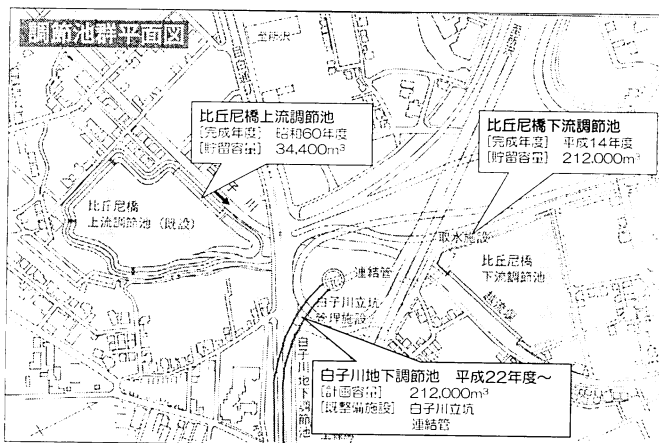


図-2 白子川調節池群平面図

キーワード：地下調節池，泥水式シールド，内水圧，合成セグメント

¹ 非会員 東京都第四建設事務所 工事第二課（〒170-0005 東京都豊島区南大塚 2-36-2），
E-mail: Nobuyasu_Tatsuzawa@member.metro.tokyo.jp

2 正会員 大成建設株式会社 土木本部土木設計部 陸上第二設計室 (〒163-0606 東京都新宿区西新宿 1-25-1)

³正会員 大成・佐藤・錢高建設共同企業体 白子川地下調節池工事作業所（〒178-0062 東京都練馬区大泉町4-2 比丘尼下流調節池管理棟用地内）



図-3 地下調節池ルート図

2. 白子川地下調節池工事（その5）の概要

本工事は、練馬区大泉町二丁目地内に存する東京外環道路大泉ジャンクション内に既に設置済の発進立坑（内径 21.0m、深さ 47.3m）を起点とした延長 3.2km のシールドトンネルの構築と、その終点となる石神井川と都道環状八号線の交差部付近、同区高松三丁目に到達立坑（内径 19.5m、深さ 46.5m）の構築を行う工事である。

また、本工事は、材料や施工方法等について提案を受け付け、入札価格と提案内容を総合的に評価する「技術提案型総合評価方式」により受注者の選定を行った。その技術提案により、工期が大幅に短縮されるとともに、シールドトンネルに使用するセグメントについては、内水圧が作用する地下河川トンネルに初めて適用されるタイプの合成セグメントを採用することとなった。本稿では、技術提案により採用したセグメントが内水圧に対応できることを検証するために実施した実構造系載荷実験の概要および結果等について報告する。

(1) 工事概要

工事の概要は以下のとおりである。

工事件名：白子川地下調節池工事（その5）

工事期間：平成 23 年 2 月 24 日

～平成 24 年 9 月 11 日

【到達立坑】

立坑内径：19.5m

立坑外径：25.1m

立坑深さ：GL-54.0m（ケーソン刃口先端）

工 法：ニューマチックケーソン工法

【シールドトンネル】

内 径：10.0m

外 径：10.6m

延 長：3,185.3m

平面線形：直線および曲線

(R=130m, 140m, 300m, 318.5m)

土かぶり：約 34～47m

工 法：泥水式シールド工法

覆 工：合成セグメント

および鋼製セグメント

(2) 地質概要

土質縦断面図を図-4に示す。シールド掘削対象地盤は、全線にわたり江戸川層であり、粘性土、砂質土、砂礫土の互層となっている。土質については非常に硬く、あるいは非常によく締まった地層からなっている。江戸川層第1粘性土層は、硬質固結シルトで、N値は11～50以上である。また、江戸川層第1砂質土層は、均一な細砂で、N値は16～50以上である。江戸川層第1砂礫層は、礫径は2～50mmだが所々100mm程度の玉石が混じり、N値は50以上である。江戸川層第2粘性土層は、砂質固結シルトでN値は50以上と堅固である。

3. 到達立坑

(1) 構造概要

本工事の到達立坑構造を図-5に示す。施工方法は、ニューマチックケーソン工法である。

本到達立坑計画位置は、地下水位が高く、躯体形状も外径 25.1m・深さ GL-54m と大断面・大深度であり、浮上りによる安定を確保するため側壁部材厚が 2.8m となり、マスコンクリート対策を行う必要が生じた。このため、温度応力解析を実施し、低発熱・収縮抑制型高炉セメント(MKC-III)を用いることでひびわれ抑制を図ることとした。また、本立坑の躯体ロット数は、上記の温度応力解析結果に基づき、10 ロットと設定した。

本立坑に設けるシールド到達開口は、大断面（φ 11.14m）・大深度（土被り約35m）であり、開口の影響を適切に評価する必要があるため、3次元シェルモデルによる構造解析を実施して、配筋仕様を決定した。

4. シールドトンネル

本工事のシールド掘削断面はN値50以上の硬質地盤であり、土質は粘性土、砂質土、砂礫と様々な土層を掘削する。また、全線にわたり土かぶり約35mの高水圧下での長距離掘削となることから、様々な土質に適合し、高水圧下でも切羽の安定性が優れている泥水式シールド工法を採用した。

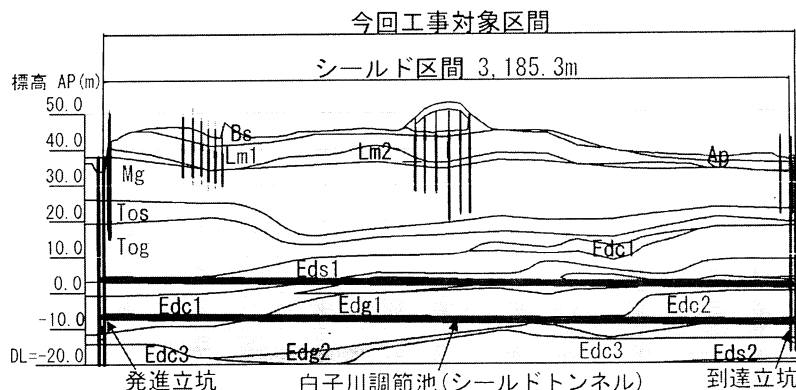


図-4 土質縦断面図

時代	地層区分	地層名	記号
完新世	二次堆積土層	埋土層	Bs
	腐植土層	腐植土層	Ap
	関東ローム層	ローム層	Lm1
		凝灰質粘土層	Lm2
更新世	武蔵野レキ層	砂レキ層	Mg
	東京層	砂質土層	Tos
	東京レキ層	砂レキ層	Tog
	江戸川層	第1粘性土層	Edc1
		第1砂質土層	Eds1
		第1砂レキ層	Edg1
		第2粘性土層	Edc2
		第2砂質土層	Eds2
		第3粘性土層	Edc3
		第2砂レキ層	Edg2

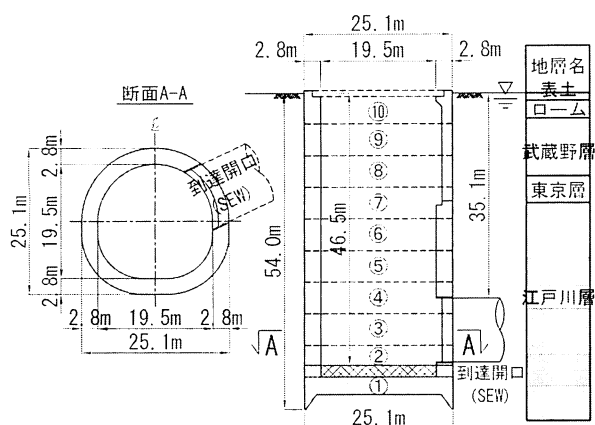


図-5 到達立坑構造図

表-1 シールド仕様

項目	詳細項目	仕様
シールド 本 体	外径	φ 10,800 mm
	機長	11,100 mm
	テールシール	ワイヤブラシ 3 段
推進装置	シールド ジャッキ	3,500kN×36 本 総推力 126,000kN
中折れ装置	機構	X 型 (球面中折れ)
	中折れジャッキ	3,000 k N×30 本
掘削装置	装備トルク	16,500kN-m
	カッタ回転速度	0.6min ⁻¹
	カッタ支持方式	中間支持方式
	カッタモータ	75kw×40P×14 台
	カッタヘッド	スポーク主 6, 副 6 開口率 37.5%
	余掘り装置	コピーカッタ 2 基
	攪拌装置	攪拌翼 10 本

(1) シールドの仕様

本工事で使用する泥水式シールドの構造図および全景を図-6に、仕様を表-1に示す。

カッタヘッドは、粘性土層掘削時の面板閉塞が発生しないように開口率を37.5%と大きくして取り込みを良くするが、一方で、巨礫による配管閉塞が発生しないようにスリット幅を350mm以下とした。また、カッタビットのチップは礫層掘削時の破損を抑制するため、耐衝撃性に優れているE5種を使用することとした。

硬質地盤を長距離掘削することから、強化先行ピ

ットを内周2パス、外周3パス配置するとともに、カッタトルクは計算による所要トルクの2.7倍 (α 値 13) とし、装備推力についても、計算による所要推力の2.2倍とした。

(2) シールド設備

a) 流体輸送設備

流体輸送設備は、礫層卓越区間での高速施工に対応するため、国内最大級の泥水ポンプを使用し、送排泥管は送泥16B、排泥14Bを使用することとした。また、クラッシャーは効率的な破砕が可能な直列2台方式とし、礫の破砕量を向上させることにより、礫による閉塞を防止することとした。

b) 泥水処理設備

泥水処理設備は、一次処理土、二次処理土がそれぞれ卓越する断面で高速施工に対応できる一次処理機、二次処理機（フィルタープレス）およびタンク類を配置する必要があることから、地上ヤードに2階建てで効率的に配置した。

5. 覆工構造

(1) 覆工構造

本工事に用いるセグメントは、地下調節池トンネルのため内水圧に対応する必要がある。このため、高い耐荷性を有する嵌合方式合成セグメント、粗度係数を抑えるための内面平滑性、シール材の膨張圧による割れ欠けを防止するため継手面にコンクリートが露出しない構造とする必要がある。これらの条件を満足する覆工構造として、嵌合方式コンクリート一体型鋼製セグメントを採用した（図-7、図-8、表-2）。

本セグメントの止水性は、内水圧および外水圧に対して、内外2条のシール材を配置することにより確保することとした。

また、耐久性は、地山側は鋼材（スキンプレート）に1mmの腐食代を考慮することとし、内面側は鋼材（内フランジ）に1mmの腐食代を考慮し、さらに重防食塗装(5mm)を行うこととした。

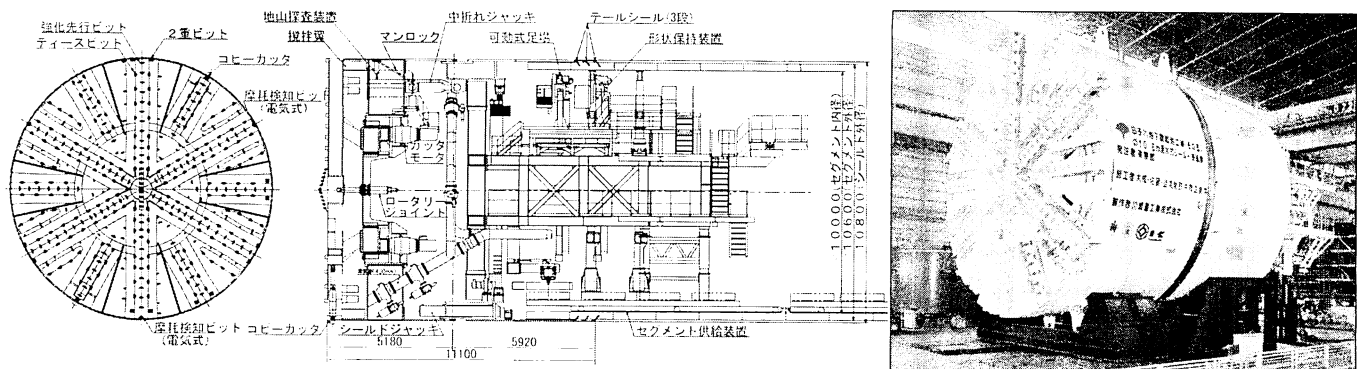


図-6 シールド構造図および全景

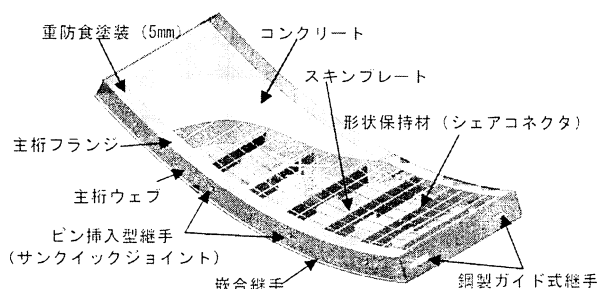


図-7 嵌合方式コンクリート一体型鋼製セグメント概要図

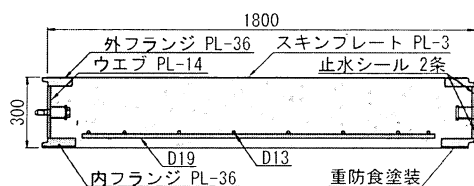


図-8 嵌合方式コンクリート一体型鋼製セグメント断面図

表-2 覆工仕様

	一般部 (R=300m 以上)	急曲線部 (R=130m,140m)
内径	10,000mm	
外径	10,600mm	
幅	1,800mm	1,200mm
桁高	300mm	
セグメント分割	7分割 (K 縮小)	
継手形式	鋼製ガイド式継手	
継手形式	嵌合継手	ピン挿入型継手

(2) 設計条件

a) 解析モデル

本セグメントの設計に用いる解析モデルは、2 リング梁-ばねモデルとした。

ここで、セグメント継手のモデル化については、内水圧により軸引張力が作用する場合、回転ばねに

加えて軸引張ばねも考慮した。

本セグメントは、リング継手に嵌合継手とピン挿入型継手を有している。しかし、セグメント設計においては、嵌合継手のみ、ピン挿入型継手のみをモデル化した各々のケースで構造成立することを確認して安全性を確保している (図-9)。

b) 設計断面の設定

セグメント設計断面の選定は、地下水位の分布、シールドトンネル通過層の土層構成に加えて、本調節池完成後に構築される可能性のある開削トンネル施工の影響を考慮して行った。

c) 荷重条件

本セグメントの設計に考慮する荷重は、土圧、外水圧、内水圧、自重および地盤反力とし、荷重の組合せは、空水時、平常時内水位¹⁾および異常時内水位¹⁾について、土圧の大小や外水圧の高低を考慮して決定した (表-3、図-10)。

さらに本工事においては、将来、本トンネル上部に開削トンネルが施工される可能性も考慮し、以下の3つの荷重状態を検討することとした。

- ① 白子川地下調節池完成時
- ② 開削トンネル施工時
- ③ 開削トンネル完成時

上記3つの荷重状態のうち、②開削トンネル施工時 (内水圧作用時) の荷重図を図-11に示す。このように、外水圧に比較して内水圧が極めて大きく軸引張力が卓越するため、特にセグメント継手に厳しい荷重条件となる。

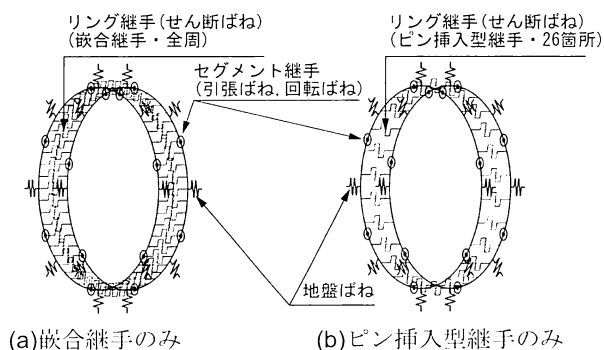
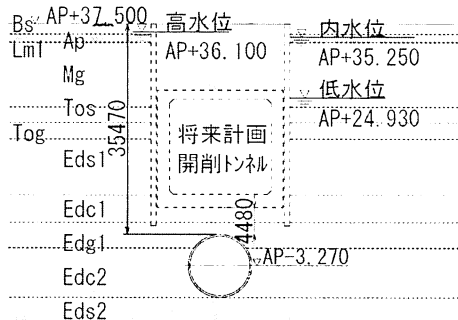


図-9 解析モデル概要図

荷重 ケース	管内の 状態	土 圧		外水圧		内水圧		自重	地盤 反力
		大	小	高	低	平常	異常		
Case 1	室水時	○		○				○	○
Case 2		○			○			○	○
Case 3	平常時	○		○	○	○		○	○
Case 4	内水位 ¹⁾		○		○	○		○	○
Case 5	異常時	○		○	○		○	○	○
Case 6	内水位 ¹⁾		○		○		○	○	○



地盤反力 P_r
鉛直土圧 P_e

側方土圧 q_{e1}
側方土圧 q_{e2}

内水圧 P_{i1}
内水圧 P_{i2}

外水圧 P_{w1}
外水圧 P_{w2}

$P_r = 37 \text{ (kN/m)}$
 $P_e = 101 \text{ (kN/m)}$
 $q_{e1} = 94 \text{ (kN/m)}$
 $q_{e2} = 157 \text{ (kN/m)}$
 $P_{w1} = 114 \text{ (kN/m)}$
 $P_{w2} = 300 \text{ (kN/m)}$
 $P_{i1} = 601 \text{ (kN/m)}$
 $P_{i2} = 786 \text{ (kN/m)}$

(3) 覆工構造性能確認試験¹⁾

a) 実構造系載荷実験

実験ケースは、軸引張力が卓越してセグメント継手に厳しい荷重条件となる、長期内水圧作用時（①白子川地下調節池完成時）および短期水圧作用時（②開削トンネル施工時）を選定した（表-6）。

	実物大継手試験	実構造系載荷実験
目的	軸引張力作用時の引張 および回転ばね値確認	長期および短期内水圧作用時 の覆工構造成立性確認
概要図		

セグメント幅（中央リング）			900 mm	実物大の 1/2
セグメント厚さ			150 mm	
外径			5300 mm	
継手	セグメント継手		—	
	リング 継手	嵌合	—	
		ピン	M20	流通資材最少
分割数			7 分割	実構造と同じ

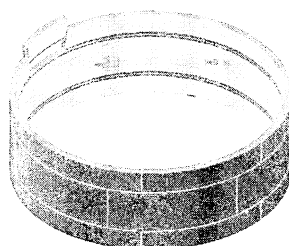
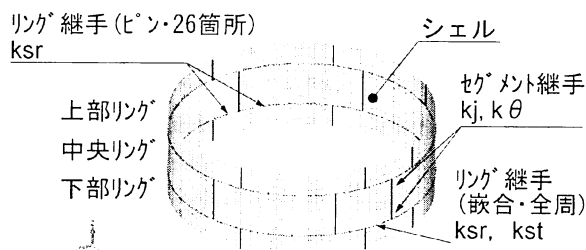


図-12 供試体組立図

実験 ケース	内水圧 荷重 P_w (kN/m/R)	曲げ 荷重 P (kN)	断面力状態
1	44.6	0.0	—
2	44.6	57.4	長期内水圧作用時相当
3	180.0	0.0	短期内水圧作用時相当



- 153 -

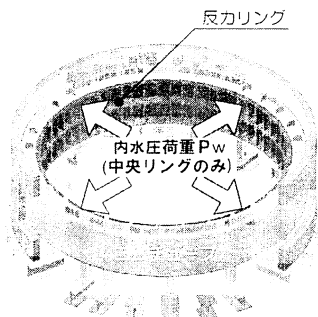


図-14 内水圧荷重模式図

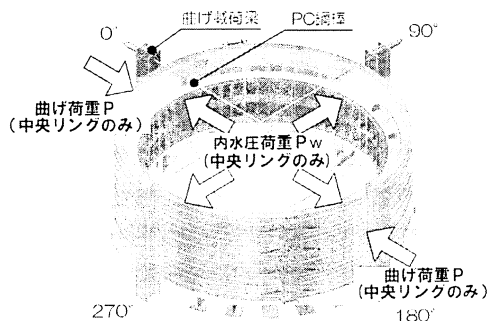


図-15 曲げ荷重荷重模式図

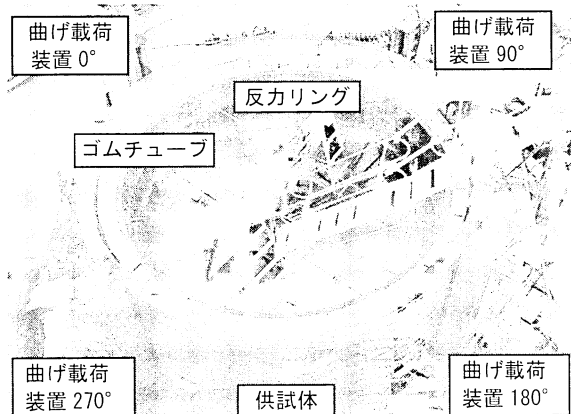


写真-1 曲げ荷重荷重模式図

事前解析

実験荷重および実験結果の予測値を算定する事前解析は、供試体の境界条件（下部リング下端鉛直方向固定，上部リング上端自由）を忠実にモデル化するため，3次元シェル-ばねモデルを用いて行った（図-13）。

実験方法

内水圧荷重 P_w は，リングの内側にドーナツ状のゴムチューブを設置し，チューブ内へ注水，加圧する方法で中央リングにのみ荷重した（図-14）．曲げ荷重 P は，PC鋼棒をタイロッドとした $0^\circ - 180^\circ$ 方向の荷重梁を用いて，中央リングにのみ集中荷重として荷重した（図-15）．実験状況を写真-1に示す．

実験結果

実験結果を図-16，図-17 に示す．グラフには，リング継手を「ピン挿入型継手のみ」，「嵌合継手のみ」としてモデル化した解析結果も併記する．

直径変化量およびセグメント継手ひずみの実験値は，全ケースにおいて解析値を下回った．よって，

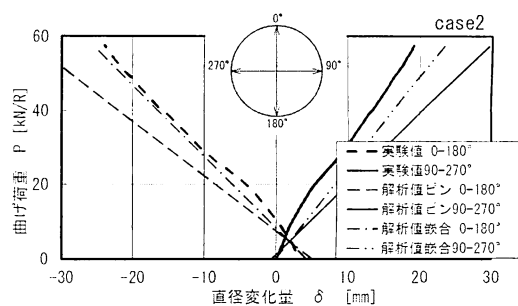


図-16 直径変化量

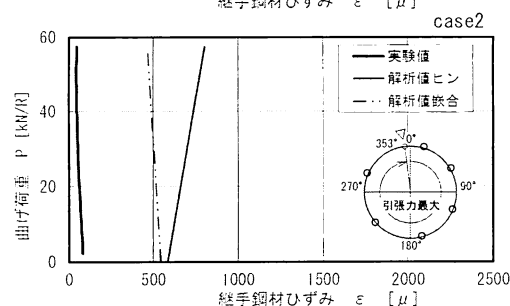
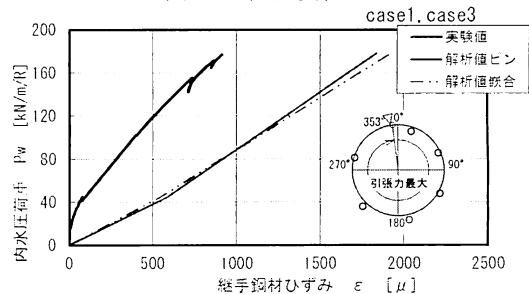


図-17 継手鋼材ひずみ

本覆工の設計手法が安全側であることと，本覆工構造が内水圧に対応できることを確認した．

今後は，実験値をより忠実に再現できる解析モデルや，嵌合継手の有効性について精査することで，嵌合方式コンクリート一体型鋼製セグメントの合理的な設計手法を探究する．

6. おわりに

本工事で使用するセグメントは，実構造系載荷実験と実物大継手試験により，内水圧に十分対応できることを確認したため，平成 23 年 7 月からセグメント製作を開始している．また，現地ではシールド発進に向けての準備工を行っている．

本シールド工事は大断面・大深度・長距離という条件の中，難しい工事ではあるが，発注者・受注業者・関連業者が一体となった協力体制のもと，品質確保に万全を期すとともに，適切な施工管理により安全かつ早期に工事を完成させ，白子川の治水効果の早期発現に努めていく所存である．

謝辞：最後に，今回の実験を行うにあたりご指導，ご協力をいただいた関係者の皆様に改めてお礼を申し上げます．

参考文献

- 1) (財) 先端建設技術センター：地下河川（シールドトンネル）内水圧が作用するトンネル覆工構造設計の手引き，1999.3