

内水圧を受ける4分割3ヒンジセグメントの挙動に関する 実験的研究について

EXPERIMENTAL STUDY ON THE BEHAVIOR OF FOUR-PART THREE-HINGED STRUCTURE SEGMENTS ACTING INTERNAL PRESSURE

松浦 将行¹⁾・高久 節夫²⁾・桐谷 祥治³⁾・田中 秀樹⁴⁾

Masayuki MATSUURA, Setuo TAKAKU, Yoshiharu KIRITANI, Hideki TANAKA

Tokyo Metropolitan Government has developed to apply the shield construction method with four-segmented three-hinged structure, which is suitable for construction of the main and the branch lines of Sewage re-construction plan, in the field. This segment is different from the conventional one with bolted joints. It has the hinge coupler joint which cannot resist tensile forces. Usually analysis for internal pressure is omitted for sewage tunnels. However, in this study loading tests for internal water pressure were carried out to confirm safety of the hinged structure in the case of unexpected level of rainfall and unbalanced loading conditions caused by construction in vicinity. The result of the loading tests confirms safety and watertightness of the tunnel in both cases

Key Words : sewerage shield tunnel, three-hinge structure, internal pressure

1. はじめに

東京都下水道局では、下水道再構築事業における主要枝線整備に適したシールド工法として、コンパクトシールド工法を開発した。すでに「台東区三筋二丁目、鳥越二丁目付近再構築工事」において実証施工を終了し、引き続いて「江東区大島四、五丁目付近再構築工事」の掘進準備を進めている。台東区で使用したシールド機を回収し、江東区の工事に転用すべく整備を実施している。

本工法は、「建設費縮減」、「工期短縮」、「施工環境の多様化への対応」、「環境負荷の低減」、「維持管理の効率化」といった課題に対応するため、覆工体として「4分割3ヒンジ構造の溝付インバート二次覆工一体型セグメント」を採用するとともにシールド設備等にも新しい概念を取入れている¹⁾。

下水道トンネルに用いるシールド工用標準セグメント²⁾は、セグメント継手の性能として、単体の抵抗モーメントに対して60%以上の抵抗モーメントを有することが規定されている。これに対して、本工法に用いるセグメントは、セグメント継手にヒンジ構造を導入し、静的に安定なトンネル構造(3ヒンジ静定構造)を提案している。

下水道管渠では、異常降雨時などによって満管状態となり短期的に内圧が作用する状態や、近接施工の影響によって一時的に荷重バランスが崩れる状態が想定される。「ヒンジ継手」は引張りに抵抗できない構造で

1) 正会員 東京都下水道局 建設部設計調整課長

2) 東京都下水道局 建設部事業調査担当係長

3) 正会員 佐藤工業株式会社 土木本部技術部門部長

4) 正会員 ジオスター株式会社 技術部技術開発チーム課長

本研究は、新しく提案した「ヒンジ継手構造」を有するセグメントの下水道管渠としての安全性を確認することを目的としたもので、下水道管渠に想定される荷重状態を整理して数値解析的な検討を加え、実工事に使用するセグメントを用いたリング載荷試験を実施し、ヒンジ継手の実験的検証を行った。

2.1 4分割3ヒンジセグメント

以上より、セグメントは4分割3ヒンジ構造とし、セグメント継手は、3カ所のヒンジ部にナックル継手(図-2)を、1カ所の剛結部に新しく開発したC形嵌合継手(図-3)を採用することとした。リング継手については、ピン挿入型(図-4)を採用することとし、全体として内面の平滑性が得られる継手構成とした。

下水道再構築事業における主要枝線の設計条件は、一般的な合流管渠のため、平常時の内圧は設定されていない。しかしながら、異常降雨時などに一時的に内圧が作用する可能性は高い。下水道工事用標準セグメントでは、セグメント継手部がボルト締結式であり、異常時の内圧に対しては、ボルトの引張強度に対する安全率が3倍程度以上考慮できることから、通常の設計では内圧に対する検討を省略している。

Technical drawing of a circular flange with four bolt holes. The drawing shows the overall dimensions and the layout of the bolt holes. The outer diameter is 2,300 mm and the inner diameter is 2,000 mm. The bolt holes are arranged in a circle with a diameter of 1,057.8 mm. The distance from the center to the center of a bolt hole is 264.5 mm. The bolt holes are labeled A, B, C, and D. The distance between the centers of adjacent bolt holes is 105.7 mm. The distance from the center to the edge of the flange is 115 mm. The distance from the center to the center of a bolt hole is 264.5 mm. The distance from the center to the edge of the bolt hole is 105.7 mm. The distance from the center to the center of a bolt hole is 264.5 mm. The distance from the center to the edge of the bolt hole is 105.7 mm.

図-1 コンパクトシールドセグメント

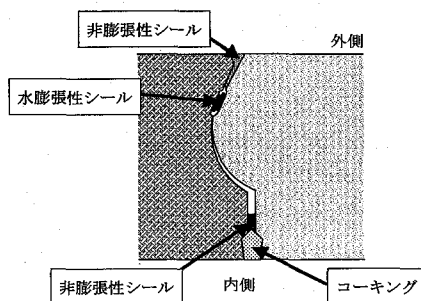


図-2 ナックル継手

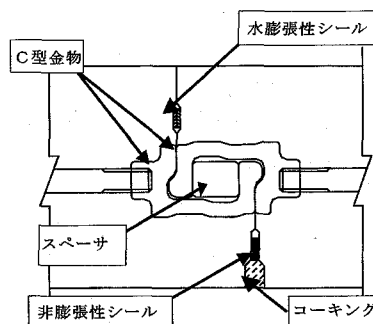


圖-3 C型勘合継手

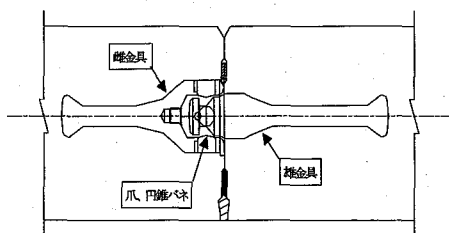


図-4 ピン挿入継手（ノブ型継手）

3. 内圧載荷実験

3.1 実験目的

前項で記述したように、外荷重の載荷状態から内水圧が作用したりあるいは近接施工によって荷重の一部が除去された状態においては、ヒンジ部に作用する軸力が変化する。ヒンジ部は引張抵抗部材が省略されているため、ヒンジ部の軸力変化によるリング挙動や止水性におよぼす影響が懸念される。そこで、これらの状況を把握することを目的として、外荷重および内水圧を載荷するリング載荷実験を実施した。

3.2 供試体の諸元

供試体は、図-5に示す幅1000mm、桁高150mmの二次覆工一体型セグメント（外径2000mm）を2リング使用し、セグメントの組立ては縦方向に千鳥組みとした。表-1に設計基準強度を42N/mm²のコンクリートの配合と試験材齢の圧縮強度試験結果を示す。コンクリートの実弾性係数は39kN/mm²であった。

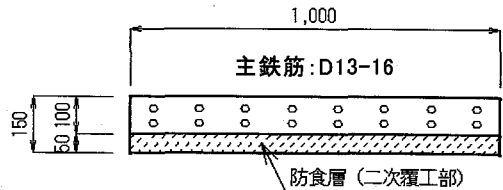


図-5 供試体断面図

表-1 コンクリートの配合表および圧縮強度試験結果

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプの範囲 (cm)	空気量の範囲 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨率 S/A (%)	単位量 (kg/m ³)					圧縮強度結果 (N/mm ²)			
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤	1	2	3	平均
20	3±1.5	1.5±1.5	41	43	138	340	842	1158	2.72	59.0	58.6	58.1	58.6

混和剤：レオビルド 8000E

3.3 載荷重の検討

載荷荷重および載荷ケースの検討にあたり、前述した実証工事における設計条件により事前解析を実施した。本管渠は一般的な合流管であり、平常時の内水圧は考慮されていない。ところで、東京都下水道局建設部の「ボルトレスセグメントの設計の手引き」では、内水圧を考慮する場合、異常時として、対象管渠に取り込む流域内の最上流管渠の管頂高を考慮することとしている。本手引きに基づく、当該管渠の異常時内水位として、管中心より1.75mを考慮することとなるが、さらに厳しい条件として、土被り相当の内水位(6.68m)を想定した荷重の組合せを加え、表-2に示す4ケースについて試設計を実施した。表-3に各試設計ケースの設計条件を示す。本工区的地盤は、N値10以下の自立性の低い砂質系シルト地盤であることから、鉛直土圧は全土圧を考慮した。ケースiiiの地下水位の扱いおよび最小鉛直土圧0.175・Dは、「内水圧が作用するトンネル覆工構造設計の手引き」³⁾に準拠した。

表-2 荷重の組合せ一覧表

試設計 ケース	土圧		地下 水位	内 水位	備考
	大	小			
i	○		—	—	常時
ii	○		—	1.75m	異常時 管頂差相当水位
iii		○	○	1.75m	
iv	○		—	6.68m	土被り相当水位

表-3 設計条件一覧表

試設計ケース	i	ii	iii	iv
セグメント外径	2.30 m			
セグメント桁高	0.15 m			
セグメント幅	1.00 m			
土被り	5.53 m			
地下水位	G L-1.55 m			
地盤の分類	土水一体地盤 注1)			
鉛直土圧	全土圧	全土圧	0.175D	全土圧
土の単位体積重量	18kN/m ³ (8kN/m ³)			
側方土圧係数	0.5			
地盤反力係数	10 N/cm ³			
上載荷重	10MN/mm ²		—	10MN/mm ²

注1) ケースiiiのみ土水分離地盤として取扱い地下水位を考慮した。

セグメント間の回転ばね定数として、ヒンジ部は軸力の影響は考慮せずゼロとし、剛結合部は無限大とした。また、リング間継手のせん断ばね定数は、ノブ型継手のせん断実験結果より、60000kN/mとした。^{4) 5)}

図-6に各試算結果における曲げモーメントと軸力の分布状態を示す。土被り相当の内水圧が作用するケースivについても、ヒンジ部の軸力状態は、すべて圧縮力が作用している状態である。

以上の各試設計結果を段階的に再現するため、軸力、鉛直荷重（集中荷重）および内水圧の組合せを表-4 に示す9ケースとし、各載荷ケースとした。載荷 CASE①, ②は、試設計で正の最大曲げモーメントを与える軸力と鉛直荷重の組合せに、ケース ii およびケース iv に相当する内水位を考慮した状態で、CASE ③は、さらに内水位を載荷装置の限界となる土被りの1.5倍相当まで上昇させた状態である。

CASE④, ⑤は、負の最大曲げモーメントを与える軸力と鉛直荷重の組合せに、CASE ①, ②と同様の内水位を考慮した状態である。CASE⑥は、CASE⑤の状態から、鉛直荷重のみを CASE①, ②と同等まで減少させたもので、止水確認実験の初期状態とした。以下、CASE⑥の状態から、軸力のみを減少させていき、クラウン部の軸力がゼロ (CASE ⑦), AK間ヒンジ部の軸力がゼロ (CASE⑧), さらに漏水が確認された段階 (CASE⑨) までとした。

3.4 実験装置と載荷方法

実験装置は、軸力、鉛直荷重および内圧の3種類の荷重載荷装置（図-7、図-8）で構成されている。軸力はセグメント外周にPC鋼線を巻付け、油圧ジャッキによってこれを緊張して導入し、鉛直荷重は、載荷梁を上下2本のPC鋼棒によって締付け、集中荷重として載荷した。内水圧は、供試体の内側に反力リングを設置し、その上下をゴムパッキンおよび鋼板で押え、内部に水を加えることにより載荷した⁶⁾。この内水圧載荷方法によれば、供試体内面に各種計測器を設置できる他、載荷時の止水状況を直接把握することができる。なお、載荷時に供試体リングの変形を拘束しないように、パッキンゴムは半径方向を蛇腹状の構造とし、また、押え鋼板は幅20cm程度に分割して設置した。表-5に各計測項目、目的および計測機器等の一覧を示す。計測機器のうち、セグメント内面に取付けるものについては防水タイプのものを用いた（図-9）。

荷重は、軸力⇒鉛直荷重⇒内水圧の順に載荷した。図-10に載荷方法と各載荷により発生する断面力の概念図を示す。供試体には、これらを重ね合わせた断面力が発生する。

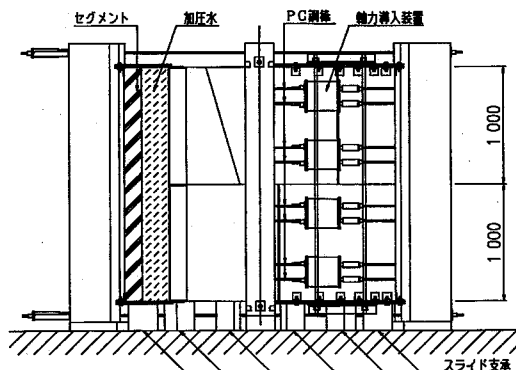
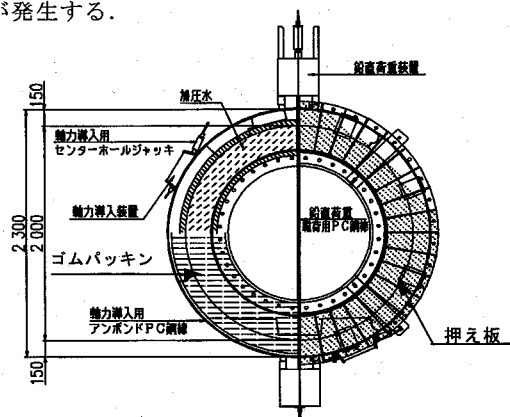


図-7 載荷装置詳細図



		ケース i	ケース ii	ケース iii	ケース iv
甲組リング	曲げモーメント (kN·m/R)				
	軸力 (kN/R)				
乙組リング	曲げモーメント (kN·m/R)				
	軸力 (kN/R)				

図-6 各試設計による断面力図

表-4 載荷ケース一覧表

載荷 CASE	導入軸力 (kN/m)	鉛直荷重 (kN/m)	内圧 (kN/m ²)	内圧による軸引張力 (kN/m)	備 考
①	86.5	27.75	17.5	18.8	試設計の正の最大曲げモーメント発生時相当
②	86.5	27.75	66.8	71.8	
③	86.5	27.75	90.0	96.8	土被りの1.5倍相当の内圧
④	124.5	34.50	17.5	18.8	試設計の負の最大曲げモーメント発生時相当
⑤	124.5	34.50	66.8	71.8	
⑥	124.5	27.75	66.8	71.8	漏水確認実験初期段階
⑦	77.5	27.75	66.8	71.8	クラウン部軸力がゼロ
⑧	63.5	27.75	66.8	71.8	AK間ヒンジ部軸力がゼロ
⑨		27.75	66.8	71.8	漏水確認

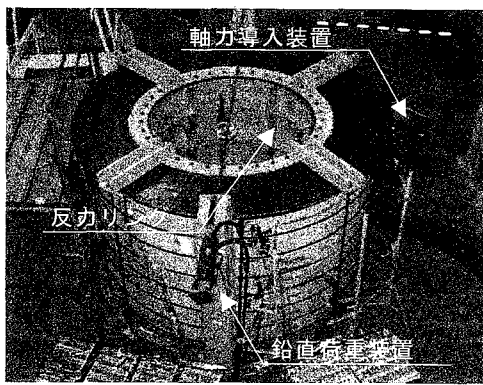


図-8 荷装置全景

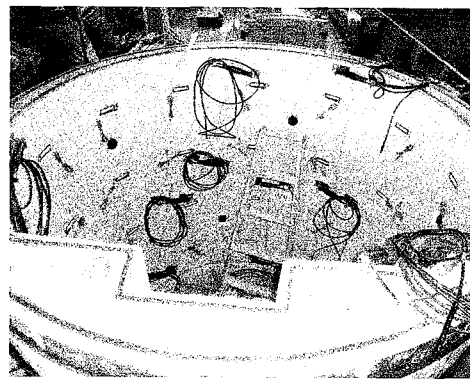


図-9 計測機器取付図 (内面)

荷方法	軸力図	曲げモーメント図

図-10 荷方法と発生断面力の概念図

3.5 実験結果と考察

(1) 荷荷重と断面力分布

表-6 に各荷荷重ケースにおける主な着目点における断面力の解析値を示す。各ケースの上段および下段は、実験時の上・下段リングに各々対応している。2リングを千鳥組で組立っているため、鉛直荷荷重位置とヒンジの位置関係が、上・下段リングでそれぞれ異なるため、発生断面力も異なっている。

表-5 計測項目一覧表

計測項目	計測目的	計測機器
軸力	導入軸力の管理と確認	ロードセル
鉛直荷重	曲げモーメント発生荷重の管理	ロードセル
内圧	内圧の管理と確認	圧力計
直径変化量	構造体の変形性能の確認	変位計
セグメント継手目開き量	セグメント継手目開き量の確認	Ω ゲージ
セグメント本体ひずみ	強度性能確認と力の伝達の把握	コンクリート・鉄筋ゲージ
止水性能	止水性能と止水限界の確認	目視
BK間継手ひずみ	継手性能の確認	鉄筋ゲージ

CASE③, CASE⑤では, 一部のヒンジ部が軸引張状態となっており, 漏水が発生した CASE⑨の荷重段階では, 全てのヒンジ部が軸引張状態であった。

(2) ヒンジ部回転性能

ヒンジ部の回転性能について, 導入軸力の大きい CASE④の曲げモーメントの実測値に対して, ヒンジ部の回転ばね定数をパラメータとした解析を行った。ここでは, B-K間剛結合部を本体と同等の曲げ剛性とし, ヒンジ部回転ばね定数を以下の2ケースとした。

ケース a : ヒンジと見なした値 ($k_{\theta}=0\text{kN}\cdot\text{m}/\text{rad}$)

ケース b : レオンハルトら⁷⁾によるコンクリート継手 (Betongelenke) に関する理論式(1)により荷重偏心率 m を 0.24 としたときの算定値 [ほぞ付きセグメントではこのときの値を設計上の最大回転ばね定数として扱う] ($k_{\theta}=27,000\text{kN}\cdot\text{m}/\text{rad}$)

$$k_{\theta}=M/\alpha=9a^2bEo/8\times m(1-2m)^2 \quad \text{式-(1)}$$

ここに, k_{θ} : 継手の回転ばね定数 ($\text{kN}\cdot\text{m}/\text{rad}$), α : 回転角 (rad), m : 荷重偏心率 $m=e/a=M/(N\cdot a)$, M : 曲げモーメント ($\text{kN}\cdot\text{m}$), N : 軸力 (kN), a : ほぞ幅 ($=0.100\text{m}$: 一次覆工厚), b : ほぞ長さ ($=1.0\text{m}$), Eo : コンクリートの実弾性係数 ($\approx 39\text{kN}/\text{mm}^2$)

図-11 に実測値と解析値の最大曲げモーメントを示す。実測値は $+M_{\text{max}}$ はケース a, $-M_{\text{max}}$ はケース b の解析値に近く, ヒンジ部回転ばね定数をゼロとした場合, 安全側の設計となるが, ヒンジ部は回転剛性を有していることも読み取れる。

また, 図-12 に荷重 CASE②および CASE⑤における鉛直荷重と上段リングの AK ヒンジ部継手回転角の関係を示す。回転角は, ヒンジ部の内外目開き量から式-(2)によって算出した。

$$\theta=2\cdot\sin^{-1}\frac{\delta i+\delta o}{2\cdot h} \quad \text{式-(2)}$$

ここに, θ : 回転角 (rad), δi : 内側目開き量 (mm),

δo : 外側目開き量 (mm), h : 桁高 (mm)

解析値 1 はヒンジ部の回転ばね定数をゼロ, 解析値 2 は $k_{\theta}=27,000\text{kN}\cdot\text{m}/\text{rad}$ とした場合を示す。荷重初期段階では回転剛性を有する挙動を示し, 最終的には回転ばね定数ゼロの解析値 1 と同程度の値を示している。また, 軸力を 86.5kN (CASE②) から 124.5kN (CASE⑤) に変化しての再荷重に対しても同一の挙動を示しており, 設計荷重時にはほとんど軸力の影響を受けず, ヒンジ部としての回転性能を有していることが分かる。

(3) リング変形量

図-13 に CASE①, ②, ③, 図-14 に CASE④, ⑤の各荷重ケースにおけるリング変形量を示す。計測値は各ケースともに解析値に比べ小さい値であるが, 0.5mm 以下の範囲であり, 試験装置などの影響を受けているためであると考えられる。変位の分布傾向は解析値とほぼ一致

表-6 各荷重ケースにおける M・N の分布

		クラウン部		A-K 間	A-I 間	B-I 間
		M	N	N	N	N
CASE②	上段	13.07	-9.0	-23.6	-24.5	-22.3
	下段	1.23	-22.1	-25.8	-21.4	-23.3
CASE③	上段	13.07	16.0	1.4	0.5	2.7
	下段	1.23	2.9	-0.8	3.6	1.7
CASE⑦	上段	13.07	0.0	-14.6	-15.5	-13.3
	下段	1.23	-13.1	-16.8	-12.4	-14.3
CASE⑧	上段	13.07	14.0	-0.6	-1.5	0.7
	下段	1.23	0.9	-2.8	1.6	-0.3
CASE⑨	上段	13.07	25.5	10.4	10.0	12.2
	下段	1.23	12.4	8.7	13.1	11.2

単位: M ($\text{kN}\cdot\text{m}$), N (kN/m)

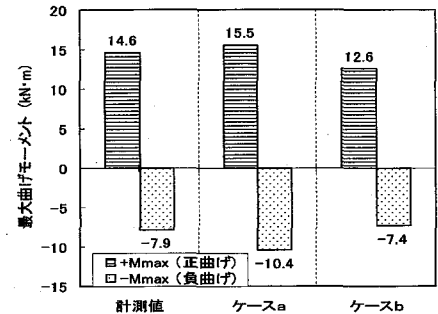


図-11 ヒンジ部の回転ばねの影響

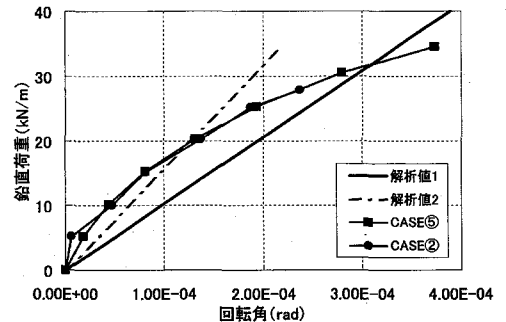


図-12 鉛直荷重と継手回転角の関係

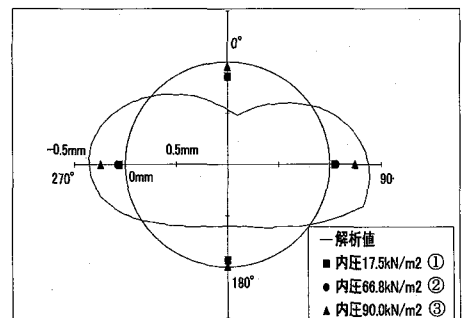


図-13 鉛直荷重と変位量の関係
(導入軸力 $86.5\text{kN}/\text{m}$)

(4) 止水性能

以上より、ヒンジの回転によるシール溝断面積の変化を考慮した止水シールの設計を行うことで、締結部材のないヒンジ部においても、十分な止水性能が確保されることが確認されたが、実際の使用状況においては、設計上、構造モデルの限界となるヒンジ部軸圧縮力状態の範囲とすることが望ましい。図-17 は、土水一体地盤における土被りと AK 間軸力との関係および内水位と AK 間軸引張力の関係を示したものである。本条件下では、10m の土被りに対して約 13.2m (GL+3.2m) の内水位まで軸圧縮力が確保され、止水性能が発揮できるものと読み取ることができる。

4.1 検討方法

漏水箇所

- 81 -

設計条件は、表-3 に示す試設計ケース i とし、荷重バランスが崩れる状態として、鉛直土水圧のみゼロとする場合と、側方土水圧のみをゼロとする場合の2ケースを想定した。

4.2 検討結果

図-18 に各曲げモーメントおよび軸力分布図を示す。図中の数値は、曲げモーメントについては正負の最大値を、軸力については各ヒンジ部の値を示している。

側方土水圧ゼロの状態のクラウン部とインバート部および鉛直土水圧ゼロの状態のスプリングライン部軸力は、殆どゼロの状態となっているが、各ヒンジ部は軸圧縮状態にあり、本条件下においてはシール材の反発力を考慮しても、3 ヒンジ構造として十分安定した状態にあると考えられる。

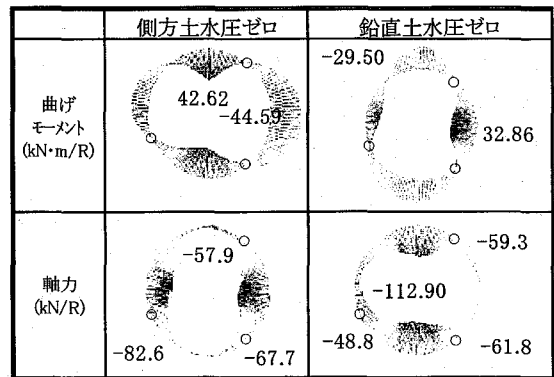


図-18 断面力分布図

5. まとめ

ヒンジ継手を有するセグメントリングの、下水道管渠としての安全性を確認する目的で、実験的検証を行った結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) ヒンジ部の回転は設計荷重時においては軸力の影響をほとんど受けることがなく、ヒンジ部の軸力が圧縮から引張に移行する荷重状態においても、3 ヒンジ静定構造物として挙動していることが確認できた。
- (2) 内水圧を検討する必要のない通常の合流式管渠を想定した場合、異常時内水圧を考慮しても、各ヒンジ継手部は軸圧縮状態にあり、リングは安定した状態にある。
- (3) 止水シール材は、ヒンジ部の回転による形状変化を考慮すれば従来の方法で設計することが可能であり、外力によるヒンジ部の軸力がゼロの状態でも、継手部の止水性が確保されている。
- (4) ヒンジ部の軸力が引張状態に移行しても設計目開きの範囲では止水性が維持され、漏水はその範囲を超えて認められた。
- (5) 近接施工等を想定した厳しい荷重状況においても、ヒンジ部は軸圧縮状態にあり、リングの安定性が確保されることが確認できた。

以上より、新しく提案した「4分割3ヒンジ構造の溝付インバート二次覆工一体型セグメント」は、本セグメントの適用を想定している主要枝線管渠に対して、高い安定性を有していることを確認した。

【謝辞】 本研究の実施に際して、コンパクトシールド工法研究会の委員をはじめとする関係各位に多くのご指導・ご助言を戴いたことに対し、感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) 前田正博, 串山宏太郎: コンパクトなシールドシステムの開発と実用化, トンネルと地下, 2001.8
- 2) 土木学会・日本下水道協会共編: シールド工事用標準セグメント, 2001.
- 3) 財団法人 先端建設技術センター: 内水圧が作用するトンネル覆工構造設計の手引き
- 4) 宇田川徳彦, 前田正博 他: 内圧を作用させたリング載荷試験時における4分割3ヒンジ構造セグメントの挙動について, 第57回土木学会年次学術講演会講演概要集, VI-041, 2002.9.
- 5) 寺田武彦, 前田正博 他: 4分割3ヒンジ構造セグメントのリング載荷試験に関する一考察, 第57回土木学会年次学術講演会講演概要集, VI-039, 2002.9.
- 6) 白石浩司, 荒川賢治 他: 内水圧対抗型ハニカムセグメント, 奥村組技術研究年報, No. 26, 2000
- 7) ほぞ付きセグメント工法研究会: ほぞ付きセグメント工法技術資料, 1995.4.
- 8) 東京都下水道局: 二次覆工一体型セグメント設計・施工指針(案), 2002.5