

アンボンドPC構造セグメントの継手曲げ剛性の評価

AN EVALUATION OF JOINT BENDING STIFFNESS ON A TUNNEL LINING SEGMENT WITH UNBONDED PRESTRESSED CONCRETE STRUCTURE

金子正士¹⁾, 松浦正典²⁾, 渡邊恵一³⁾, 杉本雅人⁴⁾, 小泉 淳⁵⁾
Masashi KANEKO, Masanori MATSUURA, Keiichi WATANABE, Masato SUGIMOTO, Atushi KOIZUMI

The authors have been studying the prestressed precast concrete segmental lining that structural features are to introduce prestress by unbonded prestressing steels to radial and circumferential directions of shield tunnel lining. This paper reports that a computation coincides with a test result by various analysis trials which consider prestressing steel friction resistance in order to evaluate joint bending stiffness of a tunnel lining segment with unbonded prestressed concrete structure.

KeyWords : shield, segment, prestressed concrete

1. はじめに

PCセグメントは、プレキャストコンクリートリングの横断面方向や縦断方向にアンボンドPC鋼より線を用いてプレストレスを導入することを構造的な特徴としている。アンボンドPC鋼より線を用いることで、①PC鋼材とシースとの間の摩擦抵抗が一般のPC鋼材に比べて1/5程度と極めて小さいため、横断面方向にプレストレスを導入する場合でもリング一周あたり一箇所の片引き緊張ですみ、緊張の作業性がよい、②地震動などによる大きな変形に対しても、継手部は復元性の高い挙動を示し破壊に至りにくい、などの利点がある。

本研究は、アンボンドPC構造セグメントを対象に継手の曲げ剛性を評価する目的で行った、継手曲げ試験の結果とその解析結果について述べるものである。

2. 従来からの設計法の課題

2.1 PCセグメントの設計法の概要¹⁾

PCセグメントの構造モデルは、トンネル横断面方向のプレストレス量によって、以下の方法に分けて考える。

①セグメントリングをフルプレストレス構造とする場合

曲げモーメントおよび軸力によるコンクリートの圧縮応力度は許容応力度以下で、かつセグメント全周にわたって引張応力度が発生しないように、プレストレスを導入する。この場合、セグメントは、剛性一様なリングとして扱える。

②セグメント本体部をPRC構造、継手部をフルプレストレス構造とする場合

セグメント継手を曲げモーメントの大きい位置を避けて設けることとし、セグメント継手部については、その位置の曲げモーメントに対し全圧縮応力状態となるように、同時にセグメント本体部については、引張応力の発生を許容してプレストレスと鉄筋の両方で曲げモーメントに対抗する状態となるように、適度なプレストレスを導入する。この場合、セグメント継手は①と同様に全圧縮応力状態となるため、剛性一様なリングとして扱える。

③セグメント継手の曲げ剛性低下を許容する場合

セグメント横断面方向の導入プレストレスをさらに減らして、組立精度や止水性の確保のため、組立時の自重

-
- 1) 正会員 三井住友建設株式会社 土木事業本部P&PCプロジェクト室
 - 2) 鹿島建設株式会社 土木設計本部プロジェクト設計部
 - 3) 東亜建設工業株式会社 土木本部設計部
 - 4) 正会員 日本国土開発株式会社 施工本部土木部
 - 5) 正会員 工博 早稲田大学理工学部教授

による断面力に対し、全圧縮応力状態となる程度のプレストレスを導入する。この場合、地山荷重による断面力に対しては、セグメント継手面は無応力域が発生し、セグメント継手の曲げ剛性は、本体部に比べて低下する。この際の断面力の計算は、継手の剛性低下を評価する必要があるため、修正慣用計算法やはりばねモデル計算法を用いることになる。

なお、これらの使い分けは、トンネルの用途、地盤条件、許容変形量、経済性等を勘案して選定している。

2.2 従来からの設計法の課題と本研究の目的

本研究は、セグメント継手の曲げ剛性低下を許容する場合(2.1③)を対象とする。これまでPCセグメントでは、はりばねモデル計算法により断面力を算定する場合のセグメント継手の回転ばね定数は、F.Leonhardt の Betongelenke²⁾に基づいて、コンクリートの突き合わせ継手として、継手の幾何学的関係から回転ばね定数を算出していた。この際、導入プレストレスは、外力による発生軸力に足し合わせることで評価していた。しかし、継手曲げ試験等の実験値と比較すると、計算値のほうが曲げ剛性が小さめの値となる傾向があった。これは、従来の設計ではPC鋼材の存在が初期軸力としてしか評価されていないのに対し、実際は、アンボンド構造であってもPC鋼材が存在するため、少なからず引張部材として機能しているためと考えられる。

本研究は、二次元FEM解析およびファイバーモデルを用いた非線形骨組解析³⁾によって、アンボンドPC構造セグメントの継手曲げ剛性を適正に評価し、その結果を反映した継手モデルを提案することを目的とした。

3. 継手曲げ試験の結果

PCセグメントはこれまで4件の実施工に使用されており、工事ごとにセグメント継手の曲げ試験を実施している。今回の解析では、その内3件の工事で実施した4例の試験データを対象とした。継手曲げ試験の概要を表-1にまとめる。(表中のA-1、A-2は、同一工事において実施したもので、導入緊張力のみを変更している。)

セグメント継手の曲げ試験では、供試体セグメント(A型セグメント)2ピースを水平にならべてPC鋼材を挿入しアーチ脚部で緊張定着して所定のプレストレスを導入後、鉛直方向にセットしている。また、脚部には水平方向にローラー支承を設けている。載荷は2点集中載荷とした。セグメント継手の曲げ試験の実施状況(試験A-1時)を写真-1に示す。

表-1 セグメント継手の曲げ試験概要

試験	単位	A-1	A-2	B	C
外径	mm	2950	2950	3550	2750
内径	mm	2650	2650	3250	2350
桁高	mm	150	150	150	200
幅	mm	1000	1000	1000	1000
継手形状	—	コンクリート面(フラット)の突き合わせ			
分割角度(2ピース)	°	168	168	174	172
曲げスパン	mm	2635	2635	3246	2344
導入緊張力	kN	190	160	169	178
載荷点間隔	mm	900	900	900	600
載荷治具重量	kN	2.5	2.5	2.5	1.3
自重曲げモーメント	kN・m	3.56	3.56	7.85	5.8
載荷重単位モーメント	kN・m	0.434	0.434	0.587	0.436

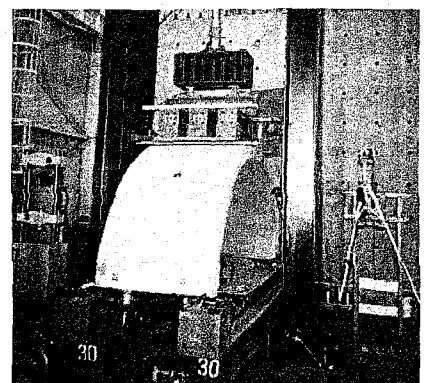


写真-1 セグメント継手の曲げ試験状況
(試験A-1時)

4. 解析

前述のセグメント継手の曲げ試験結果を解析によって確認する目的でFEM解析とファイバーモデルを用いた非線形骨組み解析を行った。このうちFEM解析は、表-1中の試験A-1を対象として行った。また、ファイバーモデル解析は、4つの試験全てを対象として行った。

4.1 FEM解析

(1) 解析モデル

解析は2次元平面問題として行った。コンクリートはひび割れ等の破壊を考慮した弾塑性部材とし、奥行き1mの試験体に対し、PC鋼材位置を考慮して1/2の奥行き幅(0.5m)の平面応力要素とした。セグメントのモデル化は着目点である継手部を中心にメッシュを分割した。このとき、荷重が載荷されるとセグ

メントは変形を伴い、アーチは開いていく。この際、セグメント継手はプレストレスによる軸力のみで結合されているため、アーチが開こうとすれば、継手部は回転する。この挙動を再現させるため、アーチ頂部の継手部には微小な隙間をあけ、そこにすべりと剥離を表現できる界面要素を設置した。また、PC 鋼材(トラス要素)とセグメント本体(平面応力要素)は付着していないアンボンド構造のため、トラス要素と平面応力要素の間に半径方向に剛なばね部材を設け、すべりに対しては無抵抗、剥離方向(すべりに垂直な方向)に対しては変位を伝えるように設定した。さらに、PC 鋼材とシーす間の摩擦抵抗を再現するため、トラス要素と平面応力要素の間のすべり方向(円周方向)にも非線形のばね部材を設けた。解析ツールは汎用 FEM 解析コード"DIANA"を用いた。

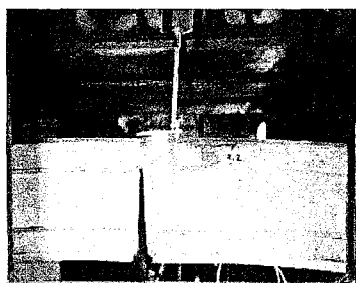


写真-2 セグメント継手の接合面
(試験 A-1 時)

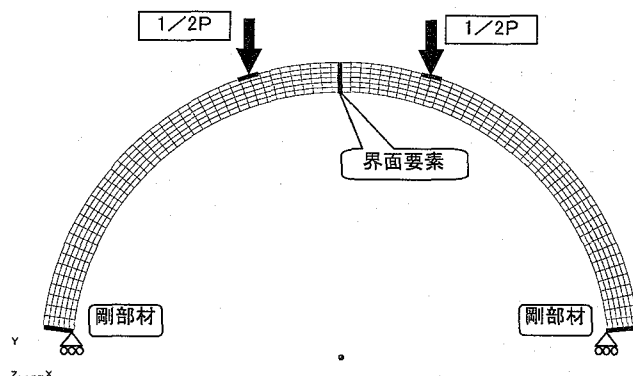


図-1 セグメント (平面応力要素) のモデル化

(2) モデル化の条件

①モデルの要素設定

モデル内で使用する要素と材料の特性値を表-2 のように設定した。

表-2 使用要素と材料の特性値

材料	材料特性	要素モデル	ヤング率 E	ポアソン比 ν	単位体積重量	断面積 (奥行き)
			(N/mm^2)		(N/mm^3)	(mm^2)(mm)
コンクリート	非線形	平面応力要素	3.30×10^4	0.17	26.0×10^{-6}	(500.0)
鉄 筋	非線形	埋込み鉄筋要素	2.10×10^5	0.30	78.5×10^{-6}	506.8
PC鋼材	非線形	トラス要素	1.91×10^5	0.30	78.5×10^{-6}	98.71
継手部	非線形	線分界面要素	法線方向: 圧縮は伝達, 引張は抵抗しない (No Tension モデル) せん断方向: せん断剛性係数 $0.01(\text{N}/\text{mm}^2)$			

②非線形材料特性

コンクリートの圧縮特性は、2002 年制定コンクリート標準示方書 [構造性能照査編] (土木学会) を参照した。ここで、2 次曲線の初期勾配は用いたヤング率 $3.30 \times 10^4 \text{N}/\text{mm}^2$ とは異なるため、弾性勾配と 2 次曲線との交点 (894 μ) までは線形剛性とし、交点以降は 2 次曲線に従うとした。また、コンクリートの引張特性には、分散ひび割れモデルを用いた。コンクリートの応力-ひずみ関係 (圧縮を正で表示) を図-2 に、材料データを表-3 に示す。

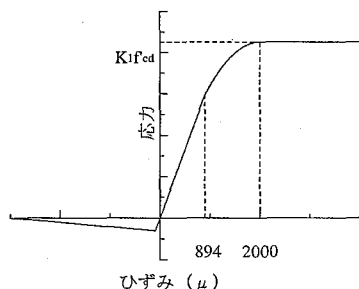


図-2 コンクリートの応力-ひずみ曲線

表-3 材料データ (コンクリート)

材料	ヤング率 $E(\text{N}/\text{mm}^2)$	設計基準強度 $f'_{ck}(\text{N}/\text{mm}^2)$	圧縮強度 $k_1 f'_{cd}(\text{N}/\text{mm}^2)$	引張強度 $f_t(\text{N}/\text{mm}^2)$
コンクリート	3.30×10^4	50	42.5	3.122

また、鉄筋、PC鋼材の応力－ひずみ関係を図-3、4に、材料データを表-4に示す。

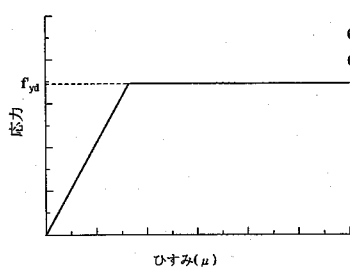


図-3 鉄筋の応力－ひずみ曲線

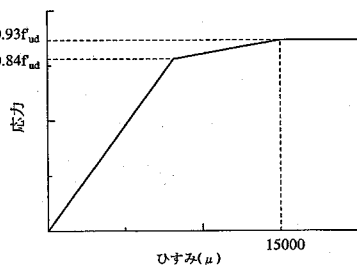


図-4 PC鋼材の応力－ひずみ曲線

表-4 材料データ(鉄筋・PC鋼材)

材料	ヤング率 E (N/mm ²)	降伏強度 f _{yd} (N/mm ²)	終局強度 f _{ud} (N/mm ²)
鉄筋	2.10×10 ⁵	345	—
PC鋼材	1.91×10 ⁵	—	1860

③拘束条件

実験装置と同様に、アーチ内側の端部に支点を設け、水平方向へ自由に可動するものとする。拘束方法は、アーチ下端の節点を剛部材で結ぶことによる平面保持を行い、内側の1点を鉛直方向に拘束した。ただし、FEM解析において、モデルを水平方向に全く支持しない場合、構造上不安定となるため、アーチ上端の1点を水平方向に對して固定とした。

④荷重条件

本解析で考慮される荷重は、自重、プレストレス(PC鋼材－アンボンド)、ジャッキによる載荷重である。プレストレスは初期応力としてPC鋼材(トラス要素)に作用させ、ジャッキによる載荷重は計画破壊荷重を目指し漸増させるものとした。

(3)解析ケース

PC鋼材とセグメント間の摩擦抵抗の大きさに着目して、表-6の3ケースとした。

表-5 荷重条件

荷重ケース	荷重強度	備 考
自 重	3.910(N/mm)	鉛直下向きに 単位体積重量分を載荷
プレストレス	9.620×10 ² (N/mm ²)	PC鋼材に応力として載荷
載荷重	5.000×10 ⁴ (N)	漸増載荷

表-6 解析ケース

ケース No.	摩擦抵抗	材料特性
1	なし	非線形
2	すべり方向ばね小	非線形
3	すべり方向ばね大	非線形

(4)すべり方向ばねの設定⁴⁾

載荷が進んでセグメント継手に目開きが生じると、PC鋼材は目開き分伸びて張力が増加する。この増加張力の分布形状は、初期張力の導入形態によって異なると考えられる。実際の緊張作業においては、2ピースを片側1箇所から緊張した場合、初期張力は片勾配となる。また、両側から緊張した場合、中間部が最小となり、谷型の分布となる。さらに、PC鋼材定着時のセット量(定着時の引き込み量)による影響もあり、初期張力の分布形態は複雑となる。このため、本解析では、初期張力の分布を以下の3種類にパターン化して、目開き発生による張力の影響範囲と張力の増加量との関係を計算し、すべり方向ばねを設定した。

①すべり方向ばねなし(ケース1)

初期張力の分布が継手位置で最大となり、その分布勾配が目開き時の摩擦と同じと考えると、継手目開きによる張力の増加は、PC鋼材全長(L)で発生することになり、摩擦がない場合と同じとなる。

②すべり方向ばね小(ケース2)

①と③の中間の状態として、セグメントに初期張力(P₀)が均等に導入されているものとし、継手目開きによる張力の増加と摩擦抵抗とのつり合いを考える。

$$\Delta P = (\mu \cdot \Delta \alpha + \lambda) \cdot P_0 \cdot L1$$

$$\Delta P \cdot L1 / 2 = \Delta S \cdot E_p \cdot A_p$$

これより張力の影響範囲(L1)は右記となる。

$$L1 = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta S \cdot E_p \cdot A_p}{(\mu \cdot \Delta \alpha + \lambda) \cdot P_0}}$$

また、単位長あたりの張力の増分（ばね抵抗値）は、
 $\Delta P / L1 = (\mu \cdot \Delta \alpha + \lambda) \cdot P_0$ となる。

③すべり方向ばね大（ケース3）

初期張力の分布が継手位置で最小となり、その分布勾配が目開き時の摩擦と同じと考える。②と同様に継手の目開きによる張力の増加と摩擦抵抗とのつり合いを考える。

$$\Delta P = 2 \cdot (\mu \cdot \Delta \alpha + \lambda) \cdot P_0 \cdot L1$$

$$\Delta P \cdot L1 / 2 = \Delta S \cdot E_p \cdot A_p$$

これより張力の影響範囲(L1)は以下となる。

$$L1 = \sqrt{\frac{\Delta S \cdot E_p \cdot A_p}{(\mu \cdot \Delta \alpha + \lambda) \cdot P_0}}$$

また、単位長あたりの張力の増分（ばね抵抗値）は、
 $\Delta P / L1 = 2 \cdot (\mu \cdot \Delta \alpha + \lambda) \cdot P_0$ となる。

ここで

- ΔS : 継手の目開きによるPC鋼材の伸び量(m)
- ΔP : PC鋼材の張力の増加量(kN)
- P_0 : PC鋼材の初期張力(kN)
- μ : 角変化1ラジアンあたりの摩擦係数(1/rad)
- $\Delta \alpha$: PC鋼材1mあたりの角変化(rad/m)
- λ : PC鋼材の長さ1mあたりの摩擦係数(1/m)
- L : PC鋼材の長さ(m)
- $L1$: 影響範囲(m)
- E_p : PC鋼材のヤング係数(kN/m²)
- A_p : PC鋼材の断面積(m²)

図-6に試験A-1時の計算結果を示す。ここで、PC鋼材の初期張力 $P_0=94.5$ (kN)、PC鋼材1mあたりの角変化 $\Delta \alpha=0.714$ (rad/m)とし、PC鋼材の摩擦係数は、アンボンドPC鋼より線で一般的に用いられている値として、 $\mu=0.06$ (1/rad)、 $\lambda=0.002$ (1/m)とした。すべり方向ばねは、単位長あたりのばね抵抗値で打ち切りとなる、バイリニアの非線形ばねとして設定される。

4.2 ファイバーモデルを用いた非線形骨組解析

(1)概要

ファイバーモデルを用いた非線形骨組解析は、基本的には変位法を用いた2次元フレーム解析であり、解析作業が比較的容易であるが、断面にファイバーモデルを用いることで、個々の材料要素の非線形特性を入力し、荷重状態に応じた断面の剛性や図心軸の移動を考慮できるため、軸力の変動を含めた断面剛性の評価ができる。本検討では、試験A-1について前項のFEM解析との整合性を確認したうえで、ほかの3つの試験についても解析を行った。解析には非線形解析プログラム(Say-nap)³⁾を用いた。

(2)解析モデル

①モデル

セグメント断面は、15~20分割したコンクリートファイバーと2段の鉄筋ファイバーとし、セグメント継手位置を無筋とする。PC鋼材は、両端部をセグメントに固定し、中間部は部材軸方向を可動としてダミー部材によりセグメントに固定することにより、アンボンドPC構造を再現する。また、PC鋼材の摩擦抵抗は、FEM解析と同様にダミー部材とPC鋼材との間に4.1(4)で設定した非線形ばね部材を配置した。拘束条件は、実験装置と同様に、アーチ端部に支点を設け、水平方向へ自由に可動するものとした。図-7に解析モデル図を示す。

②荷重条件、材料特性

本解析において考慮される荷重の載荷手順および、コンクリート、PC鋼材、鉄筋の非線形材料特性は、FEM解析と同じとした。

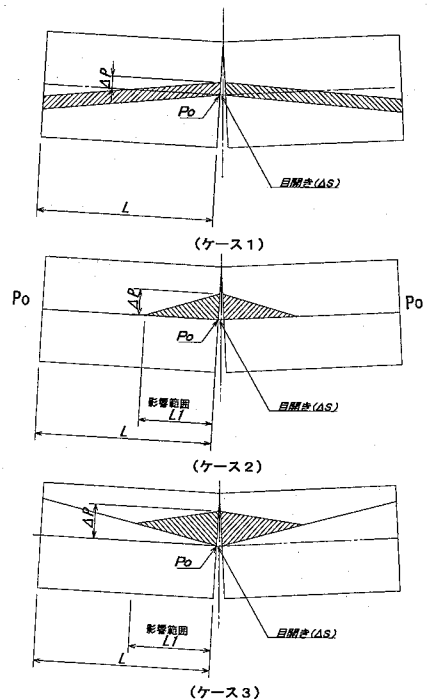


図-5 継手位置張力の分布形状

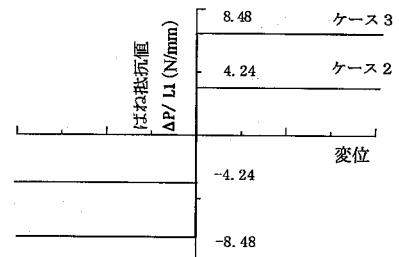


図-6 すべり方向ばねの非線形ばね特性
(試験A-1)

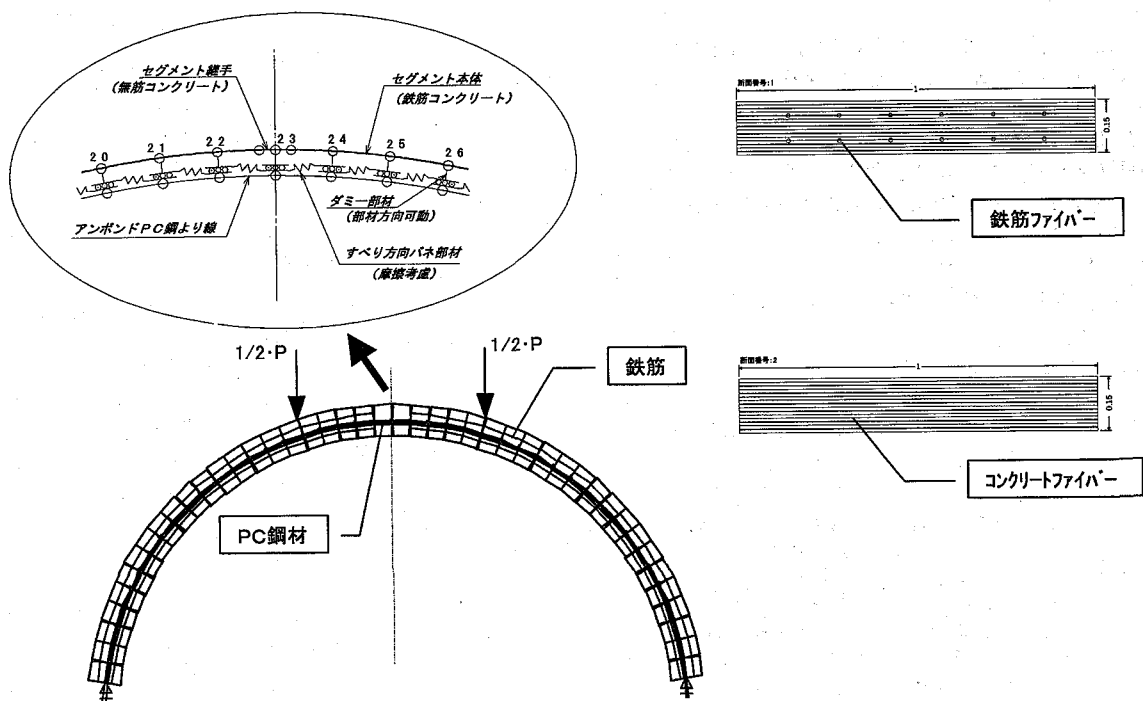


図-7 解析モデル

5. 解析結果

(1) FEM解析結果

載荷重 26.0kN 時の試験 A-1 (ケース 3) の最大主応力図を図-8 に示す。変形形状は、継手部のみが回転し継手内側の端部で 0.49mm の目開きを生じている。最大主応力は、本体内側の荷重点付近で最大となるが、 2N/mm^2 前後とひび割れ発生には至らない。また、最小主応力は継手位置の圧縮側で最小となる。

載荷重 26.0kN 時のケース 2 とケース 3 の PC 鋼材応力コンター図を図-9, 10 にそれぞれ示す。継手位置の目開きに対応した継手付近の PC 鋼材応力の変動範囲は、ケース 2 で片側 1.3m、ケース 3 で 0.75m となっており、4.1(4)による計算値とほぼ合致する。

また、載荷重が同じため、継手位置の応力値は両ケースとも 1014N/mm^2 と同じであるが、影響範囲が異なるため応力に応じた伸び量 (目開き量) が異なることがわかる。以上より、本解析の全体挙動は継手曲げ試験を再現できていることがわかる。

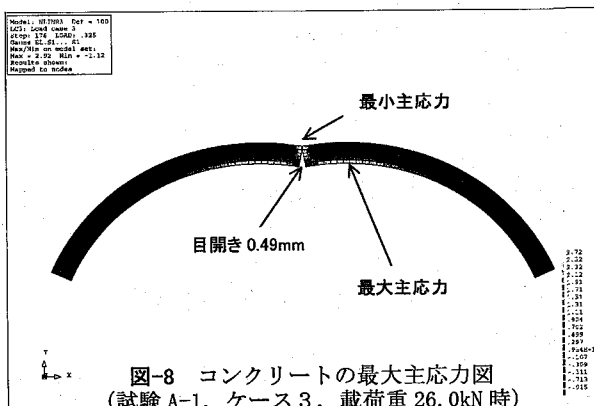


図-8 コンクリートの最大主応力図
(試験 A-1, ケース 3, 載荷重 26.0kN 時)

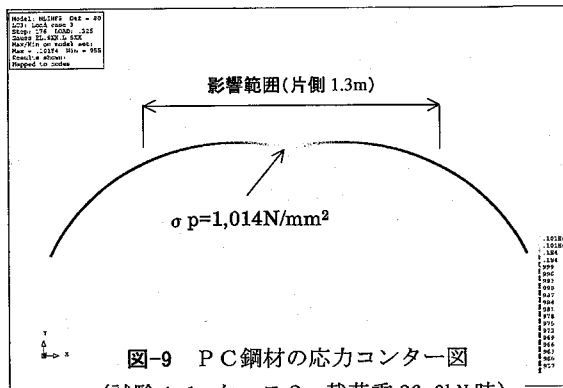


図-9 PC鋼材の応力コンター図
(試験 A-1, ケース 2, 載荷重 26.0kN 時)

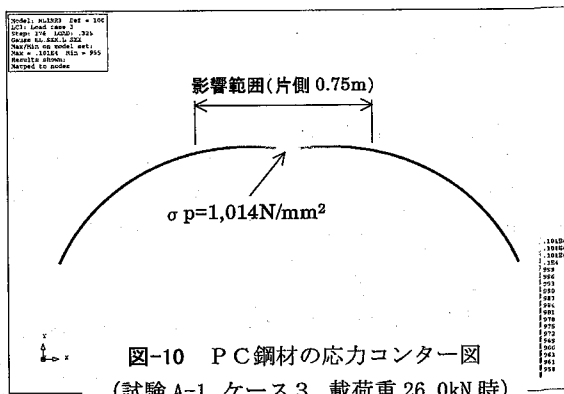


図-10 PC鋼材の応力コンター図
(試験 A-1, ケース 3, 載荷重 26.0kN 時)

(2) 実験値とFEM解析および、ファイバーモデルによる解析結果との比較

載荷重と鉛直変位の関係は、載荷重 25kN までの初期勾配は、各ケースともよく整合している。これは、継手の目開き前のため、すべり方向ばね定数の違いが影響しないためと考えられる。載荷が進み継手の目開きを生じた後は、想定どおりケース 3～1 の順に鉛直変位が小さくなっていく。また、実験値とは、ケース 3 が近接する。次に、FEM による解析値とファイバーモデルによる解析値を比べると、ほぼ近接しており、解析手法に差がないことが確認できた (図-11)。

載荷重と P C 鋼材張力の関係は、継手部においては 25kN 付近から増加しており、その傾きは、FEM の全ケースとファイバーモデルによるものともほぼ一致している。これは、載荷重に対応した継手位置の発生曲げモーメントが各ケースとも同じであることを示している。一方、定着部 (脚部) の張力は 30kN 付近から増加しており、継手の目開きが進行して張力の影響範囲が定着部位置まで及んだ時点から増加に転じている。なお、実験値は、定着部のみロードセルにより計測されており、その値は、ケース 3 と整合している (図-12)。

張力と継手回転角の関係を図-13 に示す。グラフは、継手部と定着部の各張力が、P C 鋼材の摩擦のないケース 1 をはさんで分布する。継手が回転する初期においては、すべり方向ばねが大きいほど、継手部の張力の増加割合が大きく、途中から定着部とほぼ同じ勾配になっている。これは、継手目開きの影響範囲が定着部まで及んだことを示している。また、4.1(4) によった計算値は、回転角が小さい範囲で解析値とよく整合しており、P C 鋼材の摩擦抵抗がほぼ適正にモデル化されていることがわかる。

(3) F. Leonhardt の Betongelenke による計算値との比較

図-13 に示した、各継手回転角に対応した継手部の張力の計算値を軸力として用いて、F. Leonhardt の Betongelenke の実験式により、各ケースの曲げモーメントと継手回転角の関係を計算し、実験値および FEM による解析値と比較した (図-14)。各ケースの計算値は、実験値および FEM による解析値に比べて継手の回転角に対応した曲げモーメントが小さめの結果となった。しかし、軸力を初期張力に固定して計算した結果 (従来の設計法) に比べて、継手の目開き後の勾配が実験値に近接している。以上より、アンボンド P C 構造のセグメント継手の曲げ剛性 (回転ばね定数) を F. Leonhardt の Betongelenke により求める場合、P C 鋼材の摩擦の影響を考慮した、継手部の張力の増加量を 4.1(4) により計算し、それを見込んだ軸力に対応して計算すれば実験値との整合がよいことがわかる。

(4) すべり方向ばね値の評価

P C 鋼材の定着部張力は、継手の回転が進み張力の影響範囲が定着部に達した時点から増加に転じるため、

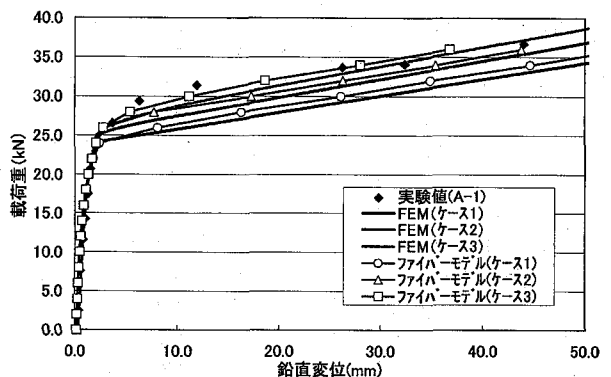


図-11 載荷重と鉛直変位 (試験 A-1)

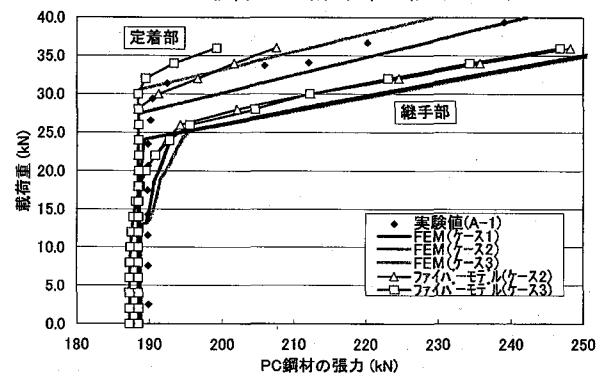


図-12 載荷重と P C 鋼材の張力 (試験 A-1)

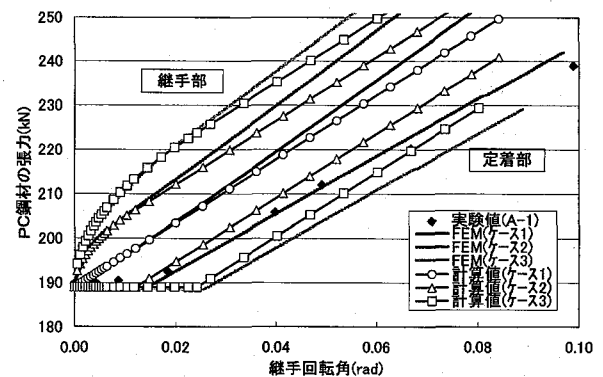


図-13 P C 鋼材の張力と継手回転角 (試験 A-1)

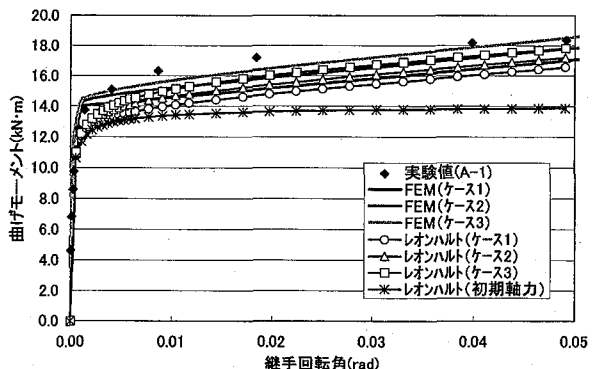


図-14 曲げモーメントと継手回転角 (試験 A-1)

定着部張力と継手回転角の関係を実験値と比較することで、すべり方向ばね値の妥当性を評価できる。図-15に表-1に示した4試験データについて、4.1(4)により計算した定着部張力と継手回転角の関係を実験値とともに示す。これより、ばらつきはあるものの、実験値は計算値のケース2～3の間にあり、すべり方向ばね値の大きさは妥当なものといえる。

次に、4試験データについて、ファイバーモデルを用いた解析値およびF.LeonhardtのBetongelenkeによる計算値(前項の方法で張力の増加を考慮)との比較を行った(図-16, 17)。ファイバーモデルを用いた解析値は、Cデータの初期勾配がやや大きめであることを除いて各試験データともケース3がよく整合している。また、F.LeonhardtのBetongelenkeによる計算値は、全体にやや実験値よりも小さめであるが同様の傾向を示しており、試験データごとのばらつきは少ない。

6. まとめ

アンボンドPC構造セグメントの継手曲げ試験結果を、解析によって確認する目的で二次元FEM解析とファイバーモデルを用いた非線形骨組解析を行った結果、以下の知見を得た。

- ① PC鋼材とシースとの間の摩擦抵抗を非線形のばね部材でモデル化することにより、アンボンドPC構造のセグメント継手の回転挙動を実験値に近い形で再現できた。
- ② 本解析においては、この際のばね定数は、初期張力の分布を継手位置で最小にパターン化したケース(ケース3)が実験結果との整合性がよかった。
- ③ 二次元FEM解析とファイバーモデルを用いた非線形骨組解析は、ほぼ同様に実験結果を説明できた。今後、このような検討においては、解析作業が容易なファイバーモデルは、有力なツールである。
- ④ アンボンドPC構造のセグメント継手の曲げ剛性をF.LeonhardtのBetongelenkeにより計算する場合、継手部の張力の増加を見込んだ軸力に対応して計算すればよく、また、その張力の増加量は、4.1(4)に示した摩擦の影響を考慮して計算すれば整合性がよい。
- ⑤ 4例の試験データについて解析値と実験値とを比較した結果、試験固有のばらつきは少なく、再現性が期待できた。

7. おわりに

PCセグメントは、高い内水圧が作用する場合、高い耐震性能が求められる場合、地盤条件が悪く曲げモーメントが卓越する場合など、厳しい条件下のシールドトンネルの覆工に対して適性が高いと考えられる。今後、それらに対応した合理的な設計手法を模索していきたいと考えている。

参考文献

- 1) (財)先端建設技術センター, 先端建設技術・技術審査証明報告書「P&PCセグメント工法」, 1999
- 2) 林, 斎藤, 小泉: ガス導管シールドトンネル用セグメントの力学実験と解析について, 土木学会論文集 No. 535/III-34, pp. 43-56, 1996. 3
- 3) 玉置, 新井, 板井, 山崎: 非線形解析プログラムの外ケーブル構造への適用と今後の標準化について, プレストレストコンクリート技術協会 第5回論文集, 1995. 10
- 4) 住友電工スチールワイヤー(株), シングルストランド工法設計・施工基準

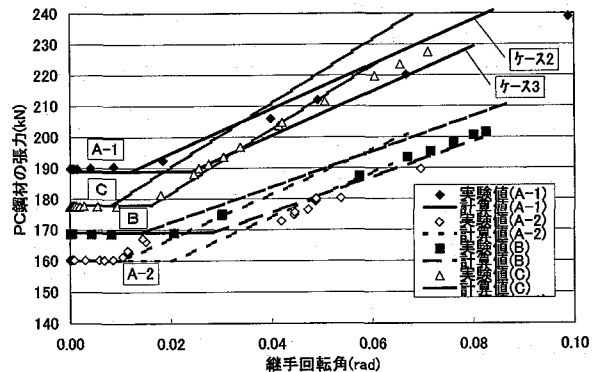


図-15 定着部PC鋼材の張力と継手回転角 (4試験データ)

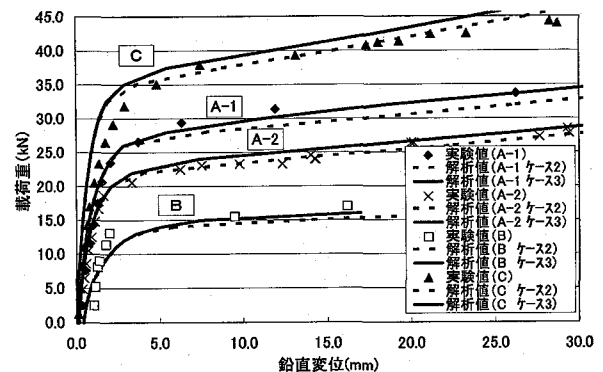


図-16 載荷重と鉛直変位 (4試験データ)

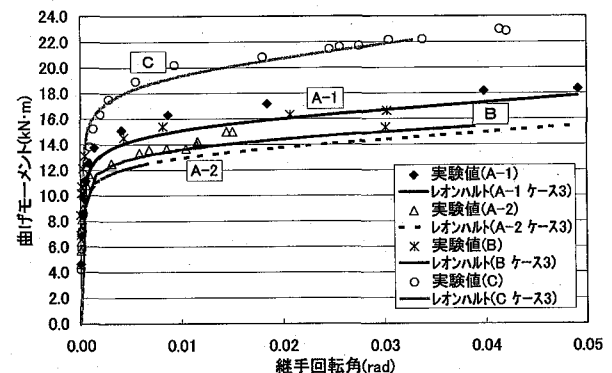


図-17 曲げモーメントと継手回転角 (4試験データ)