

嵌合注入方式合成セグメントのセグメント継手の力学挙動

MECHANICAL BEHAVIOR OF NEW MECHANICAL JOINT

三宅正人* 広沢規行* 佐野陽一** 横山務**

Masato MIYAKE, Noriyuki HIROSAWA, Youich SANO and Tutom YOKOYAMAO

In the shield tunnel for the artificial underground river, inner pressure in addition to both earth and water pressure results in the large tension in the main lining members and the joints. "A new composite segment with new mechanical joint system" was developed as the primary lining member (segment) suitable for the erection of shield tunnel for the artificial underground river.

In this paper, 3-dimensional F.E.M. analysis, tension tests of the joint models and bending tests of full size joints are performed as the basic research of the joint between two segments. The result of the mechanical behavior of the joint are reported in comparison with the proposed design model.

[Key word : shield tunnel, composite segment, mechanical joint]

1. はじめに

近年、大都市を流れる河川流域部の都市化が進み、流域の保水・遊水機能の低下による豪雨時の浸水被害が増大する傾向にあり、このような都市型水害対策としてシールド工法による地下貯留方式地下河川工事が脚光を浴びている状況にある。地下河川用のシールドトンネルは、土水圧に加えトンネル内流水の内水圧により覆工本体および継手に引張力が作用するという特徴を有しており、当社はこのような地下河川シールドトンネル建設に適した一次覆工部材(セグメント)として「嵌合注入方式合成セグメント」の開発を推進してきた。

本報は、本セグメントにおけるセグメント継手に関する基礎研究として、3次元数値解析、継手要素実験および実大継手曲げ実験を実施し、継手の力学挙動を明らかにするとともに設計モデルとの比較検討を行ったので、その結果について報告するものである。

2. 「嵌合注入方式合成セグメント」の特徴

2.1 セグメント本体の特徴

本セグメントの特徴を以下に記す。写真-1に示す本セグメントは、鋼コンクリート合成セグメントであることから従来のRCセグメントに比較して覆工厚を薄くすることが可能であり、セグメント本体のみならずシールドマシン外径の縮小、掘削・排土量の低減が可能でシールド工事における

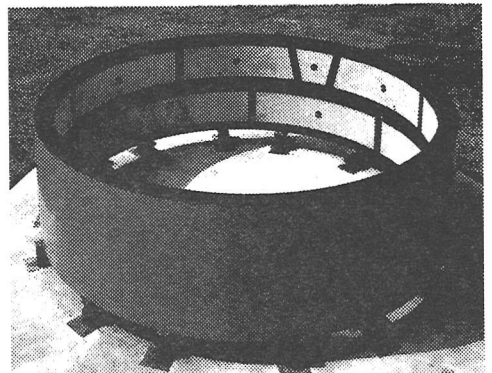


写真-1 嵌合注入方式合成セグメント

* 正会員 新日本製鐵(株)技術開発本部 鋼構造研究開発センター

** 正会員 新日本製鐵(株)建材開発技術部

トータルコストを低く抑えることができる。また、鋼枠フランジに特殊形鋼(写真-2)を用いた鋼枠嵌合方式継手を採用することによりリング全周にわたって鋼枠相互のかみ合い効果(図-1)によりリングせん断力を強化するとともに高い真円性を確保できるとともに継手には一切ボルトを使用していないため自動組立に最適で施工時間の短縮が図ることが可能である。さらに、図-1に示すように特殊形鋼フランジに設けた止水材と空隙部に充填した継手モルタルにより高い止水性が確保されている。

2.2 セグメント継手の特徴

本セグメントのセグメント継手には写真-3,4および図-2に示す「厚鋼板雌・鋼雄挿入方式」継手(以下、雄雌継手)を使用し、トンネル内流水の内水圧により継手部に作用する引張力に対して効果的に抵抗している。セグメント継手に作用する引張力は、雄型と雌型の接触面を介して隣接するセグメントに伝達される機構となっており、従来のボルト継手ではボルトを通じて直線的に荷重伝達されるのに対し、本セグメント継手は荷重が雄型の形状により屈曲した状態で伝達される構造となっている。また、継手部に作用する圧縮力の伝達は継手板フランジ、充填モルタル、雄雌継手の協働作用により伝達される機構をとっている。

本報告では、この雄雌継手の力学的挙動に着目した検討を行っている。

3. セグメント継手の要素実験

3.1 供試体と実験ケース

要素実験では、セグメント継手における雄雌継手の力学挙動を明らかにすることを目的とし、図-3および図-4に代表例を示す試験体により引張試験を実施した。試験水準および検討項目を表-1に示す。Case-1を基準の試験体とし、Case-2の試験体により鋼枠フランジの効果、Case-3により雄型、雌型の接触点の偏心量の影響、Case-4によりセグメント本体に打設するコンクリートおよび継手部の空隙に充填するモルタルの影響を評価するものである。

試験体への引張力の載荷は、縦型の引張試験機を用いて試験体両端取付けた治具により荷重制御で行った。

3.3 実験結果

1) 最大耐力

図-5に試験に継手部の荷重～目開き量の関係を示す。また、表-2に最大耐力およびその時の目開き量を示す。Case-2以外の試験体では、雄型と継手板とのすみ肉溶接部の上部が破断して最大耐力が決した。この結果から雄型と継手板のすみ肉溶接部の耐力は100t程度であると考えられる。また、Case-3では雌型と雄型の接触点を他の試験体に比べ20mm上方にずらしたことにより、すみ肉溶接部に作用する応力が増大したため最大耐力が80tと若干低い値になったと考えられる。Case-2では、セグメントの鋼枠フランジに相当する部分を無くしたため継手板が曲げ降伏した時点で最大耐力を示した。

2) 継手の剛性

図-5からは、鋼枠に配置されたフランジのみならずセグメント本体に打設されるコンクリートおよび継手部の空隙に充填されるモルタルが、継手の引張剛性を向上させることが明らかとなった。また、図-6にCase-1,4の試験体において雄型および雌型で測定されたひずみの変化を示した。図-7にはこの時のひずみの測定位置を示しているが、雄型では図



写真-2 特殊形鋼

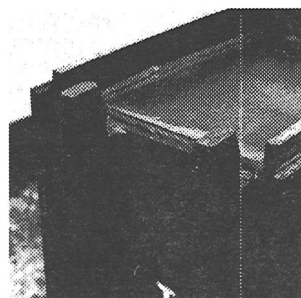


写真-3 雄型

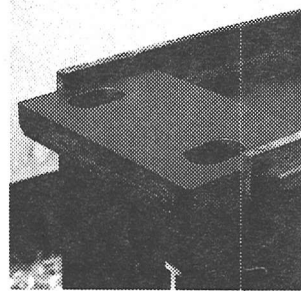


写真-4 雌型

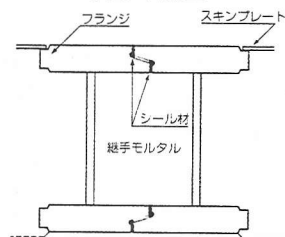


図-1 嵌合方式継手

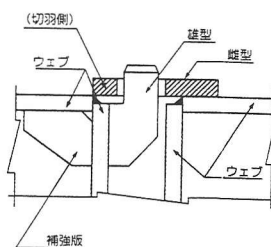


図-2 雄雌継手

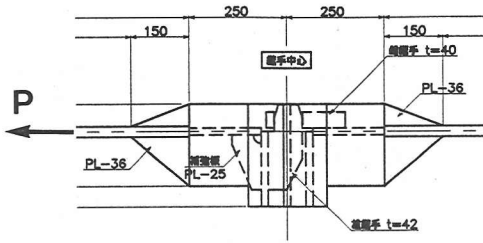


図-3 要素実験の試験体（基準）

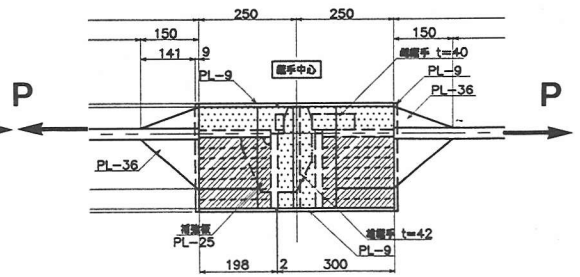


図-4 要素実験の試験体（コンクリート打設）

表-1 要素実験の水準

試験体名称	試験体			目的
	フランジ	偏心	モルタル	
Case-1	○	-	-	基本仕様
Case-2	-	-	-	フランジの影響
Case-3	○	○	-	偏心量の違いによる影響
Case-4	○	-	○	継手モルタルの影響

表-2 最大耐力

試験体名称	降伏体力	目開き量
Case-1	100t	4.2mm
Case-2	100t	5.6mm
Case-3	80t	3.9mm
Case-4	100t	1.1mm

示の1点、雌型では図示の位置の表裏計8点の計測値の平均値である。図-7から明らかなように、継手部空隙に充填したモルタルの拘束効果により雄型および雌型の塑性変形が抑制されていることが分かる。

3.4 考 察

図-8に要素試験に先立って実施した雄型の3次元数値解析(弾性解析)の結果を示す。図示の解析結果は図の上下方向の発生応力で、色の濃い部分の応力度が高いことを示している。事前に実施した数値解析の結果からは、①雄継手コーナー部の応力集中、②雄型と継手板の接続部上部の応力集中、③雄型の下部先端における圧縮領域の存在などが示された。要素実験の結果からもこれらの応力集中部の存在は確認されたが、実際には応力度が降伏値を越えると塑性域が拡大することにより応力の再配分が行われるため継手が十分な耐力および伸び性能を有していることも同時に確認している。

この雄雌継手の挙動は、図-9に示すラーメン構造および片持梁として財団法人／先端建設技術センターによりモデル化されている。このモデルにならない雄型および雌型を固定の支持条件として求めた継手部の荷重～目開き量関係を図-5中に実線として示した。実験値と解析値は良好な対応を示しており、適切なモデル化がなされていることが分かる。

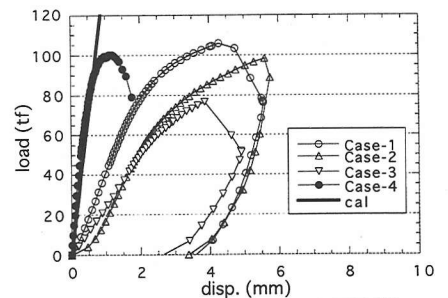


図-5 荷重～目開き量関係

4. 実大継手曲げ実験

4.1 試験体および実験方法

実大継手曲げ実験は地下河川シールドトンネルに対して作用する各種の荷重条件下における継手部の回転剛性および引張軸力載荷時の終局の曲げ耐力を明らかにすることを目的として実施した。図-10に試験体の平面図および断面図を、図-11に載荷状況の側面図を示す。試験体への載荷は、まず水平方向の軸力載荷用ジャッキにより所定の軸力を作用させ、次に軸力を保持しつつ鉛直方向のジャッキにより4点載荷により曲げを作用させている。

試験体に使用したコンクリートの強度は材令28日において798kgf/cm²、モルタルの強度は材令28日において545kgf/cm²であった。なお、載荷用

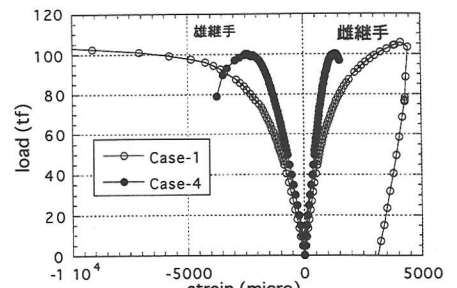


図-6 荷重～継手のひずみ関係

表-3 実大継手曲げ実験の水準

荷重ケース名	導入軸力 (tf)	備考
Case-1	-266	軸圧縮条件
Case-2	0	軸力なし
Case-3	66	軸引張条件

表-4 回転バネ定数

荷重ケース名	実験値(tf*m/rad)	解析値(tf*m/rad)
Case-1	84,800	176,400
Case-2	7,030	8,253
Case-3	3,770	4,471

4.2 解析モデル

断面力の算定および回転角の算定は、先端建設技術センターでモデル化された手法を用いることにより可能である。

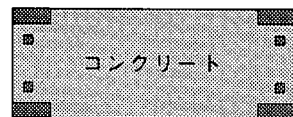
1) 断面力の算定

図-12に継手の断面モデルを示す。継手部は、軸力(N)と曲げモーメント(M)の作用により図に示す全断面圧縮、中立軸断面内、全断面引張りいずれかの状態にある。ここで、継手部のフランジおよびモルタルは圧縮力のみ伝達し、雄雌継手は圧縮力、引張力の何れをも伝達可能としてモデル化されている。これら断面モデルに対して平面保持を仮定することにより、断面各部の応力状態を算定することが可能である。

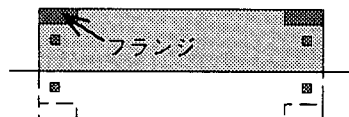
以下に示す解析値は、フランジおよび雄雌継手に対して鋼材とコンクリートのヤング係数比(n)を6.36として算定している。

2) 回転角の算定

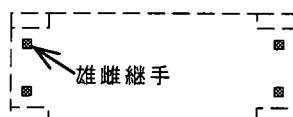
一方、継手部の回転角の算定には、図-13のモデルが用いられる。1)により断面力および中立軸位置が算定されるとすでに述べた雄雌継手モデル(図-9)を用いて継手の伸び量を算定することができる。算定された中立軸位置と伸び量を用いて図-13のモデルにより回転角の算定が可能である。



a) 全断面圧縮



b) 中立軸断面内



c) 全断面引張

図-12 継手部の解析モデル

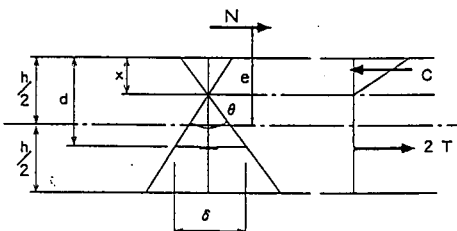


図-13 回転角の解析モデル

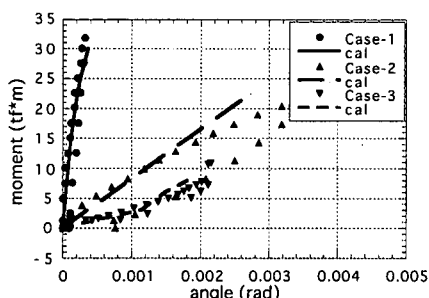


図-14 曲げモーメント～回転角関係

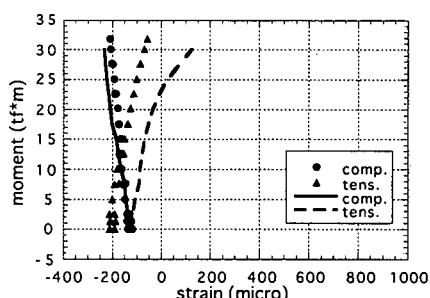


図-15 継手のひずみ変化(Case-1)

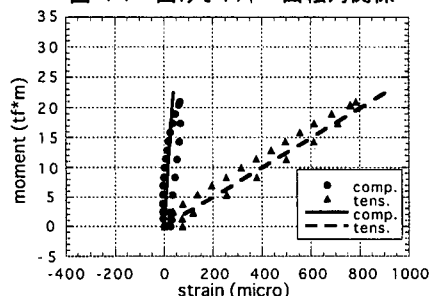


図-16 継手のひずみ変化(Case-2)

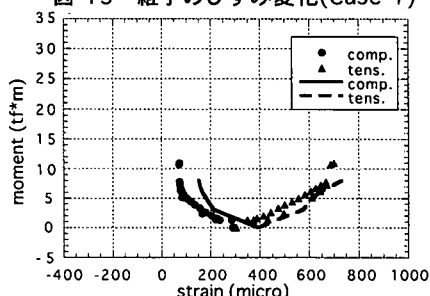


図-17 継手のひずみ変化(Case-3)

4.3 実験結果

1) 継手の回転剛性

図-14には、曲げモーメントと継手の回転角の関係について実験値をプロットで、解析値を実線および破線で示している。また、継手の回転が一定数に関する実験値と解析値の比較を表-4に示す。試験結果は、当然のことながら軸圧縮力が作用している場合が回転が一定数が最も大きく、軸引張力が作用している条件で最も小さくなった。また、実験結果と解析結果は良好な対応を示しておりモデル化が適正なことが示されている。

2) 雄雌継手の発生ひずみ

図-15,16,17には、各ケースで圧縮側および引張側の雌型に発生したひずみに関して実験値をプロットで、解析値を実線および破線で示している。実験値と解析値は、曲げモーメント無負荷の状態でも若干相違しているが、これは軸力導入時の試験体のタワミおよびセグメント本体の図心と載荷位置との偏心等の影響により曲げが発生しているためと考えられる。しかしながら、この点を除けば実験値と解析値は良好な対応を示している。

3) 鋼棒フランジの発生ひずみ

図-18,19は、継手部の圧縮側および引張側フランジのひずみについて実験値をプロットで、解析値を実線および破線で示している。実験値では、先にも述べたような初期値のズレおよび引張側フランジの圧縮ひずみの増加が見られるが、これらは実験精度に起因するものと考えられる。しかしながら、解析値は圧縮側フランジの挙動を良好に表現しておりモデルが適切であったことが解る。

4) 終局曲げ耐力

図-20にCase-3において終局状態まで載荷した時の曲げモーメント～回転角関係を示す。図中のプロットは実験値を示し、実線はモデルにより算定された終局の曲げモーメントを示している。実験値はモデルによる解析値を若干上回るという結果が得られ、図-12のモデルにより終局状態までも評価可能なことが分かった。

5. 結 論

実大継手曲げ試験の結果を先端建設技術センターのモデルを用いて解析した結果、継手部断面の応力度、曲げモーメント～回転角関係および終局曲げ耐力を適切に評価可能なことが検証できた。

6. おわりに

今回の実験結果とその評価により嵌合注入方式合成セグメントのセグメント継手の力学挙動を把握し、設計モデルの妥当性を検証した。今後は本継手の特徴を活かしつつより簡便なセグメント継手を考案していきたい。

7. 参考文献

- 1) (財) 先端建設技術センター；地下河川 内圧トンネル覆工構造設計要領（案），1996,3

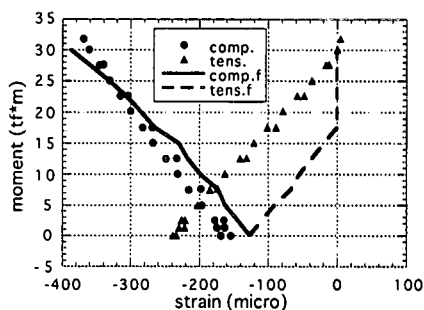


図-18 フランジのひずみ変化(Case-1)

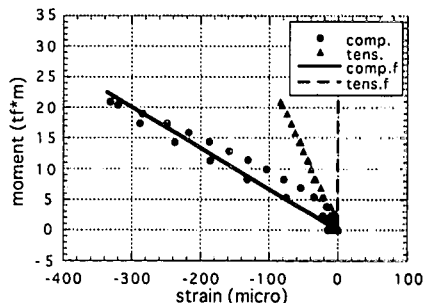


図-19 フランジのひずみ変化(Case-2)

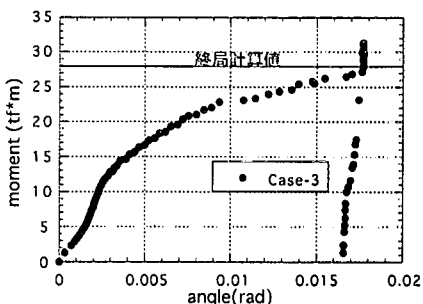


図-20 曲げモーメント～回転角関係(終局)