

# (41) 角鋼管を用いたトンネル用合成セグメントの耐荷力に関する研究

中西 克佳<sup>1</sup>・須藤 修<sup>2</sup>・鱒淵 健<sup>3</sup>・高山 恵司<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 JFE技研(株)土木・建築研究部 (〒210-0855 神奈川県川崎市川崎区南渡田町 1-1)

ka-nakanishi@jfe-rd.co.jp

<sup>2</sup>正会員 JFE建材(株)商品研究所 (〒103-0012 東京都中央区日本橋掘留町 1-10-15)

o-sudo@jfe-kenzai.co.jp

<sup>3</sup>正会員 JFE建材(株)地下土木技術部 (〒103-0012 東京都中央区日本橋掘留町 1-10-15)

t-masubuchi@jfe-kenzai.co.jp

<sup>4</sup>非会員 JFEテクノロジー(株) (〒210-0855 神奈川県川崎市川崎区南渡田町 1-1)

k-takayama@jfe-tec.co.jp

コンクリートを充填した角鋼管を主桁部に用いたトンネル用鋼管合成セグメントを考案した。本セグメントは、トンネル断面方向の力に抵抗するセグメントの桁部分にコンクリート充填鋼管を適用し、鋼管間をスキンプレートで繋いで鋼管間にコンクリートを充填する鋼・コンクリート合成構造である。高耐力が期待できるコンクリート充填鋼管により低桁高化と施工時のジャッキ推力に対する抵抗力の確保を実現し、かつスキンプレートによる漏水対策を施している。

本文では、まず本セグメント構造を紹介する。つぎに、曲率の無い平板の 1/2 縮尺の実験供試体を用いた曲げ耐力実験により断面性能を検証し、さらに曲率を有する実大サイズの実験供試体を用いた曲げ耐力実験により耐力を実証する。そして、これら実験結果の計算結果との比較により、曲げ剛性、曲げ耐力、ならびに曲げに対する破壊メカニズムを明確化する。

**Key Words:** *tunnel, composite segment, rectangular steel tube, ultimate strength, bending test*

## 1. はじめに

関東圏、および関西圏の環状道路整備においては、地下道路トンネルの需要が増加している。そんな中、トンネルの耐久性、およびトンネルの拡幅・分岐工法、および立坑掘削工法のコストダウンが課題となっている。

トンネルが大口径になると、桁高(セグメントの厚さ)が施工コストに寄与する割合が上昇する。つまり、計画内径に桁高を足した径が掘削断面となるため桁高を押さえることによって掘削土量を減少させることが出来る。また、通常、合成セグメントにおいては、セグメントの製作時、コンクリートの打設荷重に耐えるため、トンネル周方向に沿った周壁を構成するスキンプレートの面外変形を抑制する補剛材が多数必要となる<sup>1-3)</sup>。さらに、セグメントの施工時には、セグメントをジャッキ等で押し込むため、トンネル周方向に沿うアーチ形状の周方向壁(セグメント側面)の強度が問題となる。とくに大深度対応のトンネル用セグメントの場合、セグメント1体当たりの重量が増すことに比例してジャッキの押込み力も増加する。この力に対応するためにも、補剛材を多数設

置する必要がある、セグメント1体当たりの重量がさらに増し、その結果、施工性が悪化する。

本論文では上述を踏まえ、大深度地下利用(特に道路トンネル)に適した新たなトンネルセグメントの本体構造を提案し、その耐力および破壊メカニズムを確認する。

## 2. 鋼管合成セグメントの提案

図1に示す鋼殻に角鋼管を用いた合成セグメントを提案する。本セグメントは鋼材料を増加させることなく、製作時に必要なスキンプレート(以下、スキン PL と呼ぶ)の剛性、および施工時に必要なセグメント側面の強度を付加させることができる。また、鋼管内へのコンクリート充填により高耐力が見込めるため、大幅な低桁高化・スキン PL 部の省力化が期待できる。これらの理由から、合理的に低桁高を実現できるばかりでなく、スキン PL を用いることで漏水対策も施し易い構造であると考えられる。なお、本セグメントは、トンネル周方向に沿う鋼管のアーチ形状への曲げ成型が可能であれば、さらなる低コスト化の可能性を有している。

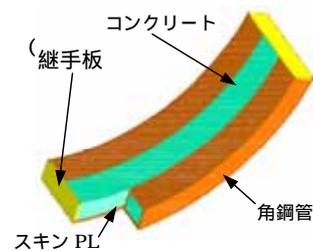


図1 鋼管合成セグメントの概略図

### 3. 鋼管合成セグメントの縮尺曲げ実験<sup>4)</sup>

#### (1) 実験の目的

角鋼管を用いた合成セグメントの耐力および曲げ破壊性状を把握するため、縮尺実験を実施した。

#### (2) 実験供試体の諸元と荷重方法

実験供試体数は曲率の無い平板4体とした。表1には実験供試体の内訳を、図2には実験供試体と荷重状況を示す。ここで、荷重装置として、3,000kN 汎用構造物試験機を用いた。実験供試体は、実際のセグメント寸法を2m (幅) × 0.45m (桁高) × 4m (周方向長さ) と想定し、約 1/2 縮尺とした幅 890mm、および桁高 200mm で構成した角鋼管には 200 × 200 × 5.7mm を用いた。図3には、荷重の荷重方法を示す。

表1 実験供試体の内訳

No.	パラメータ	荷重方法
1	鋼殻	4点正曲げ
2	角鋼管のみコンクリート充填	
3	コンクリート充填	4点負曲げ
4		

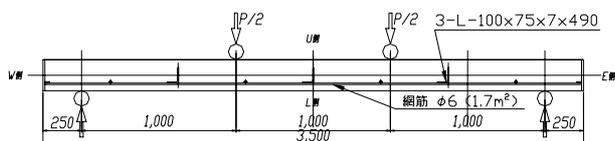


図2 実験供試体と荷重状況 (正曲げ) (寸法単位: mm)

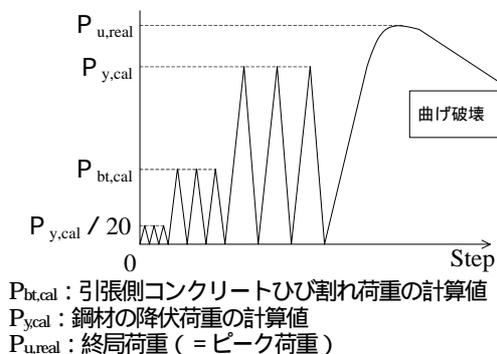


図3 荷重の荷重方法

使用コンクリートは、最大骨材寸法 20 mm, スランプフロー60cm 空気量 1.8%の高流動コンクリートとした。また、使用鋼材は、鋼管が STKR400, その他の鋼材が

SS400 材とした。表2には硬化コンクリートの力学的特性を、表3には使用鋼板の機械的性質を示す。

表2 硬化コンクリートの力学的特性

実験供試体	材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比
No.2	39	82	5.1	32.200	0.195
No.3	41	-	-	-	-
No.4	42	80	5.0	32.900	0.203

表3 使用鋼板の機械的性質

部材	板厚 (mm)	上降伏点 (N/mm <sup>2</sup> )	下降伏点 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
鋼管	5.71	-	361	鋼管
スキン PL	3.15	211	203	スキン PL
拘束板	4.39	-	216	拘束板
		ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比	伸び率 (%)
鋼管		204.800	0.283	40.4
スキン PL		217.000	0.276	51.7
拘束板		210.800	0.283	53.9

#### (3) 実験結果とその考察

実験供試体 No.1 において、スキン PL は荷重初期から実験供試体長手方向に波打っており、その変形は約 P=150kN で目で見えて膨らみが分かる程度となった。P=315kN で鋼管とスキン PL との溶接部が切れた。最大荷重は 412.3kN (たわみ 26mm 強) であった。

実験供試体 No.2 においても、スキン PL は荷重初期から実験供試体長手方向に波打っており、その変形は降伏荷重以前の時点で、目で見えて膨らみが分かる程度、また荷重点のへこみも分かる程度となった。P=60kN で充填コンクリートのひび割れが発生し、鋼管ひずみが大きく伸びた。P=260kN でコンクリートが大きくひび割れた。最大荷重は 647.3kN (たわみ 159mm) であった。その後、若干荷重が下がった P=643kN で鋼筋が切れた。

実験供試体 No.3 は、P=69kN 時、鋼管内の充填コンクリート引張側にひびが入り、鋼ひずみが非線形に伸びた。P=145kN 以降、スキン PL が断面中央部で徐々に膨らみ始めた。P=613kN 時、鋼筋の破断とともに断面中央部のスキン PL が盛り上がり、P=678kN でスキン PL 側のコンクリートが圧壊し荷重が低下した。その後再び反力が 648kN まで上昇したものの、鋼管のひずみがひずみ硬化領域に入ったため実験を終了させた。なお、コンクリート充填鋼管の断面性能は、実験終了まで健在であった。

実験供試体 No.4 において、P=253kN で引張側コンクリートがひび割れた。降伏荷重 P=449kN 時で、圧縮側のコンクリートひずみが圧壊ひずみを超え、P=818kN で鋼管間の圧縮コンクリートが圧壊し荷重が低下した。その後再び反力が 762kN まで上昇した。最大荷重は 818kN (たわみ 118mm) であった。

図4には、実験供試体 No.3 における実験終了時のコンクリート面ひび割れ図を示す。図4より、実験供試体

No.3のスキンPL部のコンクリートのひび割れは十分散らしていることが分かる。

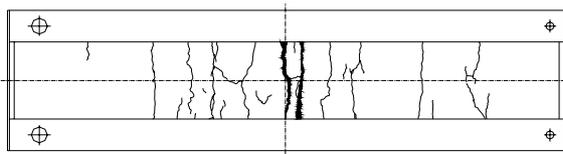


図4 実験供試体No.3のコンクリート面ひび割れ図

図5には、各実験供試体の荷重 - たわみの履歴曲線を計算値と比較して示す。なお、計算値は、鋼とコンクリートとが完全合成であるとして、図6に示す各荷重時の応力状態を仮定して算出したものである。ここで、引張側コンクリートひび割れ荷重 $P_{bt,cal}$ は、道路橋示方書・同解説「耐震設計編」記載のコンクリートの応力 - ひずみ曲線および曲げ引張強度  $f_{bt}$ を用いて計算している<sup>9)</sup>。すなわち、

$$c = 0.85 f_{ck} [2(f_{ct}/0.002) - (f_{ct}/0.002)^2] \quad (1)$$

$$f_{bt} = 0.23 f_{ck}^{2/3} \quad (2)$$

ここに、 $f_{ck}$ はコンクリートの圧縮強度である。また、終局荷重の計算値 $P_{y,cal}$ は、終局ひずみ  $\epsilon_u$ を、

$$\epsilon_u = 20 \epsilon_y \quad (\epsilon_y: \text{鋼管の降伏ひずみ}) \quad (3)$$

として算出した。ちなみに、たわみは、図6に示した各荷重時の応力状態における曲率から、線形補間して求めた各断面位置の曲率を、長さ方向に積分して求めた。

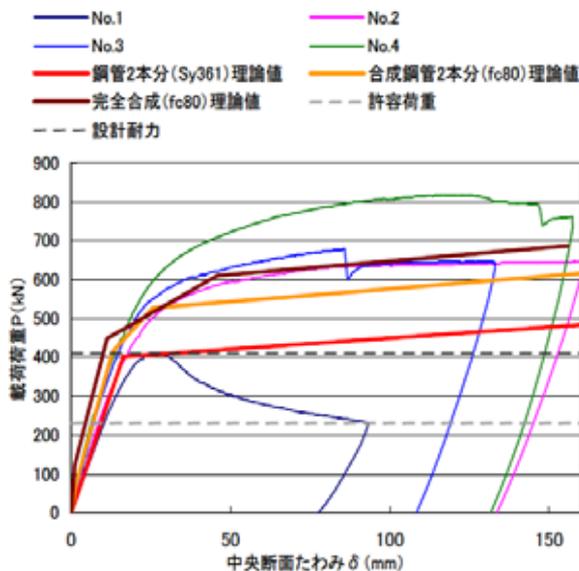


図5 各実験供試体の荷重 - たわみの履歴曲線

図5より、実験供試体No.1は鋼管2本分の初期剛性、実験供試体No.2は鋼管2本分とコンクリート充填鋼管（以下、CFTと呼ぶ）2本分との間の初期剛性である。実験供試体No.3およびNo.4は、CFT2本分の初期剛性を有している。実験供試体No.3の荷重 - たわみ曲線は、完全合成の計算値を上回っている。また、網筋が切断した後には、完全合成の計算値にほぼ一致している。実験供

試体No.2の荷重 - たわみ曲線は、完全合成の計算値を若干下回っているものの、近似している。このことから、耐力上、CFTのみでも十分な性能を有していると言える。

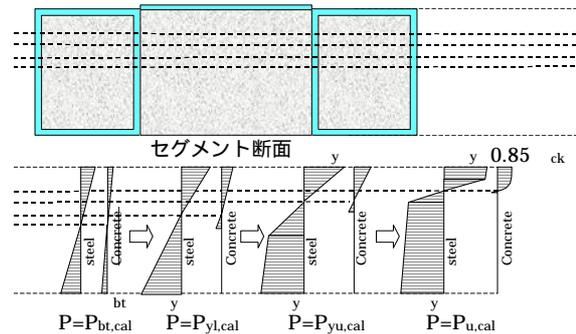


図6 各荷重時の応力状態

#### 4. コンクリート充填角鋼管の4点曲げ実験

##### (1) 実験の目的

コンクリート充填角鋼管の端部に設けた拘束板の拘束効果、および充填コンクリートのひび割れ分散性を確認した。

##### (2) 実験供試体の諸元

表4に実験供試体の内訳を、図7に実験供試体と載荷状況をそれぞれ示す。ここで、角鋼管には450x450x12mmを、拘束板には鋼板厚に合わせて12mm鋼板を用いた。なお、載荷装置として、3,000kN汎用構造物試験機を用いた。荷重の載荷方法は、図3に示した通りである。

表4 実験供試体の内訳

No.	構造断面図	パラメータ
5		充填鋼管 + 附着
6		充填鋼管 + 拘束板

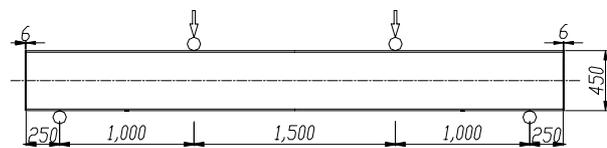


図7 実験供試体と載荷状況(寸法単位:mm)

使用コンクリートは、最大骨材寸法20mm、スランプ19.5cm、空気量1.9%の早強コンクリートとした。また、使用鋼材は、鋼管がSTKR400、拘束板がSM400A材とした。表5には硬化コンクリートの力学的特性を、表6には使用鋼板の機械的性質を示す。

表5 硬化コンクリートの力学的特性

No.	材齢(日)	圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )	引張強度(N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数(kN/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比
5,6	16	62.4	3.48	35,000	0.224

表6 使用鋼板の機械的性質

部材	板厚 (mm)	上降伏点 (N/mm <sup>2</sup> )	下降伏点 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
鋼管	11.4	-	391	478
拘束板	12.0	277	268	431
		ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比	伸び率 (%)
鋼管		206.424	0.282	25.7
拘束板		212.829	0.284	32.4

(3) 実験結果とその考察

実験供試体 No.5 は、P=440kN および 560kN で割れ音が発生し、1,700kN 前後で割れ音が連続で発生した。また、降伏荷重からの除荷時、圧縮側のコンクリートがひび割れた。最大荷重は試験機の最大能力 3,103kN (たわみ 35.0mm) であった。コンクリートの端部拔出量は、最終的に 2mm 程度であった。

実験供試体 No.6 は、P=330kN, 450kN, 550kN, および 3,080kN でひび割れが発生した。最大荷重は試験機の最大能力 3,104kN (たわみ 47.7mm) であった。端板の最大ひずみは 図8 に示すように 約 550μ であった。

図9 には、各実験供試体の荷重 - たわみの履歴曲線を計算値と比較して示す。図10 には、ひび割れ荷重時における各実験供試体の中央断面のひずみ分布を弾性計算値と比較して示す。

図9 より、耐力に関し、両実験供試体とも CFT 計算値に安全側で近似していることが分かる。ここで、付着を切って両端に拘束板を設置した実験供試体 No.6 の方が、付着を切らなかった実験供試体 No.5 (拘束板無し)

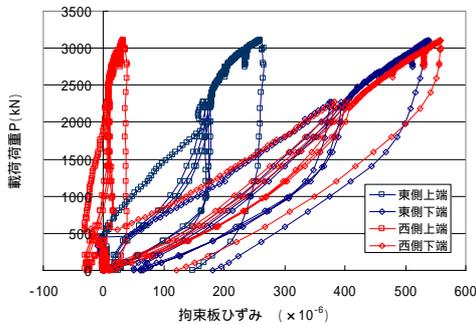


図8 実験供試体 No.6 の拘束板ひずみ

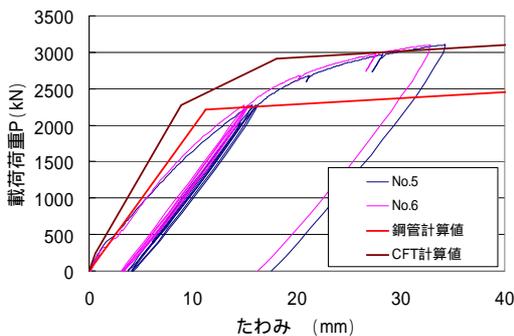


図9 各実験供試体の荷重 - たわみの履歴曲線

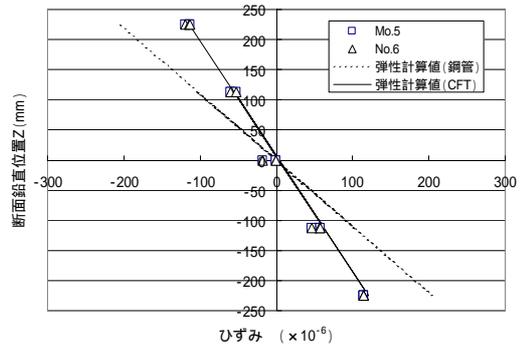


図10 中央断面のひずみ分布 (P<sub>bt,cal</sub>時)

よりも、耐力、剛性ともに、若干高い。また、実験供試体 No.5 No.6 の初期剛性はともに 鋼管計算値と CFT 計算値との間にあることが分かる。充填コンクリートがひび割れた後、鋼管計算値に近似し、1,000kN を超えた辺りから、実験値は鋼管計算値から乖離し始めている。鋼管が加工により塑性履歴をすでに受けているため、断面局部が早い段階で塑性領域に入ったためと考えられる。

図10 より、ひび割れ荷重時、断面内のひずみ分布は計算値に一致していることが分かる。ちなみに、降伏荷重 P<sub>y,cal</sub>時、中立軸位置は実験値と CFT 計算値と一致していたが、曲率は鋼管計算値に一致していた。以上のことから、本形状の CFT において、充填コンクリートは、ひび割れた後、耐力に対して圧縮側のコンクリートにより寄与するが、変形に対して寄与しないと云える。

図11(a)および(b)には 実験供試体 No.5 および No.6 における実験終了時のコンクリートひび割れ図を示す。図11(a)および(b)より、付着を切らなかった実験供試体 No.5 ほどではないが、実験供試体 No.6 もひび割れが十分分散していることが分かる。

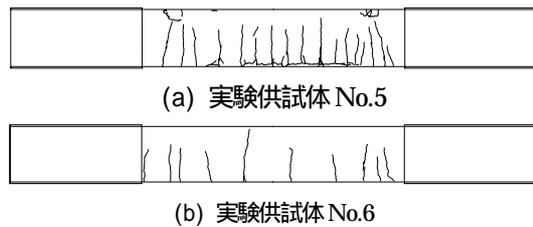


図11 実験終了時のコンクリートひび割れ図

5. 実物大実形状モデルの曲げ耐力実験

(1) 実験の目的

6 面鋼殻タイプおよび 5 面鋼殻タイプの鋼管合成セグメントの耐力実証、曲げ剛性の確認、ずれ止め (スタッド) の有無による破壊メカニズムの差異の明確化、およびスキン PL 部のひび割れ状況の確認を目的として、4 点曲げ実験を実施した。

(2) 実験供試体の諸元

表7 には実験供試体の内訳を 図12 には実験供試体と

載荷状況を示す。また、図13(a)～(c)には、3体の実験供試体の寸法・諸元を示す。ここで、実験供試体形状は、大深度トンネルセグメントの実物サイズを想定し、長さ約4m、幅2mとした。角鋼管には熱間曲げ加工を施した曲率13mの450x450x12を、継手板およびスキンPLには12mm鋼板を用いた。また、鋼管の間隔保持材として、D16の丸鋼を圧縮側から桁高3/4の位置に800mm間隔で設置した。実験供試体No.7およびNo.9のスキンPLには、ずれ止め兼座屈防止材として22×150mmの頭付きスタッドジベルを溶殖した。さらにNo.7には、コンクリート上面から50mmかぶり度で崩落防止用のD6の網筋(100mm格子)を設置した。

実験供試体の製造に際して、鋼管とスキンPLとの溶接は完全溶込み溶接とし、鋼殻へのコンクリート充填は、一方の端板に空気抜き孔を端板各室4隅に設け、他方の端板の各室に設けた充填孔から圧送車を用いて行った。

実験は、支間約4m、載荷点間0.8mの4点ピンローラー支持の4点曲げ載荷とした。載荷装置として、10,000kN汎用構造物試験機を用いた。荷重の載荷方法は、図3に示した通りである。

使用コンクリートは、最大骨材寸法20mm、スランプフロー64～72cm、空気量1.6～2.5%の高流動の普通コンクリートとした。また、使用鋼材は、鋼管がRSTK400、その他の鋼材がSS400材とした。表8には硬化コンクリートの力学的特性を、表9には使用鋼板の機械的性質を示す。表9より、熱間曲げ加工を行った鋼管の内周フランジは、一般鋼に比べヤング係数が低くポアソン比が若干高くなっていることが分かる。

### (3) スタッドジベルの配置

スタッドジベルは、スタッドジベルの基準バネ定数 $k_0=1,961\text{N/mm/mm}$ を考慮してスキンPL部を完全合成として扱える配置、かつスキンPLの座屈およびコンクリートの剥離が発生しない配置とした。その結果、実験供試体No.7およびNo.9のスキンPLには、22×150mm

表7 実験供試体の内訳

No.	実験供試体の種類		ずれ止め
7	5面鋼殻	横繋ぎ鉄筋・網筋	スタッド
8	6面鋼殻	横繋ぎ鉄筋	無し
9			スタッド

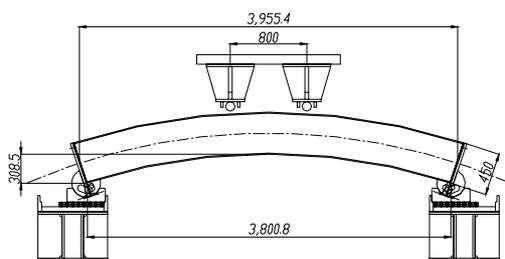
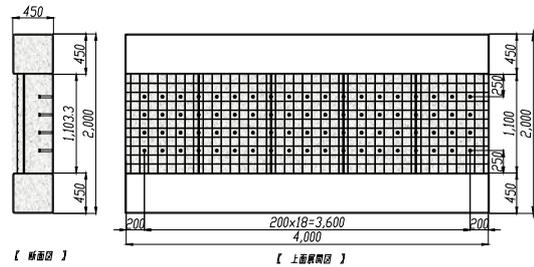


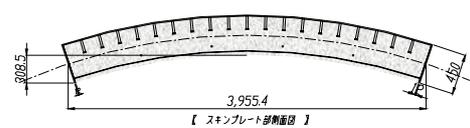
図12 実験供試体と載荷状況(寸法単位: mm)

の頭付きスタッドジベルを長さ方向および幅方向ともに200mm間隔で溶殖した。このうちNo.9では、上面スキンPLのスタッドジベルと下面スキンPLのスタッドジベルとの配置関係を、平面図上で見て両者で100mmピッチの千鳥配置となるように溶殖した。



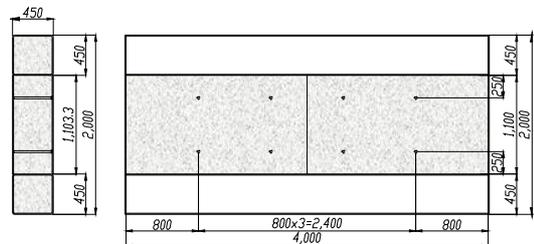
【断面図】

【上面展開図】



【スキンプレート部側面図】

(a) 実験供試体No.7



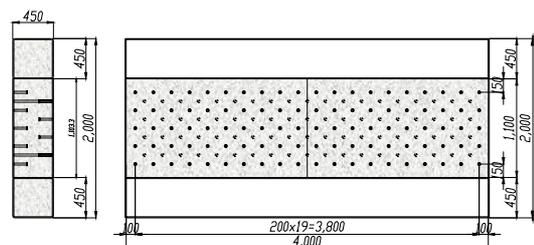
【断面図】

【上面展開図】



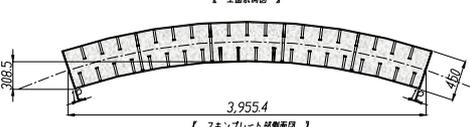
【スキンプレート部側面図】

(b) 実験供試体No.8



【断面図】

【上面展開図】



【スキンプレート部側面図】

(c) 実験供試体No.9

図13 実験供試体の寸法・諸元(寸法単位: mm)

表8 硬化コンクリートの力学的特性

No.	材齢(日)	圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )	引張強度(N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数(kN/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比
7	36	60.1	3.66	30.8	0.21
8	42	64.6	3.54	32.6	0.22
9	45	67.0	4.06	31.5	0.22

表9 使用鋼材の機械的性質

部材	板厚 (mm)	降伏点 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
鋼管(外周)	10.8	428.7	548.7
鋼管(内周)	11.5	407.5	546.2
鋼板	11.57	313.2	441.2
	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比	伸び率 (%)
鋼管(外周)	212.7	0.27	37.9
鋼管(内周)	166.6	0.34	40.0
鋼板	208.6	0.29	29.2

(4) 実験結果とその考察

a) 実験供試体 No.7

P=200kN でコンクリート中央のひずみが非線形挙動を始め、310kN で中央断面にヘアークラックが発生した。ひび割れ荷重時、そのひび割れ幅は0.5mm程度となり、幅方向に鋼管から他方の鋼管まで繋がった。P=1,000kN 時、他の断面にもひび割れが発生し、2,000kN で鋼管のひずみは局所的に降伏応力に達した。降伏荷重時のたわみは23mmであった。その後、鋼管ひずみが50,000μを超え、かつ載荷点間がほぼフラットな形状となったため、たわみ約180mmの時点で実験を終了させた。鋼材の座屈現象は、最大荷重まで殆ど発生していなかった。最大荷重は5,266kN(たわみ73mm)であった。なお、鋼管ウェブの座屈現象は、殆ど発生していなかった。

b) 実験供試体 No.8

P=650kN でコンクリートにひび割れが発生し、1,100kN で上面スキンPLが座屈し始めた。P=2,000kN で鋼管が局所的に降伏ひずみに達した。降伏荷重時、圧縮側の鋼管ひずみは降伏ひずみ程度であった。降伏荷重時、たわみは30mmであった。降伏荷重までに上面スキンPLが10mm程度座屈した。P=6,950kN(たわみ70mm)で軋み音が発生して以降、荷重が下がり始めたものの、その後ひずみ硬化領域に入り荷重が上昇傾向となった。鋼管のひずみが60,000μかつ載荷点間がほぼフラットな形状となったため、たわみ約180mmの時点で実験を終了させた。最大荷重は7,097kN(たわみ166mm)であった。なお、鋼管ウェブの座屈現象は、殆ど発生していなかった。一方、スキンPLは、上・下面ともに座屈していた。

c) 実験供試体 No.9

P=380kN でコンクリートにひび割れが発生し、2,000kN 強で鋼管ひずみが局所的に降伏ひずみに達した。降伏荷重時、たわみは25mmで、上面スキンPLの座屈現象は見留められなかった。P=7,342kN で上面が座屈し始め、荷重が一時的に下がった。圧縮側のコンクリートが圧壊したものと推察される。このときのたわみは93mmであった。その後、P=7,360kN まで荷重が上昇した。鋼管のひずみが60,000μかつ載荷点間がほぼフラット形状となり、荷重も低下し始めたため、たわみ約

180mm の時点で実験を終了させた。最大荷重は7,582kN(たわみ168mm)であった。なお、鋼管ウェブの座屈現象は、殆ど発生していなかった。

d) 実験結果の比較

図14には、各実験供試体の荷重-たわみの履歴曲線を計算値と比較して示す。実験供試体 No.7 は、5面鋼殻計算値を若干上回っている。また、実験供試体 No.8 が6面鋼殻計算値を下回っているのに対し、実験供試体 No.8 は同計算値を上回っている。ただし、スキンPLも無視して計算した荷重を大幅に上回っていることが分かる。すなわち、耐力に関しては、スタッドジベルを適切に配置すれば、5面鋼殻の場合も6面鋼殻の場合もコンクリート引張強度以上無視として計算した完全合成として扱え、6面鋼殻の場合、スタッドジベルを配置しなくても、スキンPLも、無視して耐力力を評価した場合、安全側の設計ができると思われる。

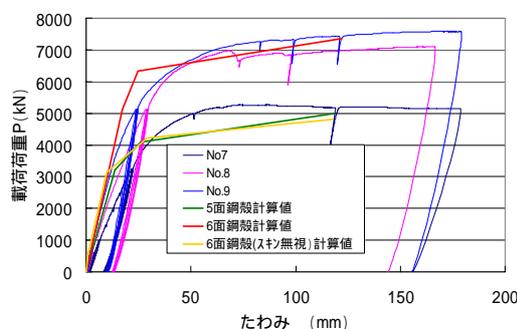


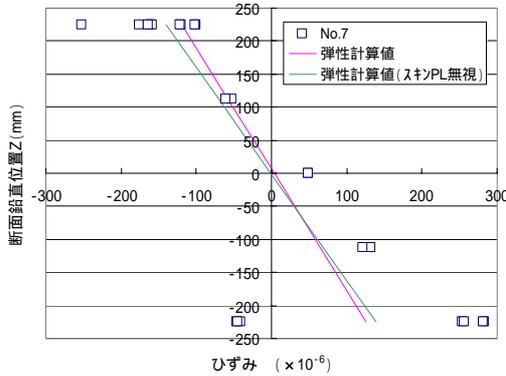
図14 各実験供試体の荷重-たわみの履歴曲線

つぎに、剛性について考察する。3体の実験供試体とも、コンクリート引張無視として計算した剛性と一致していない。実験値は、鋼材のヤング係数を鋼管内周面側フランジの材料試験結果を反映し170kN/mm<sup>2</sup>としコンクリートを無視して鋼殻のみとした計算値とほぼ一致した。以上を鑑みると、コンクリートはある程度変形が進むまで有効でなく、剛性の評価においてはコンクリートを無視した方が現実的であることが伺える。これは、充填構造であるがゆえに、鋼材の弾性の中にコンクリートの弾性が埋もれるためであると考えられる。

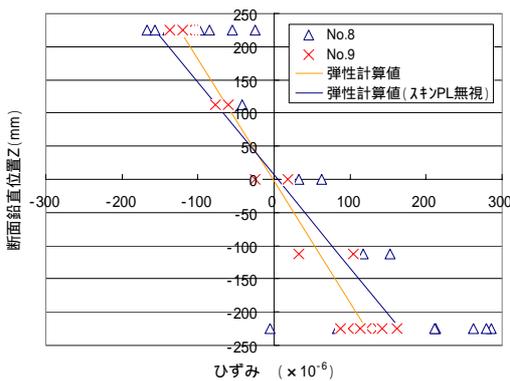
図15(a)および(b)には、ひび割れ荷重時における中央断面のひずみ分布を弾性計算値と比較して示す。図15(a)より、5面鋼殻の実験供試体の中央断面のひずみ分布は、ひび割れ荷重時、すでにコンクリートにひび割れが入り、それに伴い中立軸位置が上方に移行し、全断面有効とした計算値よりも大きなひずみが発生している。ちなみに、降伏荷重時、計算値と実験値とはほぼ一致していた。

図15(b)より、6面鋼殻の実験供試体の中央断面のひずみ分布は、ひび割れ荷重時、スタッドジベルを設置した実験供試体No.9よりも設置していない実験供試体

No.8の方がひずみが大きい。また、実験供試体No.9がコンクリート引張強度以上無視とした完全合成の計算値に近いのに対し、実験供試体No.8は、スキンPLを無視した計算値よりもひずみが大きく出ていることが分かる。ちなみに、降伏荷重時、双方とも実験値は計算値よりも上回っていた。以上、実験値が計算値よりも大きな値となっている理由として、鋼管の実ヤング係数が210 kN/mm<sup>2</sup>よりも小さいことが挙げられる。



(a) 5面鋼殻

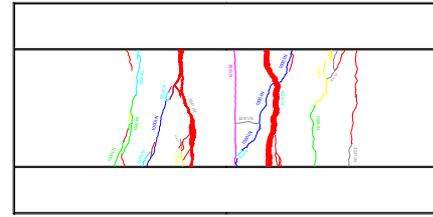


(b) 6面鋼殻

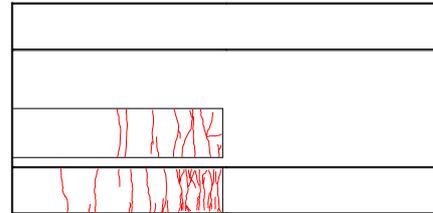
図15 中央断面のひずみ分布 (P<sub>bt,cal</sub>時)

図16(a)および(b)には、実験供試体No.7およびNo.8(鋼材溶断部)のコンクリートのひび割れ状況を示す。図16(a)および(b)より、下面コンクリートのひび割れは、曲げモーメントが最大となる荷重点間だけに集中していないことが分かる。5面鋼殻の場合、網筋が降伏した後、軸方向の拘束作用が無くなることにより荷重点に荷重が集中し、荷重点位置のひび割れ幅が増大したことが伺える。6面鋼殻(スタッドジベル無し)の場合、最終的には荷重点位置のひび割れ幅が増大していたものの、5面鋼殻と同様な鉛直変位を与えたにもかかわらず、5面鋼殻ほどひび割れが荷重点位置のひび割れ幅が増大しなかった。また、スキンPL部に関して、5面鋼殻よりも6面鋼殻の方がひび割れ間隔が狭いことが分かる。以上のことより、拘束力の大きさに比例してひび割れ間隔が狭くなる、すなわちひび割れ分散性が良くなっていると言

える。なお、鋼管内のコンクリートのひび割れは、非常に細かく分散していることが分かる。



(a) 実験供試体No.7



(b) 実験供試体No.8(鋼材溶断部)

図16 コンクリートのひび割れ状況

e) コンクリートのひび割れを考慮した弾塑性FEM解析

実験供試体No.9に関し、コンクリートのひび割れおよび圧壊を考慮した弾塑性FEM解析を試みた。図17には解析モデルを示す。ここで、コンクリートのひび割れおよび圧壊は図18に示すコンクリートの破壊面の生成過程を考慮している。また、ひび割れおよび圧壊の判定条件としては図19に示す簡易な線形の破壊モデルを用いた。図20には、実験供試体No.9の荷重-たわみの履歴曲線を解析値と比較して示す。図20より、鋼材が降伏し始めるまでは鋼殻のみ考慮した解析結果とほぼ一致しており、降伏から最大荷重までの間にコンクリートの破壊を考慮した解析結果に近づき、最大荷重以降ほぼ近似していることが分かる。

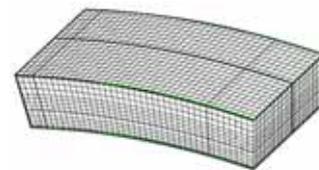


図17 解析モデル(実験供試体No.9の2軸対象モデル)

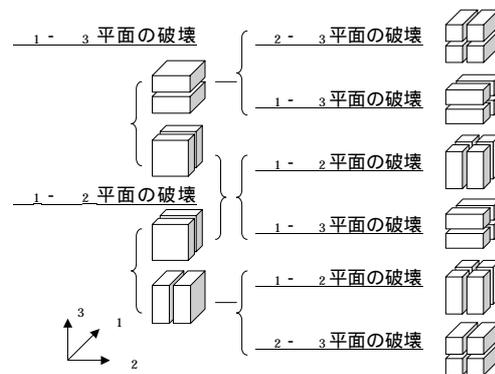


図18 破壊面の生成

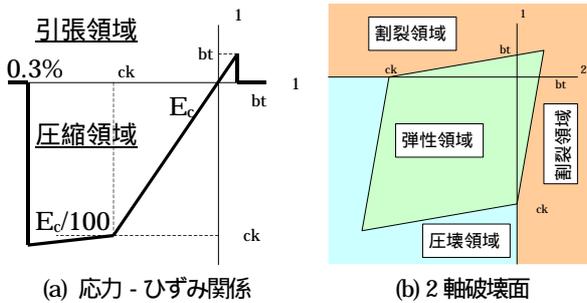


図 19 コンクリートの破壊モデル

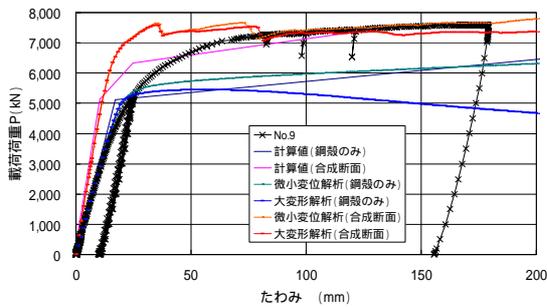


図 20 荷重 - たわみ関係 (FEM 解析結果との比較)

## 5. まとめ

コンクリートを充填した角鋼管を主桁部に用いたトンネル用鋼管合成セグメント構造を提案し、曲率の無い平板の 1/2 縮尺の実験供試体を用いた曲げ耐力実験により断面性能を検証し、さらに曲率を有する実大サイズの実験供試体を用いた曲げ耐力実験を実施した。本研究によって得られた主な成果を、以下にまとめる。

- (1) コンクリート充填 450mm 角鋼管の端部に設けた拘束板には十分なコンクリート拘束効果、および充填コンクリートのひび割れ分散効果がある。
- (2) スタッドジベルを適切に配置すれば、5 面鋼殻の場合

合も 6 面鋼殻の場合もコンクリート引張強度以上無視として計算した完全合成として扱え、6 面鋼殻の場合、スタッドジベルを配置しなくても、スキン PL も無視して耐荷力を評価すれば、安全側の設計ができる。

- (3) コンクリートはある程度変形が進むまで有効でないため、剛性の評価においてはコンクリートを無視した方が現実的である。
- (4) スキン PL 部に関して、下面コンクリートのひび割れは、曲げモーメントが最大となる荷重点間だけに集中しない。5 面鋼殻の場合、網筋が降伏した後、荷重点位置のひび割れ幅が増大する。また、5 面鋼殻よりも 6 面鋼殻の方がひび割れ間隔が狭いことから、拘束力の大きさに比例してひび割れ分散性が良くなると言える。
- (5) 簡易な線形の破壊モデルを用いた、コンクリートのひび割れおよび圧壊を考慮した弾塑性 FEM 解析結果は、荷重 - たわみ曲線に関し、最大荷重以降ほぼ実験結果に近似した。

## 参考文献

- 1) 田中ほか：大口径トンネル用合成セグメント，日本鋼管技報 No.122，1988。
- 2) 小泉淳監修：セグメントの新技术，土木工学社，2002。
- 3) セグメントの設計，トンネルライブラリー第 6 号，土木学会トンネル工学委員会シールドトンネル分科会（主査：小山幸則），1994。
- 4) 鱗淵 健・須藤 修・林 伸郎・中西克佳・岡田 淳：角鋼管を用いたトンネル用合成セグメントの提案，土木学会第 61 回年次学術講演会講演概要集，第 3 部，pp.205-206，2006 年 9 月。
- 5) 道路橋示方書・同解説 耐震設計編，(社)日本道路協会，2002 年 3 月。

## STUDY ON ULTIMATE STRENGTH OF TUNNEL COMPOSITE SEGMENT WITH RECTANGULAR STEEL TUBES

Katsuyoshi NAKANISHI, Osamu SUDO, Takeshi MASUBUCHI and Keishi TAKAYAMA

This paper describes the tunnel composite segment with the concrete-filled rectangular steel tubes. This segment, which uses the concrete-filled steel tubes to provide resistance to the cross-sectional force of the tunnel, is constructed of concrete and concrete-filled steel tubes connected to the skin-plates. There are two advantages to using concrete-filled rectangular steel tubes. First, they have a high strength allowing for thin girders and resistance to the jack thrust during the construction. Second, the skin-plates facilitate the leakage control.

We demonstrate the bearing behavior using an actual size specimen with curvature, after conducting the experiment with the flat slab on a half-scale specimen to ascertain cross-sectional strength. Finally, by comparing these experimental results with our numerical results, we demonstrate the rigidity, ultimate strength, and the destruction mechanism.