

報告 複合アーチ型シールドトンネルにおける隅部セグメントの配筋に関する検討

佐藤 清*1・武田篤史*2・吉田公宏*3・西森昭博*4

要旨： SFRC（Steel Fiber Reinforced Concrete：鋼繊維補強コンクリート）セグメントを用いた複合アーチ型シールドトンネルの開発において、腹圧力の影響が大きい隅部の配筋に関する検討を実施した。ラーメン隅角部に倣った配筋（基本案）と基本案に対して簡易にした配筋（簡易案）の2種類を考案し、FEM解析および実大セグメントによる正負交番載荷実験によってそれぞれの性能を評価した。その結果、簡易案では腹圧力によるひび割れが発生したものの、基本案では十分な性能が得られることを確認した。

キーワード： SFRCセグメント、シールドトンネル、腹圧力、FEM解析、正負交番載荷実験

1. はじめに

筆者らは異なる曲率の円弧を組み合わせたセグメントによる、複合アーチ型シールドトンネルの開発を行っている。複合アーチ型シールドトンネルは矩形に近い形状であることから、円形シールドトンネルに比べて必要な空間を確保するための掘削断面を小さくすることができる。また、小土被りにおいても非開削工法とすることができるため、地上の交通制限を行う必要がない。その一方で、複合アーチ型シールドトンネルの隅部は、頂底板および側壁に比べて曲率が小さいため、他の部分と異なった力学挙動を示し、特に地震時にその傾向が顕著になることが予想される。そこで、筆者らはボックスカルバートの隅角部の設計法¹⁾を参考に隅部セグメントの配筋を考案し、FEM解析および実大セグメントを用いた正負交番載荷実験によってその性能を確認した。なお、今回の検討ではセグメントにSFRC（Steel Fiber Reinforced Concrete：鋼繊維補強コンクリート）を用いており、そ

の特徴を考慮した配筋とした。

2. 隅部セグメントの配筋案

2.1 検討対象

図-1に検討対象とした道路トンネルの横断面図を示す。トンネル形状は複数の異なる曲率の円弧が組み合わされており、頂版外側がR13400（内側R12900）、底板外側がR16500（内側R16000）、側壁外側がR6100（内側R5700）となっている。セグメントの厚みは頂版および底板が500(mm)、側壁が400(mm)である。隅部については、上隅部がR1300、下隅部がR400となっており、セグメントの厚みは400(mm)から500(mm)へ連続的に変化している。側壁と頂・底板とのなす角は、上隅部が約134度、下隅部が約130度である。

2.2 隅部配筋の検討

(1) 隅部の応力状態

ラーメン構造の隅角部に正の曲げモーメント（内側引張）が作用すると、内力の方向変換によって軸線の直角方向に腹圧力が作用する²⁾。そのため隅角部の対角線方

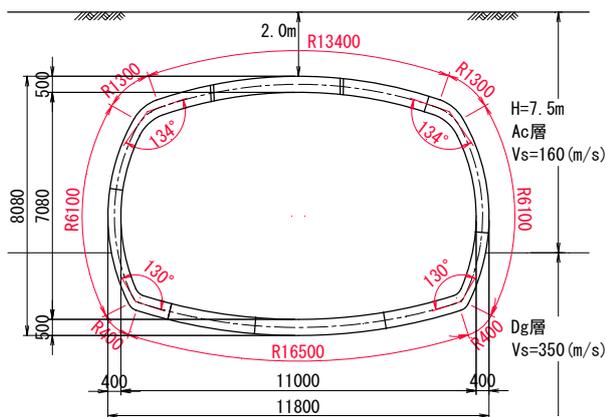


図-1 複合アーチ型シールドトンネル横断面図

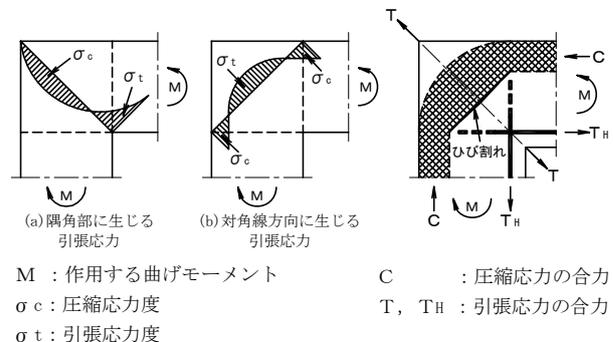


図-2 ラーメン構造隅角部の応力状態²⁾

*1 株式会社大林組 東京本社土木本部生産技術本部都市土木技術部 技術第四課 工修 (正会員)
 *2 株式会社大林組 東京本社技術研究所構造技術研究部 工修 (正会員)
 *3 株式会社大林組 東京本社土木本部生産技術本部シールド技術部
 *4 株式会社大林組 東京本社土木本部生産技術本部シールド技術部

向に引張力が作用し、十分な鉄筋が配置されていないと対角線と直交する方向にひび割れが発生する(図-2)。検討対象としたトンネル断面の隅部は、頂底板や側壁に比べて曲率が小さく、腹圧力による引張破壊の可能性が考えられる。そこで、レベル2地震時における断面力を試算し、隅部に正の曲げモーメントが発生する可能性について検討した。図-3に試算によって得られた断面力図を示す。セグメントを非線形梁要素、セグメント継手を非線形ばね要素、地盤を線形平面ひずみ要素(せん断剛性は地震時の低下剛性)とした相互作用モデルによる二次元的動的応答解析を実施し、層間変位最大時の断面力を抽出した。地震動は道路橋示方書(V耐震設計編)に示されるレベル2タイプII地震動のうち、加速度波形II-1-2を工学基盤面に入力した³⁾。

曲げモーメント分布を見ると、右上隅部および左下隅部において正の曲げモーメント(内側引張)が発生している。トンネルの変形方向が逆になれば、左上隅部および右下隅部において正の曲げモーメントが発生することとなる。これらから、隅部には腹圧力によるひび割れの可能性があり、補強鉄筋を検討することとした。

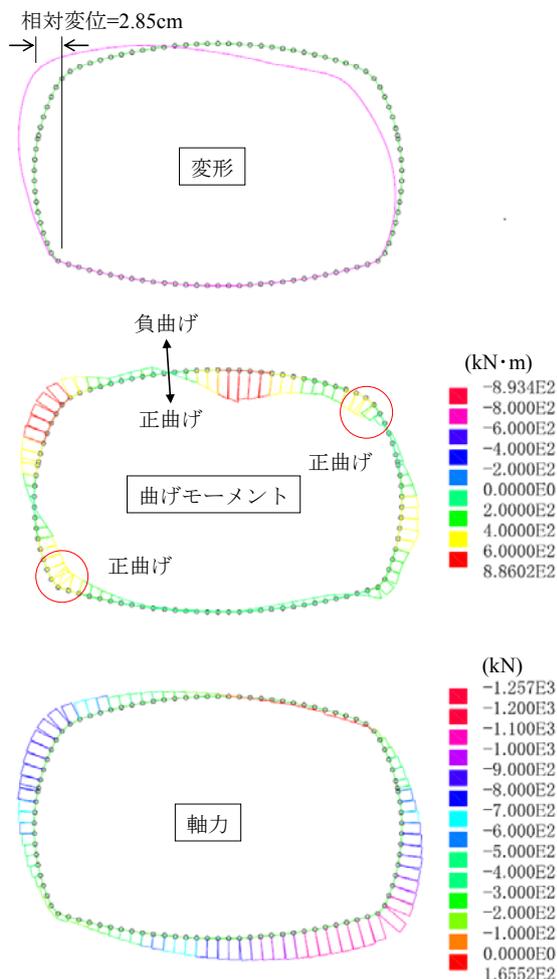


図-3 レベル2地震時の変形および断面力図

レベル2地震動に対する試算では、発生する正の曲げモーメントは上隅部・下隅部ともに約550(kN·m)、軸圧縮力は約100(kN)であった。一方、腹圧力によって発生する隅部の斜め引張力は、幾何的条件により式(1)によって推定できる²⁾。

$$T = 2 \cdot \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot T_H \quad (1)$$

T : 斜め引張力, T_H : 鉄筋に作用する引張力
 α : 隅部の角度

式(1)によると、発生断面力が同じ場合、上隅部に比べて側壁と頂・底板のなす角が小さい下隅部において、より大きな斜め引張力が作用することがわかる。そのため、本検討では下隅部を対象とした。

(2) 隅部配筋案

検討対象としたシールドトンネルはSFRCによるセグメントを採用している。SFRCセグメントはコンクリートに混入した鋼繊維によるせん断耐力を見込むことができるため、多くのケースでせん断補強筋を省略でき、本報告で検討対象としたセグメントもせん断補強筋を省略している。ただし、複合アーチ型シールドトンネルの場合、隅部に通常の円形シールドトンネルでは生じない斜め引張力が作用する場合がある。本報告の検討対象でも、2.2(1)に示したように斜め引張力の発生要因となる正の曲げモーメント発生が予想されたため、軸線と直交する帯鉄筋などを別途配して補強する必要があると判断した。そこで、図-4に示す2種類の配筋案を考案した。案1はラーメン隅角部に倣った¹⁾配筋案(基本案)で、案2は基本案に対して一部の補強鉄筋を省略した配筋案(簡易案)である。

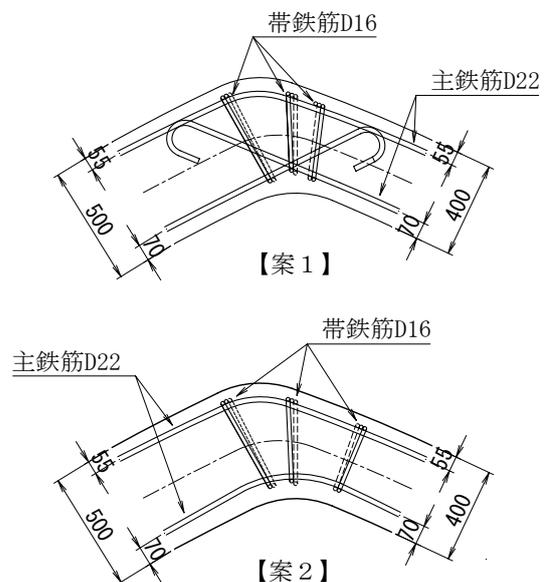


図-4 隅部配筋案

先に述べたように、隅部に正のモーメントが作用すると、腹圧力によって軸線方向にひび割れが発生し、内側主鉄筋がトンネル内空側へはらみ出そうとする。案1はトンネル内側の主鉄筋をクロスさせ（以下、クロス配筋と称す）、外側主鉄筋の位置で定着している。さらに、3本の帯鉄筋によって内側主鉄筋を拘束している。一方、案2は施工性および経済性を向上させるためにクロス配筋を省略し、3本の帯鉄筋のみによって腹圧力に抵抗させる。これらの2案について FEM 解析および実大セグメントによる正負交番載荷実験を実施し、その性能を検証した。

3. FEM 解析による予測

3.1 解析ケースおよびモデル

表-1 に解析ケースを示す。2つの補強案の他、腹圧力に対する補強を行わない場合についても解析を実施した。解析にはコンクリート構造物の非線形解析プログラム“FINAL⁴⁾”を使用した。

図-5 に解析モデルを示す。モデルは後述する正負交番載荷実験の実験供試体を模擬しており、一方の端部を固定点（ヒンジ支承）、他方の端部を載荷点として単調載荷により隅部に正の曲げモーメントを作用させた。モ

表-1 解析ケース

ケース	内容	載荷方法
Case1	クロス配筋+帯鉄筋（案1）	単調載荷
Case2	帯鉄筋（案2）	〃
Case3	補強筋なし	〃

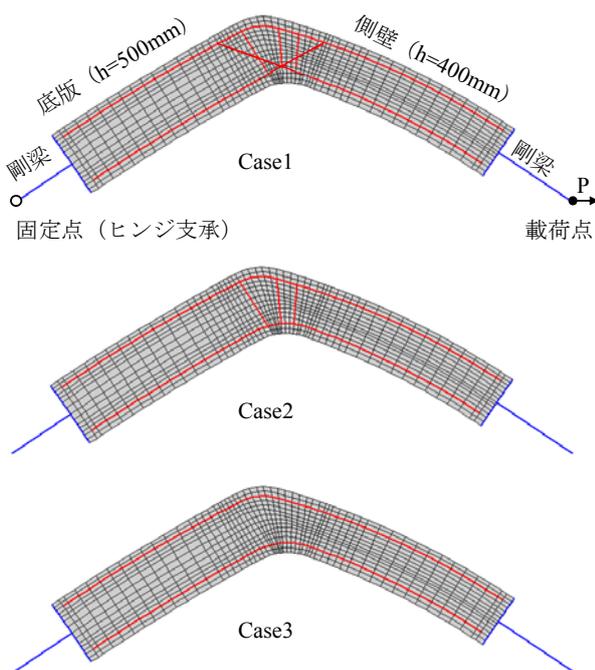


図-5 解析モデル

デル端部の剛梁は、載荷治具を模擬している。表-2 および表-3 に解析に用いた材料諸元を示す。また、図-6 に仮定したコンクリートの引張側応力～ひび割れ幅関係と、圧縮側応力～ひずみ関係を示す。これらの特性は既往の研究⁵⁾をもとに設定しており、SFRC による効果が考慮されている。ここでの解析は事前予測であるため、コンクリートの強度および鉄筋の降伏点応力については設計上の特性値を用いた。鉄筋は応力ひずみ特性を bilinear モデルとし、降伏後の剛性低下率は 1/100 とした。

表-2 コンクリート諸元

項目	諸元
要素タイプ	非線形平面応力要素
単位重量(kN/m ³)	24.5
一軸圧縮強度(N/mm ²)	42.0
一軸引張強度(N/mm ²)	2.78
ヤング率(kN/mm ²)	35.8
ポアソン比	0.17

表-3 鉄筋諸元

項目	諸元
要素タイプ	非線形梁要素
外側主鉄筋	D22 (7本/0.85m)
内側主鉄筋	D22 (7本/0.85m)
帯鉄筋	D16 (4本/0.85m)
降伏点応力(N/mm ²)	345.0
ヤング率(kN/mm ²)	200.0
ポアソン比	0.30
応力～ひずみ関係	Bilinear
降伏後の剛性低下率	1/100

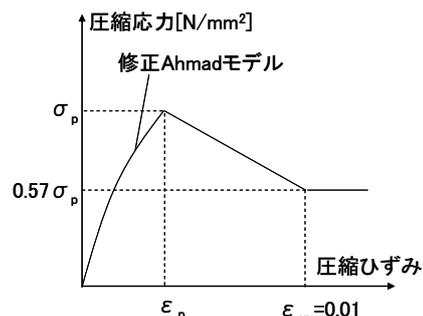
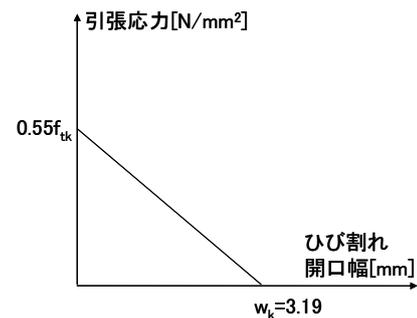


図-6 コンクリートの非線形構成モデル⁶⁾

3.2 解析結果

図-7にP～ δ 関係を示す。Pは載荷点の荷重、 δ は載荷点と固定点との相対変位量である。図中には、各ケースで引張鉄筋が初降伏するポイントも示している。図-7に示すように、降伏荷重はクロス配筋と帯鉄筋を組み合わせたCase1が最も大きく、308(kN)を示している。帯鉄筋のみで補強したCase2はCase1よりも15%小さく261(kN)、補強していないCase3では31%小さい212(kN)であった。また、Case3は引張鉄筋が降伏する前に、勾配が変化している。

図-8は各ケースの主要なひび割れ図である。ここで、Case1およびCase2は降伏変位の2倍の変位(2 δy)でのひび割れを示し、Case3は降伏変位(1 δy)でのひび割れを示している。Case1およびCase2では、1 δy にお

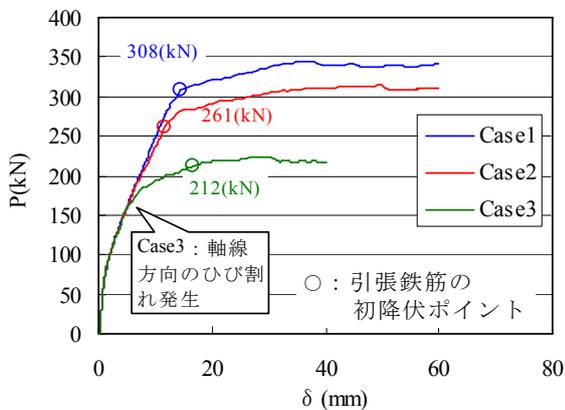


図-7 P～ δ 特性

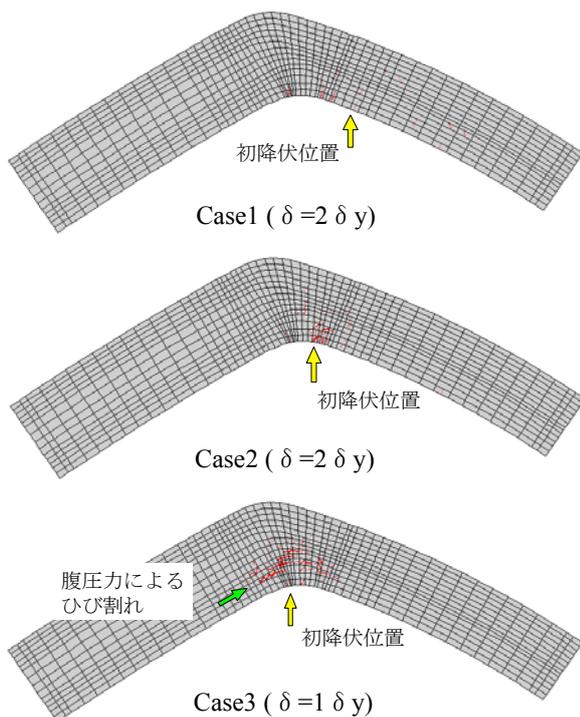


図-8 引張鉄筋降伏時のひび割れ図

いて目立ったひび割れが見られなかったが、Case3では図に示すように、腹圧力によると考えられる軸線方向のひび割れが発生している。

Case3についてひび割れ発生状況を詳細に調べたところ、P=160(kN)付近でのP～ δ の勾配変化は、軸線方向のひび割れ発生とほぼ同時であることがわかった。また、参考としてCase3と同じ配筋で、コンクリートの引張側応力～ひび割れ幅関係からSFRCの効果を除いた解析(コンクリートはひび割れに引張応力を負担しない)を実施したところ、軸線方向のひび割れが発生すると同時に荷重Pが低下しはじめた。これらより、SFRCセグメントでは、腹圧力によるひび割れが発生してもスチールファイバーが引張応力を負担し、荷重Pは急激に低下することなく増加を続けると考えられる。

Case1およびCase2では、主鉄筋の初降伏位置が隅部中央から側壁側にずれており、その位置は隅部の補強鉄筋の配置と関連している。すなわち、Case2では帯鉄筋の外側で降伏し、Case1ではさらに外側に位置するクロス配筋の結束位置の外側で降伏している。図-7に示したようにCase2はCase1よりも降伏荷重が小さく、クロス配筋の有無が隅部の耐荷性能に対して影響を及ぼすことがわかる。また、2 δy の変位において、Case1では引張鉄筋の初降伏位置で断面方向のひび割れが進展しているのに対して、Case2では断面方向のひび割れのほか、腹圧力によると考えられるひび割れも進展している。このことは、3箇所の帯鉄筋だけでは隅部の補強として不十分であり、クロス配筋の併用が有効であることを示している。また、Case1に比べて降伏荷重が小さい理由として、Case3ほどではないものの、Case2でも1 δy において軸線方向の微細なひび割れが発生していることを解析結果から確認した。

4. 実大セグメントによる正負交番荷重実験

4.1 実験ケースおよび実験モデル

表-4に実験ケース、表-5に実験供試体の諸元を示す。実験は前述の案1および案2を対象としており、実験供試体はコンクリートの設計基準強度42(N/mm²)、鋼繊維混入率0.6(%)のSFRCセグメントである。供試体の奥行きは850mmで、使用した鉄筋の径および本数は表-3に示す解析モデルと同一である。図-9に実験供試体(Case1)の概要を示す。帯鉄筋は3箇所に配置しており、それぞれ2組の鉄筋により主鉄筋を拘束している。

表-4 実験ケース

ケース	内容	荷重方法
Case1	クロス配筋+帯鉄筋	正負交番
Case2	帯鉄筋	正負交番

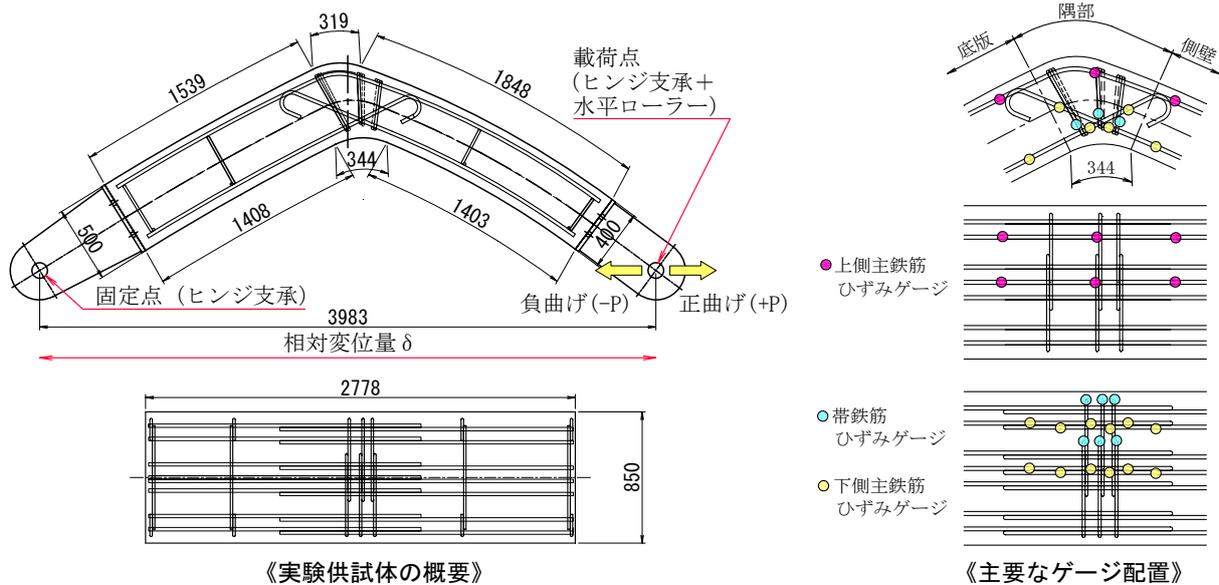


図-9 正負交番载荷実験の実験供試体 (Case1)

表-5 実験供試体の主な諸元

項目	諸元
コンクリート設計基準強度	42 (N/mm ²)
鋼繊維混入率	0.6 (%)
使用鉄筋	SD345
外側主鉄筋	D22 (7本/0.85m)
内側主鉄筋	D22 (7本/0.85m)
帯鉄筋	D16 (4本/0.85m)

実験供試体端部には鋼製治具を取り付け、一方を固定点 (ヒンジ支承)、他方を载荷点とした。図-9には隅部における主要なゲージ配置を合わせて示している。主鉄筋のゲージは、クロス配筋および曲率変化位置を中心に配置した。载荷方法は正負交番载荷⁷⁾とした。引張側主鉄筋のひずみのうち、隅部と側壁との境界付近に設置したひずみゲージ (図-9に矢印で示す) の値によって初降伏 (1δy) を判定し、その後、2δy, 3δy, 4δyまで载荷した。主鉄筋の初降伏は、材料試験から得られた降伏ひずみ (=2140μ) をもって判定した。各载荷ステップにおける载荷繰返し回数は3回とした⁷⁾。

4.2 実験結果

図-10に実験により得られたP~δ関係を示す。また、表-6に降伏変位と降伏荷重を示す。図-10には、第3章で実施した FEM 解析による事前予測 (正曲げ単調载荷) の結果も合わせて示している。これらの FEM 解析は材料強度として設計上の特性値を使用しており、材料試験の結果を反映していない。したがって厳密には実験のシミュレーション解析とは言えないが、事前予測の精度等を考察するために記載した。FEMによる事前解析の

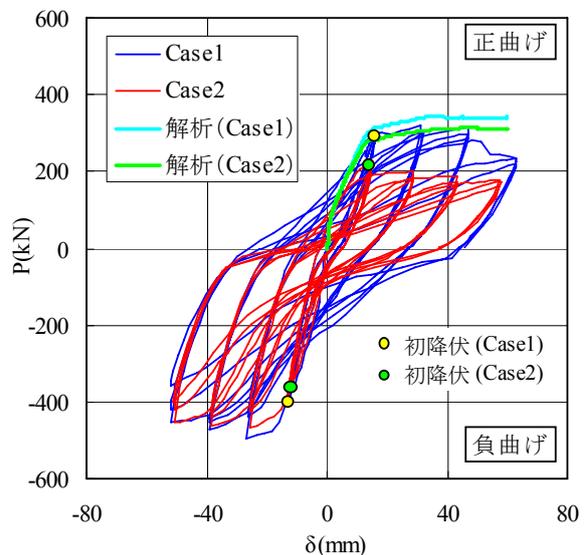


図-10 正負交番载荷実験によるP~δ関係

表-6 降伏荷重および降伏変位

ケース	载荷方向	降伏荷重 P(kN)	降伏変位 δ (mm)
Case1	正曲げ	290	15.1
	負曲げ	401	12.9
Case2	正曲げ	219	14.4
	負曲げ	380	12.7

結果と比較すると、降伏荷重については実験の方が 10~20%程度小さいが、定性的には整合した結果となっている。実際の材料強度は設計上の特性値よりも一般に大きな値を示すため、これを FEM 解析に反映するとさらに FEM 解析と実験との差が開くことが予想される。そのためコンクリートの非線形構成モデル、例えば SFRC の引張軟化特性を見直し、解析精度を上げることが必要と考えられる。



写真-1 Case1のひび割れ状況 ($\delta=2\delta y$)



写真-2 Case2のひび割れ状況 ($\delta=2\delta y$)

写真-1および2は $2\delta y$ における、Case1およびCase2それぞれのひび割れ状況である。Case1では側壁側に断面方向のひび割れが生じているが、腹圧力による軸線方向のひび割れは発生していない。一方、Case2では側壁側に、腹圧力の影響と考えられる軸線方向のひび割れが発生している。このようなひび割れ発生状況はFEMによる事前解析でも確認されており、3箇所の帯鉄筋だけでは腹圧力に対して十分ではないことがわかる。また、クロス配筋と帯鉄筋で補強したCase1では、底版側よりもセグメント厚が薄い側壁側で曲げ引張破壊が発生しており、隅部の健全性を確保できることが確認された。

5. まとめ

複合アーチ型シールドトンネルの隅部を対象に、腹圧力を考慮した配筋案を検討した。配筋案はクロス配筋と帯鉄筋を組み合わせたケースと、帯鉄筋だけによるケースとした。FEM解析による正曲げ単調荷重の数値シミュレーション、および実大セグメントを用いた正負交番荷重実験による検討の結果を以下にまとめる。

- (1) クロス配筋と帯鉄筋を組み合わせたケースの方が帯鉄筋だけのケースよりも耐荷性能、じん性能ともに優れていた。
- (2) クロス配筋と帯鉄筋を組み合わせたケースでは、 $4\delta y$ の変位を加えても、腹圧力によるひび割れの発生や主鉄筋の降伏など隅部での損傷は見られず、側壁側で曲げ引張破壊した。
- (3) 帯鉄筋だけのケースでは、腹圧力による軸線方向のひび割れを抑制することができなかった。
- (4) FEMによる単調荷重の事前予測結果と実験結果とを比較すると、実験による降伏荷重がFEM解析による降伏荷重よりも小さいものの、定性的には整合する結果が得られた。
- (5) FEM解析と実験とで降伏荷重が異なった理由としては、正負交番荷重の影響や、解析における入力定数

と実強度との整合性のほか、解析において設定したSFRCの引張軟化特性と実験供試体との整合性などが考えられる。これらの原因究明と、要素試験による力学特性の把握が今後の課題である。

今後は、帯鉄筋を増やした場合にクロス配筋を省略しても所要の性能を確保できるか、あるいはクロス配筋によって帯鉄筋をどの程度省略できるかなどに着目して、配筋案の検討を継続し、施工性や経済性の高い配筋を考案したいと考えている。

参考文献

- 1) 例えば、首都高速道路株式会社：トンネル構造物設計要領（開削工法編），pp.2-71 - 2-73，平成20年7月
- 2) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅲ，コンクリート橋編，pp.238-287，平成14年3月
- 3) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，pp.309，平成14年3月
- 4) 長沼一洋：コンクリートの3次元非線形解析手法の開発，大林組技術研究所報，No.55，pp.1-8，1997
- 5) 土木学会：コンクリートライブラリー97・鋼繊維補強鉄筋コンクリート柱部材の設計指針（案），pp.8-17，平成11年11月
- 6) 長沼一洋：三軸圧縮下のコンクリートの応力～ひずみ関係，日本建築学会構造系論文集，第474号，pp.163-170，1995.8
- 7) 独立行政法人土木研究所耐震研究グループ耐震チーム：橋の耐震性能の評価に活用する実験に関するガイドライン（案）（橋脚の正負交番荷重実験方法及び振動台実験方法），土木研究所資料第4023号，平成18年8月