

は、上隅部が 134°，下隅部が 130° である。セグメント幅は、1.7m とした。

地盤条件は、地表面から 7.5m が N 値 4 の粘性土層で、それ以深は N 値 50 以上の硬質の砂礫層である。このように、せん断弾性波速度 V_s の差が大きい地層境界では、地震時において境界付近に発生する地盤ひずみが大きくなり、トンネルに発生する断面力が大きくなる条件である。

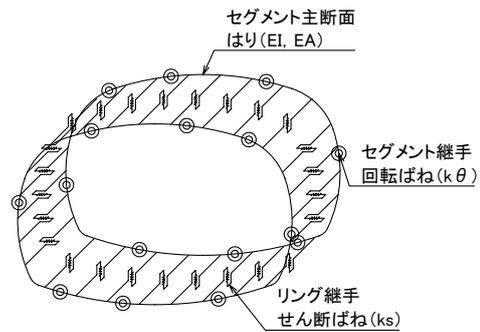


図-3 解析モデル

(2) 計算方法

上記トンネルの隅部において腹圧力の発生の有無を調べるために、常時および地震時の断面力を構造計算によって算定した。

計算手法として、常時は、セグメント本体を線形梁要素、セグメント継手を回転ばね、リング継手をせん断ばねにモデル化した 2 リング千鳥組のはりばねモデル解析とした (図-3)。地震時は、部材剛性低下を考慮するために、セグメント本体を非線形梁要素、継手部を非線形ばね要素とし、地盤を平面ひずみ要素とした相互作用モデルによる二次元動的応答解析とした。また、地震時解析も、シールドトンネル部は、添接効果を考慮するために 2 リングモデルとした。地震動は道路橋示方書 V 耐震設計編¹⁾ に示されるレベル 2 タイプ II 地震動から、トンネル上下端の層間変位が最大となる波形を選定した。

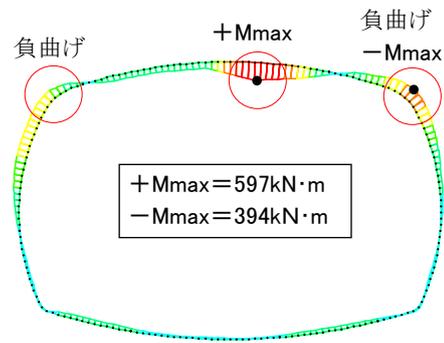


図-4 常時曲げモーメント図

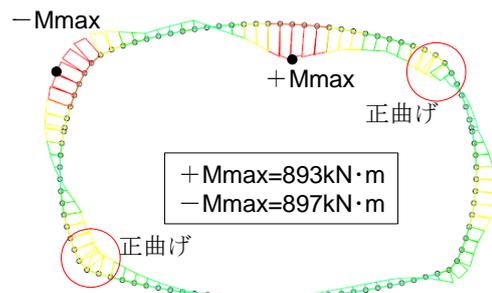


図-5 地震時曲げモーメント図

(3) 計算結果

曲げモーメント分布図について、常時解析結果を図-4 に、地震時解析結果 (左に変形時) を図-5 に示す。常時では、頂部に最大の正曲げ (内側引張) が発生し、上隅部に最大の負曲げ (外側引張) が発生している。一方、地震時で、トンネルが左に変形する時は、右上隅部および左下隅部において正曲げが発生している。反対に、トンネルが右に変形する時は、左上隅部および右下隅部において正曲げが発生することとなる。

レベル 2 地震動に対する試算では、隅部に発生する正の曲げモーメントは、上・下隅部ともに約 550kN・m、軸圧縮力は約 100kN であり、いずれも降伏モーメント約 660kN・m 以下の結果であった。

3. 隅部セグメントの配筋案

複合アーチ断面の隅部に正曲げが作用すると、ラーメン構造の隅部に正曲げが作用した時と同様に、内力の方向転換によって軸線の直角方向に腹圧力が

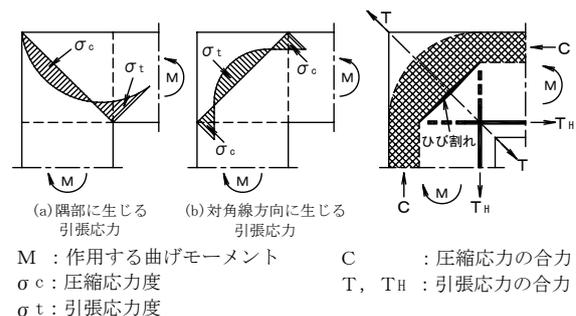


図-6 ラーメン構造隅部の応力状態¹⁾

作用する。そのため、隅部の対角線方向に引張力が発生し、十分な鉄筋が配置されていない場合、対角線と直角方向にひび割れが発生する (図-6)。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)

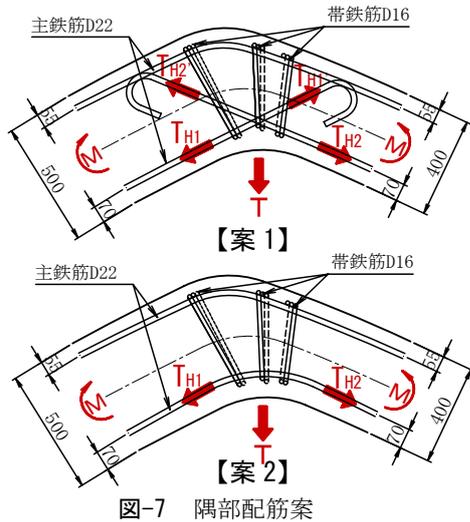


図-7 隅部配筋案

式(1)によると、発生断面力が同じ場合、上隅部に比べて側部と頂・底部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。そこで、下隅部を対象に補強配筋を検討した。

本検討で選定した SFRC セグメントは、コンクリートに混入した鋼繊維による補強効果を期待できるため、RC セグメントに比べて主鉄筋量を低減し、配筋筋・フープ筋を省略したセグメントである³⁾。

しかし、隅部に腹圧力が作用する場合、これに抵抗するための鉄筋を別途配置する必要がある。式(1)から腹圧力に抵抗するための鉄筋量は推定できるものの、SFRC セグメントにおける鋼繊維による引張応力の分担を考慮した配筋を検討することとした。具体的な例として、図-7 に 2 種類の配筋案を示す。案 1 はトンネル内側の主鉄筋を隅部でクロスさせて外側主鉄筋の位置にて定着させ、 T_{H1} ・ T_{H2} で腹圧力 T に抵抗するとともに、帯鉄筋によって補強する配筋案である。案 2 は、内側と外側の主鉄筋を平行に配置し、帯鉄筋によって腹圧力 T に抵抗させる案である。

4. FEM解析による隅部配筋案の比較

(1)解析ケースおよび解析モデル

表-1に解析ケースを示す。2つの補強案の他、補強筋を省略した場合の3ケースを対象として比較検討を行った。それぞれの配筋のFEM解析モデルを図-8に示す。荷重条件は、片側を固定点（ヒンジ支承）、もう片側を載荷点とし、セグメントを開く方向の曲げ（正曲げ）を生じさせる条件とした。解析にはコンクリート構造物の非線形FEM解析プログラム“FINAL⁴⁾”を使用した。解析に用いた材料諸元を表-2に示す。非線形構成則は、図-9に示す。

表-1 解析ケース

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

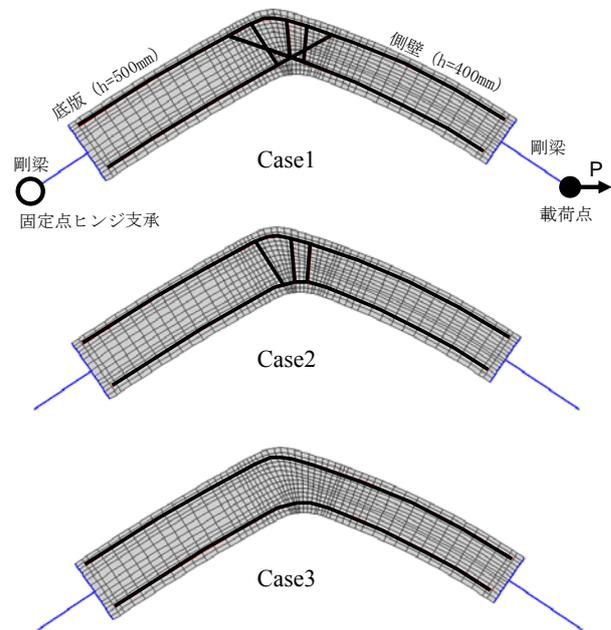


図-8 FEM 解析モデル

表-2 コンクリートおよび鉄筋諸元

<コンクリート>

要素タイプ	平面応力要素
圧縮強度 [N/mm ²]	42.0
引張強度 [N/mm ²]	2.78
ヤング率 [N/mm ²]	3.3×10^4
ポアソン比	0.17

<鉄筋>

要素タイプ	梁要素
降伏点強度 [N/mm ²]	345.0
ヤング率 [N/mm ²]	2.1×10^5
応力-ひずみ関係	バイリニア (二次剛性 1/100)

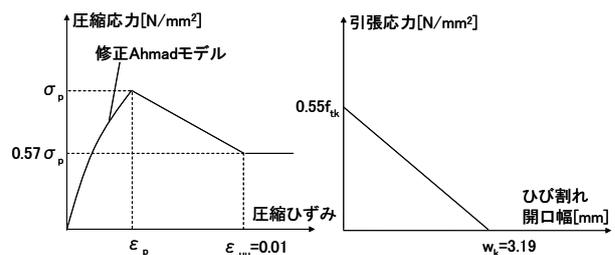


図-9 鋼繊維補強コンクリートの材料構成則⁵⁾
(左：圧縮特性 右：引張特性)

(2) 解析結果とその考察

a) 降伏荷重

図-10 に $P \sim \delta$ 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。

- Case1 : 降伏荷重最大, 308kN
- Case2 : Case1 よりも 15 (%) 小さい 261kN
- Case3 : Case1 よりも 31 (%) 小さい 212kN
(Case3 は引張鉄筋が降伏する前に、勾配が変化)

b) ひび割れ発生状況

図-11に各ケースの主要なひび割れ図を示す。ここで、Case1およびCase2は降伏変位の2倍の変位 ($2 \delta y$) でのひび割れを示し、Case3は降伏変位 ($1 \delta y$) でのひび割れを示している。

- Case1とCase 2 : $1 \delta y$ で目立つひび割れなし
- Case3 : 腹圧力による軸線方向ひび割れあり

そこで、Case3についてひび割れ発生状況を詳細に調べたところ、 $P=160\text{kN}$ 付近での $P \sim \delta$ 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、Case3と同じ配筋で、コンクリートの引張側応力 \sim 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発生と同時に荷重 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鋼繊維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。

c) 主鉄筋降伏位置とひび割れ進展状況

Case1 と 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-10 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、 $2 \delta y$ 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、隅部の補強として 3 箇所帯鉄筋のみより、クロス配筋の併用が有効であることを示している。 また、Case2 が 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 $1 \delta y$ 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。

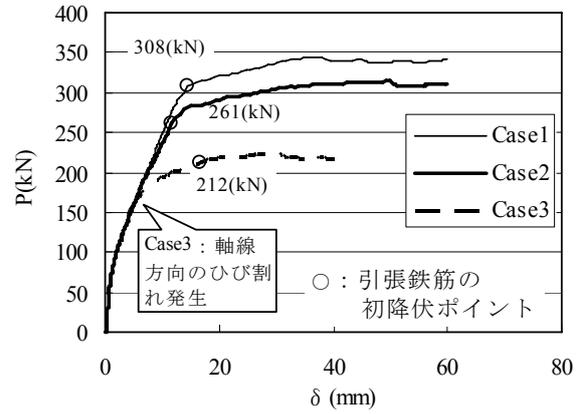


図-10 $P \sim \delta$ 特性

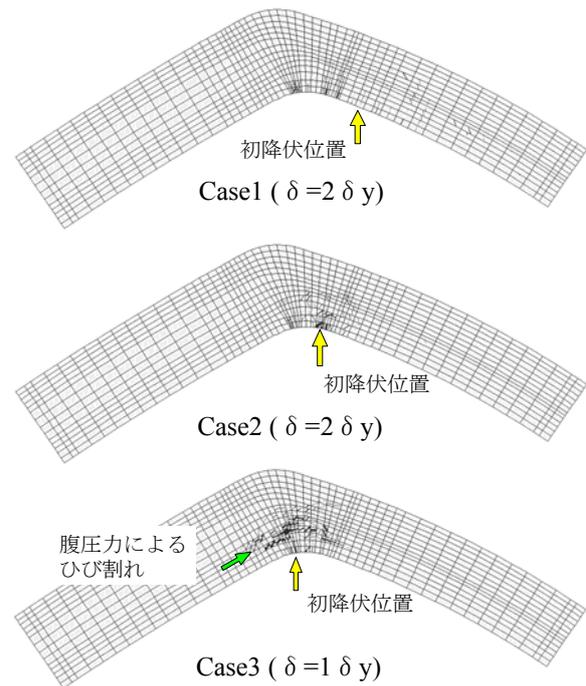


図-11 引張鉄筋降伏時のひび割れ図

5. 実大セグメントによる載荷試験

(1) 実験ケースおよび実験モデル

図-12に実験供試体およびその配筋を示す。また、表-3に実験供試体の主要な諸元を示す。実験供試体はコンクリートの設計基準強度 42N/mm^2 、鋼繊維混入率 $0.6\text{vol}\%$ のSFRCセグメントである。実験供試体の幅は 850mm で、使用した鉄筋の径および本数は表-3および図-12に示すとおりである。

セグメントは隅部を中心に一方が底部 500mm 、他方が側部 400mm となる。隅部配筋は案 1 とし、内側主鉄筋をクロスさせ、外側主鉄筋位置で定着するとともに、帯鉄筋を 3 箇所に配置し主鉄筋を拘束した。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)、他方を載荷点とした。

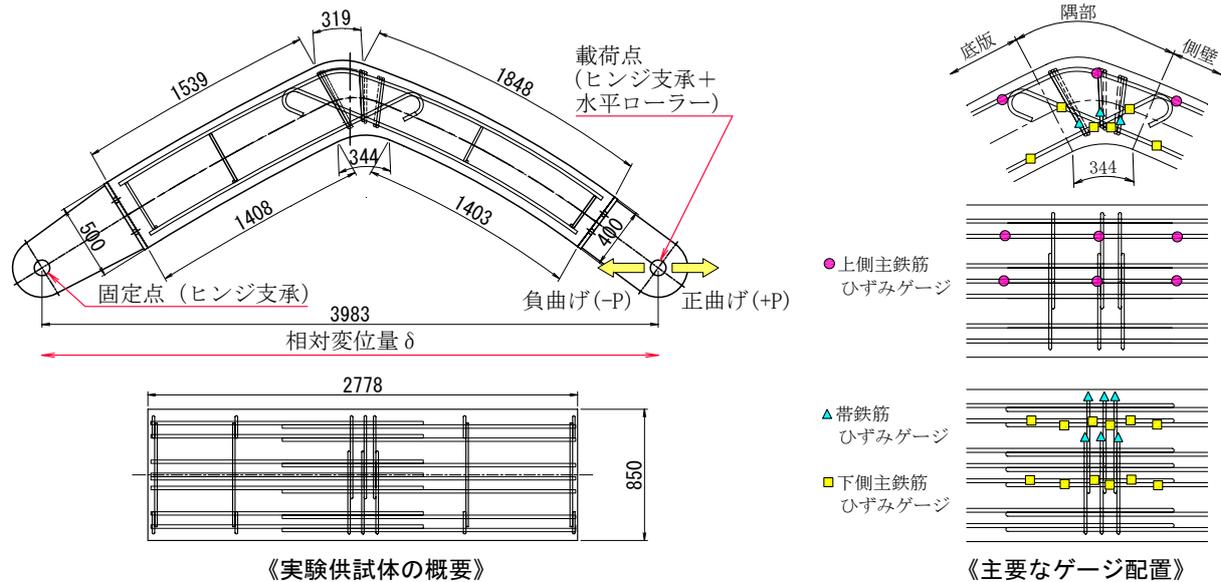


図-12 実験供試体および荷重治具

表-3 実験供試体の主な仕様

項目	仕様
コンクリート 設計基準強度	42 N/mm ²
鋼繊維混入率	0.6 vol%
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 (6本/0.85m)

表-4 実験ケース

ケース	荷重方法
Case1	正負交番荷重
Case2	単調荷重 (正曲げ)
Case3	単調荷重 (負曲げ)

表-4 に実験ケースを示す。荷重方法は正負交番荷重および単調曲げ荷重とした。正負交番荷重では引張側主鉄筋の降伏ひずみ (材料試験値=2140 μ) によって初降伏 ($1\delta_y$) を判定し、その後、 $2\delta_y$, $3\delta_y$, $4\delta_y$ まで荷重した。各荷重ステップでの荷重繰返し回数は3回とした⁶⁾。

(2) 実験結果

図-13 に実験より得られた荷重P～変位 δ 関係を示す。図には引張側主鉄筋の初降伏点および設計降伏荷重も示した。表-5 には降伏荷重および最大荷重を示す。降伏荷重および最大荷重の設計値は、セグメント厚400mmでの断面諸元 (鉄筋量, 被り, 設計基準強度等) から算出した降伏曲げ耐力および終局曲げ耐力を、荷重荷重Pに換算した値である。これら

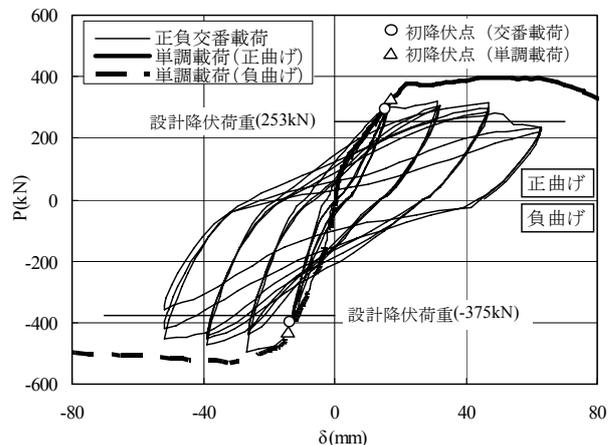


図-13 荷重P～変位 δ 関係

表-5 降伏荷重および最大荷重の比較

		降伏荷重*(kN)		最大荷重**(kN)	
		正曲げ	負曲げ	正曲げ	負曲げ
実験値	正負交番	290	-401	319	-495
	単調曲げ	307	-419	398	-529
設計値		253	-375	259	-401

※ 実験は鉄筋の初降伏荷重を示した。

※※ 設計値は降伏荷重を示した。

の値はSFRCの効果を含んでいる。図-13および表-5 に示すように、正負交番荷重, 単調曲げ荷重ともに降伏荷重および最大荷重において設計値を上回っており、隅部を含むセグメントについても梁部材としての設計が成立することを示している。これは腹圧力の影響を受ける正曲げのほか、負曲げについても同様である。

また、写真-1に示すように、いずれの実験ケースでも隅部に顕著なひび割れは発生せず、隅部を避けた位置（厚さ400mm側の曲率変化点）で曲げ破壊している。これらから隅部の補強配筋が十分であったことが確認できた。一方、正負交番载荷と単調曲げ载荷の結果を比較すると、降伏までの剛性は一致しているものの、降伏荷重や最大荷重については単調曲げ载荷の方が一様に上回っている。特に正曲げ载荷の場合にその傾向が顕著であり、写真-1においても正負交番载荷と単調载荷（正曲げ）で、破壊モードがやや異なっていることがわかる。これらの差は载荷手法の違いが主要因であると推定されるが、詳細な検討による現象の解明は今後の課題である。

6. まとめ

シールドトンネルのセグメントの設計は、本体部材を梁部材として設計を行うのが一般的である。しかし、複合アーチ断面の隅部のように、曲率半径が小さい部材に正の曲げモーメントが作用する場合、腹圧力による隅部での損傷を防止する必要がある。

本研究では小土被りの複合アーチ型シールドトンネルを対象とし、隅部における腹圧力の発生の有無を試算した結果、腹圧力の発生が予想された。そこで、SFRCセグメントにおける鋼繊維による引張応力の分担を考慮した配筋として2案（案1：クロス配筋+帯鉄筋による補強、案2：帯鉄筋のみによる補強）を検討した。非線形FEM解析によって腹圧力によるひび割れを抑制するための補強配筋を検討した結果、案2の3箇所帯鉄筋のみによる隅部の補強に対し、案1のクロス配筋の併用が有効であることが分かった。さらに、実大セグメントの正負交番载荷実験および単調曲げ载荷実験を行った。その結果、採用した案1のクロス配筋の併用による補強配筋によって隅部の損傷を防ぎ、梁部材としての設計上の耐力を確保できることを確認した。

今後、隅部セグメントの配筋のさらなる合理化を検討し、施工性や経済性に優れたセグメントを考案したい。

参考文献

- 1) 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
- 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



写真-1 破壊状況 (Case1 正負交番载荷)



写真-2 破壊状況 (Case2 単調载荷正曲げ)



写真-3 破壊状況 (Case3 単調载荷負曲げ)

- 3) 藤井，土橋，中山，松原，守屋：SFRCセグメントの実施工への適用 土木学会第61回年次学術講演会概要集，6-088，2006.9
- 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) 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
- 6) 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）（橋脚の正負交番载荷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