

シールドトンネルセグメントの地震時破壊挙動推定

東 俊司¹・小池 武²・高田至郎³

¹正会員 工修 セキスイ管材テクニクス(株)土木システム推進部 (〒520-3081 滋賀県栗太郡栗東町野尻 75)
²正会員 工博 川鉄エンジニアリング(株)土木事業部 (〒112-0004 東京都文京区後楽 1-1-5)
³正会員 工博 神戸大学工学部建設学科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1)

シールドトンネルは、コンクリート製あるいは鋼製のセグメント同士を継手部でボルト結合した構造体のため、トンネルの地震時挙動はセグメントと継手部の直列・並列システムの逐次破壊に支配される。セグメントの材料特性、構造形式、継手性能などセグメント・継手部構成要素の強度特性が、セグメント・継手部の使用限界から終局限界に至る破壊進展状況に及ぼす影響をFEM解析により検討した。また、併せて免震構造として期待できるFRPM管内挿方式(FP-L工法)での鳥取西部地震後調査を実施しその性能を確認したので、その結果を報告する。

Key Words:Shield Tunnel,segment,seismic design,FRPM pipe(Fiber Reinforce Plastic Mortar)

1. はじめに

本文は、土木学会関西支部でシールドトンネルの合理的耐震設計法を確立する目的で平成 11 年に調査委員会が発足した。その委員会活動¹⁾の一部を報告するものである。

阪神・淡路大震災では、下水道管路の被害として基本的には軽微であるが、特長として特に南北方向のシールドトンネルで管路軸方向クラックは東西方向と同程度であるが、リング方向の輪切りクラックの頻度が多く²⁾、1 m 間隔(セグメント幅)に発生している所もある。これは、シールドトンネルが管軸方向に引張ひずみを生じたからと考えられる。西日本では最近マグニチュード 6 以上の地震が活発化する傾向が見られるが、セグメント、継手板、ボルト、コンクリート二次覆工の鋼製要素が圧縮・引張・曲げの外力を受けた場合に、その部材をシールドトンネルに組み上げた状態でそれぞれが使用限界から終局限界にいたる過程を明らかにしておくことは意義深いことと考える。

本論文では、上述の目的のために一例としてFEM解析を用いて鋼製セグメントの二次覆工の破壊過程を追跡し明らかにしている。また、コンクリート二次覆工のクラック防止に効果的なFRPM管内挿方式(FP-L工法)二次覆工を鳥取西部地震後に調査した結果を報告する。

2. 簡易法によるトンネル軸方向の剛性³⁾

二次覆工を有する場合の等価剛性は、その構造は構成部分として外管(セグメントを継手ボルトで結合)と内管(二次覆工コンクリート)を持つ合成構造であり、軸方向力が圧縮か引張かで剛性が異なる。また、曲げ剛性については圧縮側がセグメント単体と二次覆工で、また引張側はセグメントと継手ボルトおよび二次覆工でそれぞれ抵抗する特徴を持つ。

(表 1 参照)

表 1. トンネル断面の剛性モデル

剛性	剛性モデル
軸方向力	
圧縮	セグメント 並バネ コンクリート二次覆工
引張	セグメント～継手ボルト 直列バネ
曲げ	セグメント～継手ボルト 直列バネ 並列バネ コンクリート二次覆工

シールドトンネルの等価軸剛性および等価軸曲げ剛性は以下の式より算出する。

1) 等価軸剛性

等価圧縮軸剛性および等価引張剛性は以下の式より算出する。

$$(EA)_{eq}^C = E_s A_s + E_L A_L \tag{1}$$

$$(EA)_{eq}^T = K_{eq1} \ell_s \tag{2}$$

$$K_{eq1} = \frac{K_B K_s}{K_B + K_s} \tag{3}$$

$$K_B = \frac{E_B A_B}{\ell_B}, \quad K_s = \frac{E_s A_s}{\ell_s} \tag{4}$$

ただし、 E_s, A_s :セグメント弾性係数、断面積

E_L, A_L :コンクリート弾性係数、断面積

K_{eq1} :セグメントリングの軸剛性

K_B :リング継手軸剛性 K_s :セグメント軸剛性

2) 等価軸曲げ剛性

等価軸曲げ剛性は以下の式より算出する。

$$(EI)_{eq} = E_s r_s^3 t_s \left\{ (\pi - 2\phi) \left(\frac{1}{2} + \sin^2 \phi \right) - 3 \sin \phi \cos \phi \right\} \\ + E_s r_s^3 t_s \frac{1}{1 + \frac{E_s A_s}{n_j k_j I_s}} \left\{ (\pi + 2\phi) \left(\frac{1}{2} + \sin^2 \phi \right) \right. \\ \left. + 3 \sin \phi \cos \phi \right\} + E_L r_L t_L \pi (r_L^2 + 2 r_L^2 \sin^2 \phi)$$

$$\phi + \cot \phi = \pi \left[\left(1 + \frac{E_L A_L}{E_s A_s} \right) \left(1 + \frac{n_j k_j \ell_s}{E_s A_s} \right) - \frac{1}{2} \right] \quad (5)$$

r_s : リング接合面におけるセグメント断面中心半径
 r_L : リング接合面における二次覆工断面中心半径
 t_s : セグメント厚さ t_L : 二次覆工厚さ
 ϕ : トンネル断面中心軸から中立までの角度
 n_j, k_j : リング継手数と1個当たり引張ばね係数

3. FEMシェルモデルによるトンネルセグメント詳細解析

1) 計算条件

代表的モデルとして、関西地方の下水道シールドトンネルを検討対象とする。構造形式(表2)は鋼製セグメントの二次覆工を有するトンネルとし、その挙動をFEM解析ソフトABAQUS5.8を用いて検討した。

表2. トンネルの諸元

	記号	単位	
セグメント外径	D_o	(m)	3.150
セグメント内径	D_i	(m)	2.894
コンクリート仕上がり内径	R_3	(m)	2.400
セグメント幅	L_s	(m)	1.00
継手ボルト呼び径			M20
継手ボルトの本数	n_b	(本)	30
継手ボルトの長さ	l_B	(m)	0.06
継手板の厚さ	t_j	(m)	0.01
継手板の高さ	h_j	(m)	0.125
縦リブの高さ	h_s	(m)	0.118
縦リブの厚さ	t_s	(m)	0.009
縦リブの幅	b_s	(m)	0.069
縦リブの本数	n_s	(本)	24

2) 評価項目

FEM解析で軸方向のシールドトンネルの断面の以下の項目に着目し弾塑性曲線を出し、簡易法との整合性を確認した。

- (1) シールドトンネルに引張荷重を与えた場合のP- δ 曲線
- (2) シールドトンネルに圧縮荷重を与えた場合のP- δ 曲線
- (3) シールドトンネルに曲げ荷重を与えた場合のM- θ 曲線
- (4) 引張荷重を与えた場合のセグメント間の開きおよびボルト部の伸び量の関係

3) 解析モデル

図1に示すように引張力を受けたトンネルの変状解析(引張解析)にはセグメントのみを使用し、圧縮・曲げ解析にはセグメント+コンクリートの合成

モデルを使用した。モデルには対称性があるので1/4モデルにて解析を行った。

セグメントにはシェル1次要素(四角形)、コンクリートにはソリッド1次要素(六面体)を使用した。なお、引張・曲げ解析の場合はセグメント結合部のボルトの伸び量を表現できるようにするために図2に示すような仮想節点を想定しbeam要素を用いてモデル化した。表3に解析で使用了材料の物性を示す。

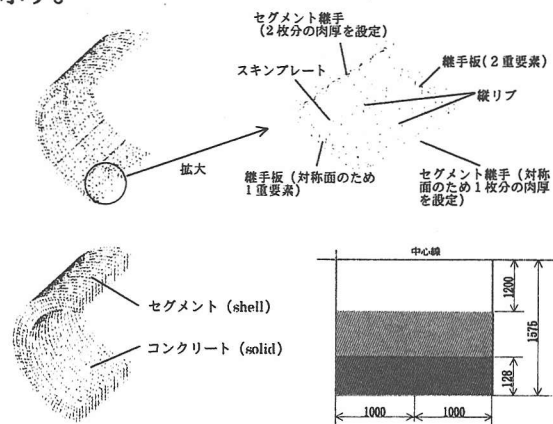


図1. FEM解析モデル図および寸法

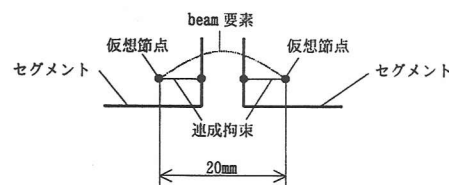


図2. セグメント結合部M20ボルト想定beam要素

表3. 材料物性

	弾性係数 GPa (kgf/mm ²)	ポアソン 比	降伏応力度 GPa (kgf/mm ²)	強度 GPa (kgf/mm ²)
セグメント	205.9 (21000)	0.29	0.137 (14)	0.402 (41)
継手ボルト	205.9 (21000)	0.29	0.137 (14)	0.402 (41)
コンクリート	圧縮	20.6 (2100)	0.30	0.021 (2.1)
	引張	20.6 (2100)	0.30	0.002 (0.21)

セグメントおよび継手ボルトの降伏応力後以降の弾性係数は1/4に低下すると仮定している。

4) 解析条件

(1) 引張圧縮の荷重条件と拘束条件

図3に示すように、1/4モデルであるため対称面に対して対称方向を拘束する。Y-Z対称面に対してはX軸方向の拘束を行う。また、X-Y対称面に対し、ではトンネルの収縮を考慮するため、円筒座標系を用いR方向のみをフリーとした。

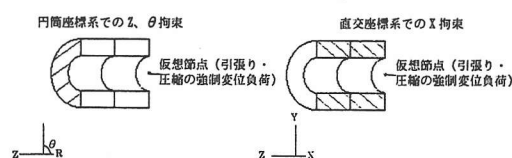


図3. 拘束条件(引張・圧縮)

(2) 曲げの荷重条件と拘束条件

曲げについては図4に示すように、Y-Z 対称面に対してはX軸方向の拘束を行う。また、簡易法で計算される中立軸のずれを考慮するため、トンネル端面に平板を想定し、中立軸上の仮想節点がY軸方向に拘束された状態で強制回転を与えた。

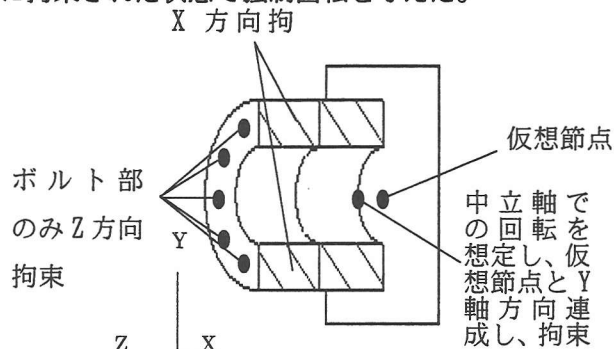


図. 4 拘束条件（曲げ）と中立軸

5) 解析結果

図5～図7は、FEM解析から求めたそれぞれ引張解析でのP-δ曲線、圧縮解析でのP-δ曲線、曲げ解析でのM-θ曲線を示す。

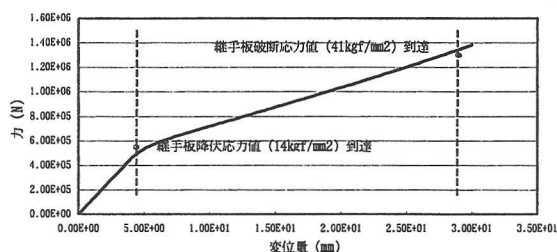


図. 5 引張解析 P-δ 曲線

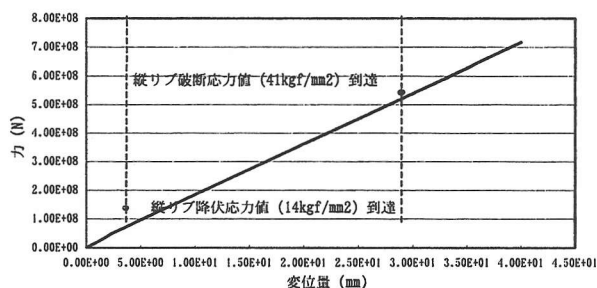


図. 6 圧縮解析 P-δ 曲線

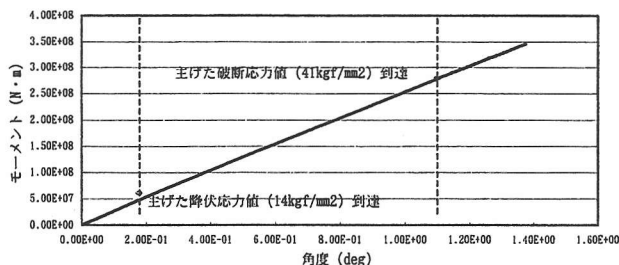


図. 7 曲げ解析 M-θ 曲線

図8は、引張解析におけるトンネル長4m換算で29mm変形したときの応力状態を示す。この時セグメントの継手板ボルト取り付け部で破断応力 0.402Gpa(14kgf/mm²)を越えることが予測される。

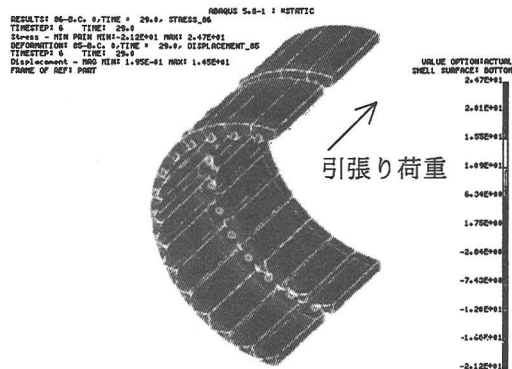


図. 8 引張解析応力図

図9は、圧縮解析におけるトンネル長4m換算で29mm変形したときの応力状態を示す。この時縦リブ部が破断応力 0.402Gpa(14kgf/mm²)を越えることが予測される。

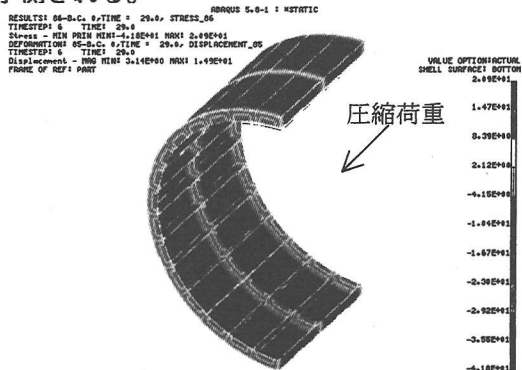


図. 9 圧縮解析応力図

図10は、曲げ解析におけるトンネル長4m換算で1.1°曲げ変形したときの応力状態を示す。この時、引張変形を受ける上部の継手板ボルト取り付け部で破断応力 0.402Gpa(14kgf/mm²)を越えることが予測される。

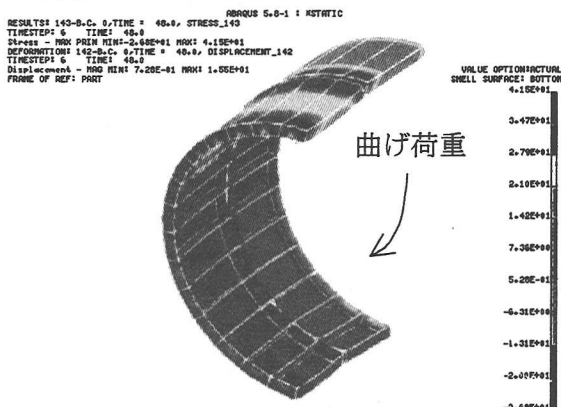


図. 10 曲げ解析応力図

さらに、引張解析において図11に示すようにボルトの伸び量を計測位置（中央対称面）の周方向各点の平均値で評価しとめた。

この結果から、ボルトが降伏するときのセグメント間の開きは10mm程度と予測できる。

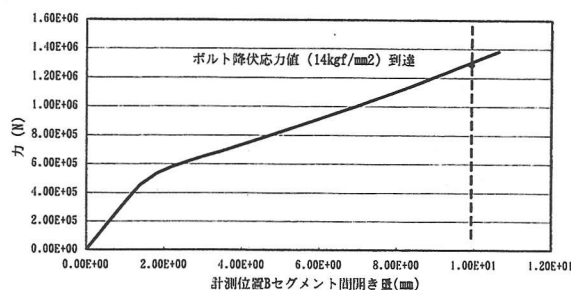


図.11 セグメント間の開きと引張力の関係

6) 考察

(1)簡易法との整合性

上述の簡易法による等価剛性と今回のFEM解析での等価剛性を比較してみると表5のようにほぼ一致しているものと考えられる。ただし、引張に対しては簡易法もFEM解析もコンクリート要素を無視した結果である。

表. 5 等価剛性の比較

	引張荷重 (kN)	圧縮荷重 (kN)	曲げ荷重 (kN・m ²)
簡易計算	552700	73442140	61917550
FEM 解析	457853	82391553	62021177

(2)トンネル破壊進行状況

FEM 解析を用いて算定したシールドトンネルの破壊進行状況を表6～表8に示す。

表. 6 破壊進行状況 (引張解析)

	変位量	荷重
1.継手板降伏	4.0mm	453N
2.継手ボルト降伏	28.0mm	1309N
3.継手板破断	29.0mm	1346N

表. 7 破壊進行状況 (圧縮解析)

	変位量	荷重
1.縦リブ降伏	2.8mm	57443N
2.コンクリート降伏	3.3mm	66181N
3.縦リブ破断	29.0mm	526754N

表. 8 破壊進行状況 (曲げ解析)

	角度	モーメント
1.コンクリート降伏(引張)	—	—
2.コンクリート降伏(圧縮)	0.069°	18604784Nm
3.継手板降伏	0.160°	43329702Nm
4.継手板破断	1.100°	266799720Nm

※引張側のコンクリート二次覆工は解析 STEP1 の時点で降伏応力に達している。

(3)関西地盤を想定した実際例

上述のトンネルが関西の地盤を想定し土被り 35m レベル2地震動でどのような状況であるかを応答変位法を用いて予測した。

表. 9 応答変位法に関する計算条件

	単位	数値
地盤変位振幅	cm	16.83
地盤周期	sec	1.16
伝播速度	m/sec	360
波長	m	418

その結果、引張力が 1016kN となり表6と図11の結果から、継手板が降伏しており、セグメント間の開きが7mm程度になる。簡易法と10倍程度の違いがあるのは、継手板取付け部の応力集中がきいていると考えられる。圧縮力は 4803kN、曲げモーメントは 1701182kN・m で表.7 および 8 から分かるようにほとんど影響がない程度と考えられる。

4. 鳥取西部地震後FRPM管内挿方式二次覆工の調査結果

上述してきたように、レベル2地震動では、曲げによる引張側コンクリートのクラックや引張解析のセグメントの開きによるコンクリートのクラックが先ず発生する。しかしFRPM管を内挿管としてセグメントとの隙間にエアールを充填したシールドトンネルでは、2000年10月6日に発生したM7.3の鳥取西部地震後に、震度5強で地震最大加速度817galを記録した新見市内のトンネル現場の現地調査を実施した結果、FRPM管内に被害がなかったことが確認できた。

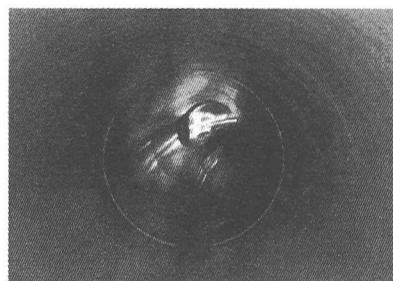


図.12 鳥取西部地震後FRPM管(φ1200)内挿方式状況

謝辞

本研究は、土木学会関西支部シールドトンネルの合理的耐震設計法に関する調査研究委員会活動の一環として実施したものであり、御指導賜った委員長土岐憲三先生ほか委員会メンバー各位のご助言に深く感謝致します。

参考文献

- 1)シールドトンネルの合理的耐震設計法に関する研究会(1999):シールドトンネルの合理的耐震設計法ガイドライン(案)
- 2)阪神大震災調査委員会(1996):阪神・淡路大震災調査報告書(解説編)、地盤工学会、PP.418-439
- 3)建設省土木研究所(平成5年3月):鉄筋コンクリート製シールドトンネルの耐震設計法に関する研究、PP.29-32