

断層変位を受けるトンネルの損傷を緩和するために高圧縮性コンクリートを用いた改良工法

若尾 和俊¹・谷 和夫²・高橋 秀明³

¹ 横浜国立大学大学院 工学府 社会空間システム学専攻 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)
E-mail:d05gc124@ynu.ac.jp

² 横浜国立大学大学院 工学研究院 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)

³ 正会員 東電設計 第二土木本部 (〒110-0015 東京都台東区上野3-3-3)

2004年に起きた新潟県中越地震では、断層変位によると思われるトンネルの覆工コンクリートの大規模な崩落が確認された。トンネルの断層変位による損傷を緩和する工法が提案され、数値解析により損傷を十分に緩和できることがわかった。しかし、吸収層として用いた発泡スチロールは初期剛性が小さく、常時の列車荷重により過大な変形が生じる可能性がある。そこで、初期剛性が大きく、降伏後に高い圧縮性を有する高圧縮性コンクリート材料を開発し、その断層変位によるトンネルの損傷を緩和する効果を数値解析により検討した。その結果、試作した高圧縮性コンクリートは、軸剛性が大きいいため損傷を緩和する効果が小さいことがわかった。今後は、より吸収層に適した高圧縮性コンクリートの性能向上に努める。

Key Words : tunnel, fault, improved ground, numerical analysis

1. はじめに

2004年に起きた新潟県中越地震では、断層変位によると思われるトンネルの覆工コンクリートの大規模な崩落が確認された¹⁾。そこで、トンネルの断層変位による損傷を緩和する工法として、平滑化層、吸収層、継ぎ手、摩擦除去層の4つの要素から成る改良工法が提案された²⁾。そして、改良効果を数値解析を用いて検討した結果、断層変位によるトンネルの損傷を十分に緩和することができることがわかった²⁾。しかし、吸収層として用いた発泡スチロール(EPS)は初期剛性が小さく、常時の列車荷重により過大な変形が生じる可能性がある。列車が安全に走行するためには、時速300kmで沈下量を35mm以下に抑える必要がある³⁾。そこで、初期剛性が大きく、降伏後に高い圧縮性を有する高圧縮性コンクリートを考案した。このコンクリートの特徴は、使用する球殻の種類や充填率、モルタルの配合を変えることで、剛性を自由に変えることができる点である。そして、高圧縮性コンクリートを吸収層として用いた改良工法の断層変位によるトンネルの損傷を緩和する効果を数値解析により検討した。

2. 高圧縮性コンクリートの一軸圧縮試験

(1) 供試体

供試体は、直径10cm、高さ20cmの円柱型の型枠に径40mmのピンポン玉を詰め、モルタルを流し込み作製した。モルタルの強度を変えるために、水セメント比を変えた3種類の供試体を作製した。供試体の諸元を表-1に示す。供試体Aは水セメント比が小さいため、流動性が低い。そこでモルタルを十分に空隙に充填するために減水剤を添加した。減水剤は高性能AE減水剤(マイティ300)を用い、水に対して2%添加した。また、セメントは早強ポルトランドセメント(太平洋セメント、密度3.14kg/m³)、砂は山砂(千葉県君津市法木産、密度2.62kg/m³、表面水率2.0%、吸水率1.59%)、ピンポン玉はヤマト卓球株式会社製(商品名: #10140、直径40mm、体積33.5cm³、質量2.77g)を用いた。また、圧縮による飛散を防ぐために、供試体にメンブレンを被せて試験を行った。

(2) 実験結果

供試体Cの変形過程を写真-1に示す。極めて脆的な挙動を示し、圧縮量が大きくなるにつれて、水平方向に大きくはらみだした。他の2つの供試体についても同様な挙動を示した。

実験結果と応力-ひずみ関係を表-2と図-1、2に示す。水セメント比が40(供試体B)と50(供試体C)では、一

軸圧縮強さ q_u と $q=1/2q_u$ 時の割線ヤング率 E_{50} はそれほど変わらないが、水セメント比が30（供試体A）のケースでは、他の2つのケースの2倍以上となっており、水セメント比が小さいほど剛性が高い。また、応力 - ひずみ曲線は、どの供試体においても、最大応力を記録した後、著しく低い残留強度を示した。

(3) 応力 - ひずみ曲線のモデル化

実験結果から得られた応力 - ひずみ曲線をバイリニア型にモデル化した（図-3）。最も一般的である水セメント比50の供試体Cを選んだ。最大せん断強さを発揮するまでの応力 - ひずみ曲線を線形と仮定し、最大応力後の剛性は初期剛性の1/1000とした。初期剛性は、密度 20kg/m^3 のEPSと比較べて、初期剛性が約200倍となった。

実験結果では、最大応力を記録した後は著しく低い残留強度を示したが、これは供試体が水平方向に拘束されていないためである。吸収層として用いる場合は、吸収層は水平方向に広がっているため、水平方向に拘束を受け、降伏後も強度を保つと考えられる。そこで、最大応力後の剛性は初期剛性の1/1000とした。

表-1 供試体の諸元

供試体	A	B	C
水セメント比	30	40	50
砂：セメント	1:1		
減水剤	添加	不添加	
ピンポン玉 (個数)	24		
直径 D (mm)	100.0		
高さ h (mm)	205.4	205.5	201.6
質量 m (g)	1858	1814	1687
体積 V (cm ³)	1630	1616	1533
密度 ρ_t (g/cm ³)	1.14	1.12	1.10
球殻の充填率	0.493	0.498	0.524
養生期間 (日数)	15	21	

表-2 実験結果

供試体	A	B	C
q_u (kPa)	5277	3519	3584
E_{50} (MPa)	2217	742	963
ε_f (%)	0.304	0.513	0.362

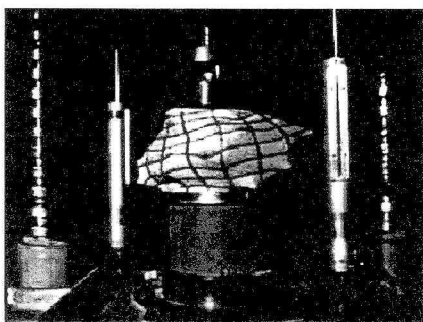
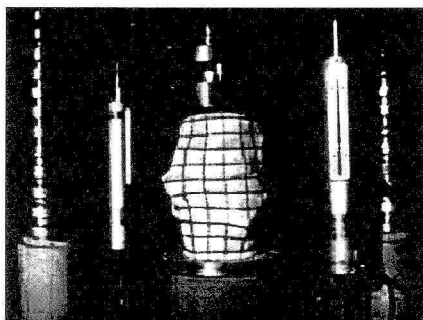
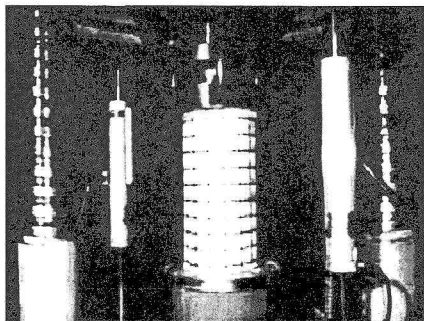


写真-1 上から $\varepsilon_a = 0, 10, 55\%$ （供試体C）

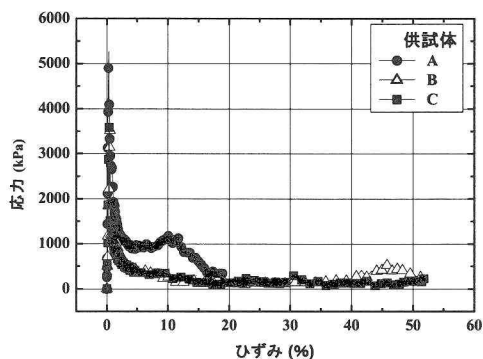


図-1 応力 - ひずみ曲線 ($\varepsilon = 0 \sim 60\%$)

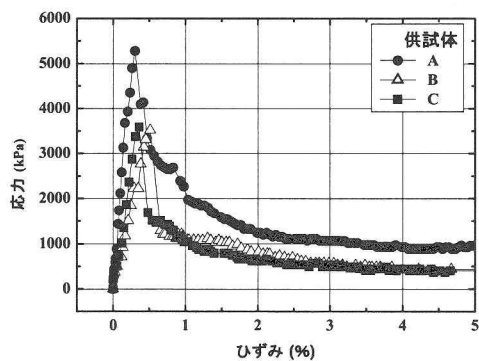


図-2 応力 - ひずみ曲線 ($\varepsilon = 0 \sim 5\%$)

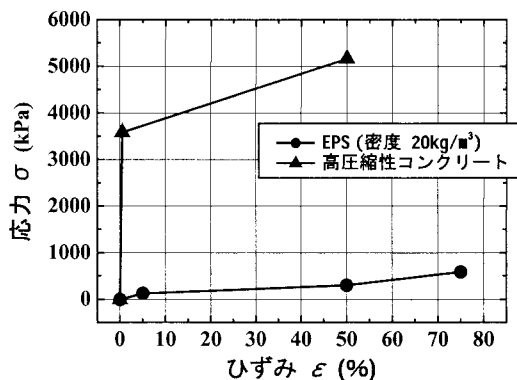


図-3 EPS と高圧縮性コンクリートの応力 - ひずみ曲線

3. 高圧縮性コンクリートを用いた改良工法の効果の数値解析による検討

(1) 断層変位を受けるトンネルの損傷を緩和する工法の概要

図-4に断層変位を受けるトンネルと改良区間の平面図と断面図を示す。

改良部分は、平滑化層、吸収層、継ぎ手、摩擦除去層4つの要素から成る。平滑化層は、曲げ剛性が高い層であり、曲げ反力により吸収層を圧縮変形し、線形構造物の連続した曲げ変形を保持する。トンネルを対象としたケースでは、鉄筋を入れた覆工が平滑化層として機能する。吸収層は、降伏後に高い圧縮性を有する層であり、断層の変形を吸収する機能を有する。トンネルの軸に直交する方向の断層変位に対しては、曲げ剛性が高い平滑化層が軟らかい吸収層を圧縮して、局所的な変形を連続で緩やかにする効果を期待している。

一方、トンネルの軸に平行な方向の断層変位に対しては、トンネルに生じる軸力を低減するために、継ぎ手と摩擦除去層を設置することとした。継ぎ手は軸方向に伸縮可能な二重管構造となっており、曲げ剛性を保った状態で軸方向の変位に追従することができる。さらに、原地盤と平滑化層の間に作用する摩擦(せん断地盤反力)を低減するために、摩擦係数の小さい摩擦除去層を設けた。

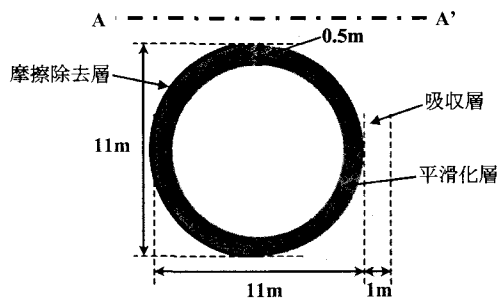
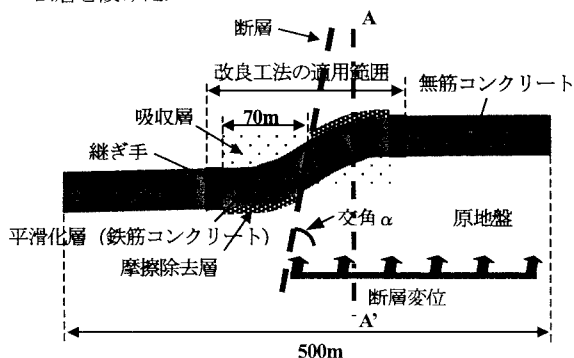


図-4 改良工法の概要

(上) 平面図 (下) 断面図 (A-A')

(2) 計算モデル

図-5に示すように、トンネルを断層と交角 α で交差する梁でモデル化し、継ぎ手の部分は梁の剛性を小さくした。原地盤、吸収層、摩擦除去層の地盤反力は、トンネルの軸に直交する方向と平行な方向の離散型ばねでモデル化した。そして、断層変位 D_f を軸直交方向と軸方向の成分に分解し、応答変位法の計算法を用いて計算した²⁾。 $\alpha < 90^\circ$ の場合は、原地盤と吸収層のせん断地盤反力によってトンネルに軸方向に引張力が生じる。一方、 $\alpha > 90^\circ$ の場合は、断層変位によりトンネルに軸方向に圧縮力が生じる。

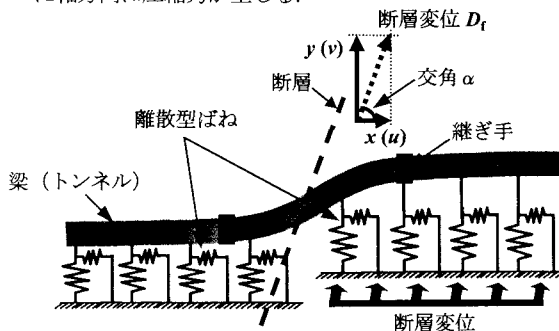


図-5 計算モデルの概要

断層変位 D_f をトンネルの軸に直交する方向 y と平行な方向 x に分割し、杭の設計計算方法を参考に、軸に直交する方向 y の式(式-1)と平行な方向 x の式(式-2)を求めた。

$$E_b I_b \frac{d^4 v}{dx^4} + k_s H_b (v - D_f \cos \alpha) = 0 \quad \dots \text{式-1}$$

$$E_b A_b \frac{d^2 u}{dx^2} + k_s H_b (u - D_f \sin \alpha) = 0 \quad \dots \text{式-2}$$

ただし、 u は軸方向の変位、 v は軸直交方向の変位、 $E_b I_b$ と $E_b A_b$ は平滑化層の曲げ剛性と軸剛性、 k_s と k_b は軸に直交な方向と平行な方向の地盤反力係数を表す。

(3) 計算条件

横ずれ断層と交わる硬岩中の山岳トンネルを対象と

した。硬岩のトンネルの軸に直交する方向の地盤反力係数は $k_h=1.4 \times 10^7 \text{ kN/m}^3$ とし、軸に平行な方向のせん断地盤反力係数は $k_v=0$ 、 $3k_v=4.2 \times 10^6 \text{ kN/m}^3$ とした²⁾。断層変位は $D=1.0\text{m}$ とした。トンネルは円筒断面とし、外径は11m、内径は10m、ライニングの厚さは0.5m、全長は500mとした。平滑化層(曲げ剛性を高めたライニング)は鉄筋コンクリートとし、長さは140mとした。軸剛性は線形と仮定し、曲げ剛性は材料の非線形性と軸力との相互作用を考慮した $M-\phi$ 関係でモデル化した²⁾。継ぎ手(長さ5m)は平滑化層の両端($x=\pm 70\text{m}$)に設置した。継ぎ手の軸剛性は無筋コンクリートの軸剛性の1/1000とし、曲げ剛性は無筋コンクリートの曲げ剛性とした。そして、非改良部分は通常の覆工である無筋コンクリートに対応する剛性とした。吸収層は高圧縮性コンクリートとし、幅は1m、高さは11m、長さは70mとした。摩擦除去層のせん断地盤反力係数は硬岩のせん断地盤反力係数の1/10000とした。

(4) 評価項目

(a) 終局引張り耐力 N_u 、終局圧縮耐力 N'_u

$\alpha < 90^\circ$ の場合は、トンネルが軸方向の引張り力によって破断しないように、生じる最大引張り力を終局引張り耐力 N_u ($=1.00 \times 10^5 \text{ kN}$)より小さくする必要がある。また、 $\alpha > 90^\circ$ の場合は、トンネルが軸方向の圧縮力によって圧壊しないように、生じる最大圧縮力を終局圧縮耐力 N'_u ($=3.56 \times 10^5 \text{ kN}$)より小さくする必要がある。

(b) 最大曲げモーメント $M_{\max}$

トンネルが曲げ破壊しないように、生じる最大曲げモーメント $M_{\max}$ を終局曲げモーメント M_u より小さくする必要がある。

(c) 最大・最小せん断力 $S_{\max}$ 、 $S_{\min}$

トンネルがせん断破壊しないように、生じる最大せん断力 $S_{\max}$ と最小せん断力 $S_{\min}$ の絶対値をせん断耐力 V_d より小さくする必要がある。せん断耐力は軸力の影響を考慮して算出した。

(d) 最大折れ角 $\theta_{\max}$

鉄道軌道には、列車が脱線せずに走行するために平行移動の折れ角と折れ込みの折れ角の制限値が規定されている²⁾。より厳しい条件である折れ込みの折れ角の制限値(列車速度100km/h, 200km/h, 300km/hにおいて、それぞれ $\theta_{100}=0.010$, $\theta_{200}=0.0047$, $\theta_{300}=0.003$ (rad))を用いて評価することとした。

(5) 解析結果

(a) トンネルの軸に直交する方向の変位 v

図-6に、トンネルと断層が直交する場合($\alpha=90^\circ$)における変位 v の分布を示す。吸収層として高圧縮性コ

ンクリートを採用すると、吸収層をEPSとする場合と比べて、高圧縮性コンクリートのケースの方が断層位置で曲げ変形が局所化している。これは、EPSと比べて、高圧縮性コンクリートの方が剛性が大きいため、吸収層が効果的に圧縮されていないためである。

(b) 曲げモーメント M

図-7に、交角 $\alpha=90^\circ$ における曲げモーメントの分布を示す。吸収層が高圧縮性コンクリートのケースは、曲げモーメントが断層のごく近傍に局所化し、最大曲げモーメント $M_{\max}$ は終局曲げモーメント M_u を超え、曲げ破壊することがわかる。一方、吸収層がEPSのケースは、最大曲げモーメントが断層位置から20mの位置に生じ、終局曲げモーメント M_u を下回り、曲げ破壊しないことがわかる。これは、EPSと比べて、高圧縮性コンクリートの方が剛性が大きいため、トンネルが吸収層から受ける反力が大きいためである。

図-8に、曲げモーメントの安全率 $M_u/M_{\max}$ と交角 α の関係を示す。 $\alpha \leq 70^\circ$ の空白の点は、トンネルに生じる軸引張り力が大きくトンネルが破断したことを意味する。EPSのケースは、 $70^\circ \leq \alpha \leq 170^\circ$ の範囲で安全率が1より大きくなり、曲げ破壊しない。しかし、高圧縮性コンクリートのケースでは、剛性が大きいため $\alpha=170^\circ$ の範囲のみ安全率が1を超えたが、それ以外の範囲では超えなかった。

(c) せん断力 S

図-9に、交角 $\alpha=90^\circ$ における、せん断力の分布を示す。吸収層がEPSのケースと比べて、高圧縮性コンクリートのケースはせん断力の生じる範囲が狭く、最大値が大きいことがわかる。高圧縮性コンクリート、EPSの両ケースともに、最大値がせん断耐力 V_d を上回っているが、せん断補強鉄筋量を増やすなどの対策で対応することができる。

図-10に、せん断力の安全率 $V_d/S_{\max}$ 、 $V_d/S_{\min}$ と交角 α の関係を示す。高圧縮性コンクリートの $\alpha=170^\circ$ のケースを除いて、どの交角においても安全率が1を下回るため、せん断補強鉄筋量を増やすなどの対策が必要である。

(d) 軸力 N

図-11に、軸力(引張り、圧縮)の安全率 N_u/N 、 N'_u/N' と交角 α の関係を示す。吸収層がEPSのケースと比べて、高圧縮性コンクリートのケースは安全率が小さい。これは、EPSと比べて、高圧縮性コンクリートの方が軸剛性が大きく、トンネルが吸収層から受けるせん断地盤反力が大きいためである。また、EPSのケースでは、 $\alpha < 70^\circ$ の範囲を除いて安全率が1を超え、軸力によってトンネルが破壊しないことがわかった。高圧縮性コンクリートのケースでは、 $\alpha \geq 90^\circ$ の圧縮力を受ける場合のみ安全率が1を超えた。

(e) 折れ角 θ_c

図-12に、交角 $\alpha=90^\circ$ における、折れ角 θ_c の分布を示す。吸収層がEPSのケースと比べて、高圧縮性コンクリートのケースは、断層位置に曲げ変形が局所化するため断層位置で折れ角が非常に大きい

図-13に、折れ角の最大値 θ_{cmax} と交角 α の関係を示す。吸収層がEPSのケースでは、 $90^\circ \leq \alpha \leq 170^\circ$ の範囲で θ_{cmax} が θ_{100} を下回り、時速100kmの列車が安全に走行できる。しかし、高圧縮性コンクリートのケースでは、 $\alpha=170^\circ$ 以外の範囲で θ_{cmax} が θ_{100} を上回り、列車走行に不適となる。

(6) 考察

せん断力はせん断補強量を増やすことで容易に対応できるので、曲げモーメントに対する考察が重要である。EPSのケースは、曲げモーメントと軸力が $70^\circ \leq \alpha \leq 170^\circ$ の範囲で安全率が1を超え、改良工法がトンネルの断層変位による損傷を緩和することができる。一方、高圧縮性コンクリートのケースでは、初期剛性および降伏応力が大きくなるため、トンネルが吸収層から大きい地盤反力を受け曲げ破壊する。吸収層は断層変位を吸収する充分な降伏後の変形性能と常時の列車荷重による変形量を抑えるよう十分な初期剛性を併せ持つ必要がある。この課題に対しては、高圧縮性コンクリートの球殻の種類や充填率、モルタルの配合を変え、剛性を変えることで対応できると考えられる。また、改良地盤の平滑化層の鉄筋量の増強も有効な手段である。

4. まとめ

断層変位を吸収する吸収層として、発泡スチロール(EPS)を用いていたケースでは、初期剛性が小さく常時の列車荷重により過大な変位が生じる可能性があった。列車が安全に走行するためには、時速300kmで沈下量を35mm以下に抑える必要がある。そこで、初期剛性と降伏応力が大きく、高い圧縮性を有する高圧縮性コンクリートを開発し、吸収層に用いた改良工法により断層変位によるトンネルの損傷を緩和する効果を数値解析により検討した結果、以下のことがわかった。

- 発泡スチロール (EPS) と比較して、高圧縮性コンクリートの軸剛性は大きい。
- 試作した高圧縮性コンクリートは、軸剛性が大き過ぎ、吸収層として断層変位によるトンネルの損傷を緩和する効果が十分でなかった。吸収層は断層変位を吸収する十分な降伏後の変形性能と常時の列車荷重による変形を抑えるよう十分な初期剛性を併せ持つ必要がある。今後はそのような高圧縮性コンクリートの性能向上に努める必要がある。

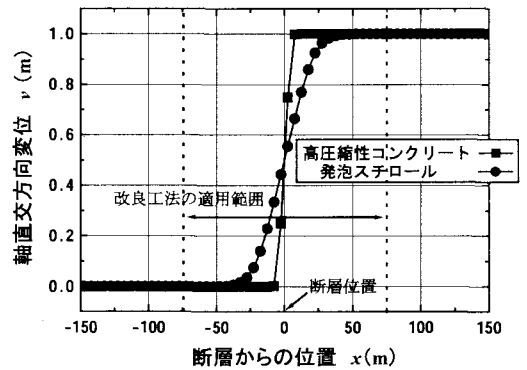


図-6 軸直交変位 v の分布

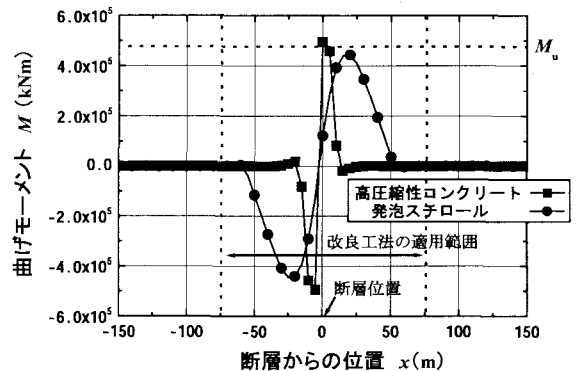


図-7 曲げモーメント M の分布

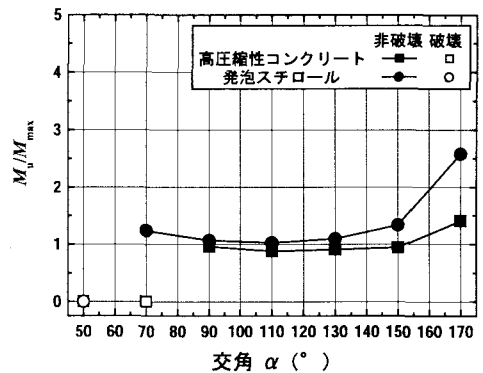


図-8 M_u/M_{max} と交角 α の関係

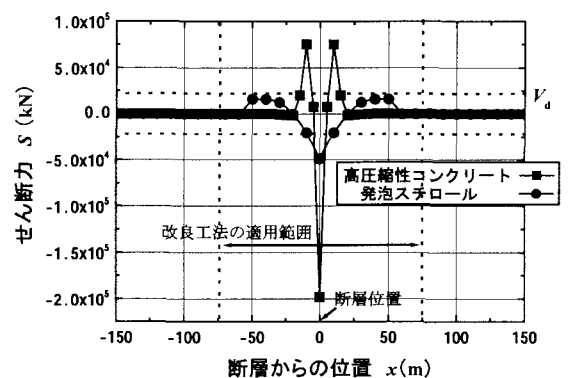


図-9 せん断力 S の分布

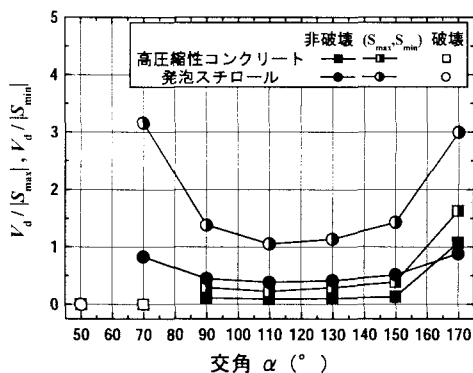


図-10 $V_d/|S_{\max}|$, $V_d/|S_{\min}|$ と交角 α の関係

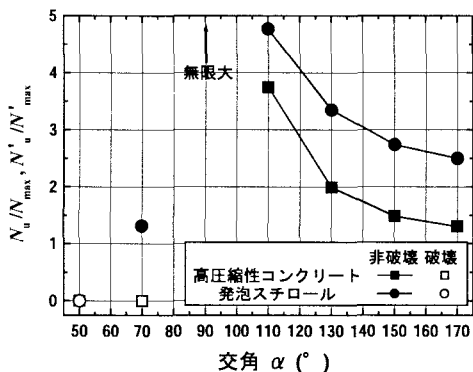


図-11 $N_u/N_{\max}$, $N'_u/N'_{\max}$ と交角 α の関係

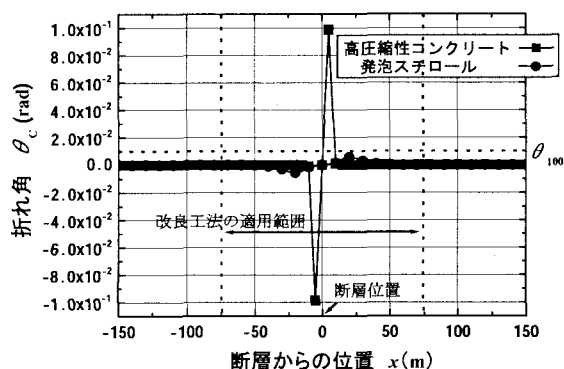


図-12 折れ角 θ_c の分布

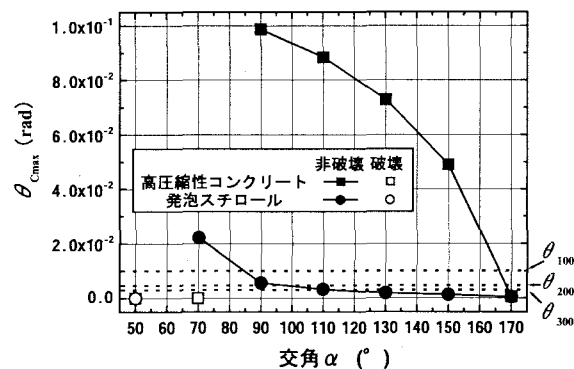


図-13 $\theta_{\max}$ と交角 α の関係

参考文献

- 1) 海野隆哉, 小長井一男: 平成16年新潟県中越地震第一次調査団調査速報, 7. トンネル被害, 2005.
- 2) 若尾和俊, 高橋秀明, 谷和夫: 断層変位を受けるトンネルの損傷を緩和する工法の提案と効果の数値解析による検討, 第40回地盤工学研究発表会, pp. 1817-1818, 2005.
- 3) 鉄道総合研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説, 耐震設計, pp. 204, 1999.

Improvement method with highly compressible concrete to mitigate fault rupture hazard on tunnel

Kazutoshi Wakao, Hideaki Takahashi and Kazuo Tani

In 2004, the large-sized collapse of tunnel lining occurred at Niigata Prefecture. It was probably caused by the earthquake. This study proposed the improvement method to mitigate such fault rupture hazard on tunnel. The effect of this method was demonstrated by numerical analysis. One of the characteristic features of this improvement method is the use of high compressible concrete to absorb the large fault displacements.