

多殻モルタルを利用した断層変位によるトンネルの損傷を緩和する技術の開発

玉置 久也^{1*}・谷 和夫²

¹横浜国立大学大学院 工学府 (〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)

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

*E-mail: d07gc117@ynu.ac.jp

断層変位によるトンネルの損傷を緩和するために、平滑化層と吸収層の二層構造の覆工に軸力を低減するために継ぎ手と摩擦除去層を設置する工法が提案された。また、吸収層に用いる材料として高い初期剛性と降伏後の高い圧縮性を特徴とする多殻モルタルが開発された。しかし、断層変位によるトンネルの損傷をどの位まで緩和できるのかが明らかにされていない。

そこで、多殻モルタルを利用した吸収層に損傷をどの位緩和する効果があるのかを数値解析により検討した。その結果、0.3mの断層変位なら時速100kmの折れ角基準をクリアできる程度にトンネルの損傷を緩和する性能を有することがわかった。

Key Words :fault,tunnel, mitigation, damage

1 はじめに

(1) 背景

活断層が多く存在するわが国では、断層変位によるトンネルの被害が懸念される地点が少なからず存在し、効果的な損傷緩和技術の確立が求められている。

既往の研究により、図-1に示すように、トンネルが断層を横断する地点の両側に平滑化層と吸収層の二層構造の覆工と、軸力を低減するために継ぎ手と摩擦除去層を設置する工法が提案された¹⁾。吸収層は、曲げ剛性が高い平滑化層と背面の地盤に挟んで設置され、常時には覆工を安定的に支持する高い剛性を有するが、断層変位時には断層のずれ変位を吸収するために降伏して高い圧縮

性能を発揮する必要がある。そこで、吸収層に用いる材料として、多殻モルタルが提案された²⁾。しかし、多殻モルタルを利用した吸収層によって断層変位によるトンネルの損傷をどの位まで緩和できるのかが明らかにされていないため、検討する必要がある。

(2) 多殻モルタル

多殻モルタルとは、剛壁に囲まれた空間を多量に含むモルタルであり、大きい荷重が加わった際の大変形を、その空間が潰れることによって吸収することができる性能を持つ。図-2に様々な材料の一軸圧縮試験によって得られた $\epsilon_{a, \max} \sim E_{50}$ 関係を示す。ここで E_{50} は破壊応力の1/2までの割線ヤング率で、 $\epsilon_{a, \max}$ はその材料の限界軸圧縮ひずみである。 $\epsilon_{a, \max}$ は、地盤材料は空隙比 e から、 $\epsilon_{a, \max} = e/(1+e)$ または、 $=100 \cdot (\text{空気量})$ で計算した。従来の材料を見ると、圧縮性能が高い ($\epsilon_{a, \max} > 50\%$) 供試体の E_{50} は 10MPa 以下であった。しかし、多殻モルタルは $\epsilon_{a, \max} > 60\%$ でありながら剛性も大きい ($E_{50} > 50\text{MPa}$) といった特徴を持っており、高い剛性と高い圧縮性能を兼ね揃えた新しい材料である。また、多殻材料の寸法・形状・剛性/強度・混入率及びモルタルの剛性/強度を変えることによって多殻モルタルとしての応力～ひずみ関係ないし初期剛性、降伏強さ、降伏後の圧縮性能をある範囲内で自由に設定できる。

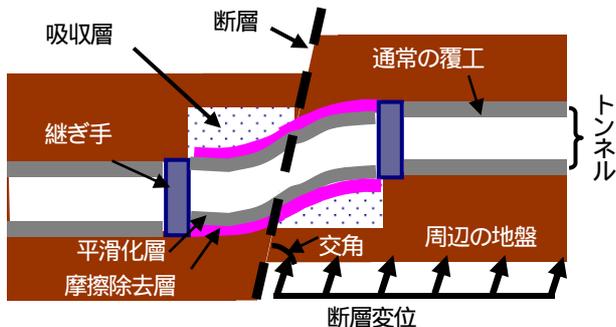


図-1 トンネルの損傷を緩和する工法

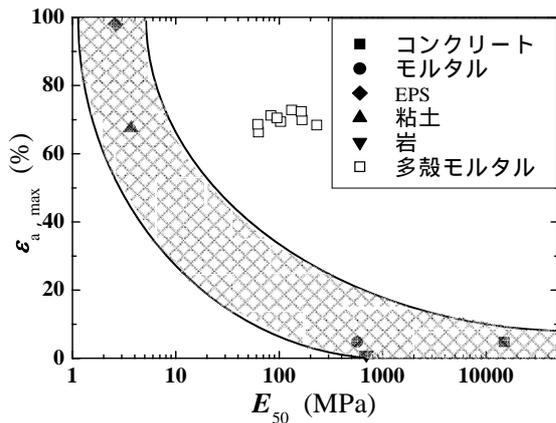


図-2 一軸圧縮試験による $E_{a, \max} \sim E_{50}$ 関係

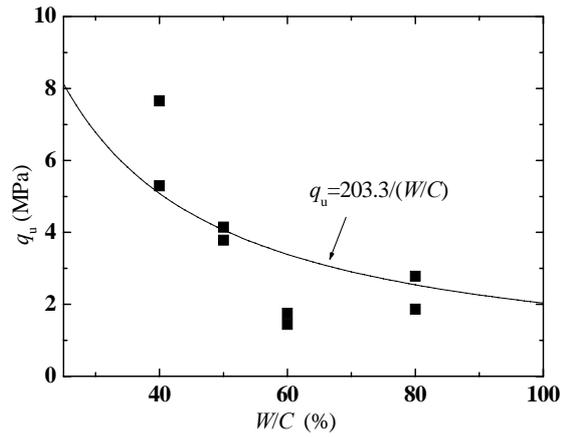


図-3 モルタルの $q_u \sim W/C$ 関係

この多殻モルタルの圧縮特性を調べる試験方法については、供試体の側面にリングを一定の間隔で配置する方法が提案されている³⁾。しかし、多殻モルタルの配合と応力～ひずみ関係の関係は未だ明らかにされていなかった。

(3) 検討方法

まず、側方向変位を拘束した一軸圧縮試験を行い、多殻モルタルの配合と応力～ひずみ関係の関係について検討する。

次に、多殻モルタルを利用した吸収層にどのくらいの緩和効果があるのかを数値解析により検討する。

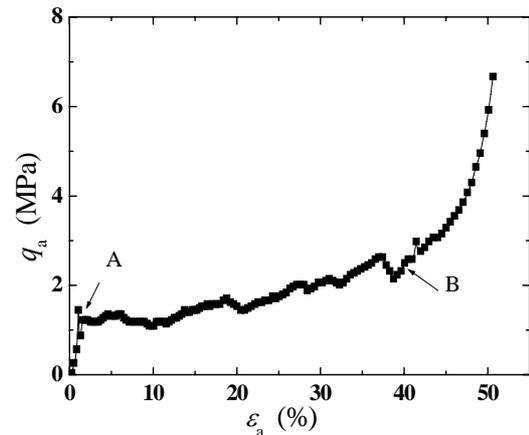


図-4 多殻モルタルの代表的な $q_a \sim \epsilon_a$ 関係

2 多殻モルタルの一軸圧縮試験

(1) 試験方法

供試体は、ピンポン玉（日本卓球(株)、双喜トレーニングボール、直径 20mm）を最密充填（理論空隙率 74%、空隙率 70%）した型枠に水セメント比 $W/C=40\%$ 、 50% 、 60% 、 80% の計 4 ケースの配合のモルタルを打設した。モルタルの一軸圧縮強さ q_u と水セメント比 W/C の関係を図-3 に示す。実線は最小二乗法で求めた双曲線関係である。2 週間の水中養生後にコアポーリングマシン（金子機械製作所, KBW-A 型）で直径 $D=100\text{mm}$ × 高さ $H=240\text{mm}$ の供試体を 3 体作製した。

試験は、リング型の拘束治具で供試体の側方向変位を拘束することを除いては、原則として岩石の一軸圧縮試験（JGS 2521-2000）に準拠して行った。荷重は軸ひずみ速度 $\dot{\epsilon}=1\%/ \text{min}$ の変位制御で最大軸ひずみ $\epsilon_{a, \max}=50\%$ まで軸圧縮した。軸荷重はロードセル（東京設計研究所, Type CLH-IMNA PC1027, 容量 1MN）を供試体の下に設置して計測し、軸ひずみは変位計（共和電業, DT-100A）を載荷板に設置して計測した。

(2) 試験結果

図-4 に多殻モルタルの代表的な軸応力 q_a - 軸ひずみ ϵ_a 関係を示す。高い剛性で線形に q_a が増加した後点 A ($\epsilon_a=2\%$) で q_a がピークを迎え、その後 $2\% < \epsilon_a < 40\%$ では、ほぼ一定の剛性で緩やかに q_a が増加して、点 B ($\epsilon_a=40\%$) 以降では剛性が漸増して q_a が急激に増加した。

降伏した点 A から剛性が増加し始める点 B まで、ピンポン玉が潰れる音が断続的に発せられ、ピンポン玉が圧縮して供試体の軸圧縮変形を吸収していることが確認できた。この点 A から点 B の区間を長くすることにより多殻モルタルの変形吸収性能を向上することができる。

(3) トリリニアモデルの提案

一軸圧縮試験の結果に基づいて、多殻モルタルの応力～ひずみ関係を図-5 に示すトリリニア型でモデル化した。上述した $\epsilon_a=2\%$ で軸応力 q_a がピークを迎えたところを降伏点 A とし、このときの軸応力 q_a を降伏強さ q 、軸ひずみ ϵ_a を降伏ひずみ ϵ とする。また剛性が増加した点 B の軸ひずみ ($\epsilon_a=40\%$) を ϵ とする。この点 A まで ($0 < \epsilon_a < \epsilon$) をゾーン 1 とし、剛性が緩やかに増加している $\epsilon < \epsilon_a < \epsilon$ の範囲をゾーン 2、それ以降の $\epsilon_a > 40\%$ をゾー

ンとする。

このトリリニアモデルを記述するパラメータ(ゾーン1, 2, 3の終点の軸応力 q_1, q_2, q_3 , と軸ひずみ $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$, 各ゾーンのヤング率 E_1, E_2, E_3)の求め方を以下に示す。

・原点 $O(\varepsilon_a=0\%)$ から降伏点 A までの回帰直線(a), $5\% < \varepsilon_a < 35\%$ の回帰直線(b), $\varepsilon_a < 45\%$ の回帰直線(c)を引く。

・aとbの交点を (q_1, ε_1) , bとcの交点を (q_2, ε_2) とする。

・a, b, cの傾きを E_1, E_2, E_3 とする。

図-6 に各パラメータとモルタルの水セメント比 W/C の関係を示す。 q_1, q_2, E_1, E_2, E_3 はすべて双曲線で表すことができ、 W/C が大きくなるにつれて値が減少する。 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ については W/C に関わらず一定である。また、図-7 に無次元化した各パラメータとモルタルの一軸圧縮強さ q_u の関係を示す。 q_1 は q_u の 0.38 倍しかないが、軟岩程度の強度($q_u=1\text{MPa}$)は有しているので、列車荷重には十分に耐えることができる。また $E_1/q_u, E_2/q_u, E_3/q_u$ については、多少のばらつきはあるがほぼ一定である。図-6 ないし図-7 を用いることによって、モルタルの W/C ないし q_u を決めるだけでピンポン玉を細密充填した多殻モルタルの応力~ひずみ関係を推定することができる。

3 トンネルの損傷を緩和する効果の評価

(1) 計算手法

多殻モルタルを利用した吸収層が断層変位による損傷をどの位まで緩和できるのかを検討するために、図-8 に示すモデルを用いて数値解析を行う。このモデルはトンネルを梁(平滑化層を代表)に置き換えている。また、周辺の地盤と吸収層の地盤反力を平滑化層に対して軸に直交する方向と軸方向の離散型ばねでモデル化した⁴⁾。

表-1 に解析に用いた値を示す。図-9 に示すように計算を簡略化するために、トンネルの断面を円形とし、一般的な複線鉄道用の山岳トンネルを参考にトンネルの外径 11m, 内径 10m, フランジ(覆工)の厚さ 0.5m とし、トンネルの長さは半無限長を想定して 500m とした。また、覆工を構成する平滑化層(RC)と無筋コンクリートの構成材料も山岳トンネルを参考にした。コンクリートのヤング率は一般的な値を参考にし、鉄筋は橋脚の躯体を参考にした⁵⁾。継ぎ手の曲げ剛性は無筋コンクリートと同様とし、軸剛性は 1/1000 とした。また、摩擦除去層の軸方向の地盤反力係数は硬岩の 1/1000 とした。そして吸収層の幅は最大断層変位 $D_{f, \max}=1.0\text{m}$ に対して片側の吸収層の最大圧縮率がその 1/2 となり、 $\varepsilon = 40\%$ を考慮して 1.25m とした。高さはトンネルの外径と等しくした。

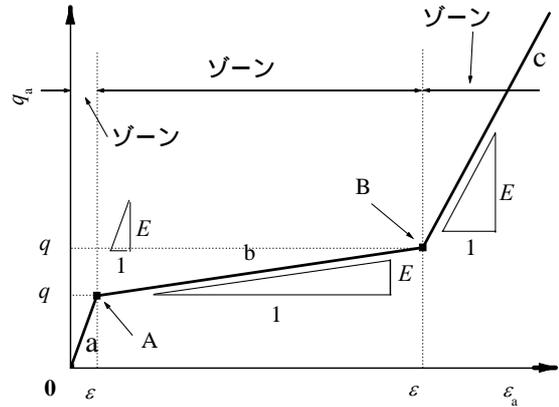


図-5 多殻モルタルの応力~ひずみ関係のトリリニアモデル

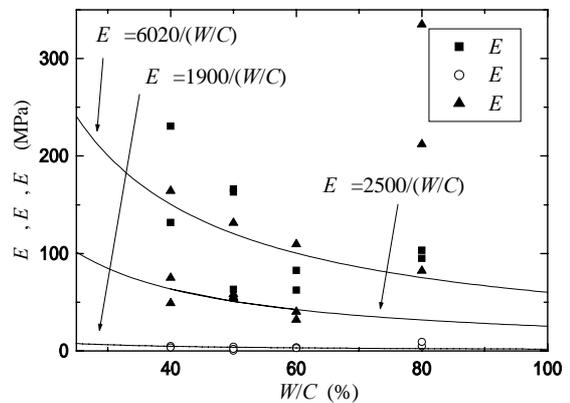
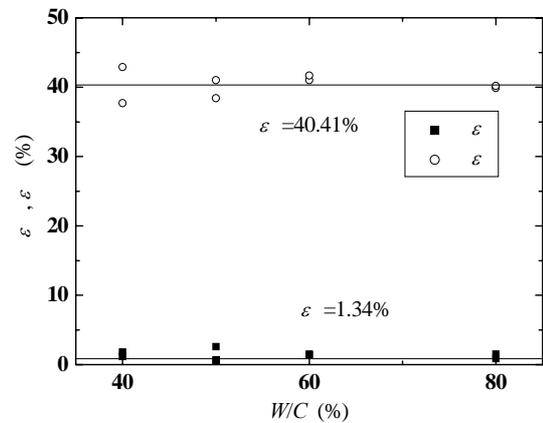
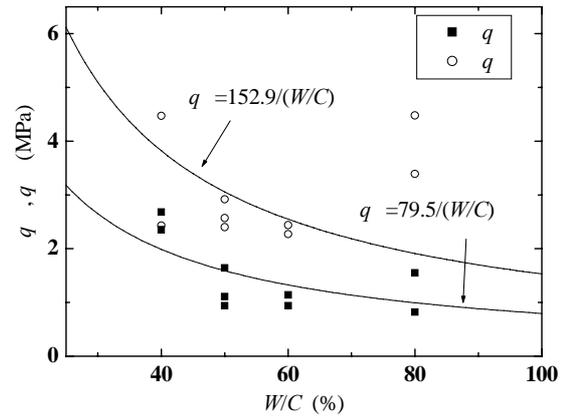


図-6 $q_1, \varepsilon_1, E_1 \sim W/C$ 関係

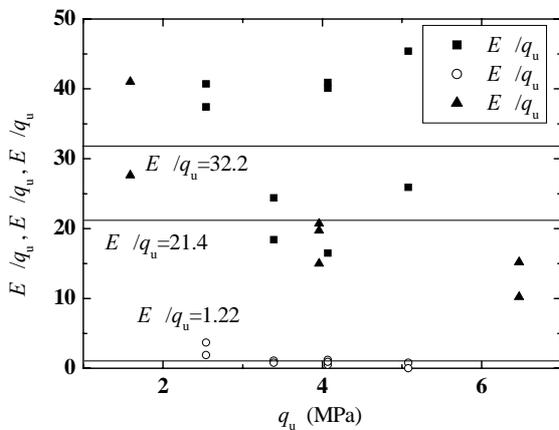
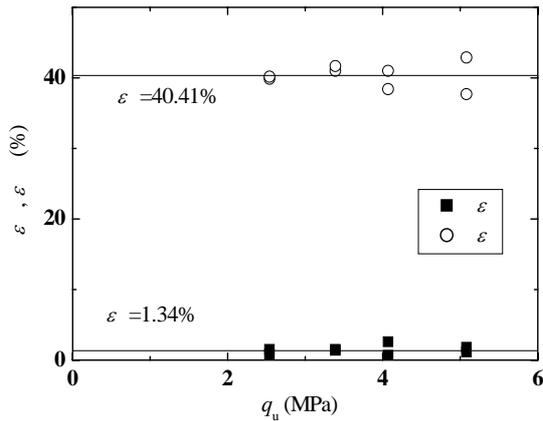
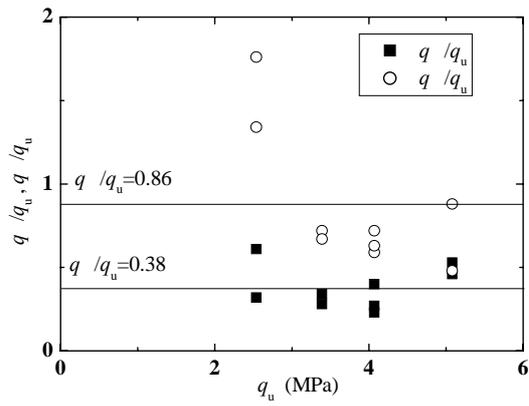


図-7 多層モルタルの $q/q_u, \varepsilon, E/q_u - q_u$ 関係

計算ケースは、 $W/C = 80\%, 100\%$ で、それぞれ断層変位 $D_f = 0.1\text{m}, 0.3\text{m}, 0.5\text{m}, 1.0\text{m}$ を与えた合計 8 ケースである。また、緩和効果の評価は安全率で行う。ここで安全率とは、平滑化層に用いたコンクリートの曲げ耐力 M_u 、せん断耐力 S_u 、折れ角の制限値 θ_u をそれぞれ計算された曲げモーメントの最大値 M_{\max} 、せん断力の最大値 S_{\max} 、折れ角の最大値 θ_{\max} で除した値とする。また、折れ角 θ とは、列車が脱線せずに行走するための制限値であり、列車の速度が 100, 200, 300km/h の時にそれぞれ $\theta_{100} = 0.010, \theta_{200} = 0.047, \theta_{300} = 0.003$ という値が設けられている⁶⁾。

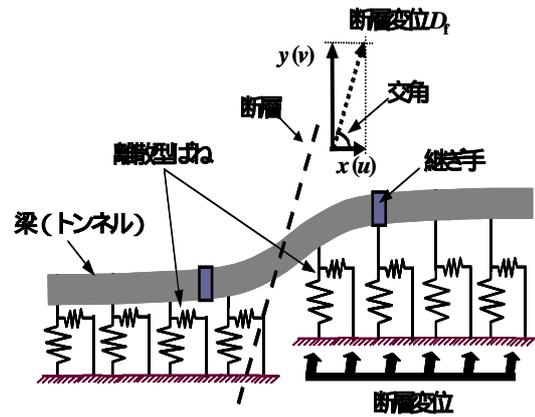


図-8 数値解析に用いたモデル

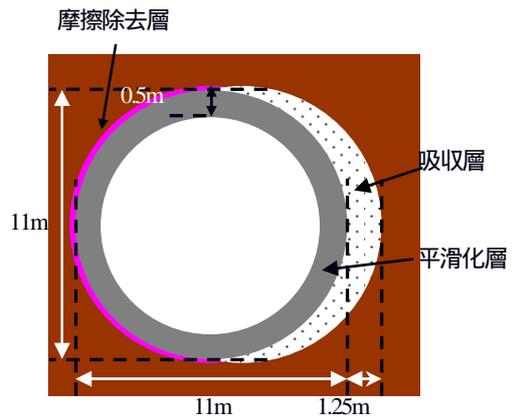


図-9 トンネルの断面

(2) 計算結果

図-10 に計算結果を示す。横軸に断層の中心からの距離 x を、縦軸にトンネルの軸に直交する方向の変位 v 、曲げモーメント M 、せん断力 S 、折れ角 θ をとった。軸に直交する方向の変位 v は断層の中心からおよそ $\pm 10\text{m}$ の間で変化していて、 $W/C = 100\%$ の方が若干緩やかに変位している。曲げモーメント M と折れ角 θ は断層の中心からおよそ $\pm 10\text{m}$ の位置が最も大きくなっていて、 $W/C = 100\%$ の方が若干広い範囲に分布しておりその値は小さい。せん断力 S は断層上で最大値をとり、 $W/C = 100\%$ の方がその値はやや小さい。

(3) 考察

図-11 に曲げモーメントの安全率 $|M_v/M_{\max}|$ 、せん断力の安全率 $|S_v/S_{\max}|$ 、折れ角の安全率 $|\theta_v/\theta_{\max}|$ を示す。どの安全率も断層変位 D_f が大きくなるにつれて小さくなっていく。曲げモーメントの安全率 $|M_v/M_{\max}|$ は、 $D_f = 1.0\text{m}$ でも 1 を大きく下回らないのでトンネルの破壊は限定されると考えられる。そこで、最も大きな曲げモーメントが働く断層の中心からおよそ $\pm 10\text{m}$ の位置に適切な崩落防止対策を施しておけば、断層変位時でも列車が走行できる空間を確保できると推測される。また、せん断力の安全

率 $|S_v/S_{max}|$ は非常に低いが、これは鉄筋量を増やすことにより解決できる。

折れ角の安全率 $|\theta_v/\theta_{max}|$ については、 $D_f \geq 0.3m$ では 1 を下回るが、列車速度が 100km/h かつ $D_f = 0.3m$ の場合は 1 を満足する。ここで折れ角の制限値について考えると、これは列車が脱線せずに安全に走行できるように設けられた値であり、実際に断層変位が発生する極めて特別な場合の制限値は、大事故につながらないことを念頭に別に定める必要がある。この場合、列車が横転しない脱輪程度の脱線ならば許容範囲として考えると、制限値は少し大きく設定でき、合理的な評価が可能と考えられる。

表-1 解析に用いた各パラメータの値

パラメータ	値
硬岩のせん断地盤反力係数 ⁷⁾	
軸と直交方向 $k_t(kN/m^3)$	1.4×10^7
軸方向 $k_s(kN/m^3)$	4.2×10^6
トンネル	
外径 $D_{out}(m)$	11
内径 $D_{in}(m)$	10
フランジの厚さ(m)	0.5
長さ(m)	500
平滑化層(RC)	
長さ $L_b(m)$	140
コンクリートのヤング率 $E_c(kN/mm^2)$	25
鉄筋 ⁸⁾	
軸剛性 $E_b A_c(kN)$	4.6×10^8
換算断面積 $A_c(m^2)$	18.3
平滑化層の剛性 $E_b(kN/m^2)$	2.5×10^7
無筋コンクリート	
長さ(m)	180
コンクリートのヤング率 $E_c(kN/mm^2)$	25
軸剛性 $E_c A_c(kN)$	4.1×10^8
断面積 $A_c(m^2)$	16.2
無筋コンクリートの曲げ剛性 $E_c(kN/m^2)$	2.5×10^7
継ぎ手	
曲げ剛性(kN/m ²)	2.5×10^7
軸剛性 $E_A(kN)$	4.1×10^5
摩擦除去層の地盤反力係数	
軸直交方向 $k_t(kN/m^3)$	1.4×10^7
軸方向 $k_s(kN/m^3)$	4.2×10^3
吸収層	
幅(m)	1.25
高さ(m)	11
長さ(m)	70

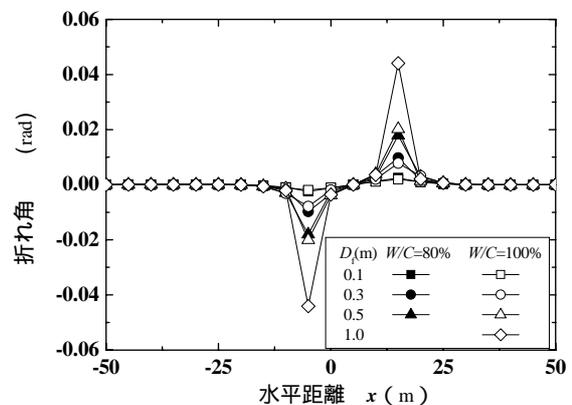
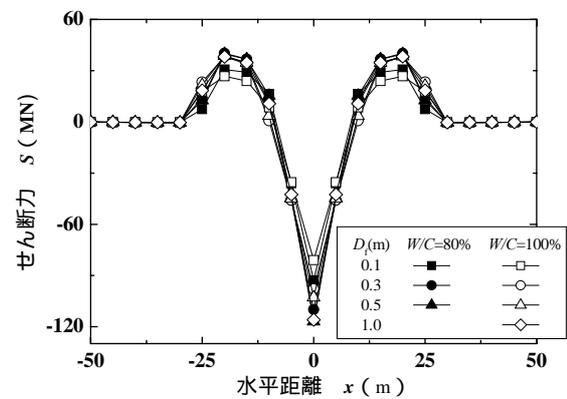
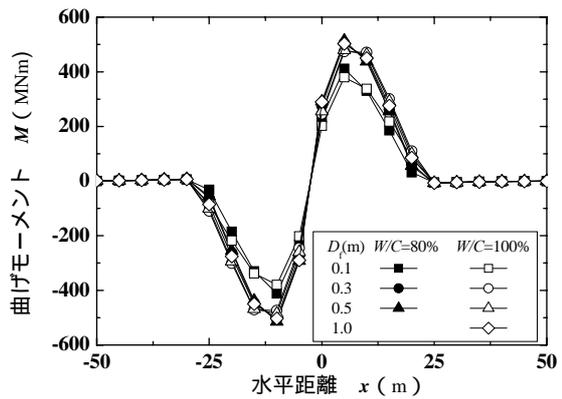
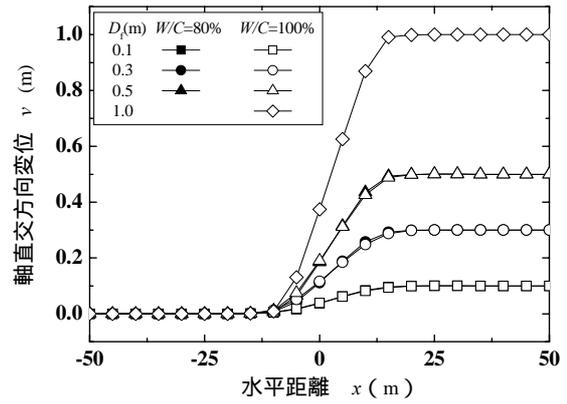


図-10 計算結果

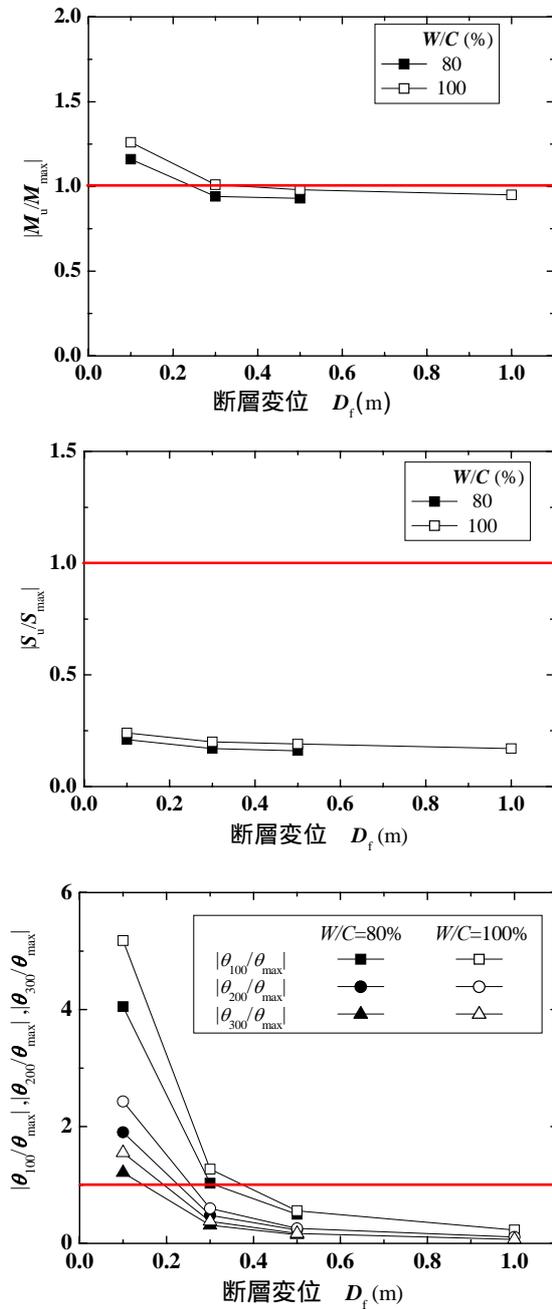


図-11 M, S, θ の安全率 $\sim D_f$ 関係

4 結論

破壊するまでの剛性は高いが、破壊後は圧縮性が高い

といった2つの相反する特徴を持つ材料として、多殻モルタルが吸収層の材料として提案されている。そこで、その応力～ひずみ関係を一軸圧縮試験により検討したところ、トリリニアモデルで表わすことができた。また、このモデルを記述するパラメータをモルタルの配合または一軸圧縮強さから推定する方法を提案した。

さらに、多殻モルタルを利用した吸収層にどのくらいの緩和効果があるのかを数値解析により検討した。その結果、断層変位が0.3m以下ならばトンネルの損傷を完全に緩和でき、100km/hまでの列車は脱線せずに走行できることが分かった。また、0.3mより大きな断層変位が発生した場合でも、±10mの位置に適切な崩落防止対策を施しておけば列車が走行できる空間は確保でき、最低限の安全は確保できると考えられる。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 若尾和俊, 谷和夫, 高橋秀明: 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, 第35回岩盤力学に関するシンポジウム, pp.47-52, 2006.
- 3) 玉置久也, 谷和夫: 断層変位による吸収層の圧縮特性を求めるための圧縮試験方法の開発, 第36回岩盤力学に関するシンポジウム, 2007.
- 4) 若尾和俊: 断層変位を受けるトンネルの損傷を緩和するための工法の提案, 卒業論文, 2005.
- 5) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計設計計算例鉄筋コンクリート橋脚(杭基礎), 2001.
- 6) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計, 1999.
- 7) 鹿島建設土木設計本部: 基礎構造物/地中構造物, pp.135-138, 1998.
- 8) 大岩健次郎, 津田和義: 既製コンクリート杭の $M-\phi$ 関係とPHC杭のせん断耐力, 橋梁と基礎, 2月号, pp.25-33, 1998.

DEVELOPMENT OF MITIGATION METHOD OF TUNNEL DAMAGE CAUSED BY FAULT RUPTURING USING MULTIHUSK MORTAR

Hisaya TAMAOKI and Kazuo TANI

A method to mitigate the tunnel damage caused by fault rupturing was proposed. In addition multihusk mortar was developed as materials to use for the absorption layer. Multihusk mortar has high initial rigidity, and high compressibility after yielding. This study examined how much the absorption layer using multihusk mortar can mitigate the relevant damage.

The computed results show that fault rupturing equal to or less than 0.3m can be absorbed without causing significant bending of the rail track.