

トンネルの断層変位による損傷を緩和する工法に用いる吸収層の設置方法に関する検討

小川 慧^{1*}・谷 和夫²・高橋 秀明³

¹横浜国立大学大学院 工学府 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5 土木工学棟)

²横浜国立大学大学院 都市イノベーション研究院 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5 土木工学棟)

³東電設計(株) 土木本部 送変電土木部 (〒110-0015 東京都台東区東上野3-3-3)

*E-mail: ogawa-kei-jx@ynu.ac.jp

断層を横断して立地するトンネルにおいて、局所的な変形を緩和する吸収層を断層近傍部に用いる損傷緩和工法が提案されている。しかし、吸収層の候補に挙げられる多殻モルタルは断層変位が0.2m以下という限られた変位にしか効果を発揮しない。吸収層の材料として、ハニカム構造材料を用いることを提案し、材料の圧縮特性や変形状況を把握することを目的として、一軸圧縮試験を行った。

この結果、ハニカム構造材料は圧縮方向によって異方性があり、材料や圧縮の方向によって変形モードが異なることがわかった。さらに、応力～ひずみ関係はトリリニア型になり、吸収層として用いる場合は、六角形の辺が断層のずれる方向に対して垂直になるように設置することが望ましいことがわかった。

Key Words : tunnel, fault, honeycombs, unconfined compression tests, compression characteristics

1. はじめに

(1) 研究の背景

地震時には、地震動による土木構造物の被害だけではなく、地表地震断層による被害が報告されている。台湾の1999年集集地震では、縦ずれの地表地震断層により多くの土木構造物が被害を受けた¹⁾。また、2004年新潟県中越地震では、トンネルの覆工コンクリートの断層変位によると思われる大規模な崩落が確認された¹⁾。

活断層が多く存在するわが国では、道路や鉄道などの線状土木構造物を地表地震断層が予測される地点を避けて立地することが難しく、大きな被害を受ける虞がある。よって、断層変位による構造物の損傷を緩和する方策が必要であり、効果的な技術の確立が求められている。

トンネルの損傷緩和工法として断層近傍に吸収層を設置して断層変位を吸収する工法が提案されている²⁾。吸収層としてトリリニア型の応力～ひずみ関係を持つ材料を用いると常時の高い剛性と断層変位時の極めて低い剛性を両立できるため、トンネルの局所的な変形の緩和に効果的である。これまで、多殻モルタルを厚さ方向に1.25 m、トンネル軸方向に70 mの範囲で用いた場合、0.2 mの断層変位に対して300 km/hで走行する列車の脱線を防ぐことが可能であることが示された³⁾。しかし、マグニチュードが7を超える内陸地震では、地表地震断層の

ずれ変位は2～3 mを超えることもあり、さらに大きな断層変位に対して効果がある吸収層の開発が求められている。

吸収層として、多殻モルタルより変形吸収性能が高いハニカム構造材料を用いることを提案する。この材料の軸応力と軸ひずみの関係を図-1に示す。アルミ製のハニカム構造材料は、軸ひずみが約70%まで圧縮し、応力～ひずみ関係がトリリニア型となることが知られている⁴⁾。また、載荷方向によって圧縮特性が異なることが解析計算によって示されているため⁴⁾、異方性を実験的に検討する必要がある。

(2) 研究の目的

材料の適切な設置方法を把握するためには圧縮特性や変形状況を知る必要がある。したがって、圧縮方向の影響、試験体の変形状況を一軸圧縮試験により調べた。

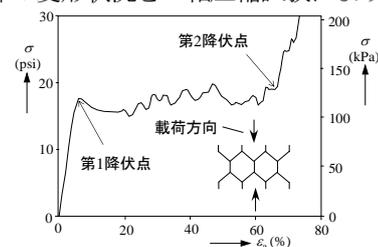


図-1 アルミハニカム構造材料の一軸圧縮試験による応力～ひずみ関係⁴⁾

2. ハニカム構造材料の一軸圧縮試験

(1) ハニカム構造材料の試験体

試験体の材料は、塩化ビニルとクラフト紙の2種類とした。それぞれの材料物性を表-1に示す⁵⁾⁶⁾。試験体の寸法は高さ×長さ×奥行(75×150×50 mm)とした。クラフト紙の試験体は、人力で展張する方式であるため展張する人によって試験体の寸法のばらつきが大きい。そこで、試験体の高さが75 mmの時に六角形セルが正六角形となるように成形した。セルサイズC mm, 箔厚t mmは、塩化ビニルの試験体ではC=13, t=0.10とし、クラフト紙ではC=12, t=0.14とした。

(2) 一軸圧縮試験の概要

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。荷重レベルが小さいため、図-2に示すように重りとワイヤーを一軸圧縮試験装置に用いた。また、載荷板の重さで試験体が潰れるのを防ぐため、載荷板をワイヤーと重り、滑車を用いて吊るした。

また、実験ケースを表-2に示す。圧縮方向は六角形セルの辺が載荷方向に対して平行な方向をP方向(図-3(a))、直交する方向をN方向(図-3(b))と定義する。各ケースに記号を当てて、記号の色で圧縮方向、形で材料とセルサイズ、箔厚の違いを区別する。

(3) 載荷・計測方法

軸荷重はロードセル(容量500 N)を載荷板の上に設置して、軸変位は変位計(容量100 mm)を載荷板上に設置して計測を行った。変位速度0.19 mm/sの変位制御で段階的に繰り返し載荷した。各載荷段階は、 $\epsilon_a=0\sim 12\%$ までは4%ずつ、 $\epsilon_a=12\%$ 以降は8%ずつとし、ロードセルの最大容量500 Nまで載荷した。

3. 実験結果

(1) 各ケースにおける応力～ひずみ関係

実験で得られた荷重～変位関係を整理し、応力～ひずみ関係を求めた。図-4に、試験体が弾性体である最終ひずみ $\epsilon_{a,e}$ 段階、塑性化した試験体のひずみ $\epsilon_{a,p}$ 段階、最大ひずみ $\epsilon_{a,m}$ 段階の各載荷・除荷時の応力～ひずみ関係を図示する。

塩化ビニルは、0.8～0.9のひずみレベルで塑性ひずみが生じ、クラフト紙は、0.2～0.3のひずみレベルで塑性ひずみが生じる。応力～ひずみ関係の勾配が急変する折れ点でひずみレベルで塑性化すると予想していたが、折れ点と塑性ひずみが発生するひずみレベルが必ずしも一致しないことがわかる。

(2) 応力～ひずみ曲線のモデル化

図-5のように、ゾーンI, IIを定義する。また、求めた応力～ひずみ関係のゾーンI, ゾーンIIの直線部分が交わった点を第1折れ点(q_1, ϵ_1)とする。さらに、ゾーンII, ゾーンIIIの直線部分が交わった点を第2降伏点(q_2, ϵ_2)とする。第2折れ点以降の直線はゾーンIIIの直線部分を用いる。

モデル化した応力～ひずみ関係は図-5に示すようにトリリニア型になる。また、モデル化した応力～ひずみ関係のパラメーターを表-3に示す。この応力～ひずみ関係と試験中の写真を用いて前述した検討項目について検討する。

表-1 材料の物性

材料	種類	坪量 (g/m ²)	引張強さ (N)
塩化ビニル	C種1号	140	39.2
クラフト紙	SS-100	100	29.4

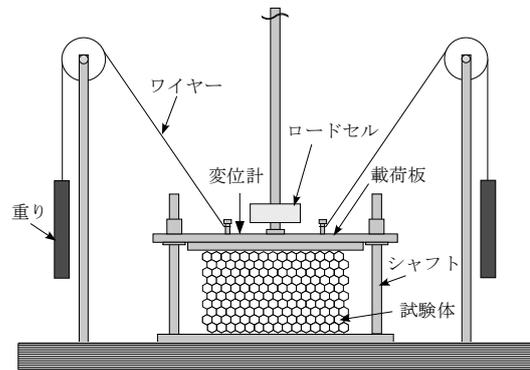


図-2 一軸圧縮試験装置(N試験体)

表-2 実験ケース表

Case	Material	Size (mm)		Loading direction	Symbol
		Cell size C	Thickness t		
1	塩化ビニル	13	0.10	P	○
2	塩化ビニル	13	0.10	N	●
3	クラフト紙	12	0.14	P	△
4	クラフト紙	12	0.14	N	▲

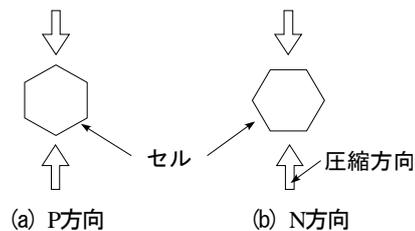
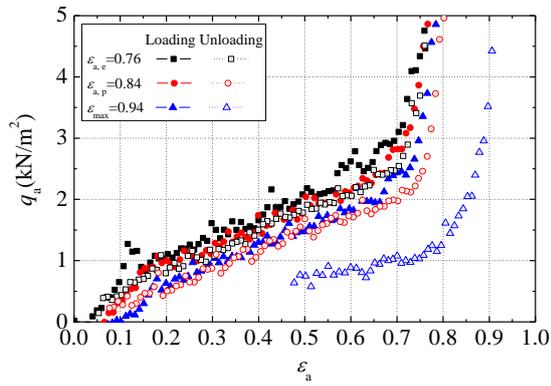
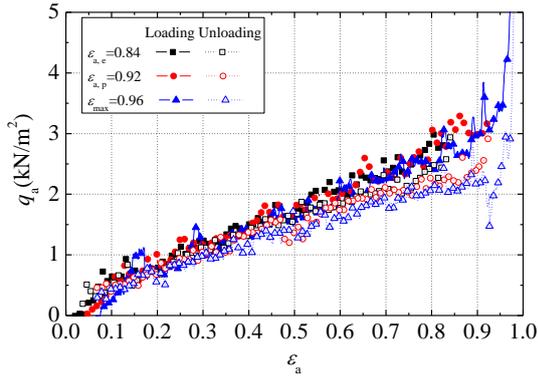


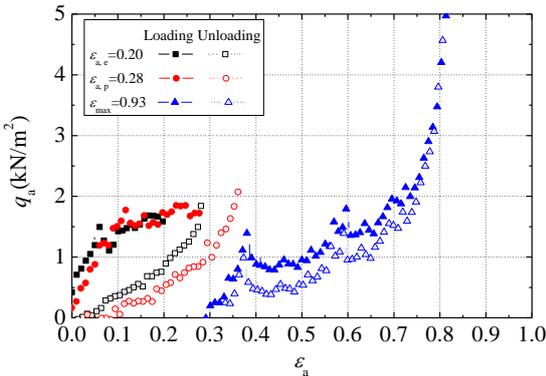
図-3 P,N方向の定義



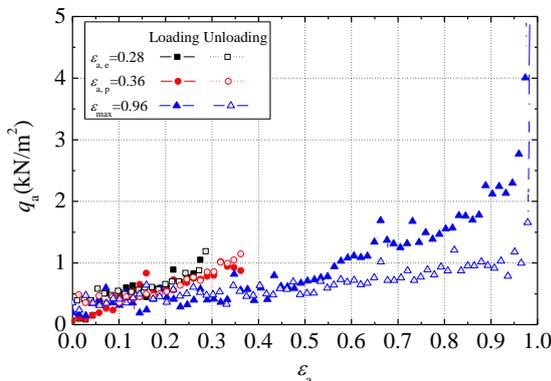
(1) Case1 (塩化ビニル, P方向)



(2) Case2 (塩化ビニル, N方向)



(3) Case3 (クラフト紙, P方向)



(4) Case4 (クラフト紙, N方向)

図-4 応力～ひずみ関係

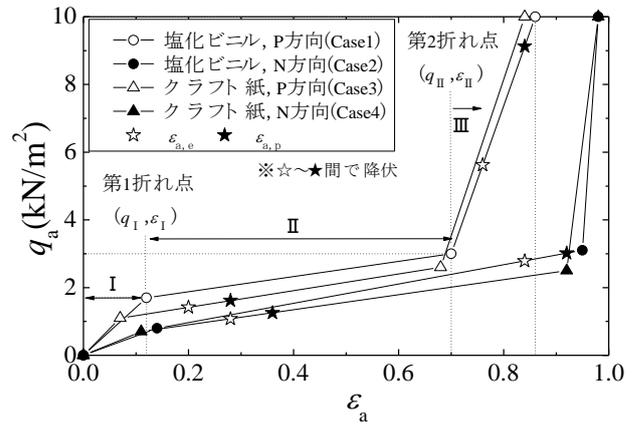


図-5 モデル化した応力～ひずみ関係

4. 考察

(1) 異方性 (载荷方向の影響)

Case1と2, Case3と4を比較すると, P方向に圧縮した場合, 第1折れ点の応力がN方向の場合よりも約2倍である。第2折れ点の。また, N方向に圧縮した方場合, P方向よりも ε_{II} が1.35~1.38倍に大きくなっており, 圧縮性が高い。吸収層として設置する場合は, 高い圧縮性が必要であるため, 断層のずれる方向と六角形の辺が垂直になるよう (N方向) に設置する方がよい。

(2) 試験体の変形状況

各ひずみレベルにおける変形メカニズムの違いを調べるために, $\varepsilon=0$ 時, 第1折れ点 (q_I, ε_I) 時, 塑性化 ($q_{a,p}, \varepsilon_{a,p}$) 時, 第2折れ点 (q_{II}, ε_{II}) 時の各段階の模式図と写真を図-6に示す。また, 各ケースにおける試験体の変形の特徴を表-4にまとめた。

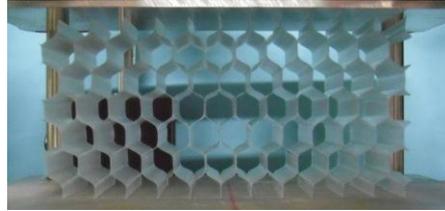
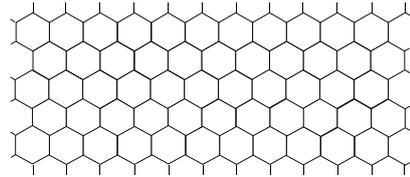
塩化ビニルの場合 (Case1, 2) は, セルが载荷方向に対して平行に並ぶ六角形の頂点同士が近づくように変形し, 試験体全体にセルが一様に配列するように変形する。

一方, クラフト紙の場合 (Case3, 4) は, セルが塩化ビニルの場合と同様に変形し, 試験体全体ではセルが非一様に配列する。また, 局所的な変形面が波型に発生する。

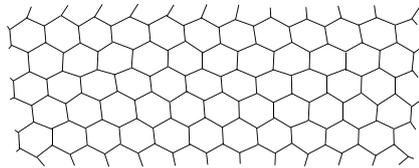
表-3 モデル化した応力～ひずみ関係のパラメーター

Case	E_I (kN/m ²)	E_{II} (kN/m ²)	E_{III} (kN/m ²)	q_I (kN/m ²)	q_{II} (kN/m ²)	ε_I	ε_{II}
1	14.2	2.24	43.75	1.7	3.0	0.12	0.70
2	5.71	2.84	230.0	0.8	3.1	0.14	0.95
3	15.7	2.46	46.25	1.1	2.6	0.07	0.68
4	6.36	1.69	197.5	0.7	2.1	0.11	0.94

• $\varepsilon=0$



• $\varepsilon_I=0.12$ (第1折れ点)



• $\varepsilon_{II}=0.68$ (第2折れ点)

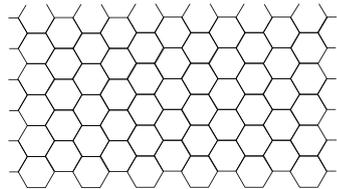


• $\varepsilon_{a,p}=0.86$ (降伏時)

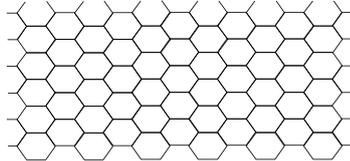


(1) Case1 (塩化ビニル, P方向)

• $\varepsilon=0$



• $\varepsilon_I=0.12$ (第1折れ点)



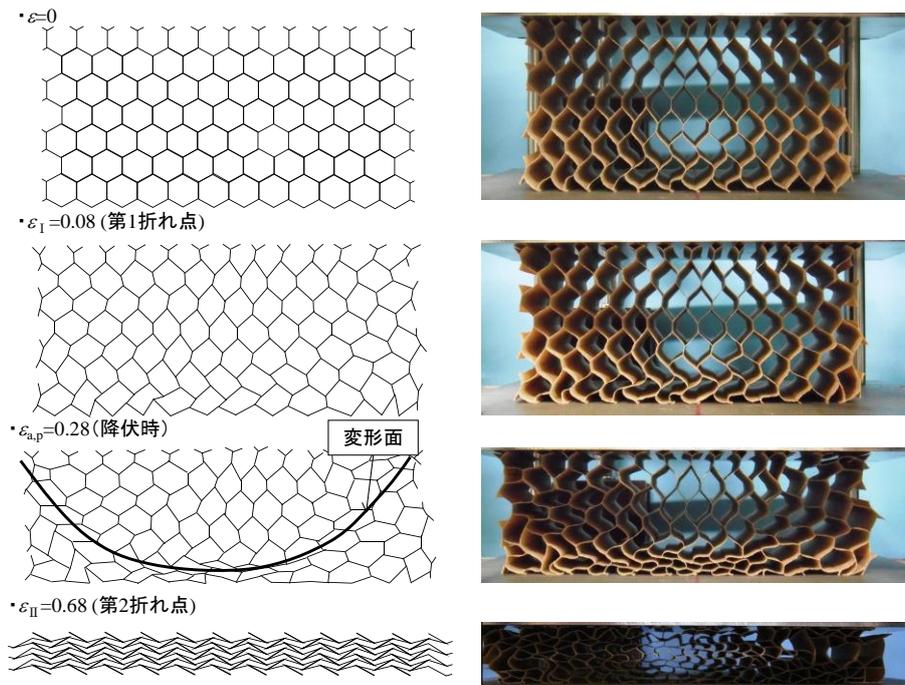
• $\varepsilon_{II}=0.92$ (第2折れ点)



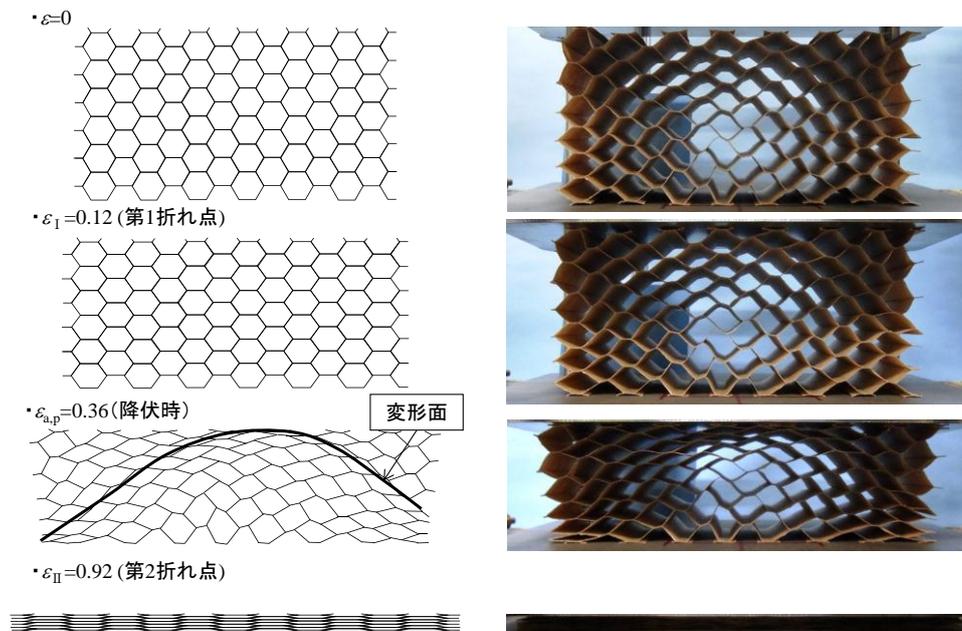
• $\varepsilon_{a,p}=0.92$ (降伏時)



(2) Case2 (塩化ビニル, N方向)



(3) Case3 (クラフト紙, P方向)



(4) Case4 (クラフト紙, N方向)

図-6 各载荷段階における試験体の模式図と写真

表-4 試験体の変形の特徴一覧

Case	降伏後の最大ひずみ $\epsilon_{a,p}$	セルの変形の様子	試験体の変形の特徴	試験体の変形の形状
1	0.84	载荷方向に対して平行に並ぶ六角形の頂点同士が近づくように変形する.	一様	列状
2	0.92		一様	列状
3	0.28		非一様	波状
4	0.36		非一様	波状

5. まとめ

ハニカム構造材料の一軸圧縮試験を行うことによって、材料の応力～ひずみ関係をモデル化した。

この結果、ハニカム構造材料を圧縮すると、応力～ひずみ曲線がトリリニア型になることがわかった。吸収層の圧縮性が高い方が吸収層の設置幅を狭くすることができるため、吸収層として設置する場合は、断層のずれる方向と六角形の辺が垂直になるように設置する方がよい。

また、塩化ビニルのハニカム構造材料を圧縮すると、破壊面は一様に発生し、クラフト紙の場合は破壊面が非一様に発生し、材料による影響が大きいことがわかった。

さらに、ハニカム構造材料のトリリニア型の応力～ひずみ関係の降伏点と材料が塑性化する地点が必ずしも一致せず、材料やセルサイズの影響を受けることがわかった。

今後は、モデル化した応力～ひずみ関係を用いて、ハニカム構造材料を吸収層として用いた場合の効果の解析計算を行う一方、材料の選定、施工方法の検討を行っていく予定である。

参考文献

- 1) 海野隆哉, 小長井一男:平成 16 年度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, 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講演論文集, 土木学会, pp.47-52, 2006.
- 3) 玉置久也, 谷和夫: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, 第37回岩盤力学に関するシンポジウム, 土木学会, pp.125-130, 2008.
- 4) S. D. Papka, S. Kyriakides: *Experiment and Full-scale Numerical Simulations of In-plane Crushing of a Honeycomb*, Acta materialia Vol. 46, No. 8, pp. 2765-2776, 1998.
- 5) 日本規格協会: JISハンドブック: 物流・包装, pp.267-271, 1999.
- 6) 日本規格協会: JISハンドブック: プラスチック, pp.1055-1059, 2009.

STUDY ON INSTALLATION OF ABSORPTIVE LAYER FOR MITIGATING FAULT RUPTURE HAZARD ON TUNNEL

Kei OGAWA, Kazuo TANI, Hideaki TAKAHASHI

When active faults cross a tunnel, fault rupture hazard may occur such as serious derauling of a train. Use of absorption layer was proposed to mitigate localized deformation of a tunnel. Although using the multi-husks mortar for the absorption layer, it appears not sufficient to care with large fault displacements. This study proposes the way of hexagonal honeycombs for the absorption layer, and conducted a series of unconfined compression tests. The test results demonstrated that the honeycombs have strong anisotropy of the compression characteristics. Furthermore, it is desirable to install the absorption layer so that a pair sides of a hexagon may become perpendicular to the direction of fault displacement.