

1. はじめに

トンネル外周に軟らかな免震材を配置することによりトンネルの地震時断面力を大幅に低減する免震構造については、近年様々な検討が行われてきている(1,2)。これまでの検討は、一般に周辺地盤が比較的軟らかく、地盤条件急変部などにおいて地震時に大きな地盤ひずみが発生する可能性があるシールドトンネルと開削トンネルを主な検討対象としてきたが、例えば1995年の兵庫県南部地震においては被害の程度こそ大きくないものの、山岳トンネルにおいても被害事例が報告されている(3)。本研究は、このような断層破砕帯を通過する導水路トンネルの縦断面方向に免震構造を適用した場合について解析的な検討を実施したものである。

2. 解析条件と解析手法

検討の対象としたのは、掘削外径3.0m、土被り20mの円形断面の山岳トンネルであり、内部に内径2.0mの鋼管をたて込み、地山と鉄管の間の50cm厚の空隙に裏込めを施した導水管路を想定している。地山は一般的な花崗岩層とし、解析モデルの中央に幅2.0mの断層破砕帯が鉛直にモデル下端から地表面まで存在し、トンネルがこの弱層部を直角に横切るモデルとした。解析手法は、3次元静的弾性FEM解析とし、150m×35m×83mの解析領域について、地山、断層破砕帯および免震層を3次元ソリッド要素で、トンネルを薄肉シェル要素でモデル化し、対称条件より半断面モデルとした。免震層は、従来の裏込め材の代わりとして厚さ50cmの空隙に免震材を注入して形成するものとし、本検討では免震層施工区間は断層破砕帯をまたぐ21mの範囲とした。また、非免震のケースでは裏込め材の物性値は周囲の地山と同一とした。解析に用いたFEMモデルのトンネル縦断面方向断面図を図-1(a)に、トンネル軸直角方向断面図を図-1(b)に示す。また、本解析に用いた地山、断層破砕帯、免震層および鋼管の物性値を表-1に示す。免震材料の物性は、表-1に示すように非免震をケース0、基本ケースはケース2(免震層のヤング率100kgf/cm<sup>2</sup>、ポアソン比0.30)としたが、地山に対する免震層のヤング率の比および免震層のポアソン比を各2ケースずつ変化させ、ケース0とケース2と比較することにより、ヤング率比およびポアソン比の影響についても検討を加えた。

地震時の断層の運動を模擬する手法として様々なアプローチが考え得るが(4)、ここでは1つの仮定として、断層が動いて、左側地山に対して右側地山を鉛直方向上向きに1mだけ押し上げたものとして、底面に対して強制変位を加えることにより与えた。ただし、入力変位の絶対値に関しては不確定要素が大きく、線形解析のみをここでは取り扱うことから、以下の結果の比較は、解析結果の絶対値

に関しては今後の課題とし、免震の各ケースに対する非免震のケースの比について議論することにした。境界条件は、側面は4つの面ともに鉛直ローラー、底面は左側地山を完全固定、右側地山を水平2方向固定、鉛直方向一定変位(上向き1m)、断層破砕帯は水平2方向固定、鉛直方向には左側地山と右側地山との間で変位が0mから1mに線形変化するように設定した。

表-1 解析用物性値

		ヤング率E (kgf/cm <sup>2</sup> )	ポアソン比 ν
岩盤	全層一様な物性値	100000	0.30
弱層	幅2m, モデル中央位置	1000	0.40
免震層	ケース0 層厚50cm	地盤と同一	地盤と同一
	ケース1 設置範囲:	1000	0.30
	ケース2 弱層を挟む21m	100	0.30
	ケース3	10	0.30
	ケース4	100	0.40
ケース5	100	0.48	
鋼管	φ=2m, t=18mm	2100000	0.167

1kgf/cm<sup>2</sup>=98kPa

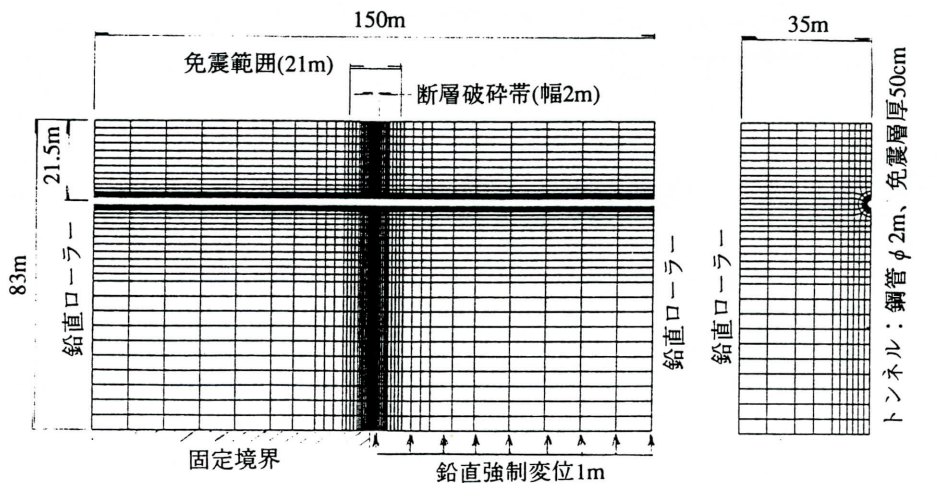


図-1 解析モデル図 (a)トンネル縦断面方向断面 (b)軸直角方向断面



### 3. 解析結果

解析結果の1例として、トンネル軸線を通る縦断方向断面の変位図をケース0（非免震）とケース2（免震、ヤング率100kgf/cm<sup>2</sup>, ポアソン比0.30）について図-2と図-3にそれぞれ示す。なお、図示は、水平方向には断層破碎帯を含む50mの範囲、深さ方向にはGL-5mから-35m間の範囲を対象とした。非免震のケースの図-2では、断層破碎帯部で急激な変位差が生じているのに対して、図-3の免震層を設けたケース2では、免震層により変位分布がなめらかな形状に変化していることがわかる。これを、トンネルスプリングライン上での鉛直方向の相対変位について考察してみると、免震層の左端位置と右端位置間（区間21m）の相対変位は、非免震が76.8cm、免震が77.8cmと大差はないが、断層破碎帯の左端位置と右端位置間（区間2m）の相対変位は、非免震が53.2cm、免震が17.4cmと大きな差がみられ、免震層によるトンネルおよび周辺地盤の変位分布の平滑化の効果を示している。

地山に対する免震層のヤング率比を変化させたケースについて、トンネルに発生する応力の低減率に関する比較結果を図-4に示す。図-4より、ヤング率比が1/100から1/10000の範囲で免震構造を適用したケースではいずれも、トンネル応力は30%以下に低減されており、ヤング率比、すなわち免震層のヤング率が小さいほどトンネル応力の低減効果は大きいことがわかる。

次に免震層のポアソン比を変化させたケースについて、トンネルに発生する応力の低減率に関する比較結果を図-5に示す。図-5より、ポアソン比が0.30から0.48の範囲で免震を施したケースではいずれも、トンネル応力は20%以下に低減されている。トンネル応力の低減効果は、免震層のポアソン比が小さいほど大きい、0.3~0.48の範囲のポアソン比の変化に対するトンネル応力の低減効果の変化は比較的小さいといえる。

### 4. まとめ

免震構造を断層破碎帯を通過する導水路トンネルの縦断面方向に適用した場合について、3次元静的FEMによる解析的検討を実施し、免震と非免震のトンネルに発生する最大応力を比較した結果、以下の結論が得られた。1)免震層は断層破碎帯部でトンネルに作用する急激な変位差を平滑化する効果があり、免震層設置によりトンネルの応力は30%以下に低減される、2)免震層のヤング率が小さい程、トンネル応力の低減効果は著しい。この結果より、軟質な地山のみならず、弱層部を通過する岩盤トンネルに対しても免震構造が非常に効果的に適用できる可能性が示された。

(参考文献) 1)鈴木・田村：シールドトンネルの免震構造とその免震効果の評価手法の提案、土木学会論文集, No.525/I -33, pp.275-285, 1995. 2)粕田・鈴木：矩形断面トンネルの免震メカニズムに関する解析的検討、第24回地震工学研究発表会講演論文集, pp.409-412, 1997. 3)小山・朝倉・佐藤：兵庫県南部地震による山岳トンネルの被害と復旧、トンネルと地下, Vol.27, No.3, pp.51-61, 1996. 4)例えば、高田・李・梁：断層を横断する地中管路の耐震計算法、第24回地震工学研究発表会講演論文集, pp.969-972, 1997.

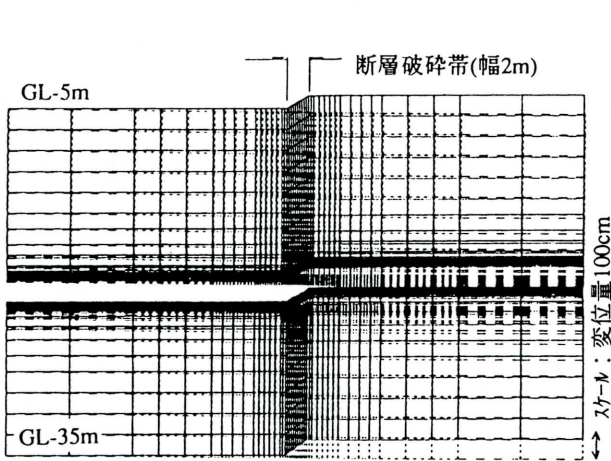


図-2 縦断方向変位図(非免震、ケース0)

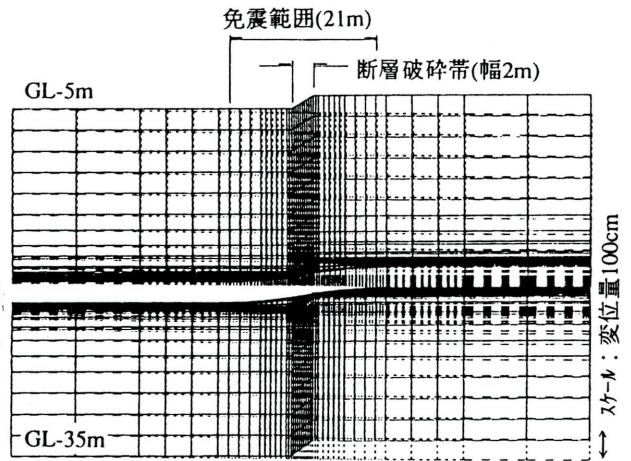


図-3 縦断方向変位図(免震、ケース2)

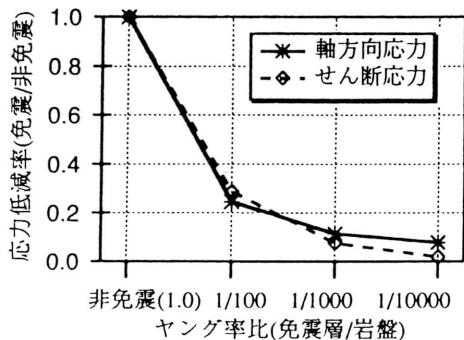


図-4 応力の低減率とヤング率比の関係

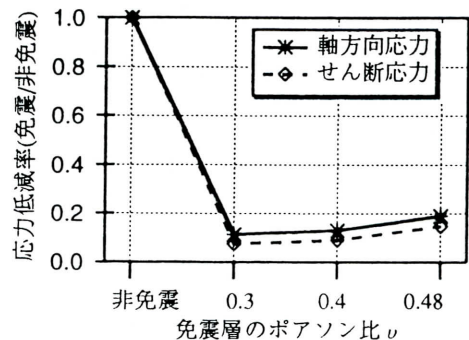


図-5 応力の低減率とポアソン比の関係