

断層変位を受ける地中構造物の耐震性と免震層を用いた断層変位対策の有効性

九州大学工学部 学生会員 相部岳暁 九州大学工学研究院 正会員 古川愛子
九州大学工学研究院 フェロー 大塚久哲

1. はじめに

現行の耐震設計では、地震による揺れのみが考慮されており、断層運動によるずれの影響は考慮されていない。しかし、線状地中構造物は断層と交差せざるを得ない場合があり、断層変位による影響が危惧される。本研究では断層を横切るトンネルの耐震性と免震層を用いた断層変位対策の有効性を3次元静的有限要素解析により検討する。

2. 解析概要

(1) 解析モデル

解析モデルを図-1に、物性値を表-1に示す。厚さ35mの表層地盤を浅をモデル化し、基盤面に断層変位が発生すると仮定した。免震材はポリビニルアルコール系ポリマー材を想定し¹⁾、厚さ50cmの免震層をトンネル全体を取り囲むように設置した。解析モデルは地盤と免震材をソリッド要素（非線形）、トンネルをシェル要素（線形）でモデル化した。地盤および免震材の非線形性は修正R-Oモデルで表現した。断層変位は断層面に沿って1mとし、上盤の底面を固定し、下盤の底面に強制変位を与えることで表現した。

(2) 解析ケース

解析ケースを表-2に示す。断層のタイプは正断層とし、断層面の傾斜角を3通りとした。また断層面が表層地盤まで至る場合と至らない場合を比較するため、「上盤と下盤の境界にジョイント要素で不連続な断層面をモデル化するケース（断層面あり）」と「上盤・下盤を連続としてモデル化するケース（断層面なし）」を想定した。ジョイント要素は断層面直交方向に圧縮力が生じる場合のみ抵抗し、引張力や接線方向の力には抵抗しない。

3. 断層変位によりトンネルに生じるひずみ

(1) 断層面の傾斜角の影響

図-2にトンネルに生じるひずみを断層面の傾斜角毎に示す。軸ひずみ（引張を正）は上床版隅角部、せん断ひずみ(γ_{yz})は側壁中央で最大となったため、それらの地点の値を出力している。上床版の軸ひずみを比較すると90°のケースが最も小さく上盤側で圧縮、下盤側で引張ひずみが生じている。一方、30°と60°のケースは30°の方が若干大きいほぼ同じ値であり、また両ケース共に正の値、つまり引張ひずみが卓越している。この理由としては、図-3に示すように90°の場合はせん断方向の断層変位によって上床版には主に曲げ変形が生じているが、軸方向にも断層変位が生じる30°、60°の場合は引張方向にも変形が生じるためであると考えられる。断層面の傾斜角が低いほど引張による影響が大きくなるために30°のケースの軸ひずみが最も大きくなったものと考えられる。一方、側壁のせん断ひずみは断層面の傾斜角が小さくなるにつれ小さくなる。図-3に示すように、傾斜角が大きいものほど側壁のせん断変形が大きくなるためであると考えられる。

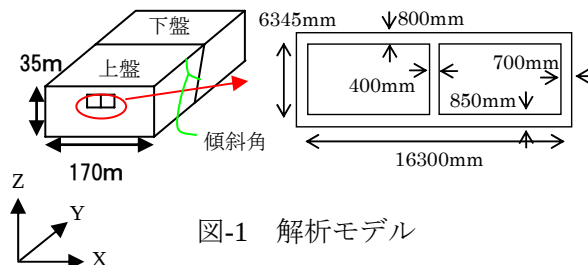


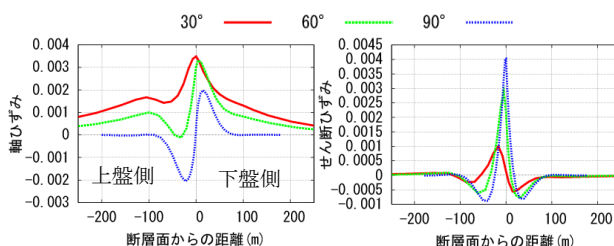
図-1 解析モデル

表-1 物性値

	せん断波速度(m/s)	ヤング率(kN/m ²)	ポアソン比	単位体積重量(kN/m ³)
地盤	200	218938	0.49	18.0
トンネル	2302	30500000	0.20	23.5
免震層	365	1088	0.49	10.0

表-2 解析ケース

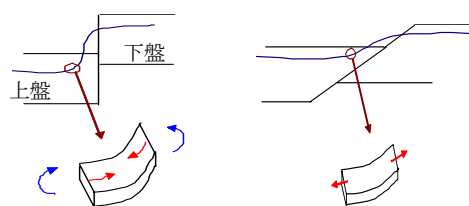
	断層面なし	断層面あり	断層面の傾斜角
免震層なし			30°, 60°, 90°
免震層あり			30°, 60°, 90°



(a)軸ひずみ

(b)せん断ひずみ

図-2 最大ひずみの比較（断層面傾斜角毎）



(a) 傾斜角 90°

(b) 傾斜角 30°, 60°

図-3 トンネルに生じる変形

(2) 断層面のモデル化の影響

断層面のモデル化の有無がトンネルのひずみに及ぼす影響を比較した。いずれの傾斜角においても断層面なしのケースの方が軸・せん断ひずみともに小さいことがわかった。例として傾斜角 60°の結果を図-4 に示す。この原因を断層面における地盤のせん断ひずみ (γ_{yz}) と Z 方向の軸ひずみより考察する。コンター図の傾向としては類似しているためせん断ひずみのみ図-5 に示す。断層面なしのケースは地盤に広い範囲で大きなせん断と圧縮ひずみが生じているためトンネルの変形が小さくなるものと考えられる。

4. 免震層を用いた断層変位対策の有効性

免震層によるトンネルのひずみの低減効果を各断層傾斜角で比較した。トンネルの軸ひずみの場合 (図-6(a))、断層面の傾斜角が小さいものほど低減効果が大きく、30°のケースでは最大で約 47%減少した。この原因を断層面の免震層のせん断ひずみ (γ_{yz}) より考察する (図-7)。免震層ありの場合、免震層に大きなせん断ひずみが生じている。一方、軸方向のトンネルの変位を比較すると免震層ありの場合の変位が下盤側で小さく、上盤側で大きくなっており、またその傾きも小さい (図-8)。この 2 点を踏まえると免震層が大きくせん断変形をすることでトンネルの軸方向の変形を抑えることができるということである。傾斜角が小さいものほど低減効果が大きくなった理由は断層変位のトンネル軸方向の割合が大きいためと考えられる。つまり、90°のケースではせん断方向の断層変位が主なものとなっており初めから引張変形がほとんど発生していないため、軸ひずみの減少割合が小さい。しかし、60°、30°と傾斜角が小さくなるにつれ引張変形の割合が大きくなるため、減少割合も大きくなったと考えられる。一方トンネルのせん断ひずみの場合 (図-6(b))、断層面の傾斜角が大きいものほど低減効果が大きく、90°のケースでは最大で約 28.6%減少した。図は省略するが、免震層下部に大きな圧縮軸ひずみ生じてトンネルの Z 方向の変位が小さくなりトンネルのせん断変形が減少しているものと考えられる。

5. まとめ

本研究では、断層面傾斜角と断層面のモデル化の有無がトンネルのひずみに及ぼす影響について検討するとともに、断層変位によってトンネルにひずみが生じるメカニズムを明らかにした。また、免震層はトンネルに生じるひずみの低減効果が期待できることがわかった。

参考文献 1) 桐生郷史他：既設開削トンネルのためのポリマー免震工法のモデル化に関する一考察，第 30 回土木学会地震工学研究発表論文集，2009

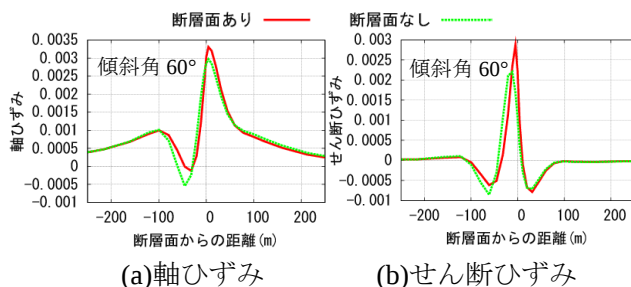
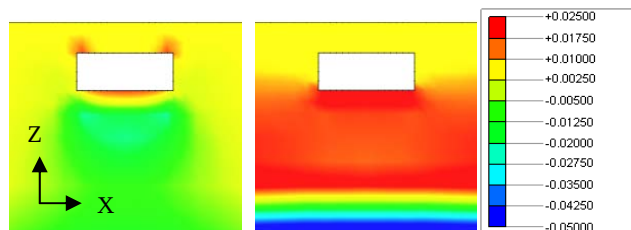
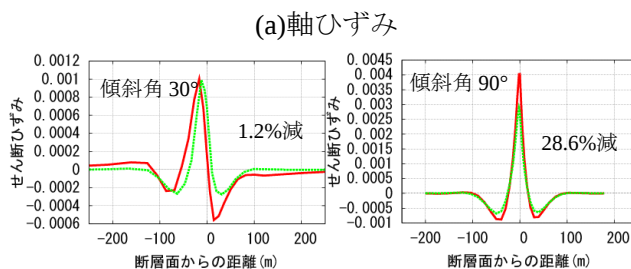
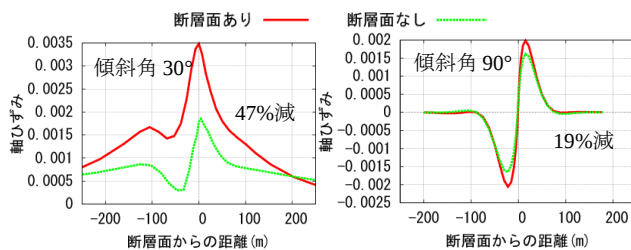


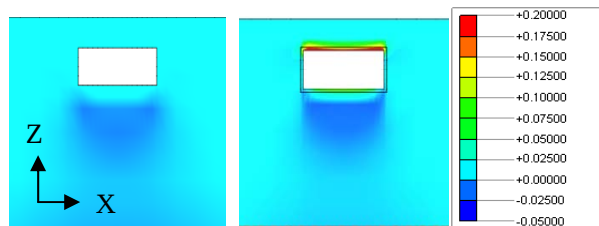
図-4 最大ひずみの比較 (断層面の有無)



(a)断層面あり (b)断層面なし
図-5 地盤のせん断ひずみ (傾斜角 60°)



(a)軸ひずみ (b)せん断ひずみ
図-6 最大ひずみの比較 (免震層の有無)



(a)免震層なし (b)免震層あり
図-7 地盤・免震層のせん断ひずみ(傾斜角 60°)

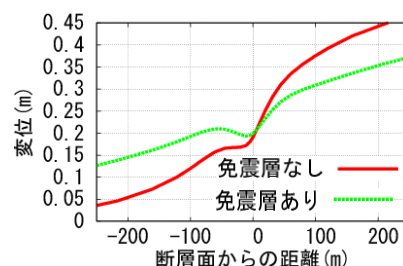


図-8 トンネル軸方向変位分布