

断層変位を受ける地中構造物の耐震性能と免震対策の有効性に関する研究

九州大学大学院 学生会員 相部岳暁 京都大学大学院 正会員 古川愛子
九州大学大学院 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影響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能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。免震材はポリマー材を想定し、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。免震層の長さは10~200mとしている。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(図-2)。

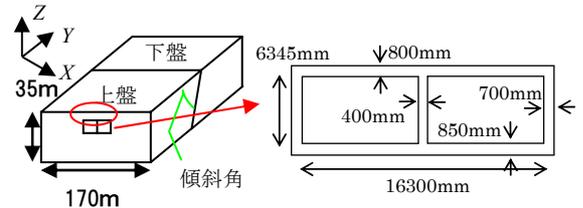


図-1 解析モデル

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	3050000	0.20	23.5
免震層	19	1088	0.49	10.0

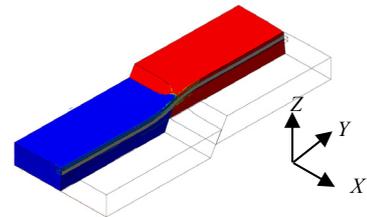


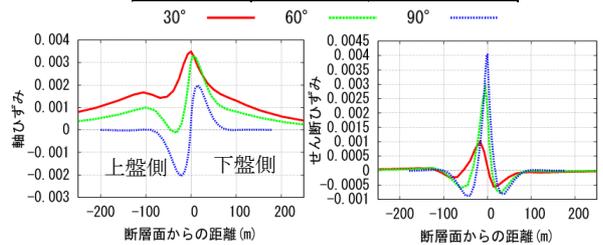
図-2 断層変位図

(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。なお、今回は上下床版隅部と左右側壁中央の応答に着目する。

表-2 解析ケース

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



(a) 軸ひずみ (b) せん断ひずみ
図-3 ひずみの比較(断層面傾斜角毎)

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-3にトンネルに生じるひずみを断層面の傾斜角毎に示す。上床版の軸ひずみ(ϵ_y)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(引張)が卓越している。この理由としては、図-4に示すように90°の場合は軸直角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、30°と60°の場合は軸方向にも変位が生じるためであると考えられる。断層面の傾斜角が小さ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(γ_{yz})は断層面の傾斜角が大きくなるにつれ大きくなる。図-4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。

キーワード 断層変位, 地中構造物, 免震層

連絡先 〒819-0395 福岡市西区元岡 744 TEL 092-802-3374

(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する。表-3 にそれぞれのモデルの最大ひずみと、断層面なしの断層面ありに対するひずみの変化率を示す。トンネルの軸ひずみの場合、いずれの傾斜角においても断層面なしのケースの方が最大軸ひずみが小さいことがわかった。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。次にトンネルのせん断ひずみの場合、60°と90°のケースは断層面なしの方が最大せん断ひずみが小さくなったが、30°のケースでは断層面なしのケースのほうが大きくなった。これは、せん断ひずみは $\gamma_{yz} = \partial u_z / \partial y - \partial u_y / \partial z$ (u_y, u_z は各方向の変位) で表されるが、断層面の有無で $\partial u_z / \partial y$ と $\partial u_y / \partial z$ の大小関係が変化したことが原因と考えられる。

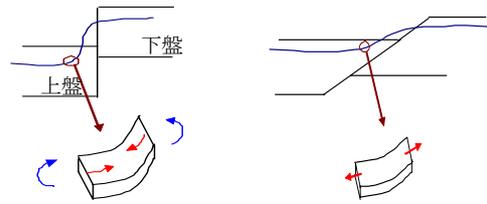
4. 免震層を用いた断層変位対策の有効性

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。図-6(a)に最大軸ひずみの低減率を示す。いずれの断層傾斜角においても最大軸ひずみの低減が確認できる。そして免震層が長くなるにつれ最大軸ひずみの低減率も大きくなるが、90°のケースでは免震層の長さが 100m 付近で低減率が約 20%に収束している。この原因を断層面における地盤と免震層のせん断ひずみより考察する(図-7)。免震層が設置されることでその部分に大きなせん断ひずみ生じる。そのため、免震層がせん断変形することでトンネルの変形を抑えることができていると考えられる。90°のケースでは軸直角方向にのみ変位し、軸方向に変位しないため、免震層の影響範囲が小さいと考えられる。次に図-6(b)に最大せん断ひずみの低減率を示す。いずれの断層傾斜角においても最大せん断ひずみの低減が確認できる。これは、免震層下部に大きな圧縮軸ひずみが生じたため、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。30°のケースで免震層の長さが 100m 以上になると最大せん断ひずみの低減率が低下した原因として、せん断ひずみが $\gamma_{yz} = \partial u_z / \partial y - \partial u_y / \partial z$ で表されるのに対し、 $\partial u_z / \partial y$ と $\partial u_y / \partial z$ の関係性が変化したことが原因であると考えられる。

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

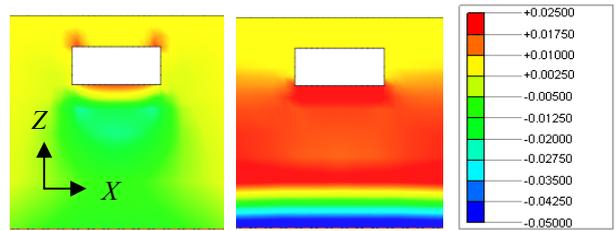


(a) 傾斜角 90° (b) 傾斜角 30°, 60°

図-4 トンネルに生じる変形

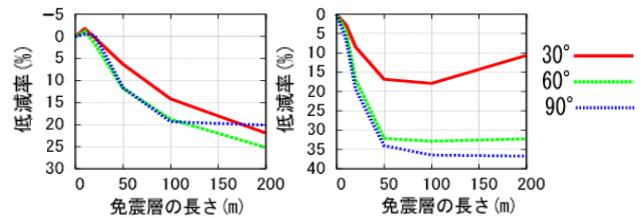
表-3 最大ひずみと変化率

傾斜角	軸ひずみ			せん断ひずみ		
	断層面あり	断層面なし	変化率(%)	断層面あり	断層面なし	変化率(%)
30°	0.00348	0.00296	-15.0	0.00091	0.00116	27.1
60°	0.00331	0.00297	-10.2	0.00269	0.00213	-20.6
90°	0.00199	0.00197	-0.9	0.00403	0.00265	-34.3



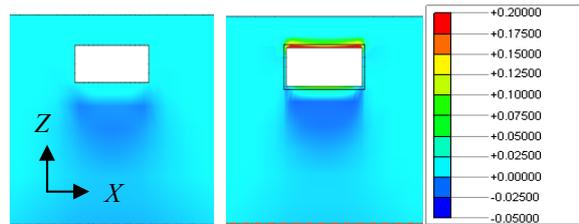
(a) 断層面あり (b) 断層面なし

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 最大ひずみの低減率



(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°)