

地下構造物の断層変位対策としての 免震構造の適用性

西山誠治¹・川満逸雄²

¹(株)日建設シビル (〒102-8117 東京都千代田区飯田橋2-18-3)

E-mail:nishiyama@nikken.co.jp

²(株)日建設シビル (〒102-8117 東京都千代田区飯田橋2-18-3)

E-mail:kawama@nikken.co.jp

鉄道や道路構造物は断層と交差せざるを得ない場合もある。耐震設計上、断層変位量と構造物の断面力の関係を把握することは重要である。一方、地震動に対して、弱剛性層による地下構造物の免震構造が開発されているが、これの断層変位への適用性はあまり議論されていない。そこで3次元FEM解析によりその適用性を確認した。さらに、簡便な断面力評価手法として、梁ばねモデルや杭設計におけるチャン式により3次元解析と同等の断面力が再現できることを確認した。この際、有限変形解析を実施し、軸力の評価は、微小変形解析では精度が悪く、有限変形解析による必要があることを示した。最後に、構造物や地盤の非線形性を考慮した場合の、断層変位に対するトンネルの安全性の検討例を示した。

Key Words : *Underground structure, Seismic isolation, Fault displacement*

1. はじめに

鉄道や道路構造物は断層と交差せざるを得ない場合もある。本研究では矩形RC地下構造物を対象とする。その対策の可能性を検討する上で、断層変位量と構造物の断面力の関係を把握することは重要である。

一方、地下構造物の低剛性材料による免震構造¹⁾²⁾は、地震動を対象に開発されてきた。免震構造の断層変位に対する適用性は、あまり議論されていないようであるため、3次元FEM解析により調査する。

さらに、より簡便な方法で断面力が評価できれば有用である。既往の研究では、断層変位による構造物の断面力性状は、地盤ばねを有する梁や、杭設計におけるチャン式等に関連して議論されている。これらの妥当性を3次元FEM解析との比較により確認する。ここで、断層変位がトンネルに対して角度を有して作用する場合、一般的な微小変形解析では軸力を正確に評価できないため、有限変形解析により微小変形解析との差異を調査する。

最後に、有限変形解析により、現実に近い条件、すなわち地盤および構造物の非線形性を考慮した場合の免震構造の検討を行う。

以上より、断層変位による線状地中構造物の断面力の基本的性状を検討し、地下構造物の断層変位対策としての免震構造の適用性を調査する。

2. 検討条件

1層2径間の鉄道一般軌道部の開削トンネル(図-1)を対象とする。表層地盤の厚さ30mの一樣地盤を対象とし、トンネルの土被りは5mとする。地盤条件および解析ケースを表-1に示す。検討は断層変位に対する地下免震の基本的特性を調査することを目的とし、地盤は弾性体としせん断弾性波速度を変化させた。免震材は液状ゴム系¹⁾とし、その厚さは10cm、30cmおよび50cmとした。さらに、鉄道沿線の地盤振動対策として開発されている低剛性のEPS混合ソイルメント改良土³⁾(以下低剛性改良土と呼ぶ)も対象とした。断層は水平横ずれ、交差角は90°とした。

3次元の解析モデルを図-1に示す。解析モデルは、地盤を3次元ソリッド、構造物をシェル要素でモデル化した1/2モデルとする。断層は、断層線の分散幅の算定が困難であるので、周辺地盤の1/10000程度の剛性の薄層(2m)としてモデル化した。断層変位は1mとし基盤層を強制変位させて与えた。境界条件は底面固定(移動部分は鉛直のみ固定)、側面は鉛直固定で、対称面は鉛直およびトンネル方向を固定とした。

梁ばねモデルの解析は、トンネル全体を1本の梁とし地盤ばねを設けたモデルで検討する。詳細な条件は各章で述べる。

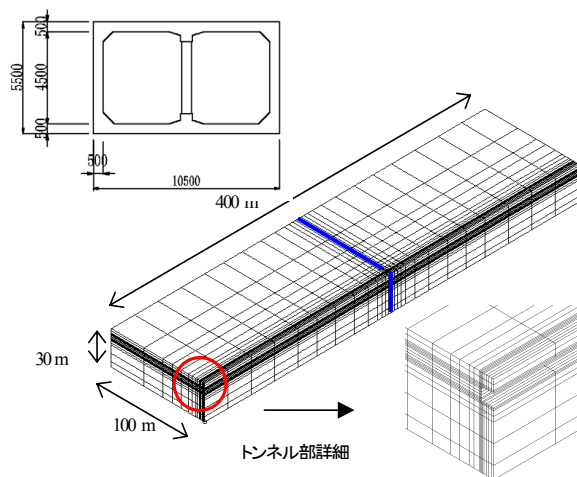


図-1 解析モデル

表-1 解析ケース

Case	角度 °	地盤 Vs (m/s) G (kN/m ²)	免震材 厚さ(m) G (kN/m ²) v
1	90	300 183700	0.0 -
2			0.1 280 0.46
3			0.3 280 0.46
4			0.5 280 0.46
5		200 81600	0.0 -
6			0.1 280 0.46
7			0.5 280 0.46
8		100 20400	0.0 -
9			0.1 280 0.46
10			0.5 280 0.46
11		300 183700	0.1 4000 0.40
12			0.3 4000 0.40
13			0.5 4000 0.40

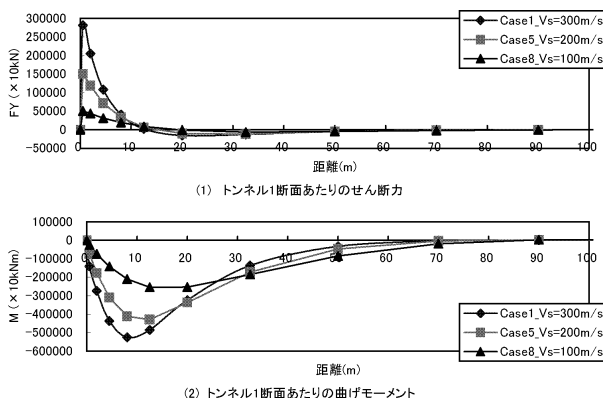


図-2 地盤剛性の比較

3. 3次元モデルの検討

断層変位に対する断面力性状や免震層の効果を、シェル要素の応力から算出したトンネル1断面あたりの断面力により考察する。免震層無しの場合の地盤剛性の影響を図-2に示す。断面力の分布は左右対称なので片側のみ示す。地盤剛性が小さくなると曲げモーメントよりせん断力が顕著に小さくなること分かる。

地盤Vs=300m/sの場合に免震層を設けた結果を図-3に

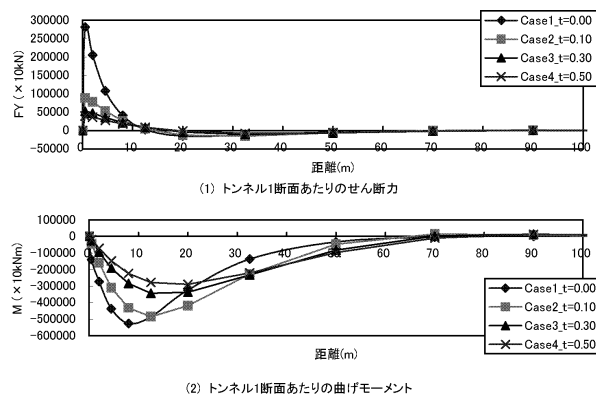


図-3 免震層厚さの比較(Vs=300m/s)

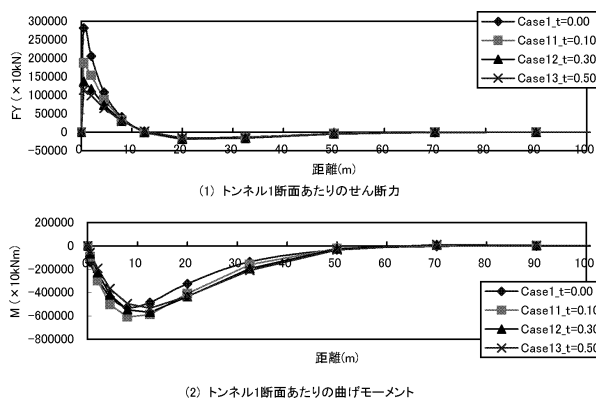


図-4 低剛性改良土の効果(Vs=300m/s)

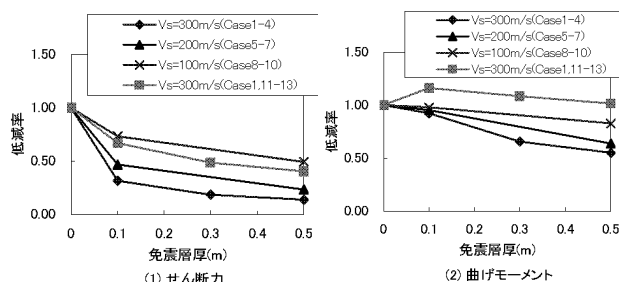
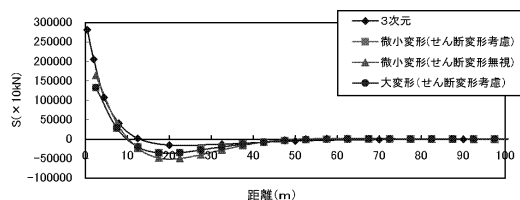


図-5 3次元解析の各ケースの比較

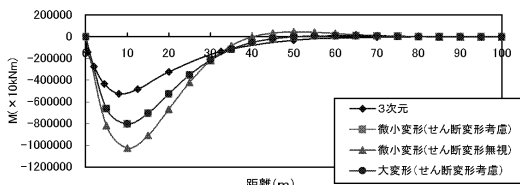
示す。免震層により断面力が低減される。免震層の設置は地盤剛性低下と同様の効果があり、免震層厚0.5mの断面力は、図-2の免震層無しのVs=100m/sと同程度である。

低剛性改良土の結果を図-4に示す。せん断力は低減するものの、曲げモーメントは低減していない。これは、剛性やポアソン比の影響で、Case2~4の免震材と異なる結果を示したと考えられ、断面力低減には現地盤より剛性が小さければ何でもよい訳ではなく、適切な物性値が必要と考えられる。

図-5に各地盤剛性の免震層無しに対する免震層の断面力の低減割合を示す。これより、せん断力に対する低減割合の方が大きいことが分かる。また、周辺地盤の剛性が小さいほど免震効果が小さくなる。さらに、今回示していないが、断層変位作用付近では、側壁の法線方向外力が大きくなり、側壁が厳しい状態になるが、これも改善される。

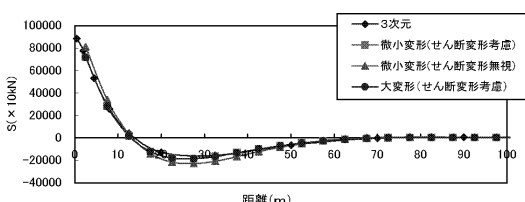


(1) トンネル1断面あたりのせん断力

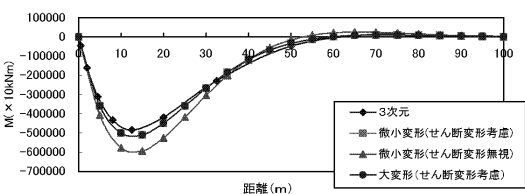


(2) トンネル1断面あたりの曲げモーメント

図-6 3次元解析と梁ばね解析の比較(Case1)



(1) トンネル1断面あたりのせん断力



(2) トンネル1断面あたりの曲げモーメント

図-7 3次元解析と梁ばね解析の比較(Case2)

4. 簡易モデルの検討

(1) 微小変形解析

トンネルを断層変位作用点で半分に取り出して考えると、杭の水平載荷に類似の挙動^{4),5)}である。そこで、トンネルを梁と地盤ばねでモデル化して解析する。直角方向地盤ばねは平面ひずみ状態を仮定した3次元FEMモデルでトンネル隅角に荷重を与えて求める。トンネル軸方向も同様に3次元FEMモデルで面外方向に荷重を与えて算出する。なお、微小変形解析では交差角90°の場合は直角方向外力のみで、軸方向ばねは断面力に影響しない。

梁ばねモデル頂部を強制変形(軸方向0, 直角方向0.5m)させた結果を図-6, 7に示す。梁のせん断変形の影響も比較した。Case1($V_s=300\text{m/s}$)では梁モデルが3次元解析より大きい。図示しないが $V_s=100\text{m/s}$ では逆の傾向である。Case2では両者は概ね整合する。

3次元解析の結果と、せん断変形を考慮した梁ばね解析の結果およびせん断変形を考慮しない解析結果(チャン式)の比率を、それぞれ図-8, 9に示す。両者とも3次元解析と同程度の断面力性状を再現する。免震層を考慮

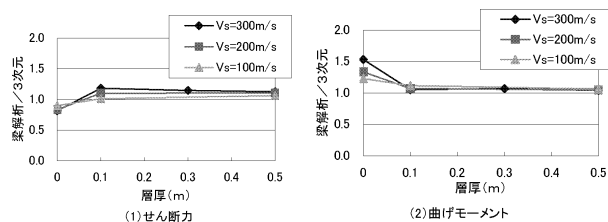


図-8 3次元解析と梁ばね解析の比較(Case1-10)

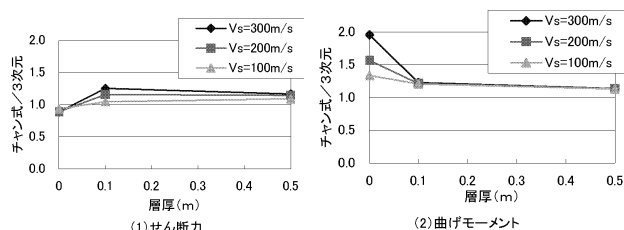
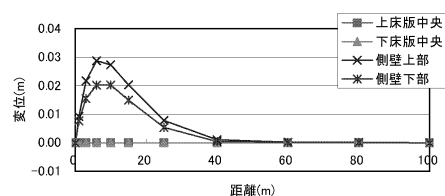
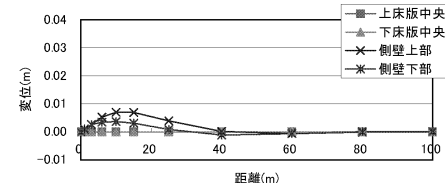


図-9 3次元解析とチャン式の比較(Case1-10)



(1) Case1



(2) Case2

図-10 トンネル部位の鉛直方向変位(3次元 Case1, 2)

した場合、せん断変形を考慮した方が整合性は高い。チャン式では3次元解析より1~2割程度の大きい値を示す。

地盤剛性が小さくなるとせん断力が急激に小さくなるのは、チャン式により理解可能である。すなわち、チャン式では、線状構造物の曲げ剛性 EI (kN/m^2)、その単位長さ当たりの地盤ばね係数 K_h (kN/m^2)とし、特性値 $\beta = \sqrt[4]{K_h/4EI}$ とすると、変形量 δ が生じた場合の断面力は、以下のように書ける。

- 断層作用部のせん断力 : $H=2EI\beta^3\delta$
- 曲げモーメントの最大値 : $M=0.645EI\beta^2\delta$

これより、せん断力および曲げモーメントは、それぞれ地盤ばね K_h の3/4乗および1/2乗に比例し、免震層によりせん断力が曲げモーメントより顕著に低減することになる。

ここで、3次元解析と2次元解析で差について考察する。3次元解析におけるトンネル部位の鉛直方向変位を図-10に示す。トンネルの軸線中心位置は変位しないが側壁は上部に変位しており、トンネルが捻れていることが分かる。捻れはCase1の方が大きく、免震層の設置により小さくなる。地盤ばね算出時は平面ひずみ状態を仮定しており、3次元解析での変形状態ではばね値が場所毎に異なるため、3次元と梁ばね解析に差が生じたと考えられる。

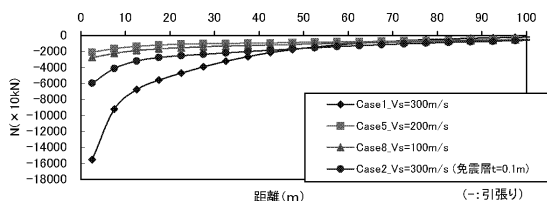


図-11 有限変形解析による軸力

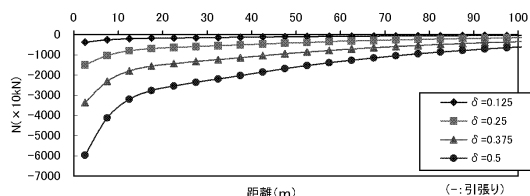


図-12 有限変形解析による軸力の増加傾向 (Case2)

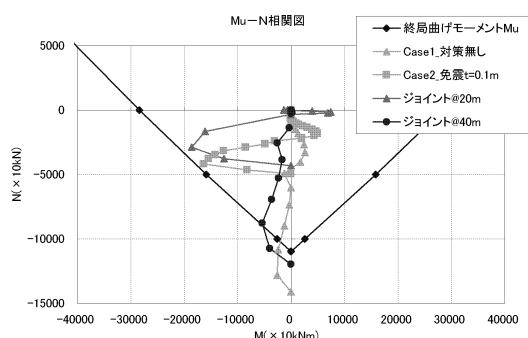


図-13 3次元解析と梁ばね解析の比較 (Case1, 非線形)

(2) 有限変形解析

有限変形解析結果の軸力を図-11に示す。地盤剛性の大きいほど軸力が大きく断層近傍に集中し、免震層は軸力を低減する。Case2の断層変位と軸力の関係を図-12に示す。軸力は概ね変位の2乗に比例して増加する。部材直角方向の変位に対する軸力は、微小変形理論では表現出来ずにゼロとなる。その定式上、部材軸方向以外の伸びは無視されるためである。軸力の構造耐力への影響は大きく断層変位の検討では幾何学的非線形を考慮した大変形解析が重要といえる。なお、曲げモーメントやせん断力は微小変形解析と同等である。(図6, 7でプロットは重なる)

5. 地盤・部材の非線形性を考慮した検討

これまでの断層変位に対する基本的な断面量性状や免震層の効果を検討するため、部材および地盤を弾性体で扱った。ここでは、両者の非線形性を考慮して検討する。

構造部材の非線形性は、トンネル方向鉄筋量を(D32@150)とし、終局曲げ状態(M_u, ϕ_u)をコンクリートの圧縮ひずみ $\epsilon_{cu}=0.0035$ となる時点としたトリニア型の曲げモーメント M ～曲率 ϕ でモデル化した。トンネルは断面幅の1/2程度(5m)で分割し、要素中央の曲げモーメントと曲率で非線形性を判定した。有限変形解析を用い M ～ ϕ 関係には軸力変動を考慮した。

地盤の非線形性は地盤を砂質土と仮定($\phi=45^\circ$)し、法線方向地盤ばねの上限値を側壁高さの受働土圧、接線方向上限値を、床版では上載圧、側壁では水平土圧力土に摩擦係数を $\tan(45^\circ)=1.0$ を乗じた値とした。

解析ケースはCase1, 2とし、比較としてジョイントを20mおよび40m間隔で設置した場合も検討した。ジョイントは曲げに対してはピン、引張軸力には抵抗しないバネでモデル化した。

検討結果を M_u - N カーブにトンネル断面力をプロットして図-13に示す。これより、Case1の無対策、ジョイント40m間隔では引張耐力を超えるが、Case2の免震層0.1mおよびジョイント20mでは終局耐力(曲率)以内に治まる。

これより、現実的な条件に対しても免震層の断層変位の適用性が確認できた。ただし、20m間隔のジョイントによっても、構造物の安全性は計算上は確保できる。実際の対策工の選定においては、経済性やその他の諸条件にも配慮して対策工を選定することになるが、候補の一つとして免震工法も取上げる上げることが可能となった。

6. まとめ

水平横ずれ、交差角 90° の場合について、断層変位に対する免震層の適用性を検討した。同一変位に対して免震層無しでは地盤剛性が小さい程断面力は小さく、免震層が厚い程断面力低減効果があること、曲げモーメントよりせん断力の方が低減効果の大きいこと、地盤剛性が免震層の剛性より大きい場合ほど低減効果があることが分かった。断面力の基本的性状は梁ばねモデルやチャン式により表現可能であった。また、軸力の評価のためには有限変形解析が重要であることが分かった。地盤・構造の非線形性を考慮した条件においても免震構造の断層変位への適用性が確認できた。

今後、軸力の簡便な評価方法、交差角や鉛直ずれの影響も対象に定量的な検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 建設省土木研究所, (財)土木研究センター, 民間17社: 地下構造物の免震設計法マニュアル(案), 1998
- 2) 土木学会: 減震・免震・制震構造設計法ガイドライン(案), 2002
- 3) 大木基裕, 神田政幸, 村田修, 金口義胤, 太田和喜: EPS混合ソリメントの配合割合が非排水繰返しせん断特性に及ぼす影響, 第58回土木学会年次学術講演会III-584, 2003
- 3) 小長井一男: 地盤と構造物の地震工学, 東京大学出版会, 2002, p57
- 4) 鈴木崇伸: 断層変位が線状構造物に及ぼす影響の基礎的考察, 第55回土木学会年次学術講演会 I-B412, 2000

(2003. 10. 14 受付)