

開削トンネルの地震時挙動に及ぼす 構造物・地盤間の剥離・すべりの影響

西山誠治¹⁾, 室谷耕輔¹⁾, 西村昭彦²⁾

¹⁾正会員 工修 (財)鉄道総合技術研究所 構造物技術開発事業部(基礎・土構造) (〒185-8540 東京都国分寺光町 2-8-38)

²⁾フェロー 工博 (財)鉄道総合技術研究所 構造物技術開発事業部 (〒185-8540 東京都国分寺光町 2-8-38)

地下構造物と地盤間には、L2レベルの地震時に剥離や滑りなどの現象が生じている可能性があるが、その影響は十分に解明されておらず、また、設計においてもこの現象は考慮されていない。そこで、本研究では、これらの影響の有無が構造物の応答値に及ぼす影響を、構造物と地盤の剛性比をパラメータとして、FEM応答変位法による静的解析を用いて調査した。これにより、そのメカニズムは、構造物と地盤に作用する水平力の分担割合の変化により概ね説明できることが分かった。さらに、構造物の剛性の高いほどその影響の大きいこと、逆の場合はその影響の小さいことが明らかとなり、また、設計上この現象を無視することは安全側の結果を与えることが分かった。

Key Words: Cut and cover tunnel, Separation, Sliding, Joint element, FEM seismic deformation method

1. はじめに

地下構造物と地盤間には、L2レベルの地震時に剥離や滑りなどの現象が生じている可能性があるが、その影響は十分に解明されておらず、また、設計においてもこの現象は考慮されていない。

これは、従来の想定する地震動の小さかったこと、これらの影響を無視することは安全側と考えられたこと、また、これらの影響を考慮するためには、骨組系の応答変位法のような Winkler 型のばねを用いた解析では困難であることによる。すなわち、地盤は連続しているため、剥離や滑りが起きた場合、地盤から構造物に伝達できなくなった応力が隣接する地盤に伝わっていくはずである。これらの現象が、Winkler 型のばねでは隣接するばね、すなわち地盤との連成作用が考慮できないため、これらの検討は一般に困難となる。これらの影響を調査するためには地盤を連続体として評価できる FEM を用いた手法が必要となる。

そこで、本研究では、これらの影響の有無が構造物の応答値に及ぼす影響を、構造物と地盤の剛性比をパラメータとして、FEM 応答変位法による静的解析を用いて調査する。さらに、そのメカニズムの解明のため、構造物と地盤に作用する水平力の分担割合を調査する。

これらにより、構造物の剛性と剥離滑りの考慮が構造物の応答値に与える影響を明らかにし、設計上この現象の取扱いについて考察することを目的とする。

2. 検討方法

(1) 解析条件

解析には剥離・滑りの現象をジョイント要素で表現できる FEM 応答変位法¹⁾を用いた。検討条件は、剥離・滑りの影響を把握しやすくするため、地盤および構造物を線形で扱うこととした。地盤モデルは $V_s=92\text{m/sec}$, $\gamma=16.0\text{kN/m}^3$ (せん断弾性係数で約 13800kN/m^2) 程度の一様な地盤を想定し、構造物は土被り 5m 程度の 1 層 2 径間 (大開駅を想定、幅 17.0m、高さ 7.17m、RC 中柱構造) を対象とした。地盤と構造物間の剥離・滑りの現象はジョイント要素で表すものとし、その設定条件を図 1 に示す。ジョイント要素の特性を表すせん断ばね K_s と垂直ばね K_n は数値計算上可能な範囲で大きく取った。また、せん断ばねの降伏応力はモルクーロン式で与え、垂直ばねは圧縮域を線形、引張域では剥離するものとし、応力を 0 とした。

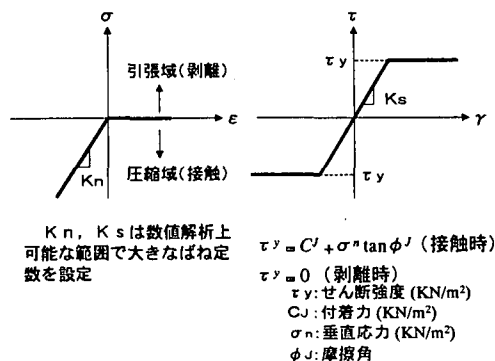


図 1 ジョイント要素の設定²⁾

応答変位法に用いる地盤変位、周面せん断力、慣性力は地盤の固有周期を卓越周期とする Ricker-Wavlet 波を入力地震動として 1 次元動的解析によって算出した。その結果より得られた荷重図を図 2 に示す。

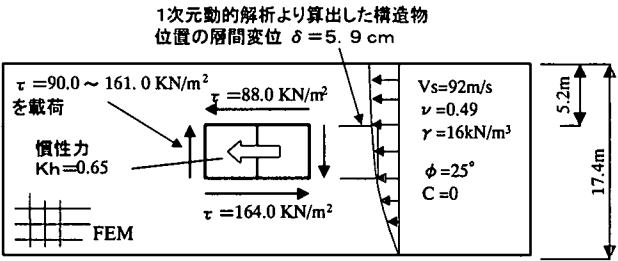


図 2 解析モデル

(2) 解析ケース

剥離・滑りが構造物に与える影響は地盤と構造物の剛性比に大きく左右されると考えられる。そこで、構造物の剛性を地盤のせん断剛性と同等、10 倍、5 倍、0.5、0.1 とした計 5 ケース（表 1）について検討を行った。

表 1 解析ケースおよび解析結果

case	Joint 有無	構造物と地盤 の剛性 比 G _s /G _g	構造物側方 地盤の変形 量 δ _g (cm)	構造物の 層間変形量 δ _s (cm)	地盤・ 構造物間の 滑り 量 (cm)	差分水平力による地盤変位 (cm)
1A	有	10	4.72	1.27	3.45	3.60
1B	無		—	1.60	—	
2A	有	5	4.93	1.77	3.16	—
2B	無		—	2.34	—	
3A	有	1	6.24	4.31	1.93	1.47
3B	無		—	5.27	—	
4A	有	0.5	7.00	5.90	1.10	—
4B	無		—	6.65	—	
5A	有	0.1	9.00	8.76	0.24	0.27
5B	無		—	8.97	—	

3. 検討結果

(1) 剥離滑りの影響

a) 構造および地盤の変形モード

典型的な例として、構造物の剛性が大きいケース 1 と小さいケース 5 の変形図を図 3 に示す。1 A の変形図は構造物が地盤の変形に追随せず、構造物の層間変形(δ_s)よりも地盤の層間変形量(δ_g)が大きくなり、側面で大きな剥離、上下面で滑りが発生していることが分かる。

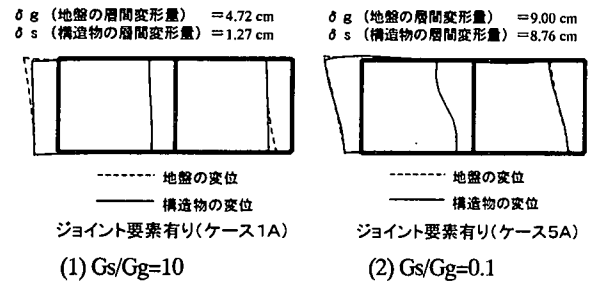


図 3 変形図

一方、構造物の剛性が小さいケース 5 A の変形図は構造物が地盤の変形に追随しており局所的に剥離や滑りが発生しているものの、全体としては地盤と同様の変形モードとなっている。そのため、剥離滑りの影響を考慮しないケース 5 B とほぼ同じ変形量になっていることが分かる。

b) 剥離滑りの影響と剛性比の関係

構造物の層間変形量を表 1 に示す。さらに、地盤と構造物の剛性比 (G_s/G_g) と正規化変形量 (δ_r/δ_g, 応答変形量を自然地盤の層間変形量で正規化) の関係を図 4 に示す。これより、G_s/G_g が小さい領域では地盤変位に比較して構造物の応答変形量の大きいこと、G_s/G_g が同程度の領域では構造物の変形量と地盤の変形量は同程度であり、G_s/G_g の大きな領域では構造物の変形量の小さいことが分かる。これに対応して、構造物の剛性が高い場合、その変形が地盤変形に追随しないため、構造物地盤間の相対変位差が大きく生じ、剥離滑りの影響が顕著になる。地盤と構造物の滑り量(図中■と●の差)は、G_s/G_g が大きくなる程、滑り量の大きく、G_s/G_g の小さな領域では微小であることが分かる。

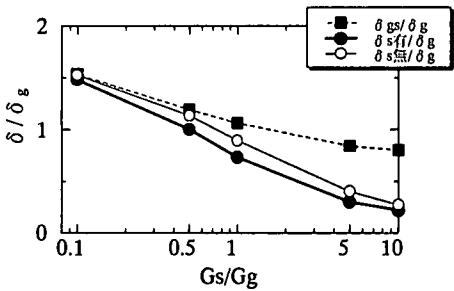


図 4 構造物・地盤の剛性比と応答変形量

c) 剥離・滑りの影響と応答変形量の低減割合

剥離滑りを考慮した場合の構造物層間変形量を考慮しない場合の値で正規化して図 5 に示す。G_s/G_g=0.1 では、剥離滑りの影響は小さく応答値の低減は少ないが、G_s/G_g が大きくなるにつれ、剥離・滑りの影響が大きくなり、G_s/G_g=1~10 で約 20% 応答値の低減が期待できることが分かる。また、低減割合(β)は対数軸上でほぼ直線関係にあり、図中の近似式で表現できることが分かる。

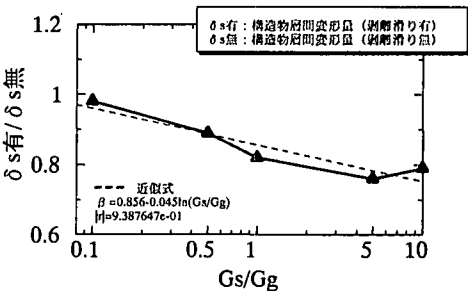


図 5 構造物・地盤の剛性比と剥離滑りの影響

d) 剥離・滑りの影響が断面力に与える影響

構造物に発生している断面力を、典型的な例として $G_s/G_g=10$ と $G_s/G_g=0.1$ のケースについて、図 6 に示す。数値はハンチ始点部の値であり、永久荷重による初期断面力も含んでいる。 $G_s/G_g=10$ の場合、剥離滑りの考慮によるハンチ始点部の曲げモーメントの低減割合は 0.55～0.65 である。一方、 $G_s/G_g=0.1$ の場合は 0.84～0.99 であり、層間変形量の低減割合に調和的である。

$G_s/G_g=10$ (ケース 1A) の場合は、断面力の低減割合は層間変形量よりも大きい。これは、構造物全体がロッキング的な挙動を示し、部材としての変形角では水平相対変位以上に剥離滑りの影響を受けるためと考えられる。

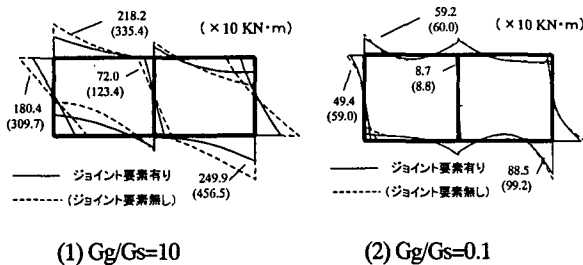


図 6 構造物・地盤の剛性比と応答変形量

e) 構造物の非線形性の影響

実設計を考えると、L2 地震動における構造物は部材が降伏し、塑性化することによって大きく剛性低下をするものと考えられる。そこで、実際に構造物の非線形性を考慮した解析を行った。構造物の非線形特性は大開駅と同等とした。その結果、構造物の層間変形が最大になるせん断荷重とその変位の関係から算出される構造物の等価剛性は、地盤の剛性と比較して 0.76 倍低下しており、地盤の剛性より小さくなった。そのため、ケース 4、5 と同様にジョイントの有無による変形量の差はわずかに 3% であった。

4. 剥離滑りのメカニズム

(1) 構造剛性の大きい場合

a) 剥離滑りの状況

ケース 1、5 の構造物に作用する接線方向応力、法線方向応力を図 7 に示す。また、同図(b)に剥離すべりの状況も併せて示す。(1)(a)の $G_s/G_g=10$ では、接線方向の地盤反力は全て上限値に達している。(b)より、側壁では、ほとんどのジョイント要素が剥離状態にあり水平力は右側壁上部および左下部のみに集中的に発生していることが分かる。

図 3(1)の変形図と合わせて考えると、構造物の剛性が硬いため、構造物が地盤の変形に抵抗するように挙動する。したがって、上床面で地盤・構造物間に相対変形

が生じ滑りを起こす。地盤から構造物に伝達できなくなったせん断方向水平力は、地盤自体を変形させる向きに作用する。これにより、左側壁上部は構造物から離れ(引張)、右側壁上部は構造物を押す(圧縮)方向に水平力が増加する。

b) 地盤と構造物系の分担割合

上床面に作用するせん断方向水平力の合計値(①, ③)、さらに側壁上部に作用する法線方向水平力を加算した値(②, ④)と構造物の相対変形の関係を図 8 に示す。図右の模式図は最終荷重状態について、それらの合計値を示している。なお側壁上部とは、図 7 に示す隅角部よりジョイント要素 4 要素分とした。

②, ④を構造物のせん断変形に關与する水平力の代表値と仮定し層せん断力と呼ぶこととする。剥離滑りを考慮しない②は弾性的に増加するが、剥離・滑りを考慮した④は 5mm から非線形性を示している。最終荷重状態では、60%程度の負担率となっていることが分かり、断面力の低減割合と調和的である。②-①および④-③が側壁のせん断力負担分であるが、剥離滑りを考慮した場合、上床面のせん断力が一定値に達したあと、側壁に載荷される水平力が増加していることが分かり、その増加割合は剥離・滑りを考慮しない場合よりも大きい。すなわち、上床面に作用しきれない水平力の一部が側壁に流れていることが確認できる。さらに、残りの水平力、②-④に対応する部分は、地盤の変形自体に費やされたと考えられる。そこで、ケース 1A の構造物に作用する水平力とケース 1B の水平力の差分を算出して、構造物を取り除いた空洞地盤に載荷したところ、表 1 に示すように構造物と地盤の剥離量とほぼ同じ変形量となった。以上より、構造剛性が大きい場合、滑りによって滑った力の一部は構造物の隅角部に外力として載荷されるが、残りは地盤に流れて行き剥離を助長させると考えられる。

(2) 構造剛性の小さい場合

a) 剥離滑りの状況

図 7 (2)(a)の $G_s/G_g=0.1$ においても、両側壁側の一部の要素を残して上限値に達していることが分かる。(b)の法線方向水平力では側壁左上部および側壁右下部を残して剥離状態にある。密着状態にある部位の傾向が、 $G_s/G_g=10$ の場合と異なるのは、構造剛性が小さいため構造物が地盤よりも変形し、それを抑える方向に地盤反力が生じるためである。

b) 地盤と構造物系の分担割合

非線形性が顕著になるのは 20～40mm であり、 $G_s/G_g=10$ の場合に比較して構造物の変形の進んだ領域である。これは、構造剛性が弱い地盤の変形に構造物が追随するためと考えられる。

上床面のせん断方向水平力は滑りを生じると、左側

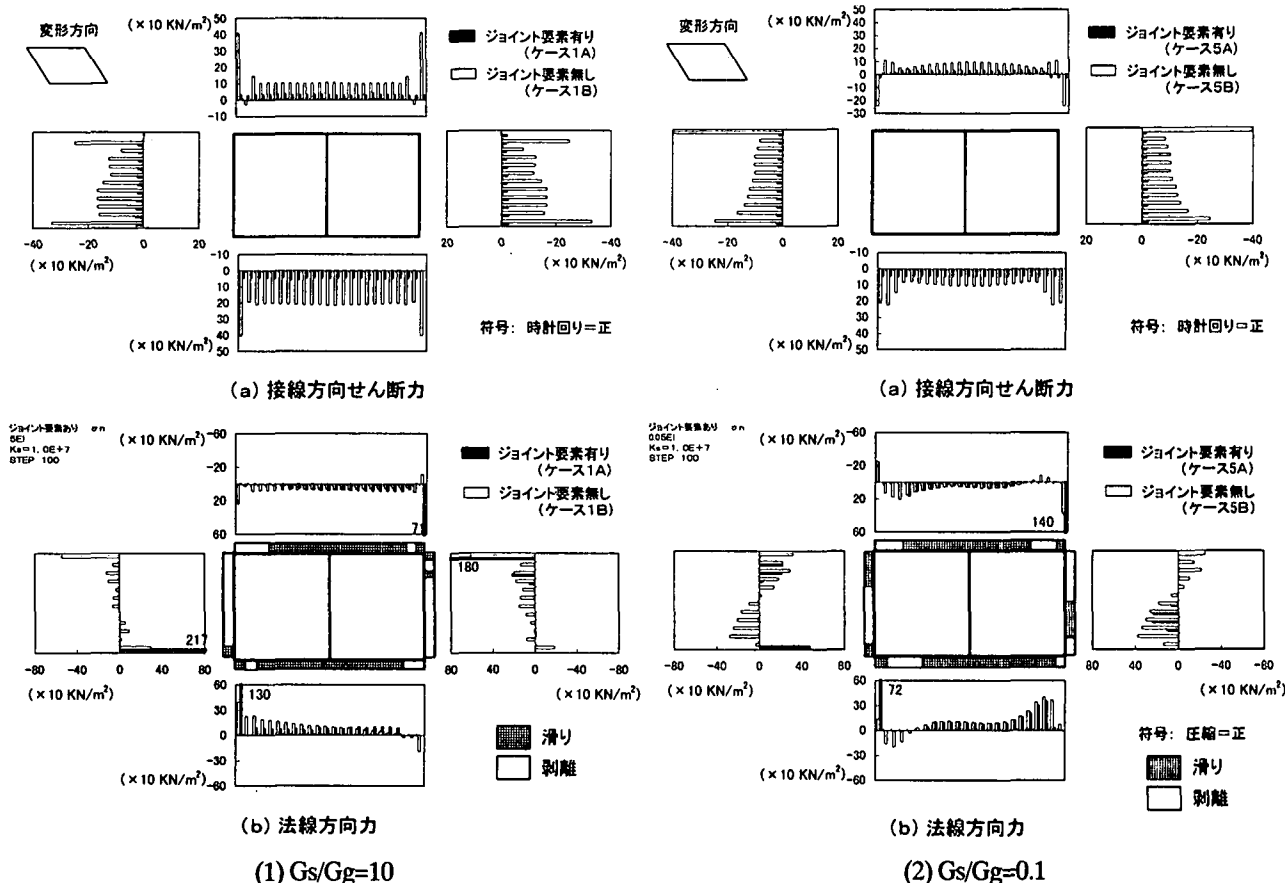


図 7 ジョイント要素の応力状態

壁上部の反力も小さくなることが分かる。しかし、層せん断力の値では、両者はほとんど同じであり、ケース 5 の変形や断面力の関係と調和している。

剥離・滑りの影響は $G_s/G_g=10$ の場合と同様の理由で左側壁上部に引張り力が作用し、右側壁では圧縮の水平力が増えることとなる。したがって、例えば左側壁上部の法線方向水平力の圧縮力が小さくなることに対応する。

構造剛性の小さい場合、このように荷重のバランスは変化するものの、最終的に構造物の負担する層せん断力は変化せず、剥離滑りの影響の小さいことが分かった。

5. まとめ

地震時における剥離・滑りの影響は構造物と地盤の剛性比に大きく影響されることが確認できた。すなわち、構造物の剛性が地盤の剛性よりも大きい場合はその影響も大きく、逆に小さい場合はその逆の傾向となる。実際に設計を行う場合、部材が大きく塑性化するような 2 地震動ではその影響は小さく、かつ、その影響を無視することは設計上安全側である。ただし、部材の剛性が大きい場合はその影響を考慮する方が設計上有利である。

剥離・滑りを考慮した場合の挙動は、構造物に荷重される水平力の構造および地盤の分担割合の変化により説明できることを示した。

今後、地盤および構造物の非線形性および構造物・地

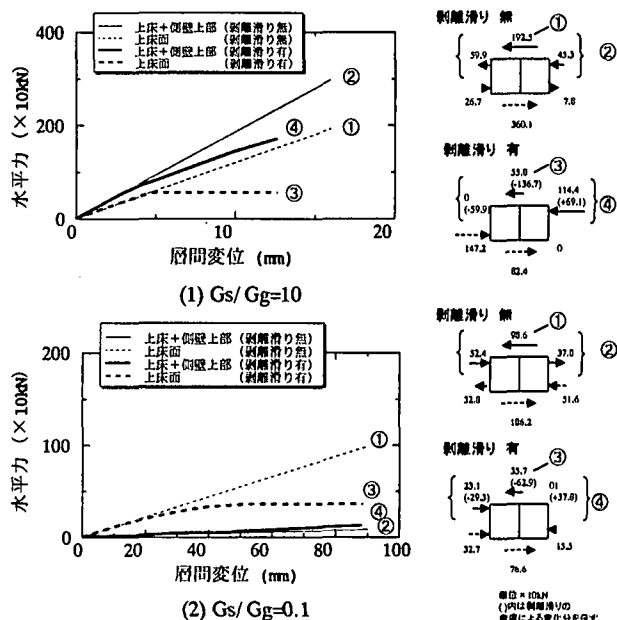


図 8 上床版および側壁に作用する水平力と層間変位

盤間のせん断耐力の影響を調査し、これらの現象の設計への簡易な適用方法について検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 太田他: 応答変位法を用いた地下構造物の耐震検討について, 第2回阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集, 1997.1
- 2) 土木学会編: 動的解析と耐震設計[第2巻]動的解析の方法, 技報堂出版