

(122) 地盤との絶縁層を用いた地下構造物の免震技術

建設省土木研究所 正会員 長屋和宏

建設省土木研究所 正会員 大塚久哲

建設省土木研究所 正会員 星隈順一

1. まえがき

地下構造物は、地震時に生じる地盤変形に追従して動く特徴があるため、地下構造物の剛性を高めると、地震時の増分断面力は、その分大きくなってしまいます。特に、耐震設計上不利な条件下においては、従来の地震設計の考え方が有利とならない場合もある。そこで著者らは、地下構造物に対する免震技術を新たに開発することを目的として、その有効性について検討を行っている。ここで、対象としている免震技術とは、地下構造物とその周辺地盤との間に絶縁材(免震材)を介在させ地震時の周辺地盤の変形を伝達しにくくする工法であり、可撓性継手を用いた免震とは区別される。本報告は、シールドトンネルにする免震工法の提言を行うとともに、地盤条件の急変部を通過するシールドトンネルを例として、免震工法を採用した場合に得られる地震力の低減効果の解析結果について述べる。

2. 免震工法が有効と考えられる適用箇所

平成7年年兵庫県南部地震では、地下構造物に大きな被害を生じた。地下構造物の被害形態については、今回の被災以前から多くの解析的な研究により、明らかにされており、地盤及び地形条件に関するものと構造条件に関するものとして、次のように分類される。

地盤及び地形条件に関しては、

- ・地震動による地盤の変形が大きく生じる箇所
- ・地震動により地盤の相対変形が生じる箇所
- ・地震により地盤に永久的な大変形が発生する箇所
等が想定される。また、構造条件に関しては、
- ・線形が変化する箇所
- ・構造物相互が接続する箇所
- ・他の構造物と近接する箇所
等が想定される。

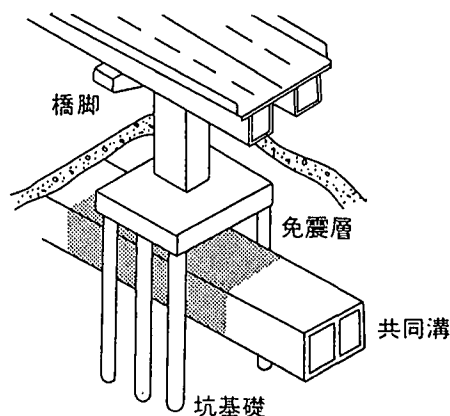
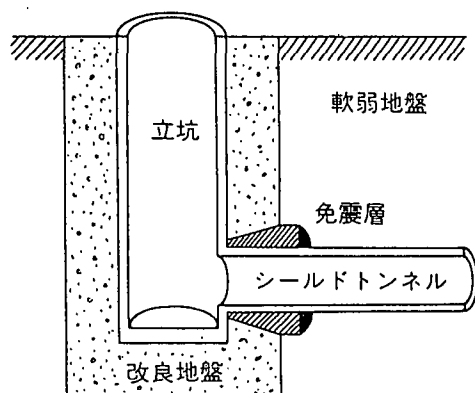
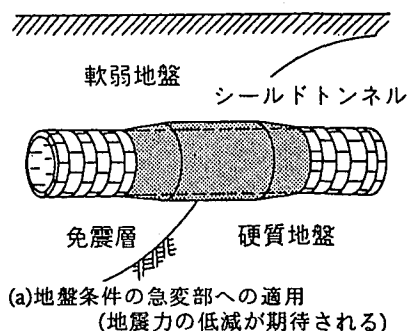


図-1 免震工法の適用例

こうした考察を踏まえると、地下構造物では、軟弱な地盤と硬質な地盤の境界部や地形の急変する箇所、立坑とシールドトンネルの取付部、他の地下構造物との近接部等が耐震設計上注意が必要になるものと考えられる。したがって、免震工法は、このような地震力が集中しやすい箇所に適用することが有効である。免震工法の適用例を示すと図-1の通りである。

3. 免震工法の検討

ここでは、まずトンネルのシールド工法に着目し、免震工法の適用を施工性などの観点から調査した結果、現在のシールドトンネル掘削技術に免震工法に固有な技術開発をいくつか加えれば、以下に示されるような工法が適用可能であると考えられる。(図-2)

- (a) 免震区間で余堀厚を大きくとりセグメント施工と同時に免震材を裏込め注入していく方法
- (b) 袋注入式セグメントを用い、シールドマシン推進後、注入袋に免震材を注入する方法
- (c) RCセグメントとスチールセグメントのセグメント厚の差を活用して免震層を確保する方法
- (d) セグメントの外側に予め免震材を取り付けておく方法

4. 免震材の検討

シールドトンネルの免震工法においては、免震材は従来裏込め材が注入されている箇所に挿入されることになる。したがって、本工法においては免震材が周辺地盤の変形を吸収すると同時に、裏込め材としての機

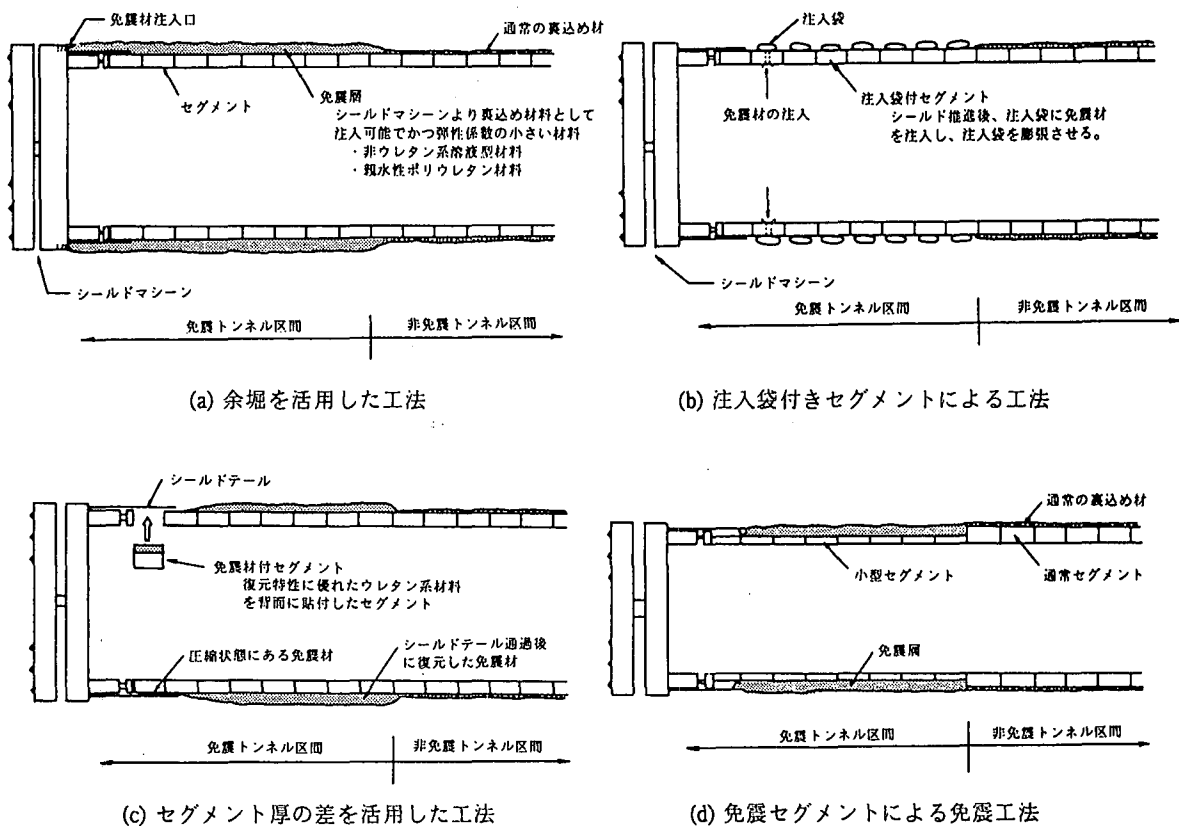


図-2 シールドトンネルの免震工法

能も兼ね備えておくことが求められる。そこで、まず既往の裏込め材を対象に免震材としての適用可能性について検討を行った。

裏込め材は、本来地山の緩みと沈下を防ぐとともに、セグメントからの漏水、漏気の防止、セグメントリングの早期安定、さらにシールド推進時のジャッキ推力を地山に円滑に伝達させることを目的として注入される。したがって、注入材には以下のような材料特性が必要とされている。

- ①材料分離を起こさない
- ②流動性を失わない
- ③注入後の容積減少が少ない
- ④水密性に富んでいる
- ⑤早期に地山の強度以上になる

一方、免震材として求められる材料特性としては、上記の①～④の他に、以下の項目が考えられる。

- ⑥弾性係数が小さく変形性能に富んでいる
- ⑦耐久性がある

ここで注意すべき点は、従来用いられている注入材では材料強度(圧縮強度)が $10\sim 50\text{kgf/cm}^2$ であり、一般的に弾性係数が大きいのにに対し、免震効果を発揮させるためには、弾性係数が小さく変形しやすい材料でなければならないことである。本来、裏込め材はセグメントからの漏水を防止させることを主目的として注入されるが、シールド推進時のジャッキ推力をセグメントのみでなく地盤にも伝達させる役目も担っているため、通常、地盤と同等以上の強度を有している。しかしながら、ジャッキ推力は施工時荷重としてセグメントの設計の中で考慮されているため、急曲線施工においてジャッキ操作に伴って偏荷重が作用する等の特殊な場合を除いて、裏込め材の強度を低減させることも可能であると考えられる。

そこで、止水材として利用されている幾つかの材料を取り上げ、その経済性や耐久性などの特性について評価した結果が表-1である。これより、既存の止水材を応用するならば、非ウレタン系溶液型の止水材が、シールドトンネルに対する免震材として適用可能であると考えられる。その他にも、発砲スチロールやゴム材料等の適用が考えられるが、いずれもシールドマシンへの同時裏込め注入が難しく、現状のままでは適用は不可能と判定した。これらの材料系の適用に当たっては、材料の面からの新たな技術開発が必要となる。

表-1 適用可能な免震材

種 別	瞬結無機材	非ウレタン系溶液型 止水材	親水性 [※] ウレタン 止水材	ウレタン樹脂 (衝撃吸収材)
タイプ	2液	2液	1液	2液
用 途	地盤強度増強 止水	小口径下水管補修	シールド坑内止水 小口径下水管補修	スリット用具や 精密機器の防振
強度(kgf/cm^2)	0.3	0.5	1.5	0.09～4.8
経済性	◎	○	△	×
経年体積変化	×	○	○	○
長期耐久性	○	○	△	○
総合評価	△	◎	△	△

5. 免震トンネルの耐震解析

解析対象としたシールドトンネルは、外径が5.1m(セグメント厚22.5cm、二次覆工厚20cm)であり、地盤条件は図-3に示す通りである。このトンネルは、耐震設計上注意が必要な沖積層($V_s < 100\text{cm/s}$)と洪積層($V_s > 200\text{cm/s}$)の境界点を通過している。耐震解析には応答変位法を適用し、免震層と地盤のばね定数比を1.0(非免震)、0.1、0.01、0.001とパラメトリックに変化させて解析を行った。ただし、地盤条件の変化の影響を考慮するため、地盤間に生じる地震時水平変位の相対差に相当する変位を強制変位として地盤ばねを介してトンネル本体に作用させた。なお、免震層は、地盤の沖積層と洪積層の境界点を跨ぐ100mの区間に設定した。

図-4および図-5は、ばね定数比が0.01とした時にトンネル本体に生じる軸力および曲げモーメントの分布を示したものである。免震層を設定することにより、地盤剛性の急変点で局所的に生じる断面力を効果的に低減できることがわかる。図-6は、ばね定数比と最大断面力の低減効率の関係を示したものである。これより、本解析条件下では、免震工法を採用することにより、地盤条件の急変点に生じる断面力は、軸力で約40%、曲げモーメントで約25%低減できることがわかる。ただし、ばね定数比が0.001の場合の曲げモーメントの低減効率は、ばね定数比が0.01の場合よりも悪くなっている。これは、ばね定数比をあまりに小さく設定すると、最大断面力の発生位置が地盤条件の急変点から免震層と洪積層の境界点へと移行するためであり、免震効果を最大限に発揮させるためには、ばね定数比(免震層厚)を適切に設定することが重要と言える。

6. まとめ

シールドトンネルを対象として、その免震工法に適用可能な施工法および免震材についていくつか例示した。また、免震トンネルの耐震性をケーススタディ的に検討した結果、免震層を適切に設定すれば、地震時に生じる断面力を効果的に低減できることを確認した。

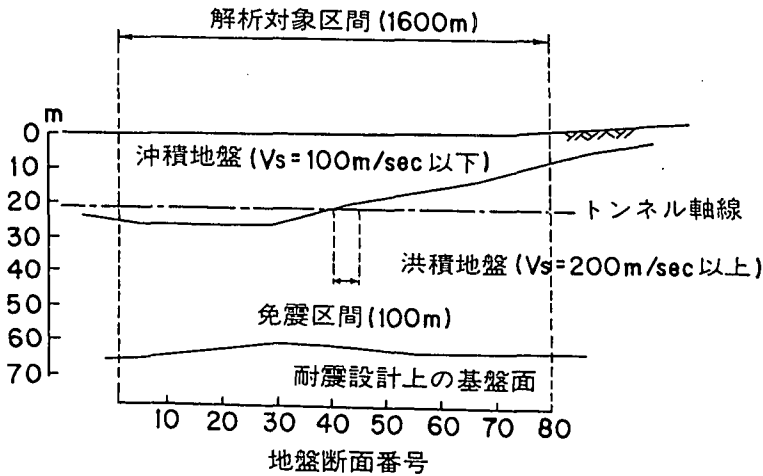


図-3 解析対象とした地盤条件

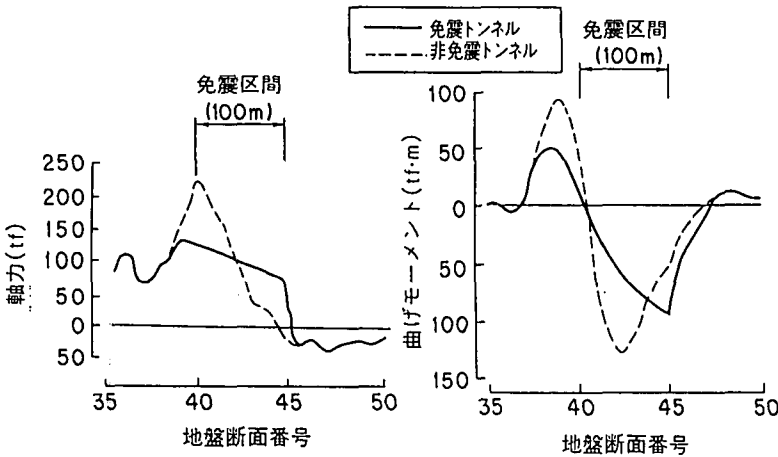


図-4 発生軸力分布

図-5 発生曲げモーメント分布

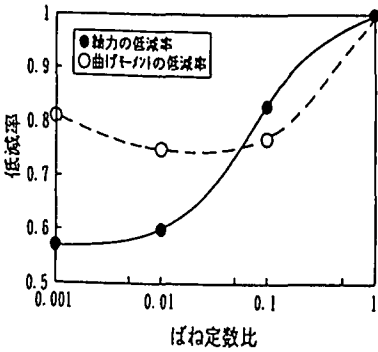


図-6 地震力の低減率