

概要 地下構造物の縦断方向ならびに横断方向の新たな地震対策を概説した。縦断方向については、従来技術である柔構造化技術と近年実用化された免震技術をメカニズムから比較し、免震技術の優位性を示した。地下構造物の免震技術について、設計法、材料、施工法を概説し、その応用技術である滑り型免震構造についても紹介した。一方、横断方向については、高地震荷重下における中柱を有する地下構造物に対して、中柱の両端に適度な復元モーメントを付与する中柱用免震装置の有効性について示し、装置の設計上の留意点を示した。

キーワード：地下構造物、地震、免震、シールドトンネル、開削トンネル

1. はじめに

地下構造物は、建築物や橋梁のように構造物本体で振動が増幅することなく、また、地下にあるから表層地盤における地震動の地盤内増幅の影響を受けにくいことから、耐震性に優れた構造物として知られている。しかし、地上構造物と比較すればはるかに耐震性に富むものの、兵庫県南部地震で体験したように、大地震による極めて大きな地震荷重条件下や、特殊な地盤・構造条件下では、必ずしも地震に対して無防備で良いわけではない。例えば、地盤条件急変部を通過するトンネル箇所や立坑等の異種構造物との接合部のような地盤・構造条件下では、耐震対策が不可欠であることが以前より指摘されており、既にいくつかの対策技術が実用化されている。

本稿では、このような条件下における地下構造物の地震対策として近年開発が行われ、実用化された免震技術を中心として、地下構造物の新しい地震対策技術を紹介する。まず、従来技術である柔構造化技術と免震技術の相違を述べ、次に地下構造物の免震技術の設計、免震材料、施工技術を概説する。次に、免震技術の低コスト化を実現する滑り型免震構造の開発についても言及し、最後に中柱を有する地下構造物の地震対策として有効となる中柱の免震装置についてまとめる。

2. 柔構造化技術と免震技術

地盤の地震時変位に追従して変形するのが、地下構造物の地震時挙動の特徴である。構造物が剛であれば、大きな断面力を伴って地盤の強制変形を受けることになるが、地盤の変形にフレキシブルに追従できる機構を構造物に付与すれば、大きな断面力が発生することなく、地盤変位に追従することが可能となる。したがって、縦断方向の地盤変形に追従できるように変形容易な柔な部位を設け、この変形で構造物全体の変形を集中して吸収する柔構造化技術が開発



鈴木 猛康

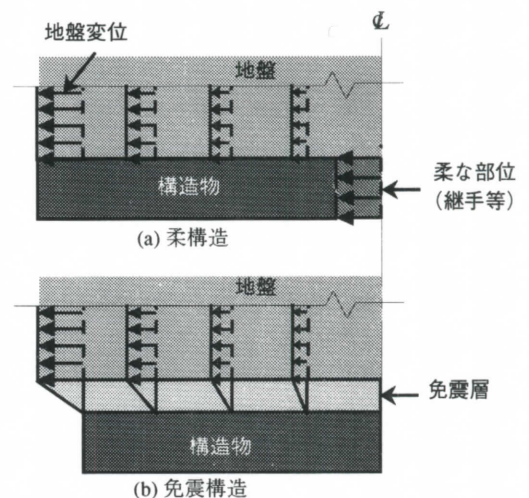


図-1 柔構造化技術と免震技術の相違

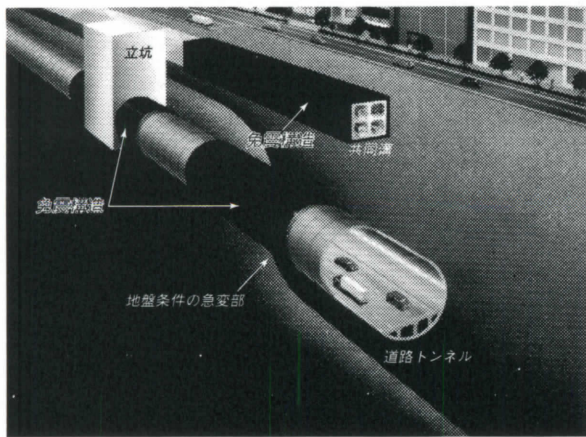
された。この柔構造化技術は、地盤沈下対策としても従来から利用されており、シールドトンネルの可撓セグメント、弾性ワッシャー、開削トンネルの可撓性継手、沈埋トンネルの可撓継手構造等はすべてこの柔構造化に分類される地震対策である。

図-1に柔構造化技術と免震技術の相違を、地盤に一樣な引張りずみが発生する場合について模式的に示す。柔構造化技術の場合、部分的に導入した柔な部位に、構造物全体の変形を集中させることは、外周を地盤で拘束されている地下構造物では理屈上困難であることが明白である。トンネルが地盤条件急変部を通過する際、地盤急変部の境界は面としてではなく、3次元的な空間として存在する。また、地盤のひずみの集中は、数なくとも数十メートル単位の範囲に分布する形で存在する。さらに、柔構造化技術では、許容値以上の変形が柔な部位に作用した場合には、この部位が破壊弱面となってしまう。これに対して免震構造では、地盤ひずみの集中する範囲の構造物外周に地盤ひずみを吸収可能な免震層を形成するので、確実に構造物を地震の影響から絶縁することができる。

3. 免震構造

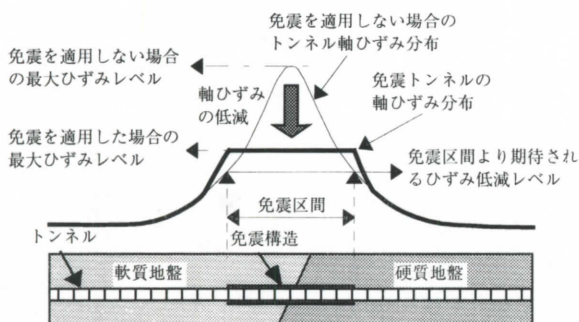
(1) 免震構造と免震機構¹⁾

地下構造物の免震構造とは、シールドトンネルではシールド掘進に伴って発生するテールボイドへ液状の免震材を注入・充填して硬

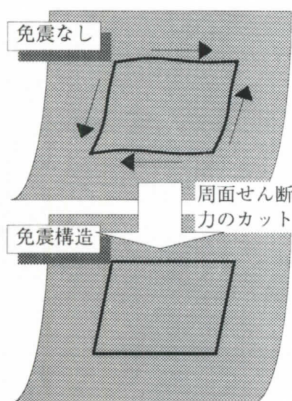


図－２ 地下構造物の免震構造模式図

化させることにより、開削トンネルでは躯体の外周に配置した型枠へ液状の免震材を打設・硬化させ、あるいは躯体外周面へプレキャストの固形ゴムパネルを接着する等により、構造物と周辺地盤とを免震層で絶縁（isolate）する構造である（図－２）。免震構造は、トンネル縦断、横断両方向の地震時変形に伴う発生断面力の低減を



図－３ トンネル縦断方向の免震メカニズム



図－４ トンネル横断方向の免震メカニズム

可能とするが、縦断方向と横断方向では免震機構が多少異なる。また、立坑等の構造物との接合部に適用する際には、トンネルと周辺地盤との絶縁に加えて構造物躯体とトンネルとの絶縁も必要である。

図－３は硬軟地盤境界のシールドトンネルを例にとり、トンネル縦断方向の免震機構を模式的に示したものである。図のように地震時には、軟質地盤側にピークを有する地盤の軸ひずみの集中が発生し、これがトンネルへと伝達されることにより、トンネルに大きな軸力が発生することとなる。地盤ひずみのピークを包含する領

域のトンネル外周に免震層を形成すると、免震層により地盤ひずみのトンネルへの伝達が遮断されるとともに、免震区間ではトンネル外周のせん断抵抗が小さくなるためにトンネルひずみは分散され、トンネルひずみはフラットな分布形状となる。

一方トンネル横断方向では、トンネルの断面形状や周辺地盤のせん断剛性に対するトンネルの見かけのせん断剛性の比によって、免震機構や免震効果の程度が異なる。開削トンネルのような矩形断面のトンネルでは、コーナー部で構造物の回転が抑制されるため、隅角部に断面力が集中する。また構造物に作用する地震荷重の中で周面せん断力が断面力発生要因に占める割合が相対的に大きく、条件によっては要因全体の６割～９割に達することがある。免震層の設置は、この周面せん断力を低減させるため、大幅な断面力低減が可能となる。一方、免震層は体積変形の小さな免震材で構成されるため、トンネル上下層間のせん断変形の低減は比較的少ない。この場合、免震機構としては、全周に亘って軸力が低減する他、図－４に示すように、側壁や上下床版のＳ字型の曲げ変形が緩和され、コーナー部に集中したせん断力と曲げモーメントが大きく低減される。これに対して、シールドトンネルのような円形断面を有するトンネルでは、構造物の回転が可能であり、周面せん断力の影響は小さいので、もともと地震時発生断面力が小さく、免震構造の有効性は比較的低いと言える。

（２）免震設計

以上のような地下構造物の縦断方向ならびに横断方向の免震機構に関する知見に基づき、建設省官民共同研究の最終成果として地下構造物の免震設計法マニュアル（案）¹⁾²⁾が作成された。地下構造物の免震設計とは、免震材のせん断弾性係数、免震層厚および免震区間を適切に設定することにより、地下構造物に発生する地震時増分断面力を効果的に低減させる設計のことである。以下、このマニュアル(案)に従って、免震設計法を概説する。

縦断方向の免震設計では、地中線状構造物の縦断方向の耐震解析で採用されてきた梁ばねモデルの適用を原則としている。従来の梁ばねモデルとの相違は、免震区間における相互作用ばね（免震層のばね）の取り扱いにあり、免震層のトンネル軸方向、軸直角方向に対する単位長さ当たりの相互作用ばね定数を、理論式を導いて与えている。

立坑接合部の免震構造における効果的な免震区間長は立坑よりせいぜい 10～20m 程度であり³⁾、この局所的な地盤の地震時挙動は、立坑とその周辺地盤の地震時挙動に支配される。また、立坑接合部の免震構造では、地盤とトンネルとの絶縁のみならず、立坑躯体とトンネルとの絶縁構造も重要である。このような局所的かつ３次元的な現象を梁ばねモデルで再現するのは困難であることから、免震設計では立坑とその周辺地盤という局所的な領域に、軸対称 FEM モデルや３次元 FEM 簡易モデルといった有限要素法を用いた部分系の解析手法を採用している。立坑接合部の免震構造では、立坑躯体とトンネル間にも免震層（あるいは絶縁層）が形成されるため、曲げ変形に対する両者の接合条件はピン結合と見なせる状態となる。そのため、立坑とトンネルの接合面に集中するトンネル軸直角方向の地盤変形に起因する水平方向の曲げ変形、ならびに立坑のロッキング振動に起因する鉛直方向の曲げ変形に伴って発生するトンネルの軸ひずみはともに、接合面では 0 に近似できることが確認されている⁴⁾。そこで、立坑接合部の免震設計では、トンネル軸方向に対

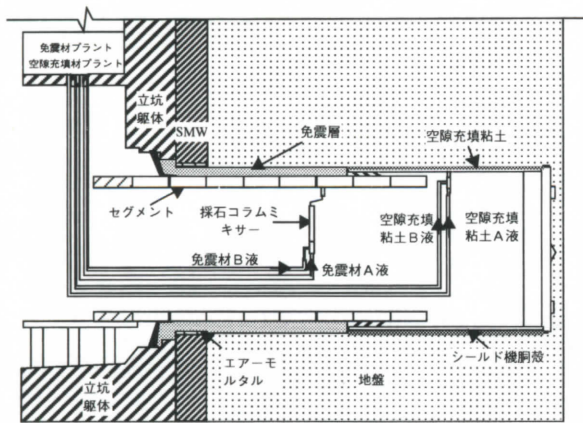


図-5 発進立坑部の免震構造の施工

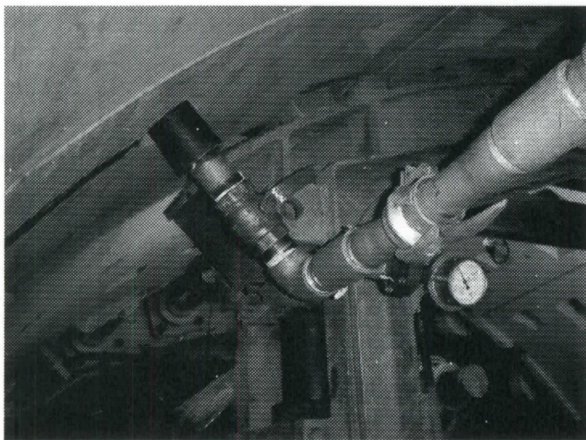


写真-1 免震材の注入状況

して安全性を照査すればよいこととされた。ただし、有限要素法による詳細モデルを採用するが、地震時地盤慣性力を要素節点に静的に載荷する静的解析に基づいており、動的解析を行う必要はない。

横断方向の免震設計では、2次元有限要素解析が採用されている。応答変位法に基づく解析手法として従来用いられてきた梁ばねモデルは、地盤ばね定数の設定法に曖昧さが残されており、また構造物の見かけのせん断剛性が周辺地盤よりも大きい小さいかで地震時土圧の作用方向が異なる等の現象を再現できないという欠点を有していた。とくに免震構造では、構造物の外周に軟らかな免震層があることにより、周辺地盤～免震層～構造物の間で免震層によるせん断変形の吸収に伴う複雑な相互作用が発生するため、トンネルを梁要素、免震層および周辺地盤を平面ひずみ要素とした2次元有限要素で相互作用を正確に取り扱うことが不可欠と判断された。ただし、必ずしも2次元動的解析を行う必要はなく、静的解析によってトンネルのひずみや変形を算出することとしている。

(3) 施工

上記共同研究では、設計法の開発とともに、材料開発、施工法開発が行われた。ここでは、免震構造の施工法について、共同研究の成果の実施である建設省中部地建名古屋国道工事事務所の中川共同溝におけるシールドトンネル発進立坑部における施工例⁹⁾を用いて紹介する。本共同溝は、共同研究成果であるマニュアル(案)に従って共同研究で開発された軸対称 FEM モデルに基づいた免震設計プログラム EASIT[®]を用いて設計が行われたものであり、立坑より

約 10mに亘る免震区間に免震層を形成することにより、従来構造である可撓セグメントで設計した場合に対して、費用は同等ながら耐震性能レベルが1ランクアップした。

図-5に発進立坑部における免震構造の施工の模式図を示す。図のように免震材はシールド掘進に伴って発生するテールボイドへ、裏込め注入における即時注入と同様にセグメントの注入口より、掘進中に注入することを原則とした(写真-1)。免震材注入工において懸念されるのは、免震材が切羽へと移動してチャンバー内に取り込まれることによって発生するトラブルである。これに対応するため、シールド機の中折れ部付近に配置した注入口より、シールド機鋼殻と地山との空隙に空隙充填粘土(クレーショック)をシールド掘進時に注入し、テールボイドと切羽との間の空隙を塞いだ。空隙充填粘土は掘削された地山の小さな空隙に圧入されることになるため、免震材の地山への逸脱防止にも効果があるものと思われる。また、ボイドをできるだけ早期に充填することでテールボイドの地山崩壊や地下水および泥水の流入を防ぐというシールド工法の基本に忠実に免震材注入を可能とするため、予めセグメントピースの異なるトンネル軸方向位置に3カ所の注入口を設けておき、ボイドにもっとも近い注入口から注入を開始することによって、トラブルによる掘進停止からの掘進再開にも対応できるよう配慮した。

免震層を形成する免震材は、シリコーン系免震材(SISMO-005)を採用した。本免震材はシリコーンオイルにフライアッシュを重量比1:1で混合したものをA液とし、これに硬化材であるB液を混合攪拌することにより、裏込め材と同様な地山保持性能を発揮するとともに、1日後にはゴム弾性体を形成する材料である。免震材のせん断弾性係数は0.5 N/mm² (5kgf/cm²)、ポアソン比は0.48であり、本材料は長期耐久性、止水性に富み、また硬化の前、中、後に亘って無害である。本材料は裏込め材と比較して地山中への逸脱が少なく⁷⁾、本共同溝でも注入率は120%に抑えられた。

(4) 滑り型免震構造

免震構造は、立坑接合部への適用では10m程度の免震区間で十分な免震効果を得ることができ、施工コストは従来の代表的な地震対策である可撓セグメントの採用と同等以下で、耐震性能を従来技術より1ランクアップさせることが可能で、さらに高止水性能が得られる等、有望な地震対策と言える。しかし、免震構造の地盤条件急変部への適用に際しては免震効果を得るために100mに達するような長い免震区間長が要求されるため材料コストが高くなり、

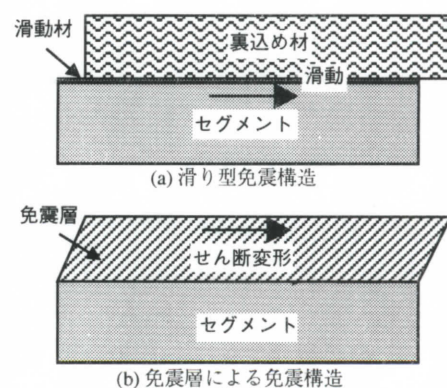


図-6 滑り型免震構造のメカニズム

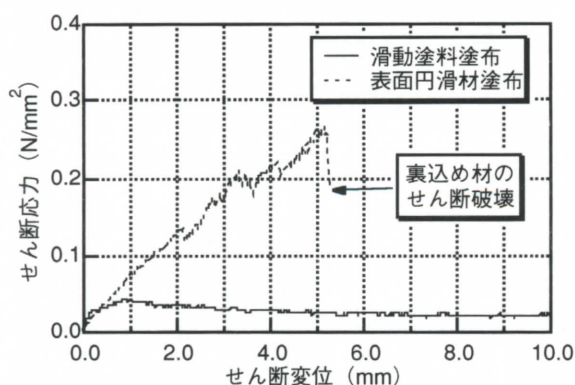


図-7 滑り型免震構造のせん断試験

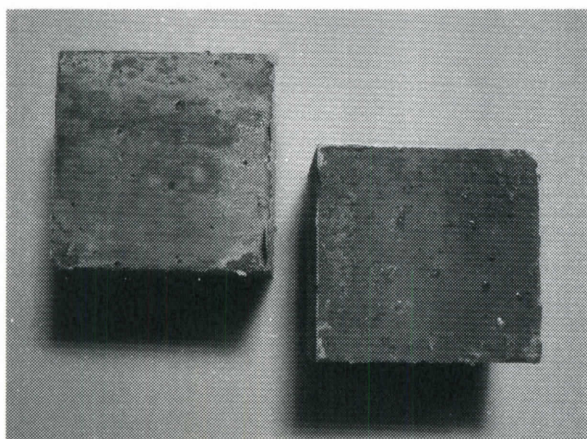


写真-2 せん断試験後の供試体ブロック

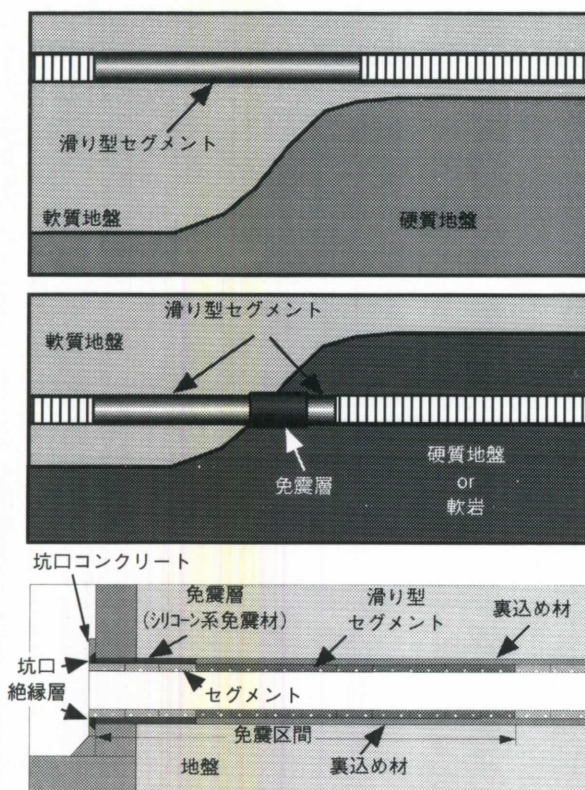


図-8 滑り型免震構造の適用例

実構造物への採用はコスト面から不利であるのが実情であった。

滑り型免震構造は、シールドセグメントや開削トンネルの外周面

に予め滑動塗料を塗布しておくことにより、図-6のように地震時に裏込め材や埋め戻し材と躯体との間で低摩擦で滑りを発生させ、地震時の地盤変位から構造物を絶縁する (isolate) ことによって、地下構造物の地震時安全性を高める新しい免震構造である。

図-7 は 10cm 角のコンクリートブロックの表面に開発した特殊シリコン系滑動塗料を塗布した後、その外側に裏込め材を打設、養生したシールドトンネルのセグメントと裏込め材を模擬した供試体 (ブロック) に対し、 0.2 N/mm^2 の軸力を載荷しながらせん断変形を与えた試験結果である。図中には、コンクリート表面に各種表面平滑剤を塗布した供試体を用いて行った同様なせん断試験結果の代表例を併記した。滑動塗料を塗布した供試体では 0.02 N/mm^2 の一定のせん断応力 (摩擦力) でコンクリートと裏込め材の境界面に滑りが発生しているのに対して、表面平滑剤を塗布した供試体では裏込め材が大きくせん断変形した後裏込め材がせん断破壊に至っており、コンクリートと裏込め材との境界面に滑動が発生することにはなかった。開発した滑動塗料は、水分透過タイプかつ微細粒子充填剤を多く含有する水性エマルジョン型シリコン塗料である。セグメント外周面に本塗料を予め塗布しておく、シールドテールを通過したセグメント外周に裏込め材が充填された際、塗料が裏込め材から水分を吸収し、セグメントの平滑面と塗料の平滑面との間に水と微粒子からなる滑動を形成する。写真-2 は試験後にコンクリートブロックと裏込め材ブロックを分離した境界面を示しているが、写真左のコンクリート表面が水膜で反射して光っているのがわかる。一方、裏込め材側には塗料面が形成されている。

滑動塗料は $0.3 \sim 0.5 \text{ mm}$ 厚であるから塗料の使用量はわずかであり、地盤条件急変部のように免震区間が長い場合でも、滑り型免震構造の採用はそれほど大きなコストにはつながらない。しかし、立坑との接合部の接合面での曲げ変形の吸収や止水性の確保には、厚みを有する免震層の存在が不可欠なことから、図-8 に示すように免震層と併用することで、信頼性が高くかつコストの低い免震構造が実現できる。

5. 中柱用免震装置

開削トンネルや多心円シールドトンネル等の中柱を有する地下構造物では、地震時横断面変形時において中柱の破壊は地下構造物にとって致命的な崩壊モードを導くため、地震時における中柱の健全性確保が不可欠である⁷⁾。筆者らは、適度な回転剛性を中柱上下端に与えることで、構造物の地震時断面力をピン構造と同等に低減できること⁸⁾、ならびに中柱上下端を完全にピン構造とするのではなく、中柱の転倒モーメントを上回る復元モーメントを付与することが重要であることを提唱しており、このような機能を有する中柱用免震装置を提案してきた⁹⁾。ここではその中で、形状復元力を利用

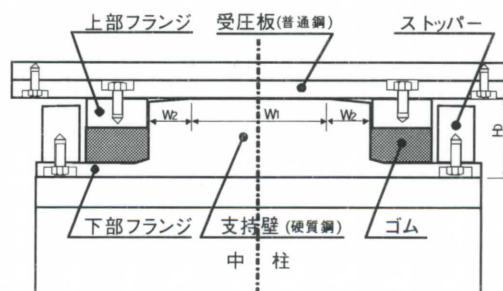


図-9 形状復元力を利用した免震装置

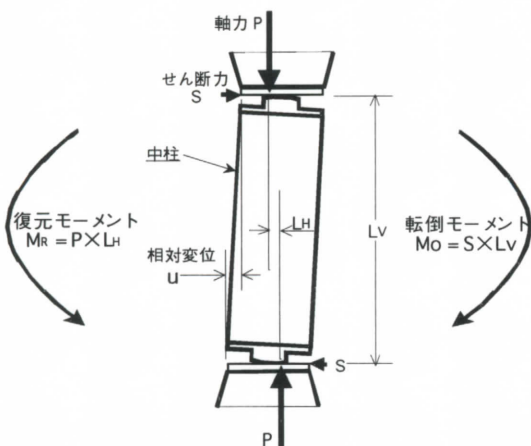


図-10 転倒モーメントと復元モーメント

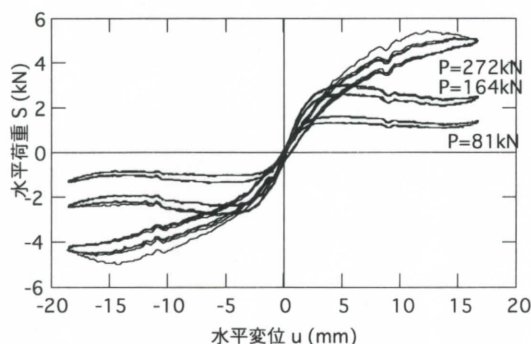


図-11 中柱の水平荷重～水平変位関係

した中柱の免震装置を例として、免震装置として必要な機能について概説する。

図-9に形状復元力を利用した免震装置を模式的に示す。本装置は、両端にテーパーを設けた支持壁（硬質鋼）と受圧板（軟質鋼）との高圧接触による受圧板側の弾塑性変形によって、中柱上下端の回転を円滑に吸収する装置である。地震時にトンネル横断面がせん断変形し、図-10のように上下床版間に相対変形が生じた場合、柱の上下端が完全なピン構造であれば柱に転倒モーメントのみが作用し、これが上下床版の変形を促進するため危険となる。一方、支持壁が長さWの幅を有する上面が平らな剛体で、かつ受圧板も剛体であるとき、柱に作用する軸力をPとすれば、転倒モーメントが支持壁の形状に基づく復元モーメント PW を超えると柱は回転を開始し、回転とともに復元モーメントが急激に減少するため、ピン構造のケースと同様に危険となる。これらのケースに対して、支持壁端部のテーパーと支持壁と受圧板の硬度変化によって、金属同士がなじみ、両者間が曲面として接することとなる。さらに、柱の回転と共に接触面が外側へと自然にシフトし、柱の回転と共に復元モーメントが増加するため、安定した復元力特性を与えることが可能となる。

図-11は、地下鉄駅舎を対象とした中柱用の免震装置の1/2模型を製作し、これに軸力を3ケース変えて作用させ、せん断変形を作用させた試験によって得られた水平荷重～水平変位関係である。図のように、変形とともに復元力は連続的に増加しており、低軸力の大変形時を除いて勾配が負となることはない。このように、支持壁にテーパーが付与されているだけで支持壁の曲面加工は施されて

いないが、滑らかな履歴関係が得られていることがわかる。

5. まとめ

地下構造物の新しい地震対策として、免震層を用いた免震技術、滑り型免震構造、中柱用免震装置について概説した。免震層と滑り型セグメントとの併用が免震構造の低コスト化を実現することは本文中で述べたが、免震構造と柔構造化技術との併用についても、免震層が継手の変位吸収を促進するとともに止水性向上や継手部の安全性確保につながると考えられ、また逆に継手が免震区間長の短縮を可能とすると思われ、それぞれの相乗効果が期待できる。このように既存技術と新技術の組合せをはじめ、複数の技術の併用についても、今後検討を行うことが重要と思われる。

地下構造物の耐震研究の歴史は古いが、地下構造物が実地震による洗礼を受けた経験が乏しいこと、また、地下構造物の地震対策技術の開発研究の歴史が浅いことから、まだ地震対策技術の効果やメカニズムについて、十分に解明されているとは言えない。我が国の重要な地下ライフラインを構成するトンネルの地震時安全性を高めるため、さらに効果的かつ低コストの対策技術が開発されることを期待する。

参考文献

- 1) 鈴木猛康：地下構造物の免震設計法マニュアル（案），橋梁と地下構造物の免震・制震講習会資料，土木学会，pp.77-80，1999.
- 2) 建設省土木研究所、他：地下構造物の免震設計法マニュアル（案），建設省土木研究所、共同研究報告書 211 号、1998 年 10 月
- 3) 鈴木猛康，運上茂樹，長屋和宏，村井和彦，田中努：シールドトンネルの立坑接合部における免震区間長と免震効果について，土木学会第 53 回年次学術講演会，第 1 部，pp.800-801 1998.
- 4) 丸山雅淑，岡田一郎，鈴木猛康：立坑接合部における免震シールドトンネルの地震応答解析，第 10 回日本地震工学シンポジウム論文集，pp.2875-2878，1998.
- 5) 運上茂樹，小木曾繁，廣瀬昌俊，鈴木猛康：シールドトンネル立坑接合部に対する免震構造，トンネルと地下，Vol.，pp.43-53，1999.12.
- 6) Suzuki, T.: The axisymmetric finite element model developed as a measure to evaluate earthquake responses of seismically isolated tunnels, Proc. 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand, 2000.
- 7) 鈴木猛康，粕田金一，小林正宏，福田健，池野正行：都市トンネルの免震構造のためのシリコン系材料に関する実験的検討，土木学会論文集，No.534/VI-30，pp.69-76，1996.
- 8) Suzuki, T.: Damages of Urban Tunnels due to the Southern Hyogo Earthquake of January 17, 1995 and the Evaluation of Seismic Isolation Effect, CD-ROM of the Eleventh World Conference on Earthquake Engineering, Acapulco, Mexico, 1996.
- 9) 鈴木猛康，金子誉，勝川藤太：制震装置を用いた既設橋梁の耐震補強，橋梁と地下構造物の免震・制震講習会資料，土木学会，pp.155-158，1999.
- 10) 鈴木猛康，金子誉，勝川藤太：地下構造物の中柱に適用する免震装置の開発，熊谷組技術研究報告，Vol.58，pp.45-50，1999.11.