

第8章 地震の影響を低減させる構造

第8章 地震の影響を低減させる構造

8.1 一般

シールドトンネルや立坑が地盤条件変化部にまたがる場合や、構造断面が大きく変化する接合部のように、地震時に大きなひずみが生じて問題になる場所においては、以下のような免震的な対策を施すことによって、部材の地震時増分断面力、またはひずみの低減を図ることができる。

その対策法を以下に列挙する。

- (a) 可とう性継手を配置する構造
- (b) シールドトンネルのリング継手の剛性を低減させる構造
- (c) 免震材を用いる構造
- (d) 二次覆工として管を内挿する構造

また、地震の影響を低減する構造は、以下の要件を満足しなければならない。

- (a) シールドトンネルや立坑の常時機能を阻害しないこと
- (b) 長期的に、安定して機能すること
- (c) レベル2地震動に対して安定して機能を発揮すること

[解説]

シールドトンネルや立坑の変形は、地震時の地盤変形に追随するため、構造物の剛性を高めると地震時増分断面力が大きくなる傾向にある。このため、耐震性が不十分と判断された場合、断面の厚さや鉄筋量を増加させることが必ずしも耐震設計上得策といえない場合がある。このような場合には、

①地震時の地盤の変形が地下構造物に伝わりにくくする。

②地下構造物の見かけの剛性を小さくして、地震時の地盤の変形に追随しやすくする。といった免震的な対策を講じることによって、部材の地震時増分断面力、またはひずみの低減を図ることが効果的である。特に断層や層境界部などの地盤条件変化部や、立坑とトンネルの接合部などの構造条件変化部のように、大きなひずみが生じる場所においては、有効な対策の1つであると考えられる。ただし、このような免震的な対策を講じて変形性能を高めることは、ある意味では構造物に弱点を設けることになるので、その影響について、常時の設計を含めて十分検討する必要がある。また、周りの地盤が液状化する可能性がある場合には、特に挙動が複雑となるため注意が必要である。

表 8.1-1 に地震の影響を低減する構造の代表的な例を示す。

表 8.1-1 地震の影響の低減を期待する構造の代表例

技術の種類	名称	適用箇所	解説	効果および適用例	実績	文献
(a) 可とう性継手配置する構造	可とうセグメント	シールドトンネルと立坑の接合部等	セグメント部の変位を許容してトンネルに生じる断面力、またはひずみを軽減する。(図 8.2-1)	立坑との接合部に設けた場合、断面力の著しい低減が確認されている。	○	1)2)
(b) シールドトンネルのリング継手の剛性を低減させる構造	可とう性継手	トンネル軸方向のセグメント間接合部	変位を許容してトンネル部材に生じる断面力またはひずみを軽減する。	沈埋トンネルの躯体同士の接合に適用されてきた技術。 沈埋トンネルでは曲げモーメント、軸力の地震時増分をそれぞれ 1/2 および 1/3 程度まで低減可能。	○	3)
	長尺リング継手ボルト	トンネル軸方向のセグメント間接合部	継手ボルトの自由長を長くし、継手の剛性を低減させる。 曲がりボルト方式、送りボルト方式(図 8.3-1)	地震時の軸方向引張りひずみの継手部での吸収が可能。	○	1)4)
	弾性ワッシャー	トンネル軸方向のセグメント間接合部	弾性ワッシャーによりリング継手部の剛性を低減させる。(図 8.3-2)	同一変形量に対し、軸力を 1/3 程度までに低減可能。	○	4)5)
	プレストレストリング構造	トンネル軸方向のセグメント間接合部	セグメント間を PC 鋼材を用いて接合し、軸剛性を小さくする。(図 8.3-3)	地震時の軸方向の引張りひずみに対する抵抗力を高める。	-	6)7)
(c) 免震材を用いる構造	免震構造	地下構造物の周囲に免震材を設置	地盤の変形を免震材で吸収し、構造物の変形と発生断面力を低減させる。 免震材：アスファルト、ウレタン、シリコン。(図 8.4-1)	適当な免震材を施すことにより、軸力および曲げモーメントの地震時増分を一般部ではそれぞれ 1/5, 4/5 程度まで、断面変化部ではそれぞれ 2/3, 1/2 程度まで低減可能。	○	8)9) 10)11) 12)13) 14)15) 16)
(d) 二次覆工として管を内挿する構造	合成樹脂管による二次覆工	二次覆工	セグメントと合成樹脂管との間に免震材を配置し、地盤ひずみを吸収する。	免震材および内管の継手で二次覆工に生ずるひずみを吸収可能	○	17)

8. 2 可とう性継手を配置する構造

可とう性継手の剛性は、地下構造物の地震時増分断面力に大きな影響を与えるため、継手に生じる相対変位、許容される相対変位量等に基づき定める。

また、可とう性継手に許容すべき相対変位量は、地盤と構造物の相互作用によって生じる継手部の相対変位および継手部の機能を考慮して定める。

なお、可とう性継手には、ストッパーを設けるものとする。

[解説]

可とう性継手を配置する構造は、シールドトンネルと立坑との接合部のように、地震時の変位差によって大きな断面力が発生する箇所に用いられる。代表的な可とう性継手の構造の一例（可とうセグメント）を図8.2-1に示す。

可とう性継手を設置する場合には、その剛性がトンネルの地震時増分断面力に大きな影響を及ぼすため、継手に生じる相対変位と許容される変位量などを考慮して、剛性を定める。可とう性継手に許容される変位量は、地盤と構造物の相互作用によって生じる継手部の相対変位と継手部の機能を考慮して設定しなければならない。さらに、用途に応じて、重要な構造物では過度な抜き出しを防止するためのストッパーを設ける。1)、18)

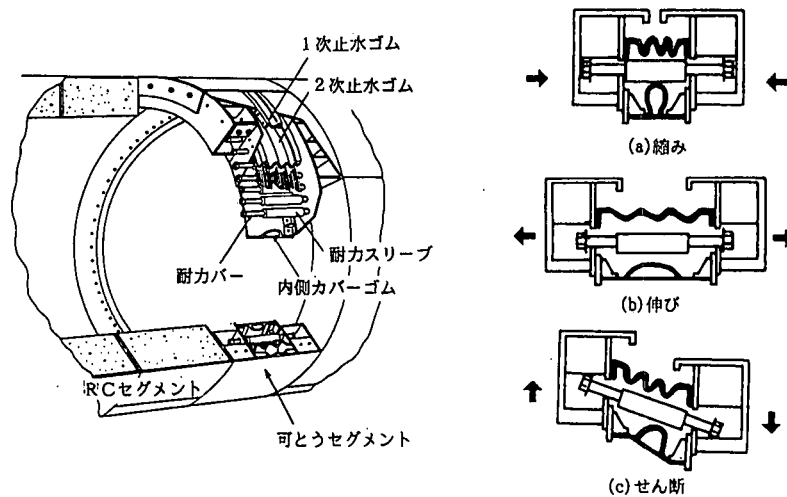


図 8.2-1 可とう性継手の構造¹⁾

なお、六甲アイランド連絡汚水幹線の立坑とシールドの接合部に設けた可とう性継手は、阪神淡路大震災の後の調査で、約5 cmのせん断変形（六甲アイランド側）を吸収していることがわかった。（図8.2-2参照）

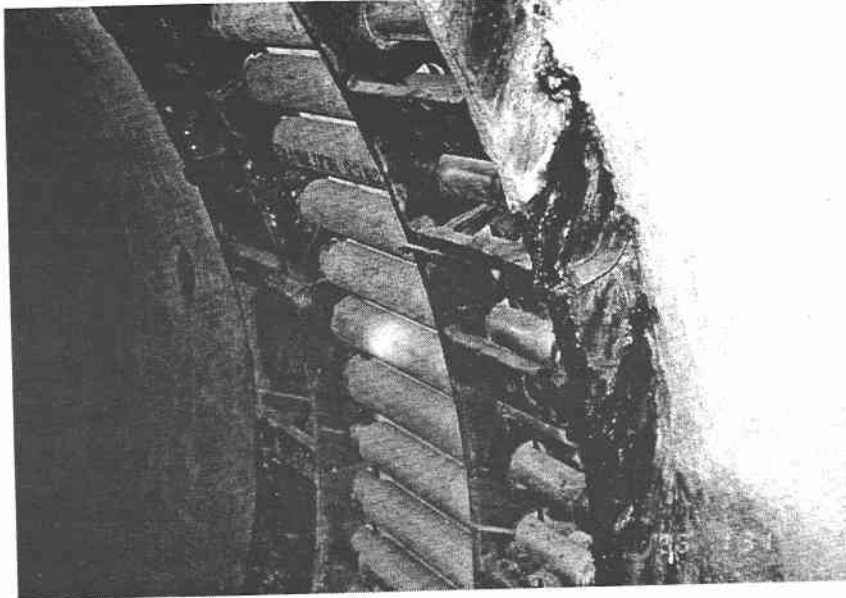


図 8.2-2 可とう性継手の変形例

8. 3 シールドトンネルのリング継手の剛性を低減させる構造

シールドトンネルでは、リング継手の剛性が長手方向の剛性に支配的な影響を与えるため、リング継手の剛性を低減させることが地震時断面力の低減を図る上で有効である。

この構造を採用する場合は、応力または変形の伝達機構や、材料の耐久性、強度、変形特性について十分検討する。

[解説]

シールドトンネルでは、リング継手の剛性がトンネル長手方向の剛性に支配的な影響を与える。このため、リング継手の剛性を低減させることにより地震時増分断面力を小さくすることができる。前述の可とう性継手と比較すると、構造が簡単で、また施工も容易であるため、地震時に地盤に生じるひずみが大きい軟弱地盤などでは、トンネル全長にわたって用いられることもある。

ただし、この構造は一次覆工だけの場合には有効であるが、二次覆工を設ける場合には一次覆工と二次覆工との間の力や変形の伝達機構を考慮して設計することが重要である。

1), 18)

リング継手の剛性を低減させる構造には次のものがある。

(a) リング継手ボルトを長くする方法^{1), 18)}

リング継手のボルトを長くすることにより、継手の剛性を低減させる構造である。長尺ボルトの挿入が困難な場合には、「曲がりボルト方式」や、図 8.3-1 に示すようにセグメント内部にあらかじめ継手ボルトを格納しておき、セグメントの組立時に抜き出す「送りボルト方式」などがある。

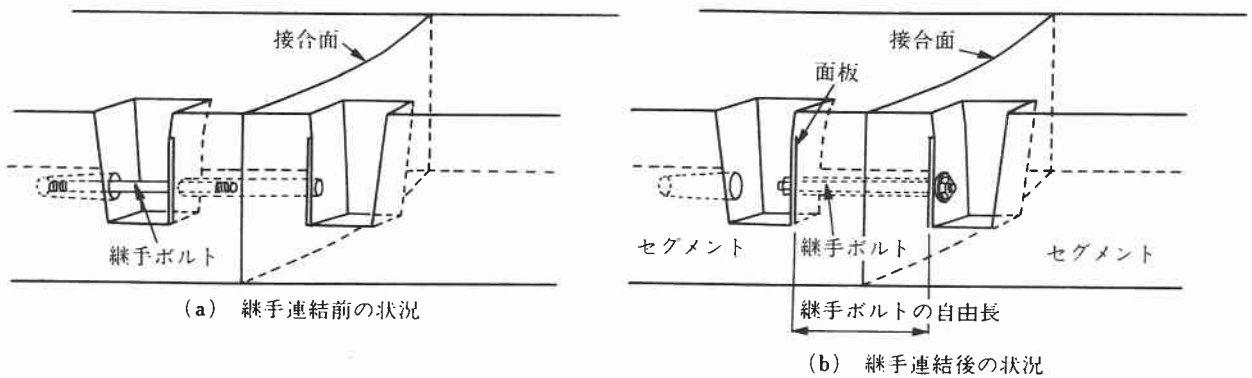


図 8.3-1 送りボルト方式の継手構造^{1), 18)}

(b) 弾性ワッシャーを用いる方法^{1), 18)}

リング継手に弾性ワッシャーなどを取り付けることにより、継手の剛性を低減させる構造である。弾性ワッシャーは、通常の鋼製ワッシャーに比べてかなり軟らかく、弾性的な圧縮性をもった円環状のワッシャーである。これを図 8.3-2 に示すようにリング継手ボルトに用いることにより、トンネルに生じる軸方向のひずみを吸収し、セグメントや継手ボルトに生じる地震時応力または変形の低減を図る。

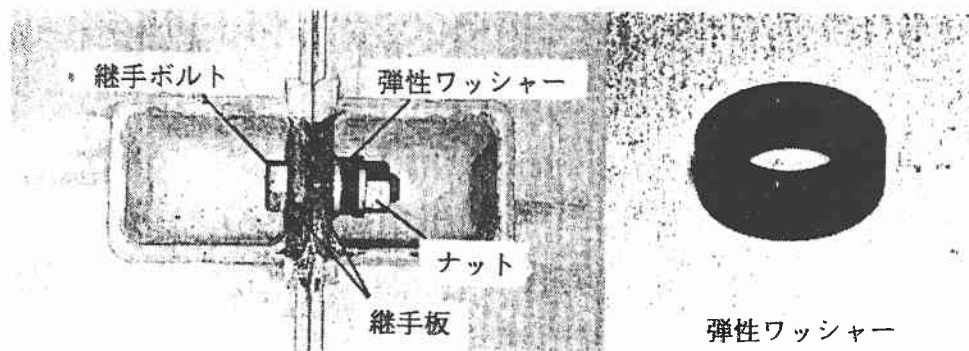


図 8.3-2 弾性ワッシャーを用いた継手構造^{1), 18)}

現在までに実用化されている弾性ワッシャーは、エポキシ樹脂タイプと積層ゴムタイプの2種類である。両タイプとも圧縮剛性は、断面形状や厚さ、材料の硬度を変えることにより調整できる。

弾性ワッシャーは、リング継手を構成する重要な構造部材の1つであるため、耐久性、変形特性、強度特性などについてよく検討しておくことが必要である。さらに、構造物の用途や弾性ワッシャーの取り付け方によっては耐火性能の検討や、二次覆工コンクリート

を施工する場合には耐アルカリ性能などに対する検討も必要になる。

(c) プレストレスを導入する継手¹⁸⁾

セグメントリング間に止水ゴムを挿入し、PC鋼材を用いてリング間を軸方向に緊張して、セグメントに圧縮ひずみを導入するものである。プレストレスにより、地震時に地盤からトンネル伝達される引張力に対する抵抗力を大きくするとともに、長尺のPC鋼棒により、目開き発生後の軸方向引張剛性を低減させることができる。図8.3-3にプレストレス導入の概念を示す。

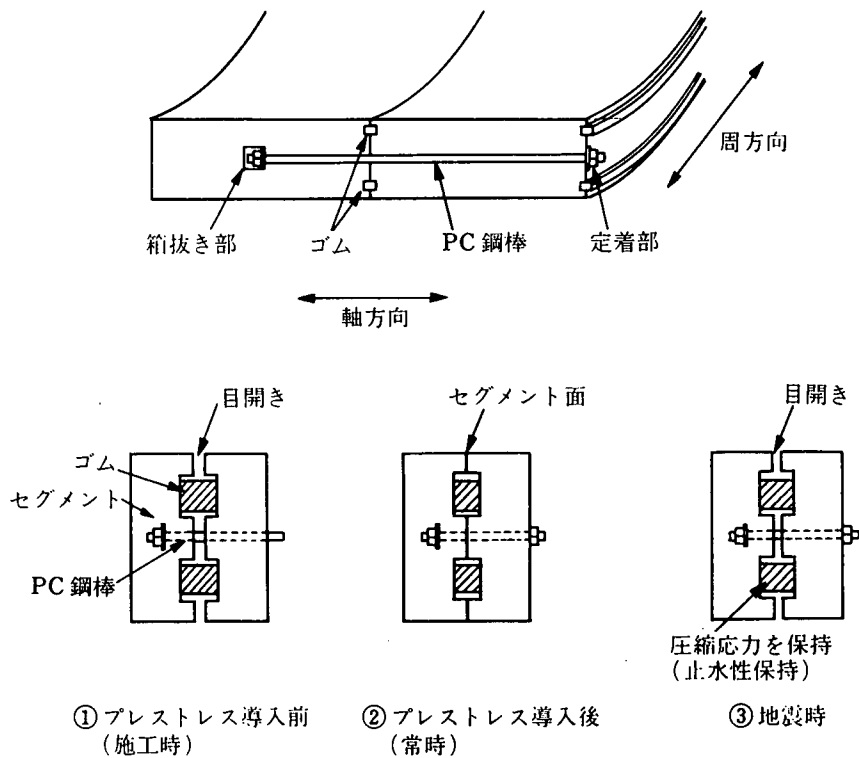


図 8.3-3 プレストレスを導入する継手¹⁸⁾

8. 4 免震材を用いる構造

シールドトンネルおよび立坑と周辺地盤との間に柔らかい免震材を設けることにより、地震の影響を低減することができる。ただし、免震材は長期的に安定して使用できると同時に、シールドトンネルおよび立坑の常時の機能、使用性にも影響を与えないものでなければならない。

[解説]

図 8.4-1 に示すように、シールドトンネルおよび立坑の周辺にクッションの働きをする柔らかい免震材を設ければ、地震時の地盤変形や断層部の相対変位対して、地盤の変形はそのまま地下構造物に伝わらない。この働きによって、地下構造物に生じる地震時増分断面力または変形の低減を図れる可能性がある。

この方式は、構造物の形状や規模の制約が少ないことから、シールドトンネルのような線状地下構造物にも、また立坑のような深さ方向に長い鉛直構造物にも採用できる利点がある。周辺地盤の剛性に対して免震材の剛性を小さくするほど免震効果は大きくなるが、剛性の極端に小さい免震材を広範囲に用いると、常時の安定性に悪影響を及ぼす恐れがある。このため、免震材は地震時に必要な剛性を満足するだけでなく、長期的に安定して構造物の周囲に存在するとともに、構造物の常時の機能を阻害しないように設計しなければならない。¹⁾ 現在、考えられている免震材料を表 8.4-1 に示す。

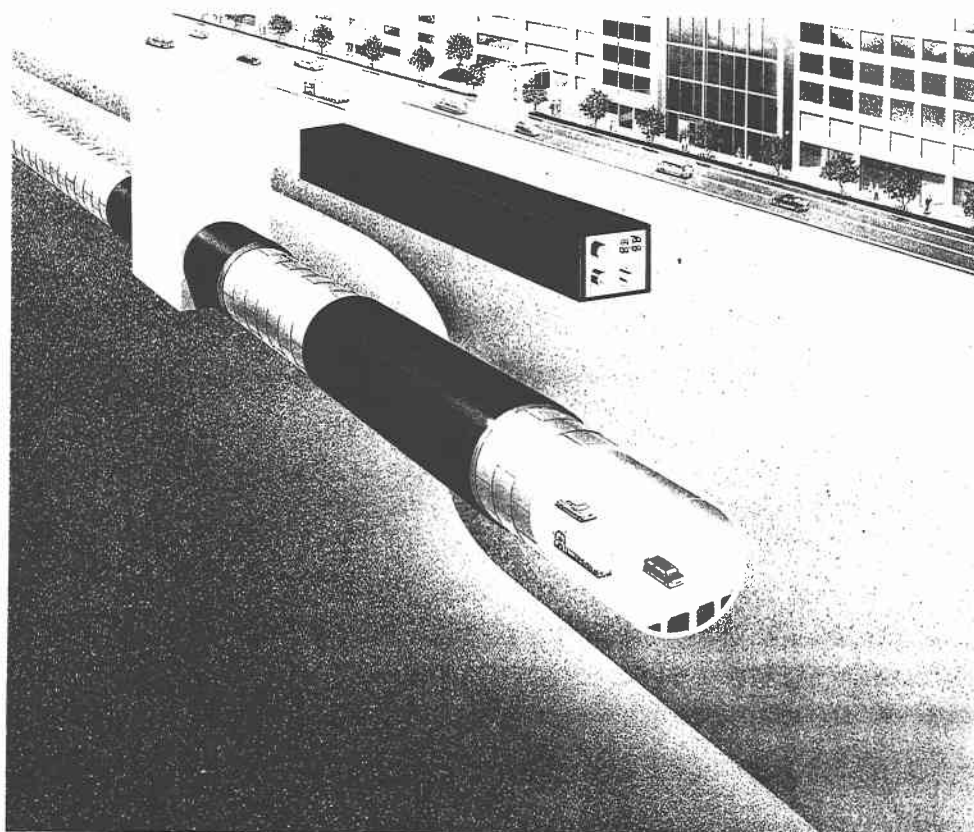


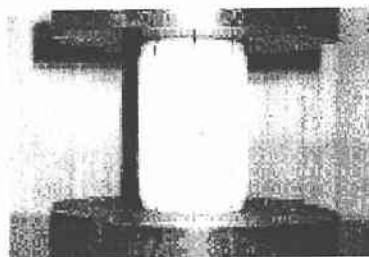
図 8.4-1 免震材を用いた地下構造物のイメージ⁸⁾

表 8.4-1 免震材料の例⁸⁾

種類	アスファルト系免震材	ウレタン系免震材	シリコーン系免震材
概要	基本材料であるアスファルト乳剤に、セメント、高吸水性ポリマーを混合することによって固化させる複合材料である。	ポリオール類（主材）とイソシアネート（硬化材）を2液混合しながら注入口より注入し、免震層を形成する。	オルガノポリシロキサンに充填材料を配合した液状シリコーンゴムをベースにした材料で、2液混合により常温で硬化する。
特記事項	弾塑性体である	弾塑性体である	弾塑性体である



アスファルト系免震材



ウレタン系免震材



シリコーン系免震材

8. 5 二次覆工として管を内挿させる構造

二次覆工として管を内挿し、シールドトンネルと二次覆工との間に免震材を充填することにより、シールドトンネルから伝達する二次覆工のひずみを低減することができる。また、地震以降に発生する外力の全部または、一部をこの内挿管で支持させる場合は、それに応じたシールドトンネルの損傷を許容できる。

この構造を採用する場合は、各荷重状態における支持機構や、材料の耐久性、強度、変形特性について十分検討する。

[解説]

二次覆工として管を内挿し、内挿管とセグメントとの間隙に免震材を充填して、シールドトンネルから伝達する二次覆工のひずみを低減する構造である。また、地震時および地震以後に発生する外力の全てを内挿管によって支持するように設計されている場合は、シールドトンネル自体を仮設構造物と考えることが可能である。この構造を採用する場合は、セグメントと二次覆工との支持機構を明らかにして、常時および地震時を含めて支持する外力や変形特性について十分検討することが必要である。

二次覆工として管を内挿する構造の一例として、図 8.5-1 に示すように内挿管に合成樹脂管（FRPM管）を使用し、施工性、水密性、耐食性に配慮するとともに、免震材としてエアモルタルを充填し、管長4～5m置きに隙間（15mm程度）を配置して地盤のひずみを吸収するようにした構造があげられる。なお、2000年10月6日に発生したマグニチュード7.3の鳥取県西部地震において、震度5強で地震最大加速度817galを記録した新見市内で、本構造を採用した現場の現地調査¹⁷⁾では、FRPM管内に全く被害はみられなかった。（図 8.5-2 参照）

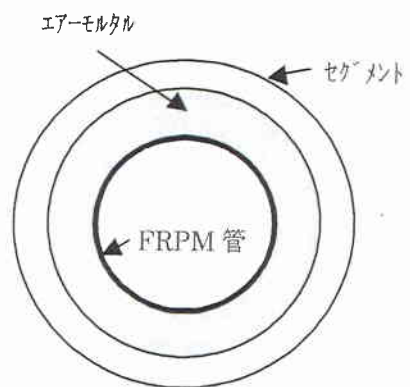


図 8.5-1 FRPM 管内挿方式の概念図



図 8.5-2 FRPM 管内挿状況

参考文献

- 1) (財)先端技術センター・(株)奥村組・鹿島建設(株)・(株)鴻池組・清水建設(株)・大成建設(株)・飛島建設(株)・(株)間組・(株)フジタ：地下構造物の免震技術，地下空間利用技術研究会，耐震設計技術分科会活動報告書，pp151-154, 1993.
- 2) 加藤教吉・水間利光・岩見輝夫：可とうセグメント地震時挙動の観測結果とその考察，第1回免震・制震コロキウム講演論文集，pp171-178, 1996.
- 3) 栗林栄一・川島一彦・柴田松雄：沈埋トンネルの地震応答に及ぼす耐震継手の効果，土木技術資料，Vol.21-12, pp.625-630, 1979.
- 4) 小野紘一・嶋村貞夫・河西 寛：地下構造物の免震，鴻池組技術研究発表会論文集，pp1-14, 1992.
- 5) 河西 寛・小野紘一・嶋村貞夫：KRS ワッシャーを用いたシールドトンネルの耐震継手の開発：土木学会第43回年次学術講演会講演概要集VI，1988.
- 6) 平澤賢治・松原勝巳・新井伸夫・脇田和試：シールドトンネルの耐震性能に関するプレストレス導入効果，—PC鋼棒とゴムを用いた軸方向プレストレス導入方法について—，土木学会第43回年次学術講演会講演概要集I，1990.
- 7) 脇田和試・松原勝巳・平澤賢治・新井伸夫：シールドトンネルの耐震性能に関するプレストレス導入効果，—リング韓にゴムを介在させたRCセグメントも系の軸方向交番裁可試験—，土木学会第43回年次学術講演会講演概要集I，1990.
- 8) 建設省土木研究所・(財)土木研究センター・(株)奥村組・飛島建設(株)・(株)熊谷組・前田建設工業：地下構造物の免震設計に適用する免震材の開発に関する共同研究報告書(その1)，pp.77-91,143-176, 1996.
- 9) 江寄順一・服部正博・伊東 守・清水全生：大地震を想定した開削トンネルの免震効果，第1回免震・制震コロキウム講演論文集，pp93-100, 1996.
- 10) 河西 寛・嶋村貞夫・笹川基史・春海正和：免震層によるトンネル横断方向の免震効果，第1回免震・制震コロキウム講演論文集，pp101-108, 1996.
- 11) 粕田金一・鈴木猛康・田中 港：矩形断面トンネルの免震構造に関する模型振動実験，第1回免震・制震コロキウム講演論文集，pp109-116, 1996.
- 12) 大角恒雄・田中 努：シールドトンネルの免震構造化に関する解析上の一考察，第1回免震・制震コロキウム講演論文集，pp117-124, 1996.
- 13) 鈴木猛康・金 聲漢・植村靖美：シールドトンネルの免震構造の地震応答評価のための解析法の提案，第1回免震・制震コロキウム講演論文集，pp125-132,1996.
- 14) 栗田 明・雑賀義夫・植村 正・三澤孝史・石井敏之・竹内幹雄：地中構造物免震用アスファルト系材料の特性，第1回免震・制震コロキウム講演論文集，pp133-140, 1996.
- 15) 鈴木猛康・小林正宏・福田 建・池野正行・宮路 敦：シールドトンネルの免震構造に対するシリコン系免震材の適用，第1回免震・制震コロキウム講演論文集，pp141-148, 1996.
- 16) 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.30, No.12,pp.37~47