

兵庫県南部地震における都市トンネルの被害と特徴

・竹内 幹雄¹ ・岩橋 敏広² ・佐保 千載³

¹フェロー 工修(株)奥村組技術開発部(〒107 東京都港区赤坂1-3-10)

²正会員 工博・東京都立大学工学部土木工学科教授(〒192-03 東京都八王子市南大沢1-1)

³正会員 神戸市交通局高速鉄道技術部(〒651-12 兵庫県神戸市北区山田町下谷上字沢56-5)

本文は1995年兵庫県南部地震で水平動によるせん断変形の影響を大きく受けたと見られる都市トンネルを対象にその被害と特徴について報告するものである。開削トンネルの代表事例として神戸高速鉄道、西代駅から新開地駅迄の被害、シールド・トンネルの代表例として鳴尾御影汚水幹線などの被害、導水路トンネルの代表例として千刈トンネルの被害を紹介する。これらから、従来指摘されていた軸方向の検討に加え横断方向の検討が不可欠であり、大断面化するとこれが一層顕著になることを指摘した。又、曲線部や振動性状変化点での対策が必要であることも明らかにした。これらの対策に免震が有力な工法であることを指摘した。

Key Words : Hyogoken-Nanbu Earthquake, Damage of Tunnels in Urban Area, Cut and Cover Tunnel, Shield Tunnel, Tunnel in Soft Rock and Soft Ground Area

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震では、十分に耐震能力があると思われていた地下構造物にも被害が生じた。土木学会耐震工学委員会では地下構造物の被害について、地下構造物調査検討グループを組織し、調査報告書¹⁾を執筆することとなった。本文はこの報告の内から水平動によるせん断変形の影響を大きく受けたと見られる都市トンネルを対象にその被害と特徴について加筆再集成して報告するものである。

都市トンネルを形成するものとして開削トンネル、シールドトンネルおよび山岳トンネルなどがある。これらの内、特に被害が大きかったものは、「震災の帯」と言われた、震度7の領域およびその近傍、海岸線の液状化地盤など特定の場所に多い。²⁾また、そのいずれもが、実質的に耐震設計はなされていなかった。これらの被害は地形・地質条件、表層地盤の増幅特性などと深く関係していることは多くの指摘がなされている通りである。本文で報告する都市トンネルの位置を震災の帯と併記して図-1に示す。

2. 開削トンネル(地下鉄)の被害

神戸市内の主要鉄道施設の内、都市部で地下鉄構造となっているのは、表-1³⁾に示す通りである。

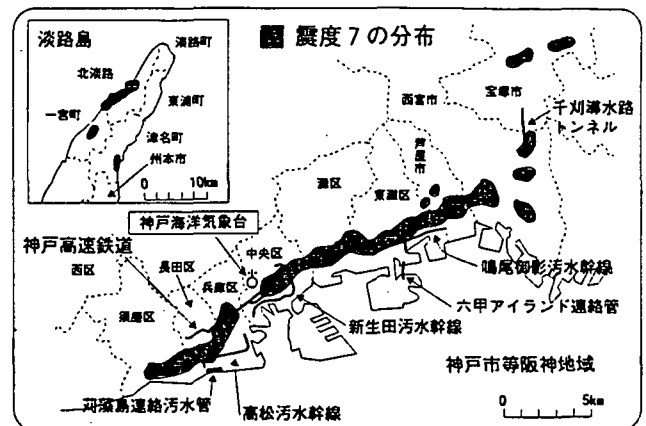


図-1 トンネル位置と震度7の地域

表-1 神戸市内の地下鉄構造の延長

鉄道種別	建設年代	延長(km)	駅数
阪神電鉄	1931~36	3.4	3
神戸電鉄	1962~67	0.4	1
神戸高速	1962~67	6.6	6
市営地下鉄	1972~85	9.5	9
山陽電鉄	1983~97	1.5	2
計	-	214	21

建設年代が最も新しいものは山陽電鉄の西代~板宿間で平成6年に構築物が完成していたが未使用の段階で被災を受けた。

ここでは昭和37年~42年にかけて建設され、今回最大級の震災を受けた、神戸高速鉄道の西坑口~新開地駅間の被害について紹介する。神戸高速鉄道の路線を図-2に示す。

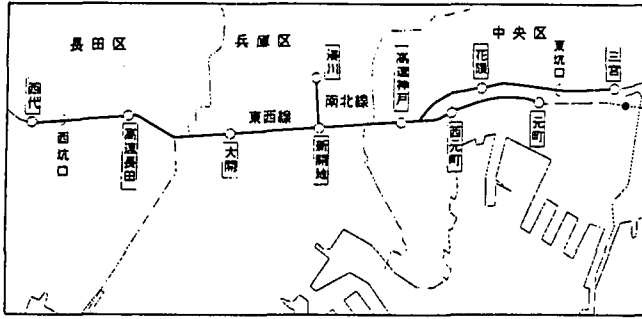


図-2 神戸高速鉄道路線

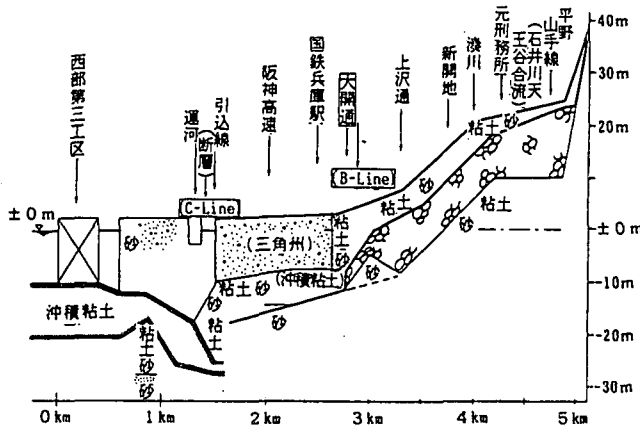


図-3 旧湊川地質縦断図

(1) 地形、地質および構造特性

被害の最も著るしかった大開駅付近を横切る旧湊川地質縦断を図-3に示す。

図示されている通り縄文海岸線 (B-Line) より海側に位置し、地上部も多大な被害を受けた地域である。一般に、GL-20m~-30m以深にN値50以上の砂礫層が存在し、その上部にN値10前後の砂質土層と粘性土層が交互に存在している。本地域は旧湊川から新湊川にかけての河口域と考えられ、中位の地盤である。地下水位はGL-4.0m付近に存在している。

駅間一般部は外幅8.96m×高さ6.3mの一層2径間のラーメンで柱は2.5mピッチで土被りは2.0m~5.5m程度に変化している。

主要駅の構造はほぼ同じであるが高速長田駅では、中柱のピッチが3.0mで土被りが3.75m~5.35mであるのに対し大開駅では中柱のピッチが3.5mで土被りが4.8mとやや深くなっている。最も被害の著しかった大開駅の平面、断面図を図-4に示す。

主な特性として路線部は

- ① 中柱上下端をピンとして左右対称な土圧を与えて常時の設計を行っている。このため、曲げやせん断を受けることは想定されていない。

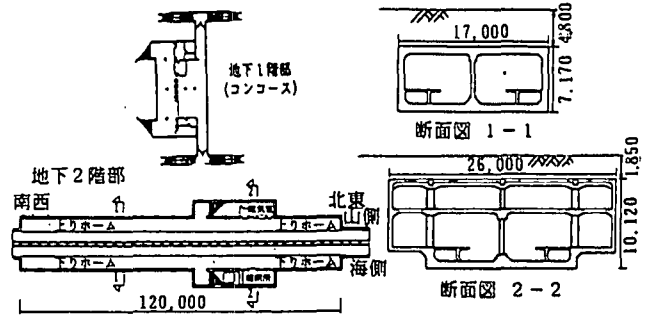


図-4 (a) 大開駅平面 (b) 代表断面

② 中柱の上下端は構造的にヒンチ構造として施工されておらず、縦桁からの軸力伝達を鉄筋に負担させるために、軸方向主鉄筋を縦桁に深く定着させ、ヒンチではなくむしろ剛構造となっている。

③ ラーメン隅角部には地震時正負の曲げモーメントが発生するが、この場合常時の負の曲げモーメントに対してのみ配筋が行われている。

そして駅部は幅広構造となっているために、線路部に比べ

④ 相対的に高い軸力を受ける。

⑤ 土被り重量に起因する、より大きな慣性力を受ける。

と言ったことが追加される。

(2) 被害状況

(a) 線路部

i) 浜側壁 (大開駅以西)

浜側壁の主要な変状は以下の通りである。

① 壁の高さの中央付近や上部にトンネル軸方向の貫通ひび割れ

② 壁基部の打継ぎ目のずれ

ハンチ始点にトンネル軸方向のひび割れがみられる。正負の曲げを交番に受けて貫通ひび割れになっている。このひび割れは大開駅に近い側 (土被りが深い側) で顕著になっている。

側壁移動と貫通クラックの位置を図-5に示す。

ii) 中間柱

中間柱の主要な変状は次の通りである。

① 基部と頂部のひび割れ

② 基部に多いコンクリートの剥離ないしは弾けとび

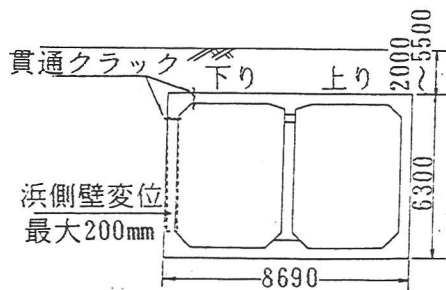


図-5 側壁移動と貫通クラックの位置

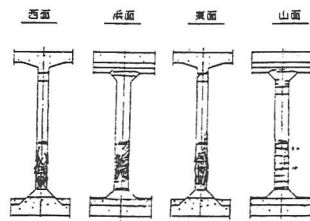


図-6 柱の損傷スケッチ

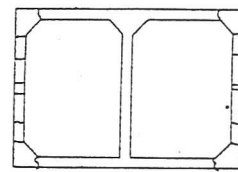


図-7 側壁のひび割れ

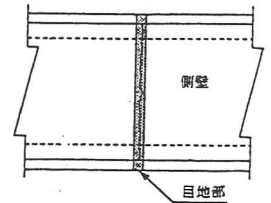


図-8 目地部のコンクリートの剥落

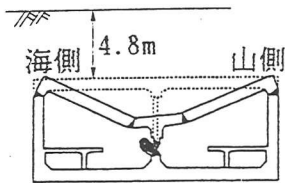


図-9 大開駅の破壊状況

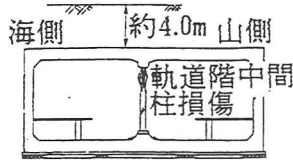


図-10 高速長田駅の損傷状況

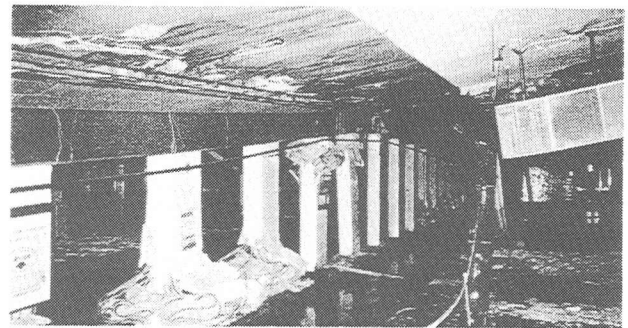


写真-1 大開駅の破壊状況

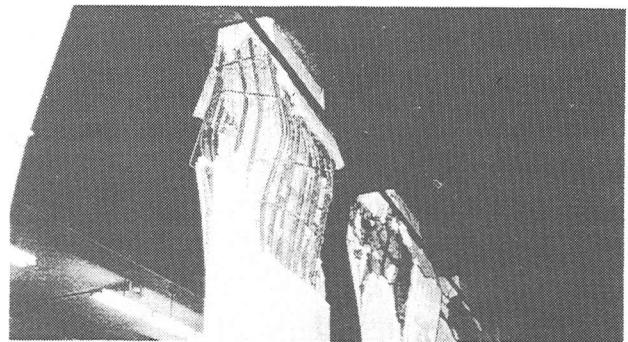


写真-2 高速長田駅の中柱上部損傷状況

③ せん断破壊

全線にわたるが大開駅以東は小規模である。又、土被りが深くなる程、その被害の程度は著しい。

図-6に柱の損傷状況のスケッチを示す。

iii) 大開駅以西の山側壁および大開駅以東の側壁の主要な変状は次の通りである。

- ① 壁頂部のハンチの始点部にトンネル軸方向のひび割れ
- ② 壁の高さの中央付近や下部にトンネル軸方向の大きいひび割れ

図-7に側壁の損傷状況を示す。

iv) 構造(施工)目地部

スラブおよび側壁部の目地部分のコンクリートが剥落している箇所も見られる(図-8)。

これはトンネル横断方向の地震力による被害が支配的である中で、トンネル軸方向の地震力による数少ない被害形態の一つである。

(b) 駅部

図-4に示した大開駅は、一般駅部と2層4径間からなるコンコース部分とを比較すると、被災は深い土被りをもつ一般駅部に集中している。これは隣接の高速長田駅も同様である。

図-9、10に大開駅と高速長田駅の一般駅部の被害パターンを示す。

写真-1、2に、その状況写真を示す。

(3) 考察

一般部および高速長田駅部ではトンネル上面において山側から浜側へ強く動かされた被害様相を留めている。又、トンネル軸方向については目地部のコンクリートの剥落がある程度で余り目立たない。

これらをまとめると以下の通りである。

- ① 山側から浜側にむかって強いせん断振動を受けた。
- ② この強さは土被りが深い程、幅広構造である程、大きく影響を受けやすい傾向にある。
- ③ 駅部だけを見ても、土被り荷重の少ないコンコース部の被害は軽微で、土被り荷重の大きい一般駅部の被害が目立つ。
- ④ 一般部においてはラーメン隅角部ハンチ始点で曲げ耐力に達した後、中柱のせん断ひびわれへと移行するのに対して、駅部では、中柱がせん断耐力に達した後ラーメン隅角部の破壊へと進む傾向が見られる。
- ⑤ トンネル軸方向の被害は目立たない。

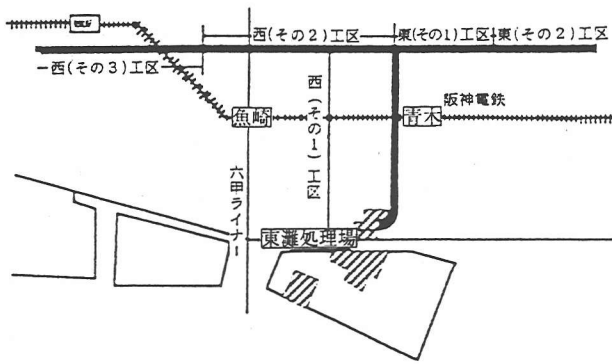


図-11 鳴尾御影汚水幹線位置図

3. シールドトンネルの被害

神戸市に存在するシールドトンネルは市営地下鉄の一部(0.4km)、地中送電線シールドトンネル(0.9km)通信線シールドトンネル(5.2km)、下水道シールドトンネル(142.2km)等である。

これまでのシールドトンネルの震害報告は1985年のメキシコ地震の際に立坑口付近のシールドトンネルのリング間ボルトの切断、全線にわたる斜め45°方向の軸方向クラック、セグメント端部のコンクリートの剥落等が報告された一例⁴⁾があるのみであった。

被害の報告が少ない理由として、

- ① 建設年代が新しく大地震に遭遇していないことがあげられるが、この他に、
 - ② 施工にあたって周辺地盤を余り乱さない。
 - ③ 一般的に断面が小さい。
 - ④ 円形断面の特性として地震時主応力は常時に較べて45°傾き常時と地震時の断面力の重畳が少ない。
 - ⑤ もともと頑丈なセグメントを用いている。
 - ⑥ 急曲線部や地盤剛性の急変部が少ない。
- などもあげられている。

今回の地震では通信線トンネル(外径4.55m、土被り11.4m)ではシールドトンネルの立坑への突出(5mm程度)や軽度の軸方向ひびわれが見られた。送電線トンネル(外径4.8m、土被り11~23m)では、インバートコンクリートのひびわれ(0.5mm程度、約10mピッチ)、南北線におけるリング間コンクリートエッジの損傷、曲線部におけるセグメント(一次覆工)の欠け、剥落、ひび割れ等が見られている。

両トンネルとも現神戸市役所付近に位置し、地盤も良好で十分な土被りを有しており、被害も全く軽

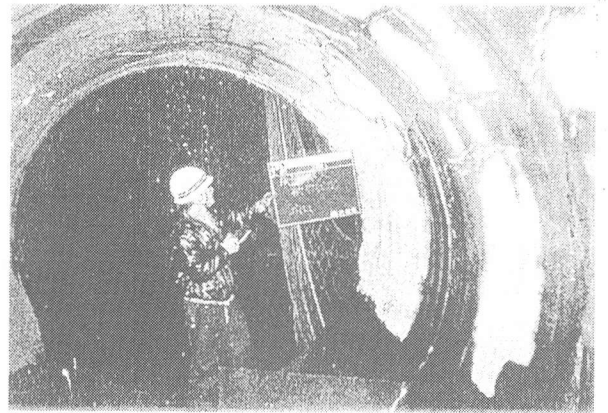


写真-3 坑口付近の二次覆工クラック

管軸方向クラック
(最大1.0mmで枝状に広がる。)

リング状クラック
(最大5mmで曲線部に多い)

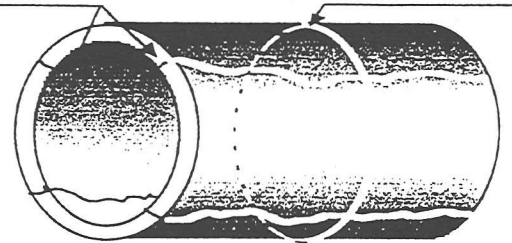


図-12 シールド二次覆工の被害

微なものであった。下水道トンネルでは図-1に示したトンネルが被害を受けた。以下に各幹線についての被害を紹介する。

(1) 鳴尾御影汚水幹線

幹線の位置と工区割りを図-11に示す。

(a) 工事概要

被害のあった工区の工事概要を以下に示す。

西(その1)工区

セグメント外径 3.150mm (鋼製)

仕上り内径 2.400mm

(二次覆工は場所打コンクリート)

工事延長 1,009.4m

土質 沖積砂質土 (N=5~24)、
沖積粘性土 (N=2~3)

土被り 9~14m

(b) 被害の概要

西(その1)工区の発進立坑側坑口付近では二次覆工コンクリートに多数のクラックが発生している。(写真-3)クラックは、円周方向のものと管軸方向のものがあり、リング状クラックはセグメントピース間付近と二次覆工の施工継目で生じており、クラック幅も最大で5mm程度と大きい。立坑付近のR=60mの曲線区間約100mにおいてはリング状クラック

表-2 その他のシールド管渠の被害

		新生田汚水幹線	高松汚水幹線	近畿島連絡汚水管
工事概要	セグメント外径	3,800mm 2,150mm	3,800mm	2,280mm
	セグメント	鋼製セグメント	鋼製セグメント	RCセグメント
	2次覆工	場所打コンクリート	場所打コンクリート	なし
	仕上り内径	3,000mm 1,500mm	3,000mm	1,800mm
	延長	1,811.83m 1,912.60m	3,368.12m	823.69m
被害状況	施工継目剥離 管軸方向クラック 漏水 マンホール蓋ズレ	施工継目剥離 円周方向クラック 管軸方向クラック 漏水	RCセグメント破損 (両坑口と中間の2ヶ所の計4ヶ所24リング) リング間のずれ	

ク(2~5mm)が多数(約1m間隔)あり、クラックからの漏水も多い。又、曲線の外周側の方がクラック幅が大きい。

管軸方向クラックは、管頂を0度として両側に45度付近と135度付近に計4本入っている(図-12)。この管軸方向のクラックはほぼ全線で確認される。管軸方向のクラック幅は最大で1.0mm程度で、やはり坑口付近で生じており、漏水が確認されている。二次覆工の被害が比較的大きい坑口付近で、セグメントとボルトを調査したところ、セグメントのプレート部に若干の変形が見られるものの、ボルトの抜差しは可能であり、セグメントに大きな目違いは発生していない。ボルト自体も検査の結果、特に異常は見受けられず、1次覆工の被害は無いものと報告されている。

また、発進坑口から約150mにわたって管路が10cm程度沈下している。この付近は極めて軟弱なシルトを含む土層である。

東(その2)工区では二次覆工コンクリートの施工継目部が剥離し漏水しているか、被害としては軽微なものであった。

その他の工区も同様であり、図-12に示した二次覆工の上下斜め左右の管軸方向のクラックが全線にわたり発生し、その幅は0.2~1.0mm程度で少し漏水している。

所々にはリング状クラック(幅0.2~0.3mm)も見られる。

(2) 六甲アイランド連絡汚水幹線

このシールドは埋立地の六甲アイランドと東灘処理場を結ぶ連絡管で、RCセグメントの一次覆工のみで形成されている。



写真-4 セグメントの破損

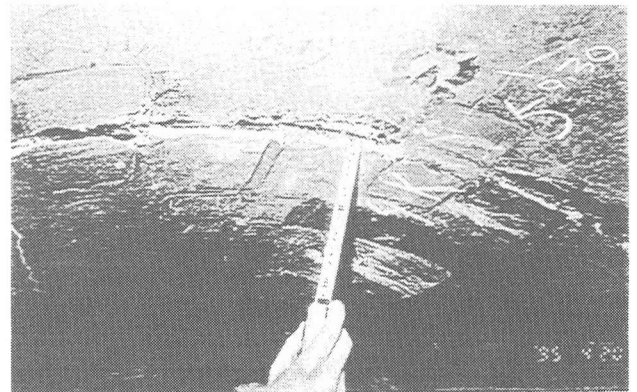


写真-5 リング間のずれ(約1.5cm)

(a) 工事概要

工事概要を以下に示す。

セグメント外径	2,750mm (RC)
仕上り内径	2,400mm
工事延長	566.40m
土質	沖積粘性土 (N=3~5)、 洪積砂礫土 (N=20~50以上)
土被り	24m~34m (陸上部) 11m~17m (海底部)

このシールドの特徴は、若齢埋立地に位置しているため沈下対策として、両立坑に接続付近で可とう性セグメントを設置している。

(b) 被害の概要

可とうセグメントで地震時の挙動が抑えられたものと思われる。可とうセグメントの変位は、発進側で最大8mm、到達側で最大47mmである。許容値が50mmであり、到達側は許容値に近い変位量であった。RCセグメント部ではセグメントピース間のパッキンがズレ、108ヶ所で漏水が生じているが、漏水量はわずかである。また、リング間でわずかに目違いが生じているものもある。

(3) その他のシールド管路の被害

表-2にその他で被害が生じたシールドの概要と被害の概略を示す。

荊藻島連絡污水管は六甲アイランド連絡污水幹線と同様、海底横断シールドで、RCセグメント仕上げである。このシールドは、極めて軟弱な土層を通過している。RCセグメントのコンクリート部に浮上がり、剥落、落下などの破損が見られる(写真-4)。また、セグメントのリング間で一部ずれが生じている(写真-5)。

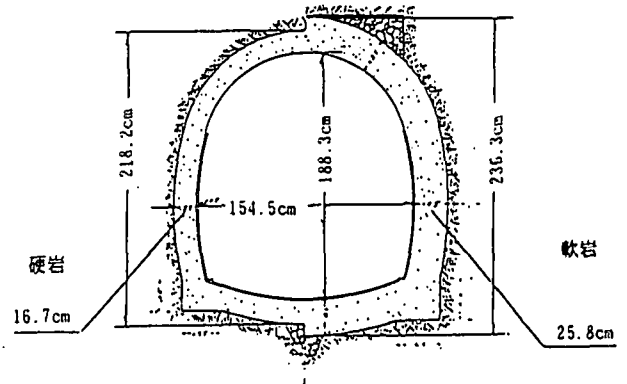


図-13 千荊導水路の横断面

(4) 考察

以上の被災からやや特徴的なことをまとめると、二次覆工を有するものについては以下の通りである。

- ① 上下左右の管軸方向クラックと、円周方向クラックが基本であり、発生頻度は管軸方向クラックが優勢である。
- ② 曲線部には円周方向クラックが多く発生している。
- ③ 円周方向クラック、管軸方向クラックとも一次覆工の継手位置に発生している。
- ④ 両クラックとも漏水を生じていることから、一次覆工の止水機能が損傷していると考えられる。

一次覆工のみのものについては以下の通りである。

- ① セグメントピース間およびリング間のゴムパッキンが損傷しやすい。
- ② 軟弱地盤に位置するシールドトンネルでは耐力不足になりやすい。
- ③ 坑口付近で立坑との挙動の相違でずれなどが生じやすい。

これらから、シールドトンネルが比較的小断面であることを考えると従来余り検討が行われていなかった横断面についての検討は疎かにされるべきではないと言える。

4. 導水路トンネルの被害

千荊導水路は、明治44年に建設が開始され、大正六年に完成した山岳トンネルであるが、起伏の激しい山谷を通過する区間もあり、開削区間が存在している。

この導水路のルートは芦屋断層の北東側末端付近に位置しており、今回の地震の影響を強く受けた地

域にあたる。宝塚市内に位置する下流側の5km区間では、覆工に亀裂や滑落が生じた箇所があり、H型鋼のアーチにより応急復旧後、パイプ・イン・トンネル工法で復旧がなされた。建設年代から、元々の耐震性は高くないと考えられるが、山岳トンネルでありながら、地震時の地山の断面方向の振動変位により発生したと考えられるトンネル軸方向に走るひび割れが覆工に見られ、今後の山岳トンネルの耐震性を論じるのに重要な事実が提示された。

(1) トンネル周辺地山とトンネル構造

建設年代が古く、地質調査に関する記録が残っておらず、地山の状態は不明であるが、被害のあった下流側の区間の大まかな地質は、次のように考えられている。

中生代白亜紀の六甲花崗岩を基盤とし、その上位に第四紀更新正世の大阪層群および中位段丘層が分布している。六甲花崗岩は風化が深部まで進み、表面層は真砂化が著しい。低位部や河川部では柔らかい沖積層の分布もある。

このトンネル5kmの区間は、3つの接合井により北からA～Dの4路線に分割されて管理されている。

本導水路のトンネル標準断面を図-13に示す。断面形状は、全線を通して高さ1.88m×幅1.55mの内空断面を有する馬蹄形である。覆工は無筋コンクリートで、厚さは硬岩部で16.7cm、軟岩部で25.8cm、土砂部および開削部で34.8cmである。

(2) 被災状況

地震による被害は、A路線およびC路線が大きく、他のB路線およびD路線の被害は比較的軽微であり、短期的には十分通水に耐えることができると考えられる程度であった。

表-3 比較的損傷の大きい区間の状態

路線	種別	位置	被災状況
A	隧道	急峻な沢部分 (写真-6)	・側壁およびアーチコンクリートの塊状の崩落 ・土砂の流出はないが背面地山が大きく露出 ・縦横3~5cm程度の内空縮小
		比較的広い尾根の下部	・広範囲に渡り、両側の壁に軸方向に幅3~5mmのひび割れ、および防水モルタルの浮きとはく離
B	隧道	比較的広い尾根の下部	・全区間に渡って、両側壁軸方向に連続したひび割れ ・アーチ、側壁、インバートに著しいひび割れと段差
C	隧道	台地部の暗渠隣接区間	・アーチ、両側壁、インバートにひび割れや段差による著しい損傷 ・アーチ肩部の覆工コンクリートが崩落、シルト状の土砂が大量に侵入。インバートが突き上げられ、内空断面が縦方向10cm程度縮小。
		暗渠隣接かつルート屈曲部 (土被り約18m、写真-7)	大きな側圧により断面が縦長に押しつぶされ、当初の内空形をとどめていない(変位置:縦+18cm:横-28cm) ・インバートの浮上がり、ひび割れ、変形。覆工コンクリートの変形、側壁の沈下。アーチ頂部の圧縮座屈。
		土地造成により土かぶり が小さい部分(写真-8)	・アーチ、両側壁に軸方向の連続ひび割れと段差(幅8mm、段差23mm)。ひび割れの密度は大
	暗渠	渡河による土かぶり極少 部および隣接部(土かぶり 4m程度、写真-9)	・アーチ、両側壁に軸方向の連続ひび割れと段差(幅5~8mm、段差23mm)。湧水伴う。 ・覆工コンクリートが崩落。目地が35mm左右にくいちがいが。(内空変位置:縦-6cm、横+8cm)。
D	隧道	台地部	・両側壁およびアーチ肩に軸方向に連続してひび割れ



写真-6 コンクリートの塊状崩落

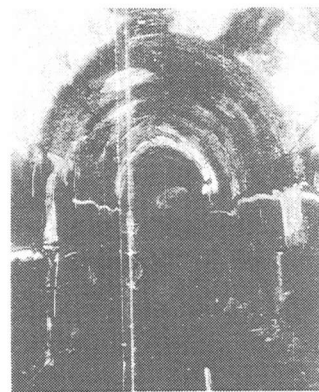


写真-7 内空変状

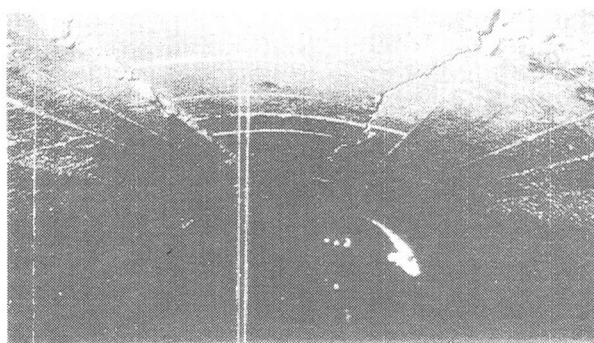


写真-8 アーチ部連続ひび割れ

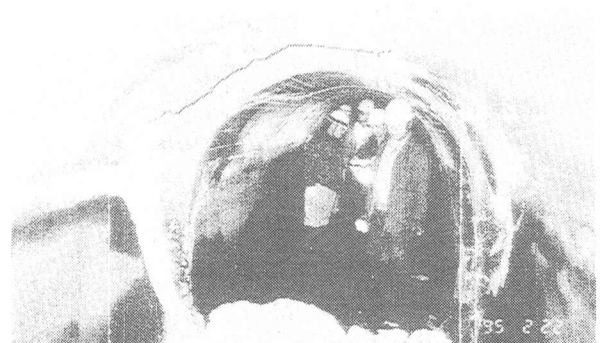


写真-9 目地のくいちがいが

全般的な特徴としては、トンネル覆工に広範囲でひび割れが入っており、大部分はスプリングライン部に軸方向に伸びる開口ひび割れである。地震による側圧が作用して施工の弱点になりやすい側壁とア

ーチの打継目付近でひび割れが発生したものと推定される。また、巻厚不足や土砂などの混入が見られる部分の覆工には、破損が見られる。

比較的損傷の大きい区間の状況を表-3に示す。

5. まとめ

以上で開削、シールド、山岳トンネルの代表的被害を報告した。これらの共通の特徴をまとめると、以下の通りとなる。

- ① 地盤のせん断変形によって断面方向のモーメントが最大となる部分に軸方向ひび割れが生じている。
- ② 支柱となる中柱のせん断破壊の様なパターンがない限りトンネルは崩落しにくい。
- ③ トンネル軸方向の動きによる影響は施工継手部、曲線部などに現れやすい。
- ④ 今回の地震では曲線部の被害を除けば軸方向力による被害は余り目立たなかったと言える。

以上、「震災の帯」およびその近傍の都市トンネルの被害について報告したが今後の課題として以下のものが挙げられる。

- ① 地下構造物の大断面化に伴い横断面の検討が必要である。
- ② 曲線部および運動の異なる変化点での対策が必要である。

上記の内①および振動性状変化点では構造物の外周に軟らかい材料を配置する免震工法も有力な対策工法の一つであろう。

曲線部については軸方向の伸びを吸収するようなシステムも考えられる。本文がこれらの対策を考える意味で参考になれば幸いである。尚、本文は現段

階での検討グループの執筆担当者の見解であり、本格的な討論はこれから開始される予定である。

謝辞：本文は冒頭に報告したように土木学会地下構造物調査報告書の原稿がもとになっている。このグループの各位、特に引用させて頂いた部分を担当執筆された神戸市の岩橋哲哉氏、オリエンタルコンサルタントの田中努氏に感謝申し上げます。又、調査執筆に温かい御協力を頂いた神戸市交通局、建設局、水道局並びに神戸高速鉄道(株)の方々に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 土木学会耐震工学委員会地下構造物調査検討グループ：阪神・淡路大震災調査報告書、第3編 第2章 トンネル・地下構造物、1997年(予定)
- 2) 岩橋徹広：阪神・淡路大震災の地震の概要と土木構造物の被害、総合都市研究第57号、pp.19～53、1995年
- 3) 佐俣千載：兵庫県南部地震での地下鉄構造物の被害と復旧、土木学会論文集、No.534/VI-30、pp.1～17、1996年3月
- 4) 田村重四郎、伯野元彦、家村浩和、竹内幹雄：1985年メキシコ地震の震害、土木学会誌、pp.79～85、1986年5月

(1996.9.14受付)

THE DAMAGES AND THE DESTRUCTIVE PECULIARITIES OF TUNNELS IN URBAN AREA CAUSED BY THE HYOGOKEN-NANBU EARTHQUAKE

Mikio TAKEUCHI, Takahiro IWATATE, Senzai SAMATA

This paper presents the damages and the destructive peculiarities of tunnels in urban area caused by the Hyogoken-Nanbu Earthquake in 1995, which probably resulted from shearing deformation of horizontal motion.

We present the damages from Nishidai-Station to Shinkaichi-Station of Kobe Express Railway as a representative example of tunnels constructed by cut and cover method. Naruo-Mikage main sewerage tunnel as an example of shield tunnel, Sengari tunnel as an example of driving channel. These damages indicate that the cross section of tunnel need to be investigated in addition to the axial section indicated so far, especially conspicuous for large tunnels. Additionally, it's indicated that countermeasures for tunnels are needed at curve or through two different ground rigidity. Finally, we present that seismic isolation methods are effective as countermeasures for tunnels.