

断層を横切るシールドトンネルの 断面方向の地震応答特性

大保直人¹・古谷俊²・高松健³

1 正会員 工博 鹿島技術研究所 (〒186-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1)
2 横須賀市水道局 (〒238-0011 神奈川県横須賀市小川町 11)
3 横須賀市下水道部 (〒238-0011 神奈川県横須賀市小川町 11)

地形・地盤急変部を横切る地下構造物の地震時挙動の解明は、地下構造物の耐震設計において重要な課題である。近年、シールドトンネルが断層を横断して施工される事例も多くなり、耐震設計を行う上で地震時挙動の把握の必要性が議論されつつある。本論文では、武山断層を横断して施工された共同溝（シールドトンネル）のトンネル軸方向で観測された地震波と解析結果の報告に引き続き、トンネル断面方向の地震波の解析と解析モデルを作成し、断層から 10m~20m 離れた位置でのトンネル断面方向の地震時挙動を解明、さらにトンネル断面方向の応答性状を明らかにした。

Key Words : Shield Tunnel, Earthquake Observation, FEM, Active Fault,

1. はじめに

地下構造物の耐震安全性評価では、地形・地盤急変部を横切る区間および構造急変部（例えば、立坑との接合部）における検討が重要である¹⁾。1995年の兵庫県南部地震で地下構造物の被害例の多くが構造急変部であったことから理解できる²⁾。このような地盤急変部および構造急変部における地下構造物の地震時挙動は、三次元的な挙動となるため動的解析や地震時挙動観測³⁾から明らかにされているが、設計での扱いは簡単でない。特に、地盤急変部に相当する断層を横切る地下構造物の地震時挙動に関する検討は少ない。

著者らは、断層を横断して建設された共同溝（シールドトンネル）の地震時挙動の解明、および耐震安全性を

確認するために断層を挟む区間に地震観測機器を設置し、1996年4月から地震観測を実施している。これまで、地震観測記録に見られる応答特性、およびトンネル軸方向の地盤・トンネル全体系2次元FEM解析からその応答性状について報告してきた^{4), 5)}。

本論文では、断層から10mおよび20m離れた地点でのトンネル断面方向の地震時挙動の考察、並びにトンネル断面の2次元FEMモデルを用いた動的解析より、地震記録のシミュレーションを行った。なお、本地震観測はトンネル内だけに地震計が設置されており、解析で用いる入力地震動波形は、本シールドトンネル近傍で実施して

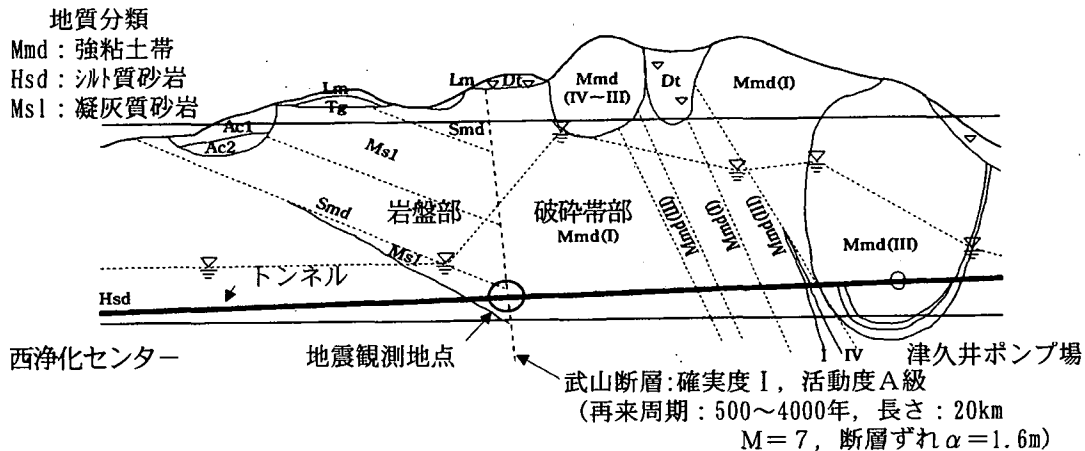


図-1 地質断面図

いる逸見浄水場で観測された地震記録を用いた。

2. 地質、構造物および地震観測の概要

図-1 は、ボーリングデータや各種地質資料を基に作成したシールドトンネルに沿った地質断面を示す。本トンネルは、断層を境にし、津久井ポンプ場側は強粘土化帯 (Mmd) を通過し、西浄化センター側はシルト質砂岩 (Hsd)、凝灰質砂岩 (Ms1) を通過している。

図-2 には、トンネル断面内に設置されている地震観測機器および管路の配置状況を示す。コンクリートセグメントが用いられている本トンネルの内径は 3050mm で、その内部には、直径 900mm の強化プラスチック複合管を用いた污水管と直径 1200mm の鋼管を用いた水道管が付設されている。断層を通過する部分には、断層活動によってシールドトンネルに大変位が発生してもトンネル内に敷設された管路への影響を少なくするような材料を用いる等の対策を施している。

地震観測機器は、シールドトンネル掘進時に行われた土質調査、およびボーリングデータ等から最も確実と考えられた武山断層部、そこから 20m 以内の岩盤部と破碎帯部に設置した (図-1 の丸で囲んだ地点)。観測成分は、変位計 4 成分、ひずみ計 4 成分、および加速度計 8 成分の合計 16 成分の観測機器を設置した。なお、文献 4) に地震観測機器設置の詳細は記載してあるので、参照されたい。

3. 観測された地震記録

1996 年 4 月から地震観測を開始し 1998 年末までに 70 の地震が記録された。横須賀市で震度 2 以上、およびトンネル内で 5Gal 以上の加速度を記録した主要な 20 の地震の発生地点、規模、最大加速度、ひずみ、および変位の一覧を表-1 に示す。最大加速度 (約 15Gal) は地震番号 19 の東京湾を震源とした地震で発生し、最大値ひずみ (約 14 μ) は地震番号 3 の千葉県東方沖を震源とした地震で発生した。なお、断層に沿った地点に震源を持つ地震は、観測されていない。

4. 地震観測に見られるトンネル断面方向の応答性状

(1) トンネル円周ひずみの応答特性

図-3 は、表-1 の地震で岩盤および破碎帯の周面ひずみで 30 度の位置での最大値の比較を示す。地震番号 10 と 13 のひずみは観測位置に関係なく同じ値を示している。これを除くと、円周ひずみは、破碎帯で大きな値を示している。なお、地震番号 18~20 のひずみは観測機器が故障したため、観測されていない。

図-4 は、地震番号 16 の観測記録の内、断層から 10m 離れた地点で観測されたトンネル円周ひずみ波形とそれのスペクトルの比較を示す。この地震での最大ひずみは、45 度に設置されたひずみ計で観測された。しかし、この波形は SN 比が悪かったため、鉛直面から 30 度の位置に設置したひずみ計の波形を示した。この位置でも、最

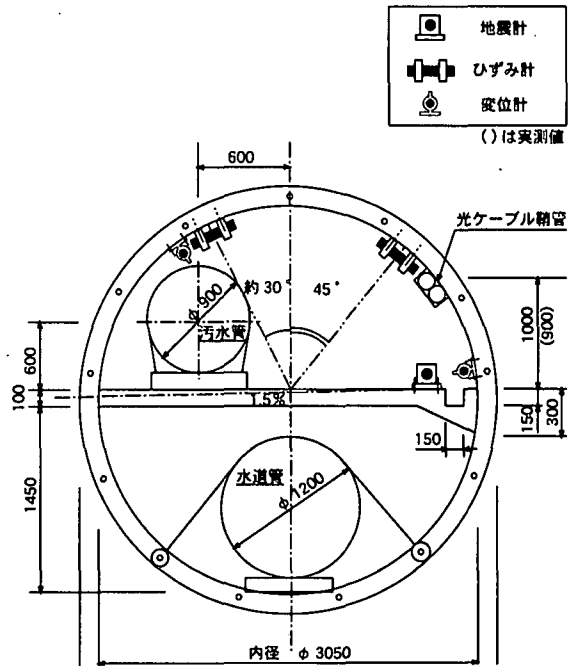


図-2 トンネル断面と地震計の配置概要

表-1 主要地震一覧

地震番号	地震発生地点	地震記録日時	地震規模	震央距離(km)	加速度 (Gal)	ひずみ (μ)	変位 (cm)
1	相模湾	96:07:10:23:06	4.1	12	2.5	2.0	0.001
2	千葉県東部	96:08:09:03:16	4.6	71	6.5	4.7	0.001
3	千葉県東方沖	96:09:11:11:37	6.2	148	6.6	13.8	0.006
4	千葉県東部	96:10:25:12:25	4.5	65	4.6	4.4	0.001
5	千葉県南部	96:11:15:10:30	4.0	28	3.2	2.5	0.001
6	房総半島南東沖	96:11:20:11:27	6.0	176	2.4	5.2	0.001
7	房総半島南東沖	96:11:28:16:40	5.2	89	6.4	9.5	0.002
8	茨城県南部	96:12:21:10:28	5.4	102	3.1	6.6	0.002
9	神奈川県東部	97:01:14:15:53	3.6	47	9.6	8.5	0.002
10	千葉県北西部	97:07:09:18:36	5.0	60	4.2	1.8	0.005
11	東京湾	97:09:08:08:40	5.1	50	7.4	3.3	0.007
12	千葉県北西部	98:01:14:02:17	4.9	68	3.9	9.7	0.005
13	千葉県南部	98:01:16:10:57	4.6	59	11.2	3.2	0.005
14	伊豆半島東方沖	98:04:26:07:37	4.7	50	3.0	5.4	0.005
15	伊豆半島東方沖	98:05:03:11:09	5.7	51	4.7	8.9	0.005
16	千葉県南部	98:05:16:03:45	4.8	38	14.1	10.8	0.006
17	千葉県東方沖	98:06:14:22:17	5.6	105	2.5	5.9	0.005
18	鳥島近海	98:08:20:15:40	7.1	701	2.3	-	-
19	東京湾	98:08:29:08:46	5.1	57	14.8	-	-
20	千葉県北西部	98:11:08:21:40	4.6	59	4.7	-	-

- : 計器故障のため欠測

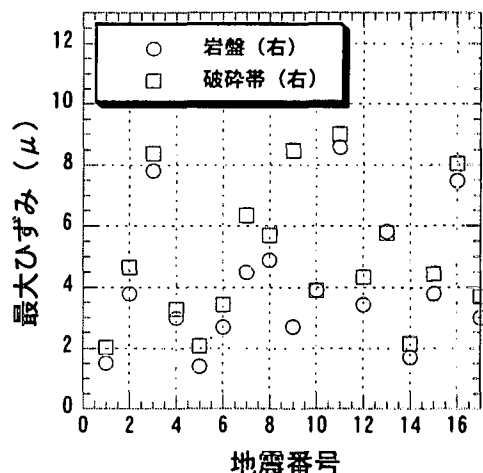


図-3 岩盤および破碎帯で観測された最大ひずみ

大ひずみは破碎帯で大きな値を示している。3.5Hz 付近に存在している卓越振動数は、破碎帯の方が岩盤部よりやや小さく、振幅が大きい性状を示している。特に、1.5～4Hz の区間では、破碎帯部の振幅が常に大きい。

(2) トンネル断面方向の加速度の応答特性

図-5 には、断層境界から 20m 離れた岩盤および破碎帯で観測された地震番号 16 のトンネル断面方向の加速度波形とそのペクトル比（伝達関数）を示す。

最大ピークは 18Hz 付近に存在し、次は 6Hz 付近に存在している。10Hz 以下の振動数領域に限定するとこれに続くピークは 8.5Hz にある。このスペクトル比から、岩盤と破碎帯で大きく振動性状が異なることが分かる。この図から岩盤と破碎帯区間では、4Hz、6Hz および 9Hz 付近に明瞭なピークが存在し、岩盤と破碎帯間に明瞭な地盤構造の違いがあることを示唆していると考えられる。

5. トンネル断面方向の応答特性の解析

断層を挟む区間でのトンネル断面方向で顕著な応答特性違いがあることが分かった。ここでは、地震番号 16 のトンネル断面方向のひずみ・加速度波形に見られた地震応答特性の違いについて解析的な検討を行う。

図-6 には、地質断面図およびシールドトンネル通過地点近傍で実施されたボーリング調査データを参考にして、トンネル断面方向の 2次元 FEM 解析モデル、および西浄化センター・津久井側の深さ方向の地質構造概要を示す。解析条件は、左右側方境界はローラー、底面は粘性境界とした。トンネルはセグメントの剛性を設定した。解析モデルにおいて断層を挟む区間において共通する基礎岩盤は、地盤調査では確認されていないため、西浄化センター側下部に存在している凝灰質質砂岩を設定した解析モデルとした。この基礎岩盤に地震動を入力した。

(1) 入力地震動の設定

本観測システムでは、トンネル内に設置されているため、応答解析に必要な基盤での地震動は観測されていない。そこで、本地震観測地点より約 9km 北側にある逸見浄水場で実施されている地震観測システムで同時に得られている地震記録の地表と基盤で得られた加速度波形を用いて入力地震動を作成した。逸見浄水場の基盤で観測された加速度波形には、表層の振動性状が含まれているので逆応答解析より解放基盤での入力加速度波形を求めた。解析に用いた地盤モデルおよび地震観測の概要については、文献 6) を参照されたい。

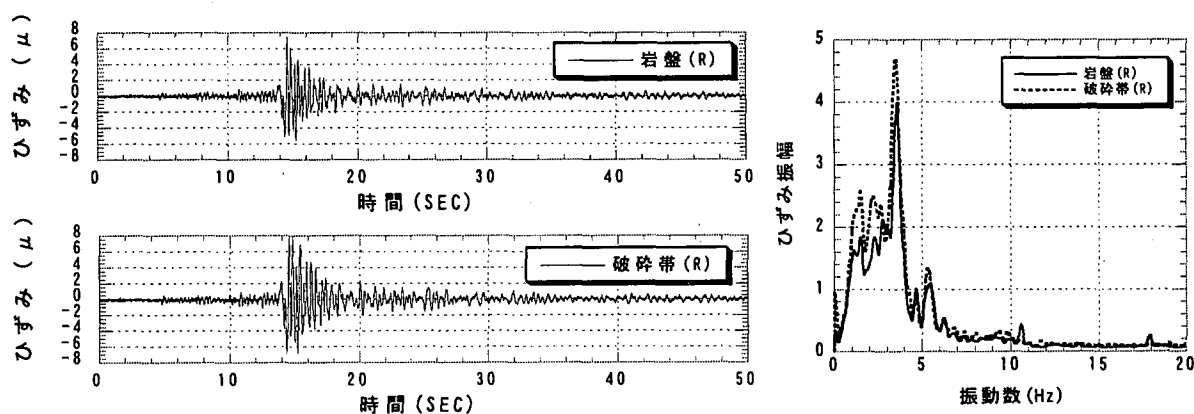


図-4 岩盤と破碎帯で観測されたひずみ波形とそのフーリエスペクトル（地震番号 16）

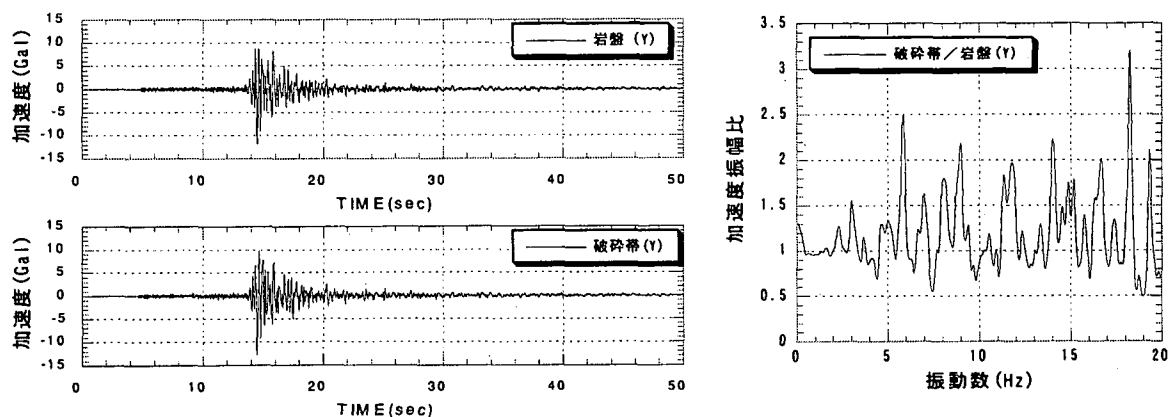


図-5 岩盤と破碎帯で観測された加速度波形と伝達関数（破碎帯/岩盤）（地震番号 16）

(2) ひずみ応答波形の比較

断層から10m離れた断面の岩盤・
 破碎帯側の30度位置のひずみ応答
 波形を図-7に示した。観測・解析
 の最大ひずみは、岩盤側で7.5と1.5
 μ 、破碎帯側で7.9と1.8 μ であ
 った。破碎帯部が若干大きくなる傾
 向は解析からも得られている。しか
 し、解析結果は観測値の約4分の1
 程度であり、基盤入力地震動の設
 定法を含め、さらに詳細な検討が
 必要である。

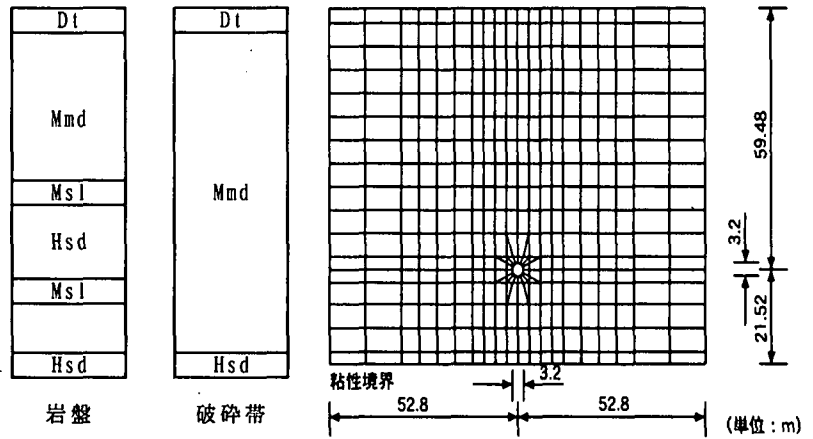


図-6 トンネル断面方向の二次元解析モデルと地盤構造の概要

(3) 振動数特性の比較

解析のひずみおよび加速度波形の最大値は、
 観測値の3分の1から4分の1程度の大き
 さであるため、解析モデルの地盤構
 造の妥当性を調べる必要がある。図-
 8には、加速度およびひずみ波形の
 観測と解析波形のフーリエスペクト
 ルの比較を示した。スペクトル振幅
 は常に観測で大きくなっているが、
 スペクトル特性は両者で共通した性
 状がある。この結果は、解析モデル
 はほぼ妥当であり、解析に用いた入
 力地震動の大きさが適当でなかった
 と考えられる。

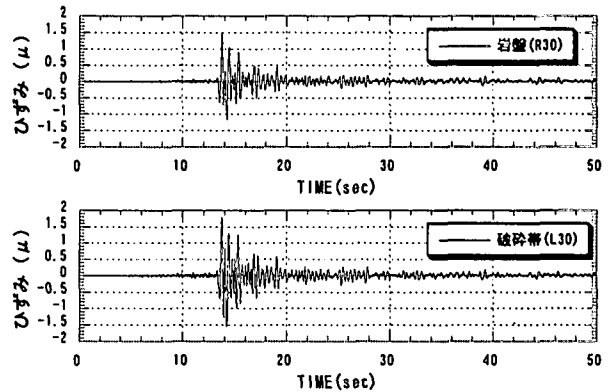


図-7 解析で得られたひずみ波形

6. おわりに

ここでは、断層を横切るシールドトンネルの断面方向
 の地震時挙動、および2次元FEMモデルを用いて動的解
 析を実施しトンネル断面方向の応答特性を検討した。得
 られた結果をまとめると、

- 1) 地震観測で得られたトンネル周面ひずみから、常
 に破碎帯での変形が大きいことが確認出来た。
- 2) 断層から10~20m区間のトンネル断面方向の2次
 元FEMモデルを用いた解析と観測結果の最大値の
 合致度は良くなかったが、両者の応答のスペクト
 ル特性は似ているので、断面方向の解析モデルが
 妥当であることが分かった。

本検討では、同じ地震記録が得られている逸見浄水場
 の加速度記録を用いて入力地震動を作成し、応答解析を
 実施した。今後は、両者に共通する地盤構造や地震動波
 形の特徴を把握し、検討を実施する必要がある。ここで
 用いた解析モデルは、地震観測を実施している周辺の地
 盤条件を参考に作成し、地盤剛性を設定した。さらに、

詳細な地盤構造に関する新たな情報を入手し、検討する
 進める予定である。

参考文献

- 1) 川島一彦：地下構造物の耐震設計、鹿島出版会、1994
- 2) 地盤工学会：阪神・淡路大震災調査報告書、平成8年
- 3) 大保他：大深度鉛直立坑とシールドトンネルの地震応答特性、
 都市地下空間利用における大深度地盤に関するシンポジウ
 ム、平成5年11月
- 4) 大保他：断層を横切るシールドトンネルでの地震時挙動観
 測、第24回地震工学研究発表会、1997
- 5) 大保他、断層を横切るシールドトンネルの地震応答特性、第
 12回日本地震工学シンポジウム、1998
- 6) 山崎他、EPS 盛土-擁壁系の地震時挙動の観測と解 析、土
 木学会論文集、1995

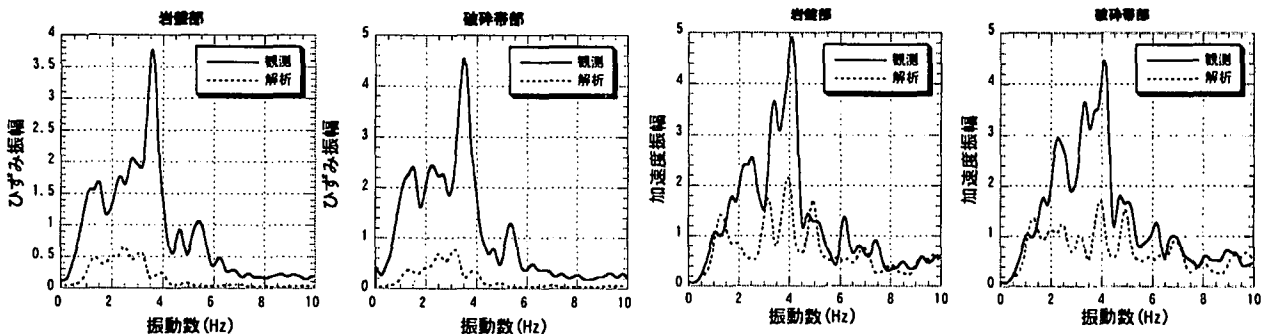


図-8 ひずみおよび加速度記録の観測・解析結果のフーリエスペクトルの比較