

兵庫県南部地震における 沈埋トンネルの動的挙動に関する考察

清宮 理¹・小泉 勝彦²・橘 義規³・塚田 あゆみ⁴

¹正会員 工博 早稲田大学教授 理工学部土木工学科 (〒169東京都新宿区大久保3-4-1)

²運輸省第三港湾建設局 高松港湾空港工事事務所 (〒760高松市浜/町7番12号)

³正会員 工修 (株)オリエンタルコンサルタンツ 総合技術部 (〒213川崎市高津区久本3-5-7)

⁴正会員 (株)オリエンタルコンサルタンツ 総合技術部 (〒213川崎市高津区久本3-5-7)

軟弱地盤中に建設される沈埋トンネルは、沈埋函相互を連結する部分に変形吸収が可能な可撓性継手が採用されており、地震時の安全性を確保している。可撓性継手を有するトンネルの挙動に関しては、動的解析等で検討しているが、実物の挙動を直接把握した例は少ない。兵庫県南部地震発生当時、大阪南港トンネルは施工中であったが、幾つかの可撓性継手は完成しており、地震後の点検により継手の移動量を把握することができた。また、スロッシングによると考えられるバラストタンク水の越流量も判明している。本研究は地震後の点検で得られたこれらの情報を地震応答解析を用いて補足し、トンネルの地震時挙動について考察したものである。

Key Word : Dynamic response analysis, Hyogoken-nanbu earthquake, Immersed tunnels, Flexible joint

1. はじめに

平成7年1月17日に発生した兵庫県南部地震により、建設中の大阪南港沈埋トンネルでは、トンネルの変形を示すいくつかの痕跡が地震後の点検により確認されている¹⁾。また、スロッシングによると考えられるバラストタンク水の越流量も判明している。本研究は地震後の点検で得られたこれらの現象を地震当時の施工状況(図-1参照)を踏まえた地震応答解析を用いて検討し、トンネルの地震時挙動について考察したものである。

検討のフローを図-2に示す。

2. 点検データの整理

(1) 継手の変形量の整理

地震直後に実施された点検より、トンネル継手部の変形を示す痕跡が得られた。これに基づき、表-1、2の継手変形量を推定した。

① 鉛直せん断キーのこすれ跡¹⁾ :

継手の変形として主に採用した。

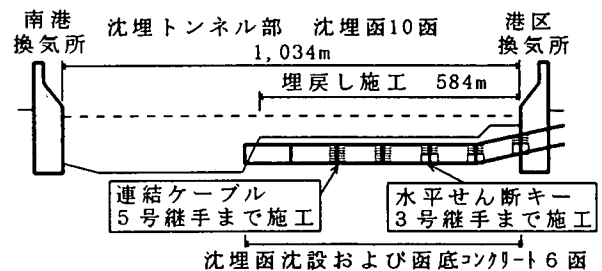


図-1 地震時の施工状況

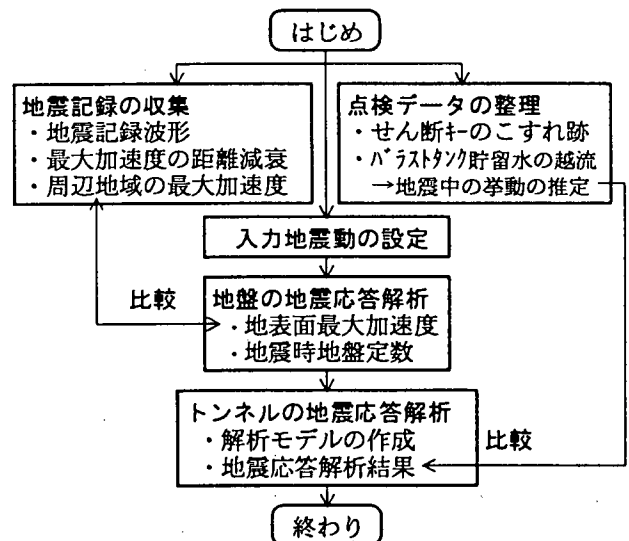


図-2 検討のフロー

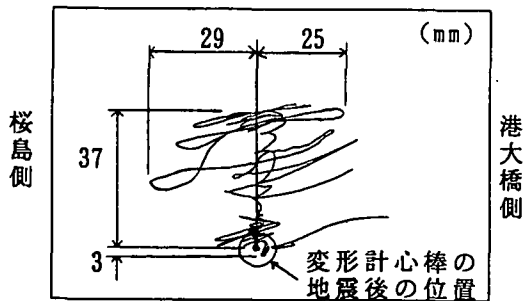


図-3 継手変位計の接触跡(1号継手)

表-1 点検データに基づく継手変形量の推定値(トンネル軸方向)

継手 番号	残留 開き量 (mm) ①	剪断+移動痕跡		地震時最大振幅	
		圧縮 (mm) ②	引張 (mm) ③	圧縮 (mm) ①+②	引張 (mm) ①+③
1	-7	9	-14	2	-21
2	-5	(5)	不明	0	不明
3	-3	5	-5	2	-8
4	-1	不明	-7	不明	-8
5	-1	5	-6	4	-7
6	不明	不明	不明	不明	不明

表-2 点検データに基づく継手変形量の推定値(トンネル水平方向)

継手 番号	残留 ずれ量 (mm) ④	せん断+ 移動痕跡 (mm) ⑤	地震時 最大振幅 (mm)
			④+⑤
1	-3	+16 -側不明	13
2	-2	(±1)	3
3	0	+側不明 -5	5
4	-10	+側不明 -15	25
5	0	+3 -7	7
6	+8	+側不明 -側不明	不明

注) 符号は、港区側函体が港大橋側(左方向)にずれる場合を正とした。

② 水平せん断キーの埋殺し型枠(発泡スチロール)のつぶれ量¹⁾ :

発泡スチロールの弾性反発が起こった可能性があるため、①のデータが得られなかった箇所のみ参考として用いた。表-1、2において括弧で示した。

③ 継手変位計のこすれ跡(変位計の心棒が相手方の鉄板につけた跡) :

地震による痕跡と判断できる1号継手のデータのみを使用した(図-3参照)。

(2) バラストタンク貯留水の越流

地震発生当時、6号函には沈設の際に使用した水バラストが残されていた。バラストタンクは5個設置されており、サイズは

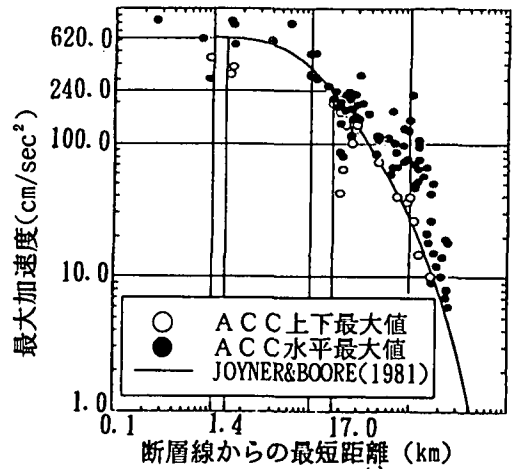


図-4 距離減衰特性⁴⁾

幅3m×深さ4m、奥行きは1番目が18.8m、2~4が16.0m、5番目が18.5mである。1~4のタンクにおける地震前の水深は3.9mであり、地震の振動による水位の低下は40cmであった。5のタンクは地震直前の水位が1.6mと低かったため、越流はなかった。

3. 地震応答解析による地震時挙動の推定

(1) 入力地震動の設定

当該地盤における基盤地震動が得られていないため、次のように入力地震動を設定した。神戸ポートアイランドのGL-83mで得られた加速度記録²⁾を基本の地震波形とした。ただし、震源からの距離が当トンネルと地震観測点が異なるため、図-4に示すJoyner&Boore³⁾の震源近傍での距離減衰特性より、加速度振幅の低減率を算定した。当該地点における最大加速度の低減率は、 $240/620=0.387 \approx 0.4$ となり、ポートアイランドの加速度記録にこの低減率を乗じ、当該地点における基盤入力波とした。

また、地震記録に含まれる誤差を除去し、工学的に意味のある範囲を取り出すため、観測されたNS、EW方向の原波形にバンドパス(0.05Hz~20Hz)処理を行った。最後に、2方向の波形をトンネル軸方向と直角方向に合成し、解析に用いる入力波形(図-5)とした。

なお、鉛直地震動に関しては、距離減衰特性が不明であること、既往の解析結果から鉛直動が沈埋トンネルの挙動に及ぼす影響があまり大きくないことから、本検討では考慮しなかった。

表-3 地表面加速度の比較^{1), 2)}

		地表面最大加速度(gal)
応答解析結果		164
地震観測	NO. 4	NS:180 EW:212
	NO. 19	266
	NO. 20	185

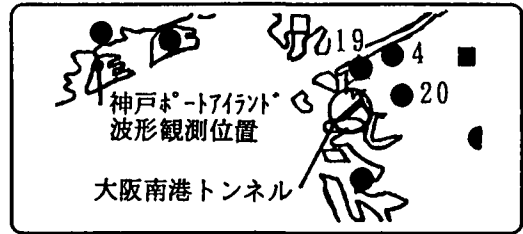


表-4 施工時の解析で考慮する部材

継手番号	継手の施工状況		剛性評価で考慮する部材	
	連結ケーブル	水平剪断	伸縮・曲げ	水平剪断
1	施工完了	施工完了	ゴム・スケット + 連結ケーブル	緩衝ゴム + ゴム・スケット + せん断ばね
2				
3				
4	未施工	未施工	ゴム・スケット	せん断ばね
5				
6				

③ 沈埋函の内空を含む見かけの単位体積重量は、おおよそ $\gamma = 1.1 \text{ tf/m}^3$ で、在来地盤や埋戻し土に比べ軽量であり、かつ、周囲の地盤に支持されているため、地震加速度が作用しても、自己振動の影響は小さく、周囲の地盤変形の影響が大きいとされている。しかしながら、埋め戻されていない状態では、側方地盤による拘束が無く、慣性力により生じる自己振動の影響が相対的に大きくなることが考えられる。よって、埋戻しの完了していない6号函の1/3部分では、躯体質量を考慮する。なお、解析では局部的な地盤の剛性低下やすべりは考慮していない。また、可撓性継手に関しても、継手部材の施工の進捗状況に応じて表-4のような剛性評価を行った。

4. 地震応答解析結果と点検結果との比較

(1) 継手変形量

表-5に地震応答解析による継手変形量と点検結果を比較して示す。地震応答解析

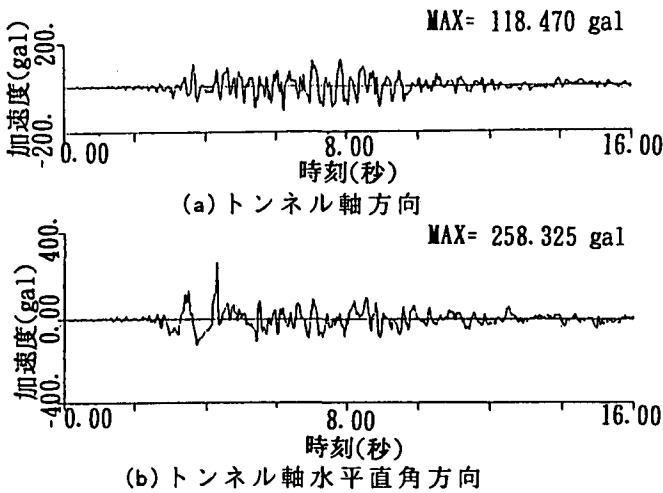


図-5 解析に用いた基盤地震波形

(2) 地盤の地震応答解析

周辺地域の観測データと比較するために、トンネルの地震応答解析に先立ち、SHAKEにより地表面の地盤加速度を算定した。地盤の剛性や減衰比は発生するせん断ひずみに応じて変化するため、図-5に示した加速度波形を再度合成し、最大加速度が発生する方向の成分を取り出し、これを入力波とした。表-3に地表面の応答加速度を、本トンネルの周辺地域での地震観測結果と比較して示す。観測結果と比較すると、幾分小さめの解析結果となった。

(3) トンネル全体系の地震応答解析モデル

地震応答解析モデルは、沈埋トンネルの耐震検討で一般的に用いられているバネ・質点モデルを基本とした。埋戻しが完了していない6号函の1/3の部分に関しては、埋戻し完了部に比べて地盤の拘束が小さい。また、埋め戻されていない部分には、周囲の水による動水圧や躯体慣性力が作用する。これらの影響を、以下のように考慮した。

- ① 埋戻しの完了していない部分では、底面地盤のばねのみを考慮する。
- ② 埋戻しが行われていない部位は、地震中に周囲の水の影響を受ける。構造物が振動する時の水の影響は、振動加速度に比例する部分と、振動速度に比例する部分に分けて考え、前者を付加質量、後者を造波減衰として評価できる。一般に、海洋構造物の耐震設計で考慮する振動周期の範囲では、造波減衰の影響は小さいとされており、本検討でも水の影響は付加質量としてのみ考慮した。⁵⁾

表-5 地震応答解析結果と点検データ比較

継手 番号	軸方向伸縮量				せん断ずれ (mm)	
	開き量(mm)		圧縮量(mm)		解析	点検
	解析	点検	解析	点検		
1	18	21(14)	16	2(9)	35	13(16) <25>
2	16	不明	12	0(5)	1	3(1)
3	13	8(5)	8	2(5)	1	5(5)
4	7	8(7)	5	不明	1	25(15)
5	3	7(6)	3	4(5)	1	7(7)
6	9	不明	3	不明	2	不明

注)点検結果の<>内は継手変位計のこすれ跡による値。()内の値は地震後の位置を基準にした変形量。

結果、点検データともに換気塔取付部の1号継手で変形が最も大きくなる傾向が見られる。開き量に関しては、解析値と点検データは概ね近い値となっている。圧縮量に関しては、1～3号継手の解析値が点検結果よりもかなり大きい。ただし、地震後の位置を基準とした点検結果と比較すると、比較的近い値となっている。水平直角方向のせん断ずれに関しては、1～3号継手では概ね解析値と点検データは近い値となっている。点検データによれば、水平せん断キーが施工済みの2、3号継手の方が、未施工の4、5号継手よりもせん断ずれが小さく、せん断キーがずれ拘束効果を発揮したと思われる。一方、解析結果では、2～6号継手で同程度のせん断ずれ量となり、せん断キーの効果は明瞭に現れなかった。

(2)バラストタンク貯留水の固有周期

6号函のバラストタンク内の貯留水は、地震の振動により、満水に近い状態から約40cm水位が低下した。

そこで、貯留水のスロッシングの固有周期を算定した。貯留水の液面動揺の固有振動数(f_w)は、次式⁶⁾を用いて算定した。

$$f_w = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\pi g}{L} \tanh\left(\frac{\pi H}{L}\right)}$$

H/L : 水深比

L : 波の進行方向の長さ

g : 重力加速度

ここで、地震前の水深が同一であった1～4番目のタンクでは、地震後の低下した水位も同じであったため、越流は水平直角方向に起こったと考え、Lはタンク横断方向の幅を考慮した。

算定の結果、貯留水の固有周期は1.96秒となった。トンネル全体系モデルの固有周期(=地盤の固有周期)は1.7秒であり、貯留水のスロッシングの固有周期と近いことが解った。

(3)沈埋函の応力度

地震後の点検では函体にはトンネル軸線の大きな変形や、コンクリートのひびわれ等の損傷は見られなかった。地震応答解析による函体断面力を用いて応力照査を行ったところ、許容応力度以内となり、損傷が生じるような応力レベルには達していなかった。

5. おわりに

地震応答解析結果は、水平せん断キー未施工部のせん断ずれなど、傾向を再現できない部分もあったが、その他は概ね点検データによる継手変形量と整合する結果となった。また、固有周期に関しても地震応答解析結果は実挙動とほぼ整合していることが考えられた。

謝辞：本トンネルの設計・施工に当たって、ご指導・ご助言を頂いている「大阪南港トンネル技術検討委員会(委員長：長尾義三京大名誉教授)」の関係各位の方々に、紙上を借りて深謝申し上げます。

参考文献

- 1)小島・松永・渋谷・岡部・小泉:1995年兵庫県南部地震における大阪港南港トンネル可とう性継手の挙動について、土木学会第50回年次学術講演会概要集第1部, pp. 1686-1687, 1995
- 2)土木学会:阪神大震災震災調査第二次報告会資料, pp. 116-118, 1995
- 3)W. B. Joyner, D. M. Boore: Peak horizontal acceleration and velocity from strong-motion records including record from the 1979 Imperial Valley, California, earthquake, BS SA VOL. 71, pp. 2011-2038, 1981
- 4)榎大林組技術研究所:平成7年(1995年)兵庫県南部地震被害調査報告書, pp. 17, 1995
- 5)橋・柄川・谷・須田:露出した沈埋トンネルの地震時挙動・その3, 土木学会第47回年次学術講演会概要集第1部, pp. 1398-1399, 1992
- 6)土木学会:土木技術者のための振動便覧, pp. 4 14, 1985