

(119) 大阪南港トンネル柔継手の耐震設計

運輸省第三港湾建設局 三橋 郁雄
 同 ○小泉 哲也
 運輸省港湾技術研究所 清宮 理
 ㈱オリエンタルコンサルタンツ 田中 努

1. まえがき

大阪南港トンネルは、直接基礎の換気塔の自重による洪積粘性土層の二次圧密に伴う地盤沈下の影響と、既設突堤と圧密進行中の埋立地を結ぶ地盤条件の変化する地点に建設されるため地震の影響が大きく、沈埋函相互と換気塔に柔継手の採用が必要である。沈埋トンネルの耐震設計では、縦断方向の軸力が大きく、継手の耐震性の評価が非常に重要となる。継手を合理的に設計することにより、函体の断面力を大幅に低減でき、かつ安全性の高いトンネルを実現することが出来る。

本トンネルでは、地震時の継手の安全性と止水性を確保するために、柔継手のばね定数、変形量、強度などを詳細に検討した。また、多質点系モデルによる動的解析でゴムガスケットの種類や地震波の種類が柔継手に及ぼす影響を調べた。

2. 沈埋トンネルの概要

大阪南港トンネルは、大阪最大の埋め立て地である南港地区と港区築港を結ぶもので、21世紀に向けての情報化、国際化に対応した新しい街づくり「テクノポート大阪」計画の交通の要としての役割が期待されている。このうち大阪港中央航路を横断する1033.9mの区間は、沈埋トンネルとして施工が進められており、幅35.2m、高さ8.6m、長さ103.39mの沈埋函10函から構成されている。本沈埋トンネルの特徴としては、我国初の道路・鉄道併用の沈埋トンネルであること、側壁と底版部を鋼・コンクリートの合成構造⁽¹⁾⁽²⁾としていることが挙げられる。

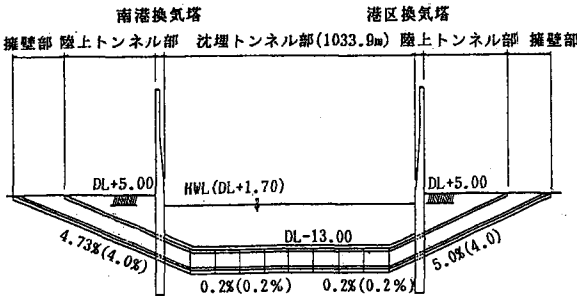


図-1 トンネル縦断面図

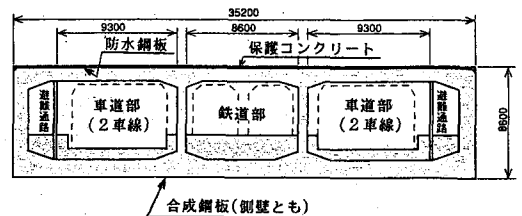


図-2 沈埋函横断面図

3. 解析条件

(1) 入力地震動

入力地震動は、大阪港周辺で発生した過去の大地震から、近距離地震として京都文録地震と遠距離地震として南海地震を選定し、それらの震央距離とマグニチュードをもとに、実効加速度⁽³⁾を算定し、これを耐震解析上の基盤露頭部での値とした。一方、近距離地震としてエルセントロ記録の地震波を、遠距離地震として八戸港記録の地震波を選定し、各々の最大加速度を前述の実効加速度(それぞれ225gal、232gal)に最大加速度を修正した。

(2)地盤モデル

トンネル周辺地盤は、粘性土 ($V_{s0}=120\sim 310\text{m/s}$) と砂層 ($V_{s0}=160\sim 360\text{m/s}$) の互層がGL-80m程度の深部まで続く大阪港特有の地盤で、耐震解析上の基盤(N値 ≥ 50)が現われない。したがって、本工事のボーリング調査で確認されている最深の洪積砂層を基盤とした。海底地盤の地層は比較的一様であるが、港区側は換気塔が既設突堤の端部に位置し、陸上トンネルが突堤を突き抜ける構造となる。また、南港側は、埋立地の角部に換気塔があり、埋立護岸法線がトンネルに斜めに位置している。

動的解析モデルは、港湾技術研究所で開発した多質点系モデル⁴⁾であるが、上記のように各地盤質点位置でトンネル横断方向に一様地盤ではないため、横断方向のFEMモデルにより固有値を求めて、質量とばね定数を定めた。ここで、地震時の地盤定数は、等価線形化法を用いた次元波動論による動的解析(SHAKE)により求めた。地震時の地盤振動の一次周期と地表の最大応答変位量は、表-1の通りである。

表-1 地盤の卓越周期と最大応答変位

	港区側 突堤	海底部	南港側 埋立地
卓越周期	1.6sec	1.5sec	2.4sec
最大 変位	八戸	15.1cm	8.0cm
	イルベントロ	13.5cm	7.5cm
		8.5cm	5.9cm

(3)トンネルおよび換気塔モデル

解析モデルは、両側の換気塔までを範囲とし、図-3のようにモデル化した。トンネルは所定の剛性を有する梁にモデル化し、約100mの各函体を4分割して節点を設け、柔継手部はばねで表わし、後述のようなゴムの材料非線形特性を考慮した。換気塔部は、所定の剛性を有する鉛直な梁で表わし、継手によりトンネルと連結している。

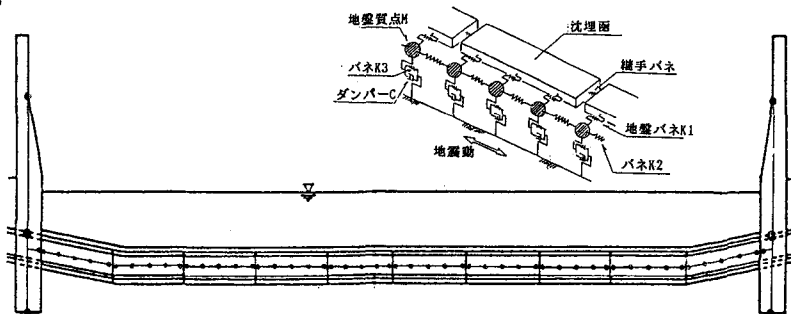


図-3 解析モデル

(4)解析ケース

解析は、ゴムガスケットの種類(ケース1:立坑よりの①, ②, ⑩, ⑪号継手にGINA190-200-40, その他はGINA190-148-40を使用、ケース2:全継手にGINA190-148-50を使用)、加振方向、地震波の種類を替えて行なった。

4. 柔継手の構造と設計

(1)柔継手の構造

柔継手の構造を図-4に示す。これは、圧縮力に対してゴムガスケットで抵抗し、引張力に対してPCケーブルの連結材により抵抗させる。最近建設される沈埋トンネルに多く採用された柔継手形式である。この継手は、東京港第二航路トンネルや多摩川沈埋トンネルに使用され、また、新潟港トンネルの設計の際に実験⁵⁾により特性が確認されている。

(2)ゴムガスケット

ゴムガスケットは、わが国の沈埋トンネルで最も使用実績の多いGINA型のガスケットである。これは図-5のような形状をしており、先端のノーズと下端のリッジの圧縮によるパッキン機構で止水を行なうものである。本トンネルの水深では、ノーズが20mm程度潰れれば止水可能で、水圧接合時にさらに圧縮される約50mmが止水性確保のための限界開き量となる。設計上は、クリープによる100年後の永久変形量を考慮し

て、20mmの余裕を取って許容開き量としている。

一方、ゴムそのものは純粋な圧縮に対して相当強度を持つが、ゴムガスケット接合部の現場加硫やノーズの押し込みによる応力集中、ガスケットビームの鋼板とのずれ等により、十分な強度が発揮されないことがある。そこで本トンネルでは、既往の試験結果をもとに、常時水圧・地盤沈下・温度変化・地震を合成した最大圧縮量に対する反力を300tf/m程度に抑えることにした。

(3) 継手のモデル化の方法

柔継手は、図-4の構造から分かるように、軸方向の引張に対しては連結ケーブルが抵抗し、圧縮に対してはガスケットが抵抗するため、各々の特性により継手剛性が定まる。また曲げに対しては連結ケーブルとガスケットの反力の釣合で中立軸と曲げ剛性が定まる。ガスケットの圧縮特性曲線は、図-6のように歪硬化型の強い非線形特性を持つ。ゴムガスケットは、地震時の卓越周期1sec程度に対しても除荷時の復元が遅れるため、繰り返し载荷となる地震時のガスケットの特性曲線の傾きは、図-6よりも急勾配となり、また、その勾配は振動の範囲により異なる。

したがって、本トンネルでは、動的解析の結果の柔継手の変形量が、継手剛性評価時の想定変形量と異なる場合には、繰り返し動的解析を行なって収斂させた。結果の一例を表-2に示す。

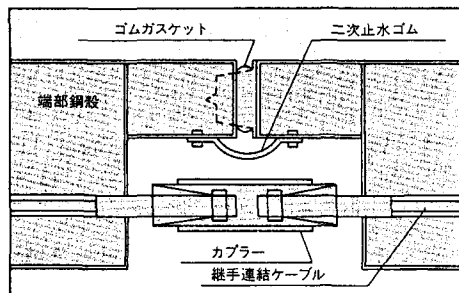


図-4 柔継手の構造

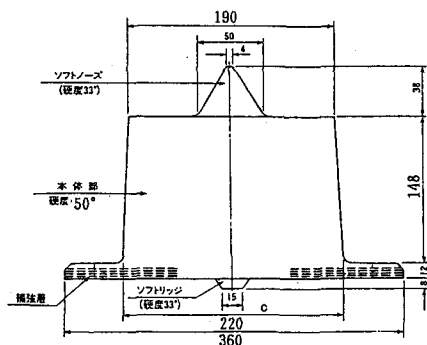


図-5 ゴムガスケットの断面

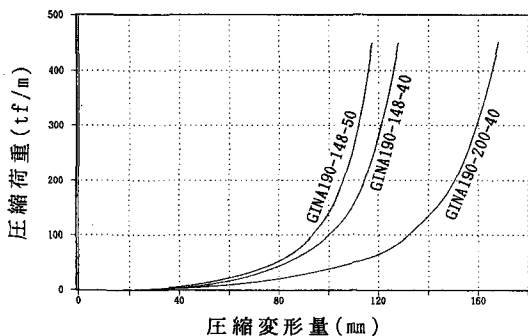


図-6 ゴムガスケットの圧縮特性曲線

表-2 継手剛性

	換気塔～函体間継手		中央部函体間継手	
	G200-40	G148-50	G148-40	G148-50
軸引張 (tf/m)	4.5×10^5 3.5×10^5	4.7×10^5 4.1×10^5	3.8×10^5	3.8×10^5
軸圧縮 (tf/m)	4.9×10^5 4.5×10^5	9.0×10^5 8.9×10^5	9.3×10^5	1.3×10^6
水平曲げ (tfm/rad)	3.9×10^7 3.6×10^7	-	5.0×10^7	-

注) 換気塔～函体間継手の剛性は、上段が港区側、下段が南港側の値。

5. 計算結果

トンネルに生じた最大断面力の分布を図-7に示す。また、函体の絶対最大断面力と柔継手の最大変形量を、表-3に示す。

(1) 函体の断面力

図-7より、ガスケットの違いによる函体断面力の差は小さく、また地震波の違いによる差もあまり大きくない。つまり、柔継手の剛性はトンネル剛性に比べて十分小さいので、応答変位法で言う地盤変位の伝達率の変化が小さくなっていること、地震波の周期特性の違いは、変位振幅には現われるものの、トンネル軸方向の卓越モードの変化には至らずトンネル各地点間の相対変位は同程度であったことが分かる。

(2)柔継手の止水性とガスケットの圧縮反力

継手の開き量は連結材に支配されるため、図-7、表-3のようにほぼ同じ値が生じている。したがって、柔継手の止水性は、初期圧縮量の違いに支配されることになる。初期圧縮量は、トンネルの沈設される水深と図-6の圧縮特性曲線で決まるため、背の高い軟らかいゴムガスケットが有利となる。しかし、初期圧縮量が大きいガスケットは常時高ひずみを受けていること、軟らかいゴムは引き裂き強度が低いこと、背の高いガスケットはクリープによる永久変形量も大きいこと等を、考慮して耐震設計を行なう必要がある。

また、水圧・地盤沈下・温度変化・地震を合成した最大圧縮量は大きく、図-6の特性曲線の急勾配の部分に達するが、過大な圧縮量が作用する場合は、ガスケットに悪影響が生じないようにストッパーを設ける必要がある。

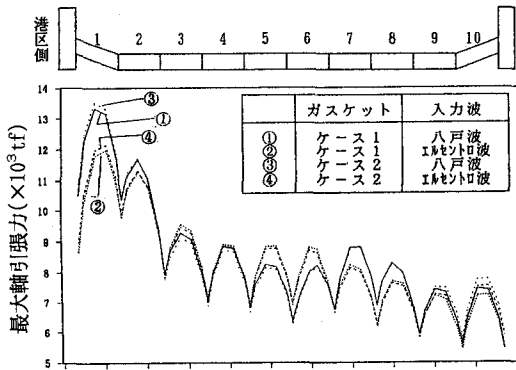


図-7(a) 最大引張軸力分布

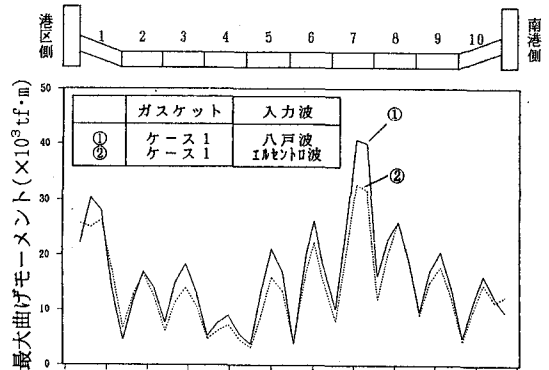


図-7(b) 最大曲げモーメント分布

表-3 解析結果一覧

ゴムガスケットの種類	入力地震波	軸方向加振		水平直角方向加振	
		軸圧縮	軸引張		
ケース1	八戸波	N=16600tf δ _N =25mm	N=13300tf δ _N =23mm	M=30400tf・m δ _M =8mm	S=2030tf δ _S =33mm
	エルセントロ波	N=16400tf δ _N =21mm	N=12000tf δ _N =22mm	M=26400tf・m δ _M =9mm	S=1960tf δ _S =34mm
ケース2	八戸波	N=21700tf δ _N =20mm	N=13500tf δ _N =23mm	—	
	エルセントロ波	N=20400tf δ _N =18mm	N=12200tf δ _N =22mm	—	

注1) N, M, Sは函体の最大断面力。 3) δ_Mは継手の回転に伴う開き量。
 2) δ_Nは軸力による継手の伸縮量。 4) δ_Sは継手の水平せん断ずれ。

6. まとめ

本トンネルでは、連結ケーブルの長さを調整して継手の開き量をコントロールし、圧縮に対しては強度の高い安定したゴム材料を採用することとした。柔継手を採用することにより、地盤沈下の影響の小さい函体では、トンネル軸方向筋は配力筋程度で十分な設計耐力を確保できている。

参考文献

- 1) Kataoka, S., T. Soejima and T. Koizumi: OSAKA PORT UNDERSEA TUNNEL DESIGNED AS A COMPOSITE STRUCTURE, PROC. OF THE THIRD INTERNATIONAL CONFERENCE ON STEEL-CONCRETE COMPOSITE STRUCTURES
- 2) 小島, 川合, 水谷, 松尾: 合成構造沈埋函設計指針の策定, コンクリート工学年次大会 1993
- 3) 野田, 上部, 千葉: 重力式岸壁の震度と地盤加速度, 港研報告 Vol. 14, No. 4 (1975)
- 4) 清宮, 中山, 土田: 衣浦港海底トンネル地震応答観測および地震応答計算, 港湾技研資料 No. 221 (1975)
- 5) 清宮, 藤澤, 山田, 本多: 沈埋トンネル柔継手の力学性状, 港湾技研資料 No. 728 (1992)