

(144) 波動伝播に注目したシールドトンネルの耐震性に関する考察

顧問組 前田 博司
 顧問組 須田 清隆
 岡山大学 竹宮 宏和

1. はじめに

近年、構造物が長大化かつ大型化し、従来あまり問題とされなかった数秒から十数秒に至る範囲に卓越周期を有するやや長周期型地震動による構造物の挙動の把握の重要性が認められてきている。やや長周期地震動に含まれる波動の成分には、表面波が支配的であり、長大・大型構造物の耐震安全性の検討においては、そのような地震波を考慮する必要性が指摘される。

地中線状構造物、たとえばシールドトンネルなどに対する現行の耐震設計法としては、地震波の伝播現象から見掛け上の位相差を仮定したうえで地震動（実体波）入力による評価法が採られることが多いしかし、これには様々の仮定（成層地盤、一次せん断振動モード等）があり、それらが必ずしも現実を適切に表現したものであるとは言えない。

筆者らは広域的な地形の不整形性、ならびに地盤の物性特性の不均一性を考慮したうえで地中線状構造物の合理的な動的耐震解析・設計法を研究開発中である。本報告においては、ケース・スタディとして東京湾横断道路計画にみられるような長大シールドトンネルを対象に、入力波（SV波の一種入力、ならびに進行性入力を考慮した基盤面入力、Rayleigh 波側方入力）の波動種別による応答性状の相違を比較、考察した。

2. 解析モデルと解析方法

解析の対象とした地盤は、東京湾地盤データを参考にしたもので、おわん型の基盤上に軟弱な層が堆積している複雑な地盤構成となっている。対象シールドトンネルの横断面の形状を図-1に、また縦断面に対する解析モデルを図-2に、地層区分及び地盤の物性を表-1に示す。解析のための有限要素モデルは、地盤をソリッド、シールドトンネルをベルヌーイ・オイラー梁でモデル化し、解析モデルの総要素は1408、メッシュサイズは解析周波数帯域の波動伝播を乱さない細かさで設定し、図-3に示す。

解析ケースを表-2に示す。入力地震動は、東京湾の地盤を想定して作成された固有周期1~3秒の範囲で最大加速度が140galの波形を用いた。同波形の加速度時刻歴とフーリエスペクトルを図-4に示す。この地震動は、Rayleigh 波を想定して作成されたものではないが、やや長い周期成分が卓越しているためRayleigh波と仮定することも可能であ

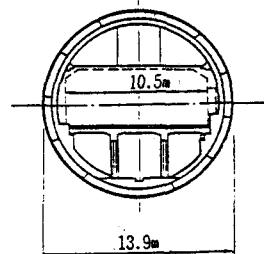


図-1 シールドトンネル横断面

表-1 地盤物性値

地層名	G (t/m ²)	Vs (m/s)	r (t/m ²)	ポアソン比	深さ h
有楽町層	1400.	100.	1.4	0.48	0.05
七号地層上部	6530.	200.	1.6	0.47	0.05
七号地層下部	11900.	300.	1.6	0.46	0.05
成田層下部粘土地層	22500.	350.	1.8	0.45	0.03
風間崎層粘土地層	29400.	400.	1.8	0.45	0.03
上地層部	99000.	700.	1.9	0.45	0.01

ると判断し、Rayleigh波として入力する場合、地表面において最大加速度を4.5 gal に調整した。

本来、実体波と表面波が同一の周波数成分をもっているはずはなく、また最大加速度の比率を1対3にする明確な根拠はない。これら実体波と表面波の強度の等価性については、現在様々な方法により研究されているが不明な点が多いため本報告では、これまでの地震観測からの知見を反映して工学的判断の基に上記のように便宜上仮定した。

Rayleigh波に対する解析は、周波数領域0～2 Hzを対象として、各周波数ごとに自然地盤での基本モードが解析領域内を伝播するものとし、FEMメッシュの底面(GL-(100 m + 1.5 λ); λ=Rayleigh波の基本波長)を固定の条件とした。

SV波の入力の解析は、0～2 Hzの周波数帯域を対象に基盤面に入射角をパラメーターとした。

表-2 解析ケース

	入力方法	波動の種類	入力地震動最大加速度	
CASE R	表面型方	Rayleigh波	4.5 gal	
CASE SV-0	基礎 入射 力界 角 17.5°	S V 波	14.0 gal	
CASE SV-10				入射角 0°
CASE SV-30				入射角 10°
CASE SV-45				入射角 30°
CASE SV-60				入射角 45°
CASE SV-60				入射角 60°

3. 解析結果および考察

各解析ケースの最大曲げモーメント分布図、最大軸力分布図を図-5、図-6に示す。

(i) 最大曲げモーメント分布について

SV波の入射角が大きくなるにつれて、立坑接合部付近のピーク値は減少し、全体的な形状もRayleigh波解析(CASE R)に似てくる。SV波の入射角が臨界角($\theta_c = 17.5^\circ$)以内の場合(CASE SV-0 CASE SV-10)は水平動と鉛直動の位相のずれは無視できる程度で、鉛直動成分は小さく、地盤は水平方向にせん断振動する。そのため立坑の運動はロッキングが卓越すると考えられる。この運動により、立坑接合部付近にピーク値が発生する。SV波の入射角が臨界角を越える(CASE SV-30 CASE SV-60)と、水平動と鉛直動の位相がずれ、地盤は波打つように運動するため、立坑のロッキングは小さくなり立坑接合部付近のピーク値は小さくなる。

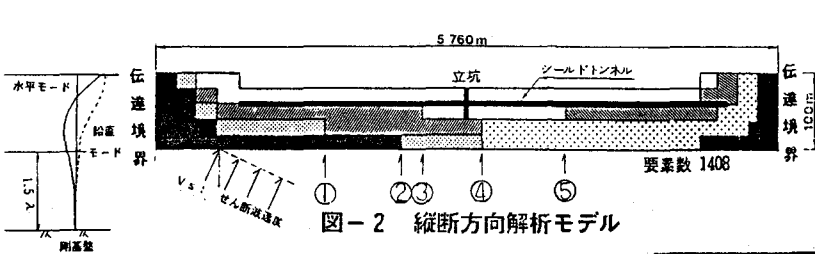


図-2 縦断方向解析モデル



図-3 メッシュサイズ

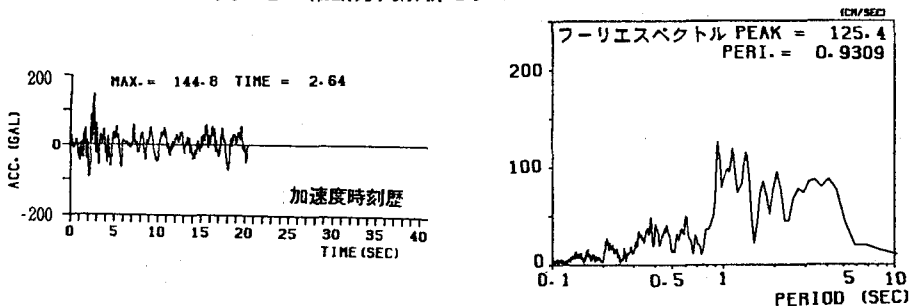
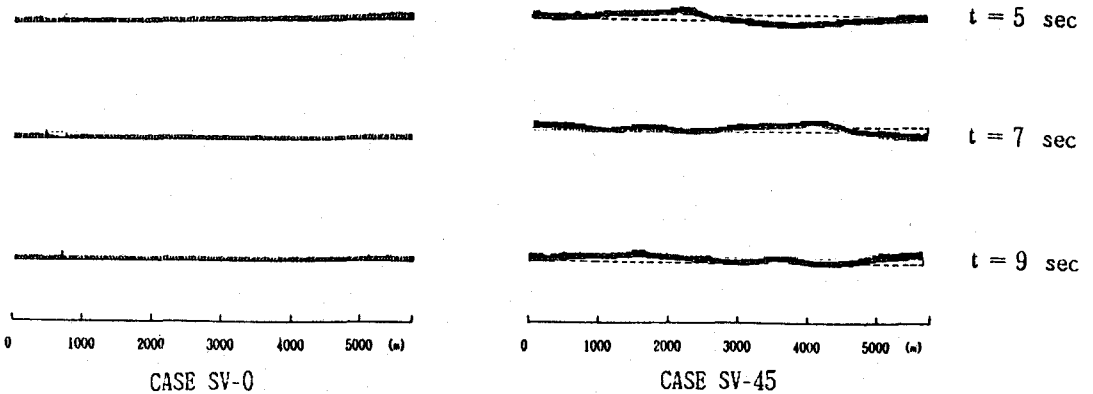
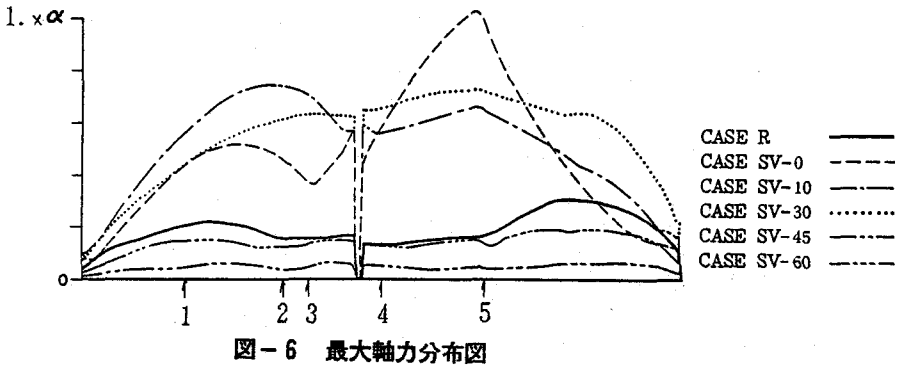
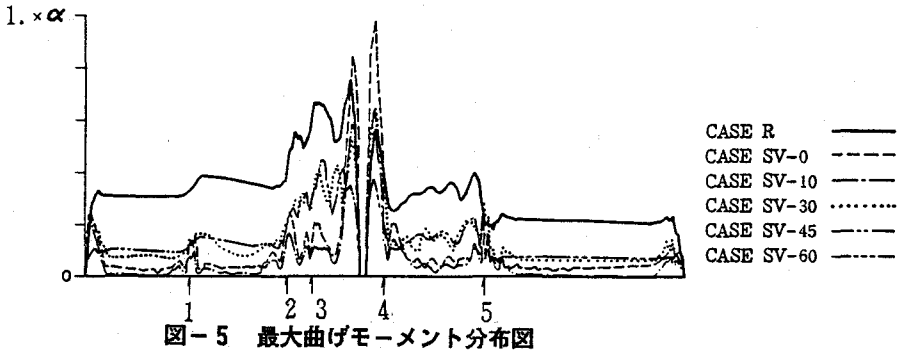


図-4 入力地震動

Rayleigh波解析 (CASE R) とSV波の入射角0度 (CASE SV-0) の解析結果を比較した場合、地層構成の急変するところにおいて、SV波の入射角0度では発生曲げモーメントが局部的に大きくなるのに対し、Rayleigh波解析は地層構成に対応して曲げモーメントが発生する傾向がある。

(ii) 最大軸力分布について

軸力は地層構成および入射角に応じて変化するが、SV波の入射角0度の場合に最大、SV波入射角45度 (CASE SV-45) 場合に最小となる。この原因として、前者では表層地盤内の位相のずれがシールドトンネル長手方向にわたり、図-7のように起こっているためであり、後者では地盤は鉛直方向に運動し、鉛直方向のせん断が卓越するためと考えられる。



(iii) 断面算定における曲げモーメントと軸力の影響

図-8に各解析ケースにおける断面の縁応力度の比率 (σ_M / σ_N) を示す。図中 (●) は、曲げモーメントが最大となるポイントでの比率、(▲) は軸力が最大となるポイントでの比率である。

SV波入射角45度(CASE SV-45)場合、軸力が非常に小さいため比率 (σ_M / σ_N) は大きな値となっている。この場合を除きRayleigh波解析(CASE R)の方が、比率 (σ_M / σ_N) が大きく、断面算定における曲げモーメントの影響が大きいと考えられる。

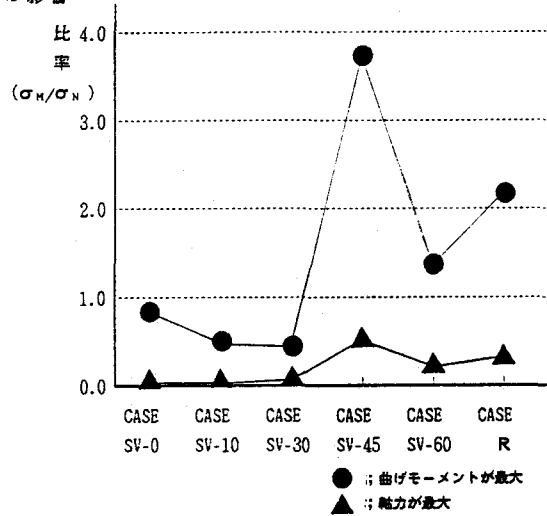


図-8 縁応力度の比率

4. まとめ

(i) 周辺地盤を広域的にとらえ、波動伝播を適切に表現した地中線状構造物の動的解析が可能となった。解析例を通して、

- (a) シールドトンネルに与える基盤の不整形、地層構成の不規則性による影響
- (b) 表面波伝播特性の影響

が認められ、耐震安全性の検討にはこれらを適切に評価することが必要であることが確認された。

(ii) 実務設計においては経済性の面より全体系簡易モデル、あるいは部分系モデルによる検討法を採らざる得ない場合があるが、その際において本報告は比較検討の一資料となりうると考えられる。

5. 今後の課題

本報告においても、多くの仮定が設定され、それぞれに対し、検討を加え改良していく必要がある。その項目としては

- ・入力加速度強度の設定方法
- ・シールドトンネルに見られる構造上の不連続性の評価
- ・シールドトンネル-地盤間のすべりによる応力の開放の評価
- ・部分系モデルとして取り扱う際の境界条件の処理方法
- ・3次元効果の評価

などがあげられる。