

開削トンネル地震時における構造目地挙動検討

首都高速道路公団 正会員 ○高橋 邦博
同 上 正会員 木下 琢雄

1. はじめに

現在、建設中である首都高速川崎縦貫線においては、大師JCTにおいて地下JCTを形成している。構造においても開削工法で施工されるものの断面においては、1層4連ボックスから2層1連あるいは単ボックスへと移行していく。

これらの中において、線状の地中構造物の地震時の挙動は、一様な地盤では軸直角方向の湾曲（正弦波形変形）と、軸方向の収縮であるが、断面変化部では、地震応答時の急変による軸直角方向の大きな水平相対変位が生じる可能性がある。当該工区付近では地層変化部は存在しないものの、ボックストンネルにおける構造・形状の変化位置付近においては、この相対変位が発生することが予想される。

本稿は、当該継手部に発生予測される最大変位量を時刻暦FEM動的解析により推定し、他の解析と比較検討したものを報告するものである。

2. 解析手法

解析手法としては、継手を挟んで別々に運動する2点間の相対変位の推定が必要であるため相対変位量の把握に適した動的解析による検討を行うものとする。

また、トンネル縦断方向の解析の必要性については、解析モデルの地層構成は同一であり、地盤の動的特性に差異はなく、着目する各ブロック（B3～B5）の延長がL=30～40mと比較的短く、構造目地間隔としては、5mmと狭く、軸方向の伸縮が生じないとの理由により縦断方向の検討は省略することにする。

また、連続する地中構造物の位相差による湾曲（正弦

波形変形）に伴う継手の空きの影響については後述する。

(1) 解析断面

解析断面は、既往の応答変位法解析において着目した1層4連のトンネル構造との接続位置、すなわち以下に示すB3とB5（2層1連トンネル構造）、B3とB4（単ボックストンネル構造）との構造目地付近の2つの断面を解析断面位置とし、FEM解析により両者の相対変位を求める。下記に平面図および断面図を示す。（図-1）

(2) トンネル横断方向

入力波形としては、既往の応答変位法による解析（1次元地震応答解析）においてレベル2タイプII（T2-B-2）地震波のケースで本トンネルの上床版～下床版間で最も大きな相対変位量が発生していることを確認している。

手法としては、動的解析結果から得られた2つの地下トンネル構造物の時刻暦変位量をもとに、継手位置に発生する層間変形角θ等及び最大相対変位δを算定する。

各ブロックの層間変形角は、すべて照査位置での許容値である1/85以下であり、構造物は安全であることを確認するとともに、相対変位量については、次表の通りとなった。（表-1）

表-1 発生変位量、相対変位および発生時刻

発生時刻 (s)	B3	B5	相対変位(mm)
	発生変位(mm)	発生変位(mm)	
5.61	60.532	49.772	10.760
発生時刻	B3	B4	
5.60	75.768	197.401	121.633

(3) トンネル縦断方向

先述した通りトンネル縦断方向については、連続する地中構造物の位相差による湾曲（正弦波形変形）に伴う継手の空きの影響を検討した。地中の線状構造物の軸直角方向の水平変形については、下記の式で表すことができる。

$$V_G(X) = V_g \sin(2\pi x/L) \quad L = 2L_1L_2 / (L_1 + L_2)$$

$V_G(X)$: 任意位置xにおけるトンネル軸直角方向の地盤変位

L: 地盤振動の波長 (L_1, L_2 は下で定義されるパラメータである) $L = 2L_1L_2 / (L_1 + L_2)$

$$= 2 \times 216 \times 383 / (216 + 383) = 276m$$

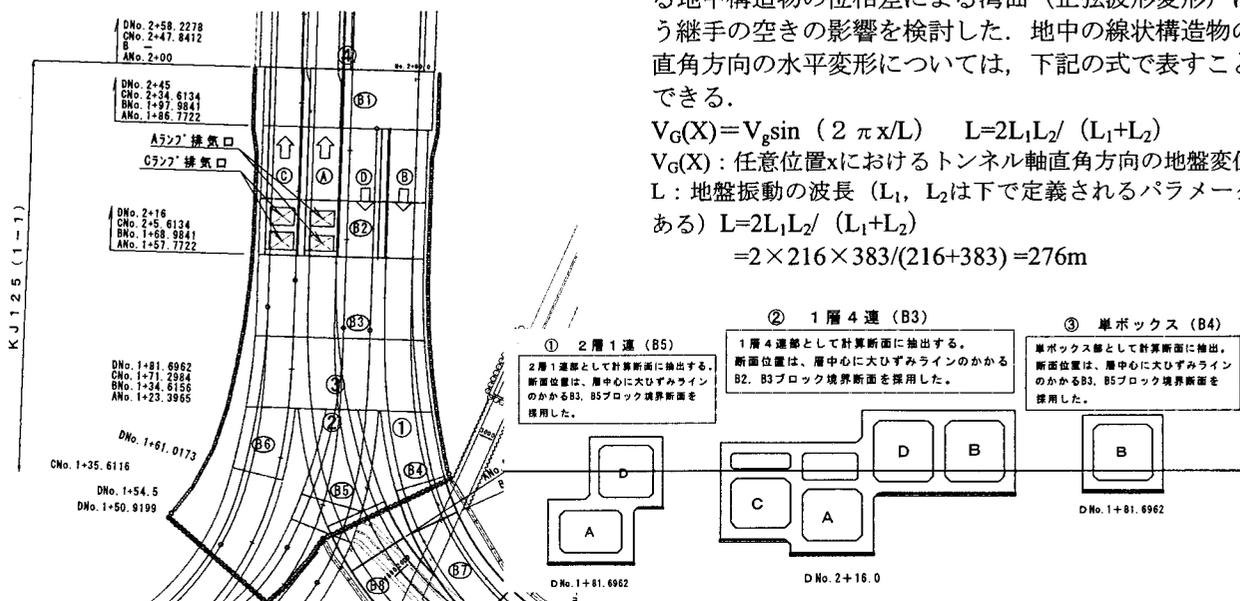


図-2 平面図および検討断面図

キーワード 構造目地, 相対変位, 動的解析

連絡先 〒221-0013 横浜市神奈川区新子安 1-2-4 首都高速道路公団神奈川建設局建設第二部設計第二課 TEL 045-439-0755

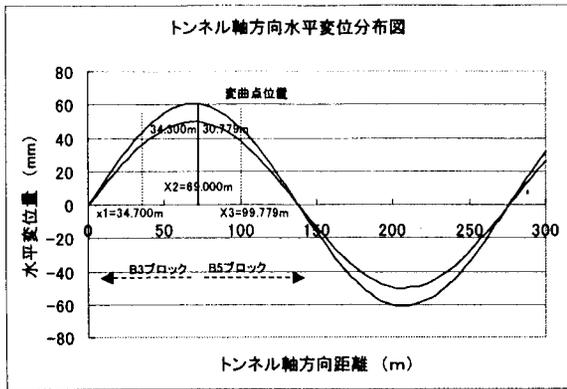


図-2 縦断方向の水平変位

したがってトンネル縦断方向の任意位置での水平変位量 $V_G(X)$ は、トンネル軸直角方向の地盤変位の振幅 V_g を定めれば、求めることができる。表-1より2ブロック間の最大相対変位発生時の絶対変位量を V_g とすると、

$$V_G(X) = 60.6\text{mm} \times \sin(2\pi x/276)$$

$$V_G(X) = 50.0\text{mm} \times \sin(2\pi x/276)$$

図-2に縦断方向の水平変位図を示す。B3及びB5の延長は、それぞれ34.300m, 30.779mである。

これにより、ブロック間の折れ角が最も厳しい条件は、正弦波形の変曲点位置($X_2=69.000\text{m}$)と継手位置が一致する場合であり、このときB3およびB5端部の位置は、それぞれ $X_1=34.700\text{m}$ および $X_3=99.779\text{m}$ である。ここで継手はトンネル軸方向力のみを伝達し、曲げを伝達しないヒンジ構造と仮定する。

変曲点を挟んで隣接する2つのブロック(B3およびB5)端部での水平変位量 δ_h の計算結果とブロック回転角 θ を下表に示す。(表-2)変曲点でのブロックの回転角 θ は、 δ_{h2} および δ_h を変曲点位置 X_2 およびブロック端部の位置($x_1=34.700\text{m}$ および $x_3=99.779\text{m}$)における水平変位から次の式で求められる。

$$\theta = (\delta_h - \delta_{h2}) / (x - x_2)$$

表-2 水平変位 δ_h および回転角 θ

	$X_1=34.7\text{m}$	$X_2=69\text{m}$	$X_3=99.779\text{m}$
	B3	変曲点位置	B5
水平変位 $\delta_h(\text{mm})$	43.0	60.6(50.0)	38.2
回転角 $\theta(\text{rad})$	5.1×10^{-4}		3.8×10^{-4}

B5の躯体幅は中床版位置において $B=18.096\text{m}$ であり、B3とB5の継手位置で地震時に生じると予想される最大相対変位発生時のブロック間の軸方向離れ量 Δy は、変曲点位置($x_2=69.000\text{m}$)において

$$\Delta_y = B \times (\theta_3 + \theta_5) = 18096 \times (5.1 \times 10^{-4} + 3.8 \times 10^{-4}) = 16.1\text{mm}$$

となる。

同様にB3とB4間の軸方向離れ量 Δy を算出すると、

$$\Delta_y = B \times (\theta_3 + \theta_4) = 11460 \times (6.4 \times 10^{-4} + 1.4 \times 10^{-3}) = 23.4\text{mm}$$

となる。

この正弦波を用い、トンネル縦断方向の任意点での水平変位量を算出する。この水平変位と前述の相対変位によりB3とB5間の合成変位を求める。合成変位の解の求め方としては、以下の2Caseとし変位量が大いほうを採用するものとする。

Case-1 最大相対変位発生時の合成変位

ブロック間の最大相対変位発生時には、軸直角方向の最大相対変位 $\Delta_{x\text{max}} = 10.8\text{mm}$ と軸方向の離れ $\Delta y = 16.1\text{mm}$ は同時刻に発生する。このとき生じる継手の相対変位は、両方向の変位を合成して求められ、 $\Delta_{\text{max}} = \sqrt{(\Delta_{x\text{max}}^2 + \Delta y^2)} = 19.4\text{mm}$ となる。

Δ_{max} : 軸直角方向の最大相対変位発生時の合成変位

$\Delta_{x\text{max}}$: 軸直角方向の最大相対変位

Δy : 軸直角方向の最大相対変位発生時の軸方向離れ

Case-2 最大軸方向離れ発生時の合成変位

同様に、最大軸方向離れ発生時の合成変位を求める。ブロック間の最大軸方向離れは最大絶対変位発生時に生じる。最大絶対変位はB3で 74.5mm ($t=10.3\text{s}$)生じている。そのときの軸方向離れが最大値 $\Delta_{y\text{max}}$ となり、

$$\Delta_{y\text{max}} = 16.1 \times 74.5 / 60.6 = 19.8\text{mm}$$

B3, B5間の同時刻($t=10.3\text{s}$)の相対変位は $\Delta x = 6.7\text{mm}$ であることから、

$$\Delta_{\text{max}} = \sqrt{(\Delta_x^2 + \Delta_{y\text{max}}^2)} = 20.9\text{mm}$$

Δ_{max} : 軸直角方向の最大相対変位発生時の合成変位

Δ_x : 最大軸方向離れ発生時の相対変位

$\Delta_{y\text{max}}$: 最大軸方向離れ

同様の検討をB3とB4間についてもCase-1のとき $\Delta_{\text{max}} = 123.8\text{mm}$ 、また、Case-2として $\Delta_{y\text{max}} = 24.1\text{mm}$ との結果を得た。

B3, B4間の同時刻($t=5.6\text{s}$)の相対変位は $\Delta x = 117.7\text{mm}$ であることから $\Delta_{\text{max}} = 120.1\text{mm}$ となった。

3. 解析結果

解析手法により絶対変位量の相違を確認するとともに、時刻層による相対変位を確認することが、今回の解析の中での着眼点となった。

絶対変位量が構造物間の相対変位に影響を与えることはいうまでもないが、構造物間の施工基面の相違が相対変位において支配的な要因となることが確認できた。

また、軸直角方向の湾曲による目地の開きは、ブロック間の相対変位量に比し、施工基面が異なるブロックにおいては、小さくなる傾向をもつことを確認した。

これらの結果をもとにした合成変位量(相対変位量: 軸方向離れ量)は、施工基面の差異による影響が、構造物の形状より大きく影響があるといえる。

4. おわりに

このようにして当該工区のようなトンネル構造にてJCTを形成し断面変化を要する構造の場合、あるいは、構造間の施工基面が異なる場合、構造目地部における相対変位・離れなどは、継手形式を決定する際に支配的な要素となるとともに、細目の検討が必須となるといえる。また、この結果をもとに適正な構造目地部の設計を行いたい。

参考文献

- ・道路橋示方書・同解説 v 耐震設計編：日本道路協会 平成14年3月
- ・地下構造物の耐震設計：川島一彦著，鹿島出版会