

立坑とシールドトンネルの地震時相互作用に関する研究

Freddy Duran c.¹・常井友也²・清野純史³・丸尾陽平⁴

¹京都大学大学院工学研究科准教授
(〒615-8246 京都府京都市西京区京都大学桂)
E-mail: f.duran@ky2.ecs.kyoto-u.ac.jp

²京都大学大学院工学研究科 (〒615-8246 京都府京都市西京区京都大学桂)
E-mail: t.tsunei@kt5.ecs.kyoto-u.ac.jp

³京都大学大学院工学研究科教授 (〒615-8246 京都府京都市西京区京都大学桂)
E-mail: kiyono@quake.kuciv.kyoto-u.ac.jp

⁴旧京都大学大学院工学研究科 (〒615-8246 京都府京都市西京区京都大学桂)

本研究では、立坑に接続されたシールドトンネルを想定し、3次元有限要素法によって動的解析を行い、立坑を有するシールドトンネルの地震時挙動について検討した。その結果からトンネル軸直角方向および軸方向の振動において、立坑がシールドトンネルに及ぼす影響を示した。また、軸直角方向に振動する場合は、シールドトンネルの回転変形と立坑のロッキングにより生じるねじれ応力を、軸方向の振動に対しては軸応力を評価し、その発生メカニズムならびに影響について考察した。

Key Words : Shield tunnel, Shaft Interaction, Seismic response analysis

1. はじめに

地下構造物の被害事例として、1995 年の兵庫県南部地震における、地下鉄トンネルの大開駅の中柱のせん断破壊や、1985 年のメキシコ地震における地下鉄の被害、半地下の下水カルバートの軸方向の衝突・離散を繰り返した被害等が有名である¹⁾。また、同メキシコ地震では、メキシコ市のシールドトンネルにおいて立坑との接合部付近で、ねじれによるリング間ボルトのせん断破壊などの被害事例なども報告されている。このような相互作用、近接作用を含めた複雑な挙動を追跡するには、有限要素法などを用いた動的解析が必要となるが、現状では、横断面、縦断面とも応答変位法を用いることが多く、横断面では梁としてモデル化されたトンネル横断面に地盤ばねを介して地震荷重を作用させ、断面力の算出を行う。一方縦断面ではトンネル自体を梁で表現して応答変位法で静的に解いたり、ばね質点系の動的モデルを用いたりするが、FEM に代表される 3 次元動的解析が主流とは言えない。

そこで本研究では、シールドトンネルと立坑の接合部に着目し、3 次元有限要素法を用いて、シールドトンネルと立坑の相互作用がシールドトンネルの

立坑接続部に与える影響を明らかにすることを目的とする。

2. 解析モデルと解析手法

(1) 解析モデル

本研究では、構造物としてシールド工法によって建設されたシールドトンネルとそれに接続された立坑を対象とした。また、立坑がシールドトンネルに及ぼす影響を考察するために、シールドトンネルのみのモデル、立坑のみのモデル、自由地盤モデルも解析対象としてモデル化した。モデル全体および、各構造物のモデル寸法を図-3.1 に示す²⁾。なお、本来立坑とシールドトンネルの接合部には、可撓セグメントもしくは免震層を用いるのが通常であるが、本研究ではシールドトンネルと立坑接合部の局所的なひずみの伝達メカニズムを明らかにするためにシールドトンネルと立坑は剛結合されているものとした。

また、図-1 から図-4 中に示すように、原点はトンネル横断面の中央に定義し、トンネル軸に水平直角方向を X 軸、トンネル軸方向を Y 軸、トンネル軸に

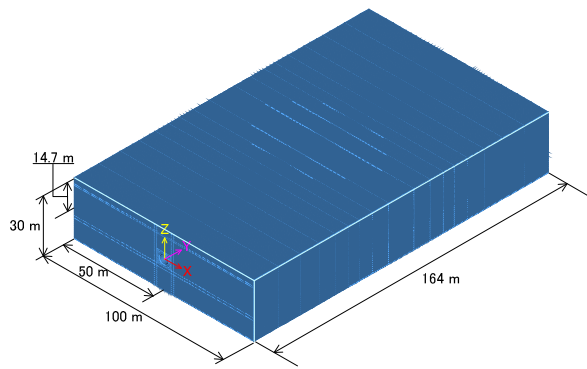


図-1 モデル全体の寸法

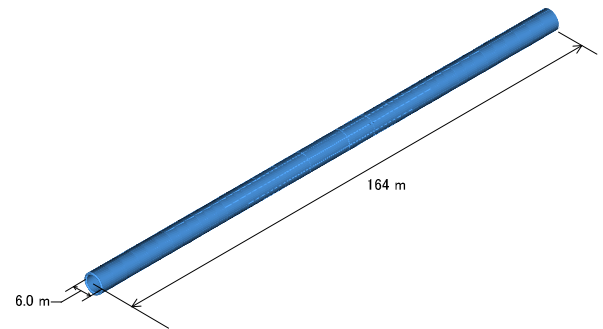


図-3 シールドトンネルのみのモデルにおけるトンネルの寸法

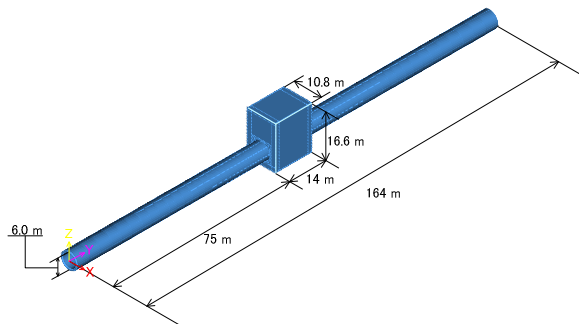


図-2 立坑接合モデルの構造物の寸法

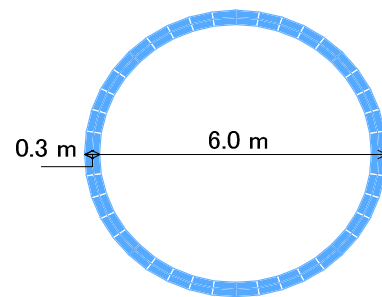


図-4 シールドトンネルの断面寸法

鉛直直角方向をZ軸とし、以降はこの座標系で表わすものとする。地盤領域はX軸方向に100[m]、Y軸方向に164[m]、Z軸方向に30[m]とし、シールドトンネルの横断面の中心位置は、地表面から14.7[m]に位置するものとする。シールドトンネルは径が6.0[m]、セグメント厚さが0.3[m]、トンネル長さが、立坑との接合モデルでは立坑壁面まで75[m]、シールドトンネルのみのモデルは164[m]となっている。立坑は中心位置がY=82[m]で、幅が10.8[m]、奥行きが14[m]、高さが16.6[m]、壁厚・床厚が1.4[m]、天井厚が0.7[m]となっている。また、シールドトンネルとはY=75[m]、89[m]の位置で剛結合されている。境界条件としては底面を固定とし、側方はZ軸方向のみを固定とした。

(2) 解析諸元

解析に用いた地盤及び構造物の解析諸元を表-1に示す。本来地盤は多層構造であり、多層モデルを考える事が通例であるが、本研究では特にシールドトンネルの挙動に着目するために、せん断波速度 $V_s = 200$ [m/s]の1層のみとした。地盤の単位体積重量・ポアソン比は表-1に示している通りである。また、立坑とシールドは鉄筋コンクリートとしそのパラメータも示してある。

表-1 解析諸元^{3)、4)}

	地盤	立坑	シールドトンネル
単位体積重量 (kN/m ³)	17.66	24.03	24.03
ポアソン比	0.49	0.167	0.167
せん断波速度 (m/s)	200	2050	574
弾性係数 (kN/m ³)	-	2.45×10^7	1.92×10^6
レイリー減衰 α	0.516		
レイリー減衰 β	0.0037		

(3) 入力地震動

動的解析においては入力波として、堤内・小林・岩楯らの研究においても用いられた鉄道構造物等設計標準・同解説・耐震設計編のL2地震のスペクトルⅡ・G1地震動の9秒から24秒を用いた。⁴⁾ その加速度波形を図-5に、加速度応答スペクトルを図-6に示す。この図より、最大加速度749.6[gal]、卓越周期が1.2[sec]付近であることが分かる。いずれの場合もX軸方向とY軸方向に入力した。また、上述した解析ケースを表-3.3にまとめて示す。

次章の第3章では各モデルの震動特性を評価するために、入力波として正弦波を用いた。その振幅は図-7に示すように100[gal]で、振動数は1.67[Hz]とした。

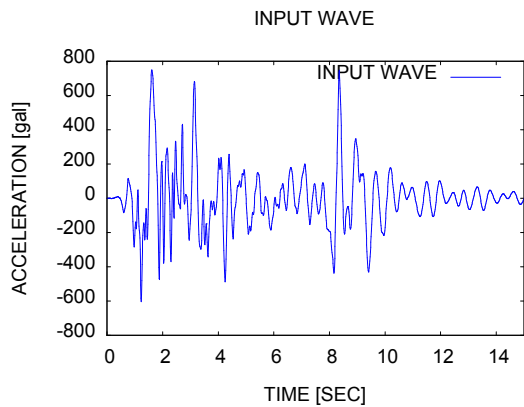


図-5 入力加速度波形

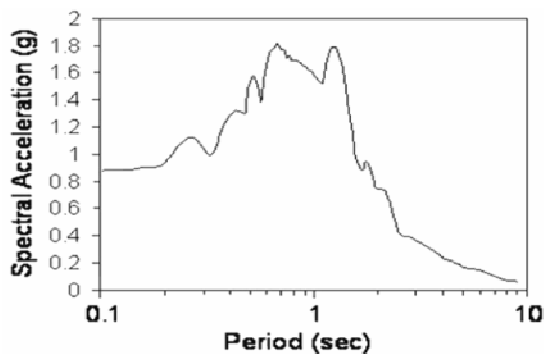


図-6 加速度応答スペクトル

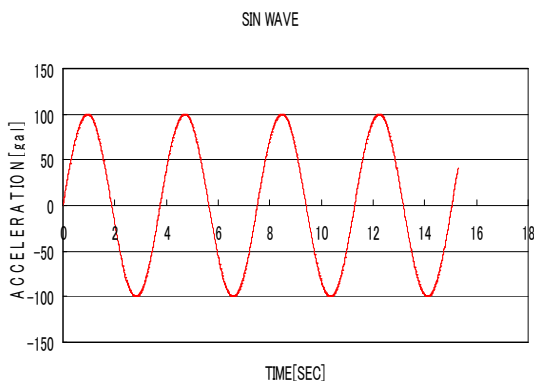


図-7 正弦波波形

3. 動的相互作用の影響

(1) 軸直角方向の動的相互作用

本節では軸直角方向に正弦波を入力した際の動的相互作用について考察する。着目する点として、シールドトンネル上端にてせん断ひずみ γ_{xy} が最大になる点((X,Y,Z)=(0, 72, 3))における、変位応答時刻歴およびひずみ γ_{xy} 応答時刻歴を図-8、図-9に示す。X軸方向の変位は、最大はT=9.86[sec]で立坑接続モデルが-0.93[cm]でシールドトンネルのみと自由地盤モデルが-1.04[cm]で約89[%]の値となった。またせん断ひずみ γ_{xy} においては、立坑接続モデルの

み非常に大きな値となっており、A点においては立坑により変位が拘束され、また立坑のロッキングにより大きなひずみ γ_{xy} が生じていることが考えられる。

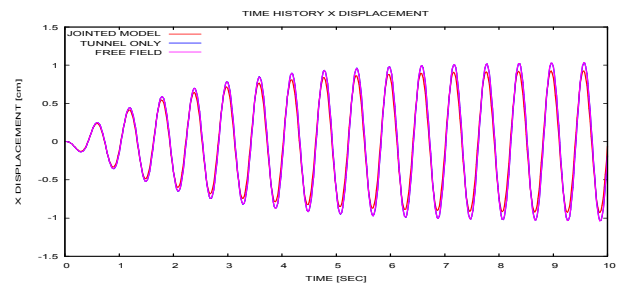


図-8 変位応答時刻歴（軸直角方向）

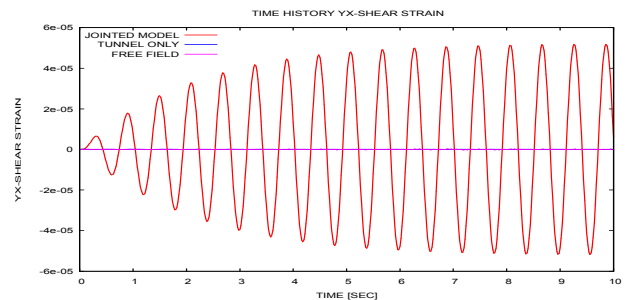


図-9 せん断ひずみ γ_{xy} 応答時刻歴（軸直角方向）

(2) 軸方向の動的相互作用

軸直角方向の振動と同様に、目する点として、シールドトンネル上端にてトンネル軸方向軸ひずみ ϵ_{yy} が最大になる点((X,Y,Z)=(0, 68, 3))における変位応答時刻歴およびひずみ ϵ_{yy} 応答時刻歴を図-10、図-11に示す。変位応答は立坑接続モデルで-0.87[cm]、シールドトンネルのみのモデルで-0.97[cm]、自由地盤で-1.03[cm]のY軸方向変位が生じており、立坑接続モデルはトンネルのみのモデルに比べ、94[%]の変位となっている。またY軸方向軸ひずみ ϵ_{yy} はトンネルのみのモデル並びに自由地盤とは正負反対のひずみが生じている。これは前節に示した通り、立坑のY軸方向のロッキングの影響により軸ひずみに位相差が生じたものと考えられる。

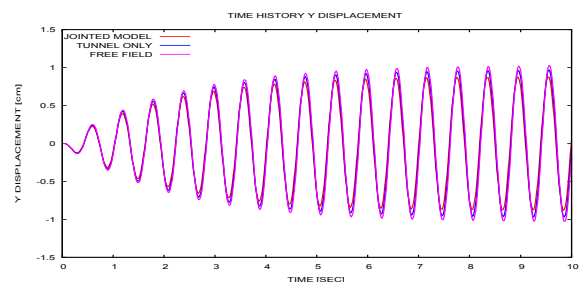


図-10 変位応答時刻歴（軸方向）

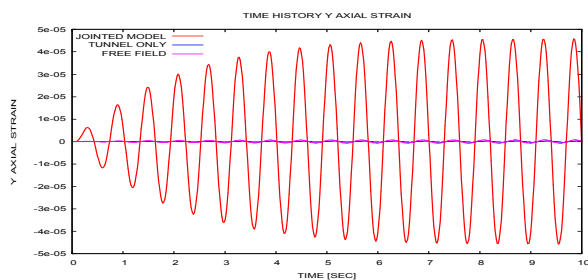


図-11 軸ひずみ ϵ_y 応答時刻歴（軸方向）

4. 立坑を有するシールドトンネルの地震応答

(1) 軸直角方向の地震応答

トンネル軸直角方向に振動を加える場合、立坑のロッキングとシールドトンネルの回転変形により、立坑接続部付近にねじれが生じていると考えられる。そこで図-12にねじれモーメント分布図を示す。図-12より、ねじれモーメントの値は $Y=73[m]$ に近づくにつれ大きくなり、 $Y=73[m]$ の位置にてねじれ応力の値は $1129[kN/m^2]$ となった。シールドトンネルのねじれ応力の値に対しては、コンクリートの許容ねじり応力⁵⁾は $3200\sim6000[kN/m^2]$ となっており、破壊には至っていないものと考えられるが、立坑接続部付近に比較的大きなねじれ応力が発生することは明らかである。

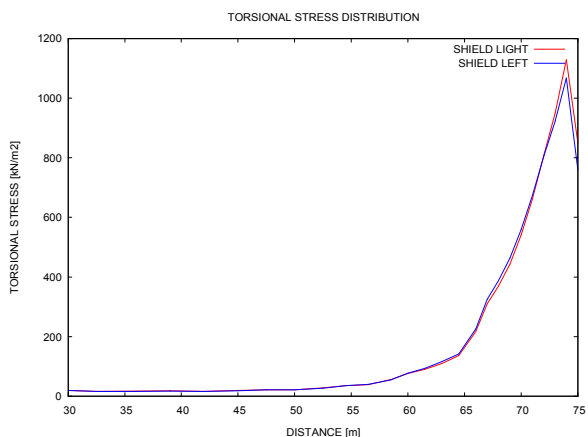


図-12 ねじれ応力分布図

(2) 軸方向の地震応答

トンネル軸方向に振動を加える場合、立坑接続部付近に大きな軸応力が発生する。そこで図-13に軸応力分布図を示す。軸応力はひずみ同様に $Y=68[m]$ でシールドトンネル約 $1500[kN/m^2]$ の引張が、下端では $750[kN/m^2]$ の圧縮が生じている。軸応力の値に対しては、シールドトンネル設計・施工指針⁶⁾にあるように、設計基準強度によってセグメント用の圧縮応力度が定められており、その値は $16000\sim22000[kN/m^2]$ となっているため、今回算出された値においては軸方向にも軸力による破壊には至っていないものと考えられるものの、立坑接続部付

近に軸応力が集中することは明らかである。

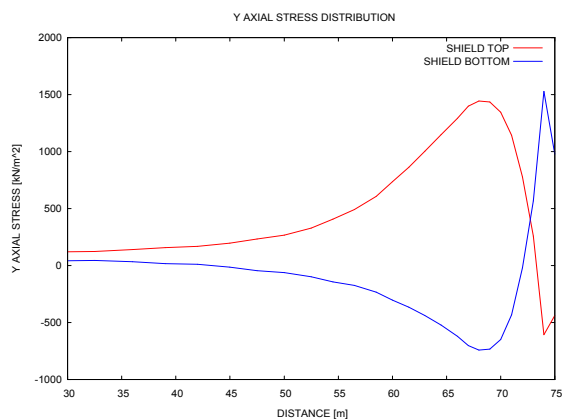


図-13 軸応力分布図

5. 結論

本研究では正弦波により構造物間の相互作用について示し、実際の地震動を入力した際の立坑を有するシールドトンネルの地震挙動について明らかにした。しかし現状では、異種構造物間の耐震性能や限界状態ならびに損傷状態および横断・縦断面に対する照査基準は明らかになっていない。そのため、今後は本研究で取り扱ったような立坑を有したシールドトンネルの動的解析を積極的に行い、ケーススタディを増やすことで照査基準を明らかにすることが望まれる。

参考文献

- 1) 竹内 雄：大地震と地下構造物の安全性-報道の参考資料として-，株式会社日水コン 下水道本部，2009年，10月
- 2) 丸山 雅淑，岡田 一郎，鈴木 猛康：立坑接合部における免震シールドトンネルの地震応答解析，第10回日本地震工学シンポジウム，pp. 2875-2878，1998，
- 3) 鈴木 猛康，粕田 金一，田中 港，小林 正宏：都市トンネルの免震構造のためのシリコン系材料に関する実験的研究，熊谷組技術研究報告，第54号，1995年，10月
- 4) 堤内 隆広：近接する複数の地下構造物の地震時相互作用に関する研究，京都大学大学院工学研究科都市社会工学 修士論文，2009年2月
- 5) 東北地方整備局：設計施工マニュアル[橋梁編]，株式会社東北建設協会，pp. 5-21，2005年
- 6) 社団法人 日本道路協会：シールドトンネル設計・施工指針，丸善株式会社出版事業部，pp. 209-214，2010年

Seismic Interaction Performance of a Shield Tunnel Connected to a Shaft

Tomoya Tsunei , Freddy Duran C , Junji Kiyono and Yohei Maruo

In this study, a shield tunnel connected with a vertical shaft is assumed; A Three-dimensional dynamic analysis by using the finite element method is performed. It aims to clarify the seismic performance of the shield tunnel connected with a shaft. The analysis result shows the effect which the shaft influences the shieldtunnel in the longitudinal direction and right-angled direction of the shieldtunnel. When the vibration is considered in the direction of the tunnel axis, torsion stress that occurs by rocking in the shaft itself and the rotational deformation of the shield tunnel is recognized. When the vibration is considered in the longitudinal direction of shield tunnel, axial stress is recongized. From these result, it is considered the influence of seismic interction performance of a shield tunnel connected to a shaft.