

新設地下構造物の地震時応答が 既設地下構造物に及ぼす影響評価

小林 孝行¹・岩楯 敞広²・武菱 邦夫³・宇都宮 博幸⁴・篠崎 哲也⁵

¹正会員 小田急建設株式会社 技術部 (〒220-0023 神奈川県横浜市西区平沼1-19-5)
E-mail:kobayasi-t@odakyu-kensetsu.co.jp

²フェロー 工博 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)
E-mail:rock-tak@ecomp.metro-u.ac.jp

³小田急建設株式会社 技術部 (〒220-0023 神奈川県横浜市西区平沼1-19-5)
E-mail:takebisi-k@odakyu-kensetsu.co.jp

⁴小田急建設株式会社 技術部 (〒220-0023 神奈川県横浜市西区平沼1-19-5)
E-mail:utunomiya-h@odakyu-kensetsu.co.jp

⁵小田急建設株式会社 技術部 (〒220-0023 神奈川県横浜市西区平沼1-19-5)
E-mail:shinozaki-t@odakyu-kensetsu.co.jp

都市部の地下には地下鉄，道路，上下水道および電力施設等の地下構造物が輻輳して構築されているが，大地震時の相互作用について十分な検討がされているとは言いがたい．このため，都市部の沖積地盤中の地下鉄近傍にシールドトンネルが新設された場合を想定し，レベル2地震動が作用した際の動的相互作用について解析的に検討した．検討では，トンネル間の離間距離およびシールドの形状をパラメータとして変化させ，既設トンネルの地震時土圧および発生断面力を評価した．

Key Words : *dynamic interaction, seismic response analysis, underground infrastructure of city*

1. はじめに

都市部においては，地下鉄，道路，上下水道および電力施設等の地下インフラストラクチャが道路直下に輻輳して構築されている．従来，地下構造物が均一な地盤中にあり，かつ土被りが大きい場合には，地震時において地下構造物に発生する変形は小さく，影響が少ないとされていた．しかし，兵庫県南部地震においては，地下構造物のうち開削工法で施工された一部の地下駅部に大きな被害が発生した．このため，開削トンネルの大地震に対する耐震性の研究および耐震設計に関する見直しが行われた．しかし，地震発生時の地下構造物相互の影響評価は，いまだ十分検討されているとは言いがたい．地下構造物の相互作用については，構造物の規模，位置関係および形状等の様々な影響要因に左右されると考えられる．本研究では，都市の地下構造物の中でも比較的規模の大きな地下鉄をモデルとし，1層2径間の既設開削トンネルの直下に新設シールドトンネルを構築した際，レベル2地震動に伴いシールドトンネルが開削トンネルに与え

る影響について，2次元有限要素法による動的応答解析（逐次積分法）により検討した．

2. 検討モデルと解析条件

(1) 検討モデル

本検討では，都市部の沖積地盤（工学的基盤深さ：24.7m）の表層より土被り5.0mの位置に構築されている1層2径間の既設開削トンネル（幅9500mm，高さ：5620mm）の直下に，以下に示す2ケースの新設シールドトンネルを構築し，位置関係，規模および形状の違いによる既設開削トンネルへの影響評価を行った．

CASE - 1 : 単線のシールドトンネル（内径7500mm）を並列にした双設シールドトンネルを構築し，離間距離 d をパラメータとして変化させた．（ $d = 2\text{ m} \sim 4\text{ m}$ ）

CASE - 2 : 双設シールドトンネルの代わりに大断面シールドトンネル（内径11000mm）を構築したモデルである（離間距離を2mとす

る)。大断面シールドトンネルは、双設シールドトンネルとの比較検討のため、双設シールドトンネルと面積および内空を含めた単位体積重量を等しくしている。検討モデル名を表 - 1 に示す。

表 - 1

モデル名	条件
Model - 1	開削トンネルのみ
Model - 2	双設シールドトンネル 離間距離 2 m
Model - 3	双設シールドトンネル 離間距離 4 m
Model - 4	双設シールドトンネル 離間距離 6 m
Model - 5	大断面シールドトンネル 離間距離 2 m

本検討に使用した断面図を図 - 1 に、解析モデルを図 - 2, 3 に示す。なお、一連の解析は汎用動的解析プログラム「TDAP」を使用した。

(2) 解析条件

解析では、シールドトンネルを線形二次元はり要素でモデル化し、開削トンネルを非線形二次元はり要素でモデル化した。非線形はり要素の復元力特性は、M - 関係としてバイリニアモデルを採用する。設定した部材の M - 関係を図 - 4 に示す。ただし、躯体は部材端に剛域を考慮し、地震時の軸力の変化は考慮していない。

つぎに、地盤は 2 次元平面ひずみ要素でモデル化し、非線形特性に修正 Ramberg-Osgood モデル¹⁾を採用している。G - , h - 関係は、土質分類に応じて建設省土木研究所の式²⁾より求めた。解析に用いる土質条件を図 - 1 に示す。

入力地震動は、鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計編³⁾の L 2 地震のスペクトル G 1 地震動(最大加速度 749.6gal)の内、9 秒 ~ 24 秒の 15 秒間を採用し、図 - 5 に示す。

その他の解析条件としては、底面は粘性境界要素、側方は 2 次元側方境界要素とし、時間積分は Newmark の法($\gamma = 1/4$), 計算時間間隔 0.002 秒とする。また、地盤および構造物の減衰は、Rayleigh 減衰とした。

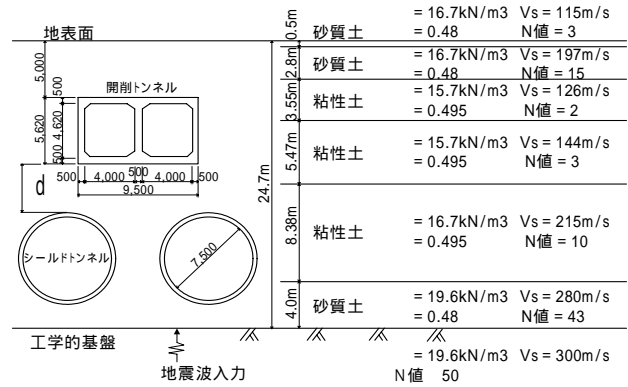
3. 解析結果および考察

本解析では、既設開削トンネル中柱上下端の相対変位が最大となる時刻における、地盤応答、直土圧、せん断土圧および断面力に着目して評価を行った。

(1) 双設シールドトンネル (CASE - 1)

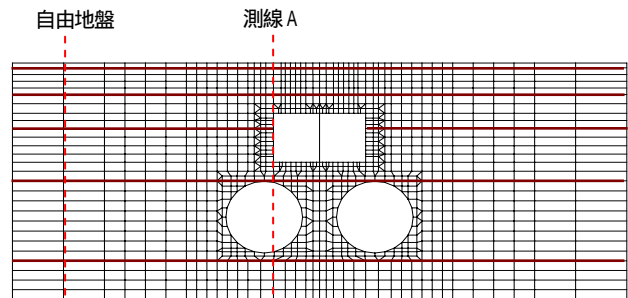
a) 地盤応答

地盤応答の比較は、図 - 2 の自由地盤測線と測線 A で行った。図 - 6 に全体変形図、図 - 7 に測線 A における地盤の絶対変位量の分布を示す。Model - 1 ~ Model - 4 は



Model - 5 では、双設シールドトンネルの位置に、大断面シールドトンネルを構築する。

図 - 1 検討断面および地盤条件



茶色線は、地層境界線を示す。

図 - 2 解析モデル(双設シールドトンネル)

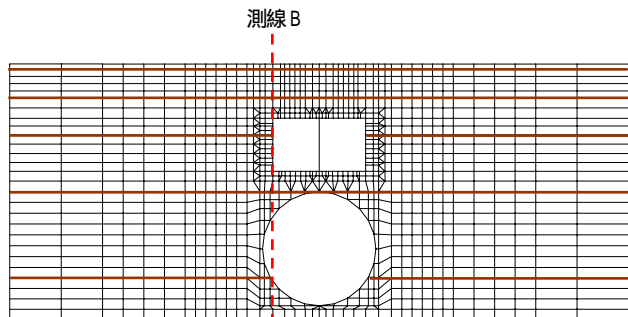


図 - 3 解析モデル(大断面シールドトンネル)

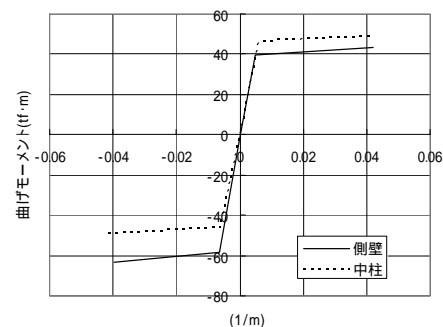


図 - 4 部材の復元力特

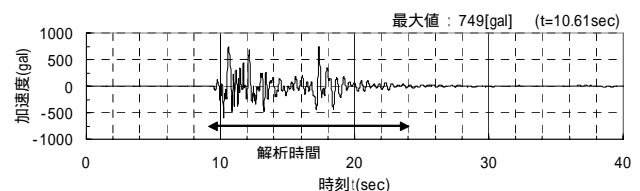


図 - 5 入力地震動

自由地盤と同様な挙動を示していることが見て取れる。また、図 - 8 は開削トンネル左側壁における上床版と下床版の相対変位を示す。相対変位は、Model - 1 が最大を示し、Model - 2 が最小を示すが、変位差は 10%程度と小さく、ほぼ同様な挙動を示していると判断する。

また、図 - 9 に加速度分布を示す。既設開削トンネル下床版の位置において、Model-1 と比較し、Model-2 で 20%程度、Model - 3 で 15%程度の加速度差を示す。また、Model - 4 は Model - 1 とほぼ同値となり、全モデルとも大きな差異は生じていない。また、自由地盤と Model - 1~4 を比較すると、開削トンネル下床版付近で幾分違うもののほとんど同様な傾向を示す。以上の結果より、構造物近傍の地盤においてもその応答は構造物の影響をあまり受けず自由地盤と同様な挙動を示すと考える。

b) 直土圧

図 - 10~図 - 13 に開削トンネルに作用する直土圧を示す。図 - 10 と図 - 11 の側壁に作用する直土圧 x では、モデルによる差異は生じていない。また、上床版に作用する直土圧 y (図 - 12) についても、モデルごとの差異は生じていない。しかし、図 - 13 の下床版に示す直土圧 y では、シールドトンネルの無い Model-1 と比較し、Model-2~Model-4 は既設開削トンネル中柱より右側では相対的に増加する傾向にあり、左側では減少の傾向にある。最も変動の大きな Model-2 は Model-1 と比較し 5tf/m^2 程度の増加・減少を示す。これは、図 - 6 の全体変形図で見て取れるように、シールドトンネルの変形により、中柱より右側では開削トンネル側への地盤の突き上げ現象が生じ、左側では地盤の引き込み現象が生じ直土圧 y を変化させたと考える。

c) せん断土圧

図 - 14 に Model - 2 におけるせん断土圧の分布を示す。せん断土圧は、シールドトンネルの天端と側面（水平および鉛直方向）で増加し、肩部（中心より水平方向を 0 度とした場合の上下左右各 45 度）で減少する傾向にある。これは、地震動によるせん断変形に伴いシールドトンネルが楕円型に変形し、シールドトンネルの肩部では、地盤のせん断変形を抑制するような挙動となり、シールドトンネルの天端および側面で助長する挙動となる為であると思われる。既設開削トンネルの下床版は両シールドトンネルの 45 度もしくは 135 度の方向に位置しているため、せん断土圧 (図 - 18) が、シールドトンネルの無い Model - 1 と比較し、Model - 2~Model - 4 は小さな値を示す。そして、開削トンネルとシールドトンネルの離間距離が少ないほど小さな値を示す傾向にある。特に

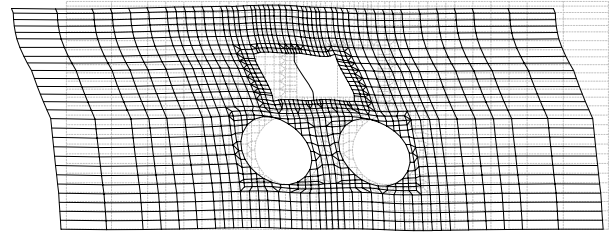


図 - 6 全体変形図

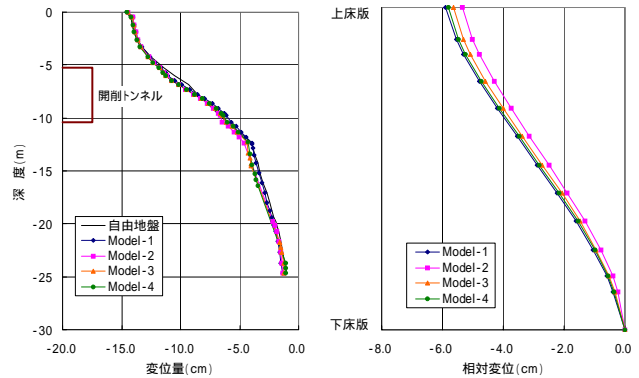


図 - 7 地盤変位分布

図 - 8 開削トンネル側壁部 相対変位

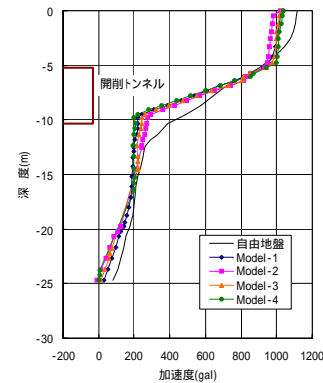


図 - 9 地盤加速度位分布

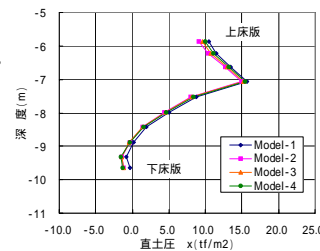


図 - 10 左側壁直土圧

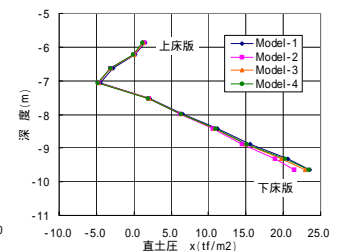


図 - 11 右側壁直土圧

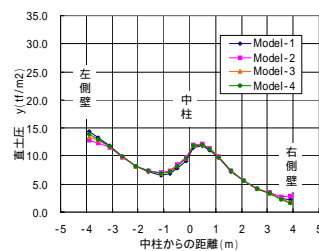


図 - 12 上床版直土圧

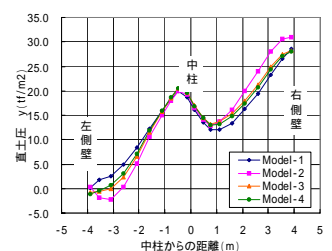


図 - 13 下床版直土圧

Model - 2 の中央部のせん断土圧は Model - 1 より 25%程度減少した。また、上床版のせん断土圧（図 - 17）は全モデルともほぼ等しい値を示した。また、側壁のせん断土圧（図 - 15, 16）に関しては、Model - 2 が最大を示す。次いで、Model - 3 および Model - 4 となり、Model - 1 が最小となる。しかし、Model - 1 と Model - 2 の差は 8%程度小さなものである。

d)開削トンネルの断面力

図 - 19、図 - 20に開削トンネルの断面力を示す。せん断力および曲げモーメントにおいて、全モデルともほぼ同等な値となる。直土圧およびせん断土圧の変動が少なく、断面力も変わらない結果を得た。

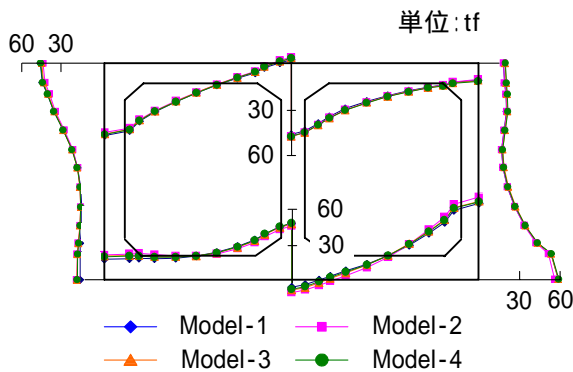


図 - 19 せん断力比較図

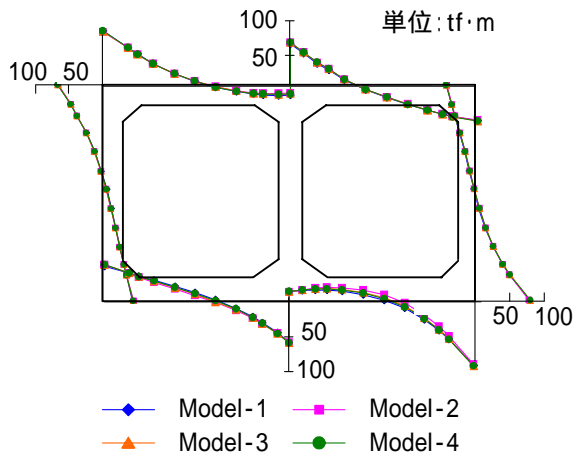


図 - 20 曲げモーメント比較図

(2) 大断面シールドトンネル (CASE - 2)

解析結果の比較をModel - 1およびModel - 2で行った。

a)地盤応答

地盤応答の比較は図 - 2の自由地盤測線，測線Aおよび図 - 3の測線Bにて実施する。図 - 21に地盤の絶対変位量を示し，図 - 22に地盤の加速度分布を示す。全モデルとも自由地盤とほぼ同様な挙動を示している。シールドトンネルの形状を変更しても構造物は周辺地盤の動き

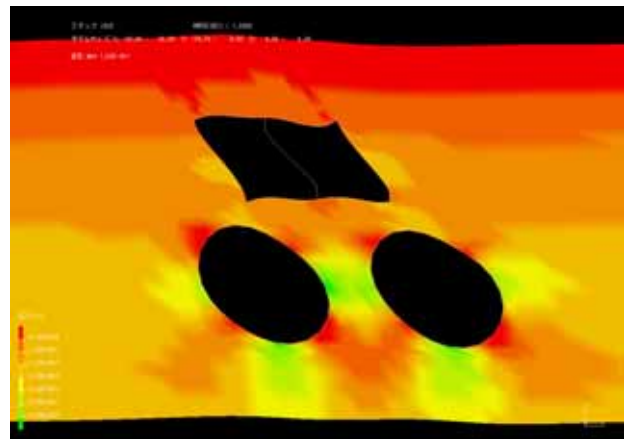


図 - 14 Model - 2のせん断土圧分布

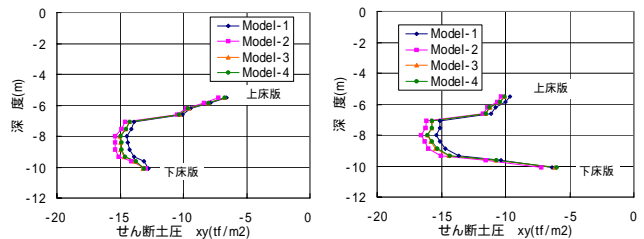


図 - 15 左側壁せん断土圧

図 - 16 右側壁せん断土圧

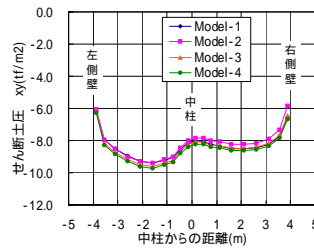


図 - 17 上床版せん断土圧

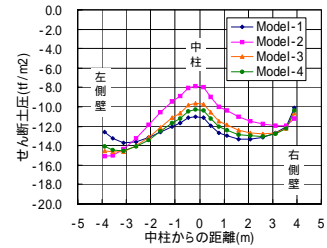


図 - 18 下床版せん断土圧

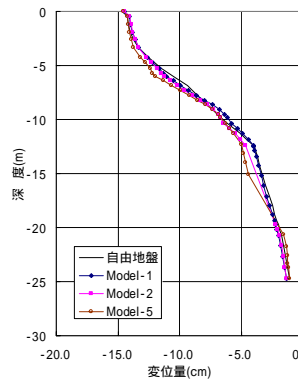


図 - 21 地盤変位分

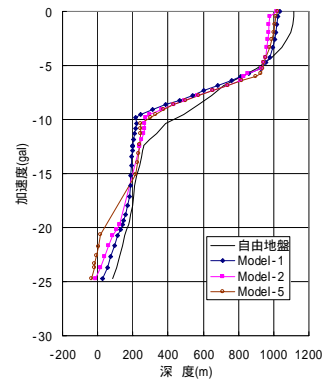


図 - 22 地盤加速度位分

に追従しているものと考えられる。

b)直土圧

直土圧では、側壁に作用する土圧を x で表し，上床版，下床版に作用する土圧を y で表現した（図 - 23 ~ 図 - 26）。下床版以外は，Model 1およびModel - 2と比較しほぼ等しい傾向および値となる。下床版では，下部

のシールドトンネルの変形に伴う突き上げと引き込みが、シールドトンネル形状の違いにより生じており、Model-5はModel-2とは逆になり、中柱より右側でModel-1より40%程度減少し、左側で30%程度増加の傾向にある。その他、側壁および上床版では、ほぼ等しい値となる。

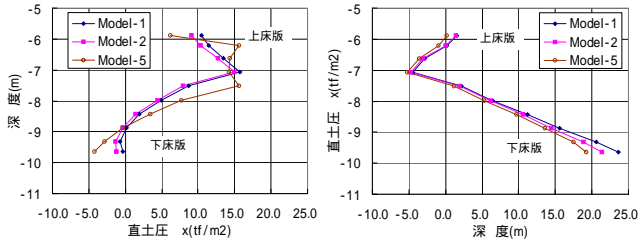


図 - 23 左側壁直土圧

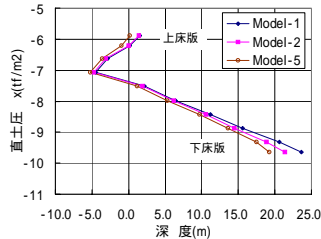


図 - 24 右側壁直土圧

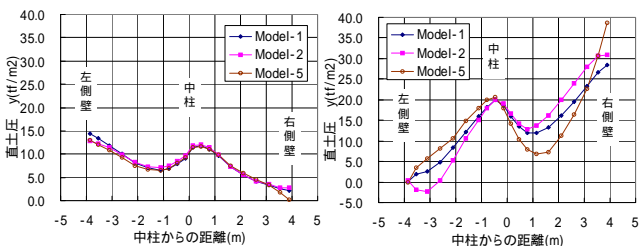


図 - 25 上床版直土圧

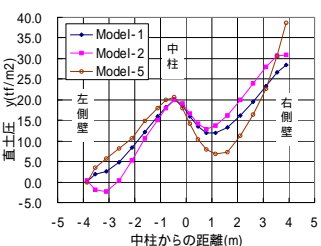


図 - 26 下床版直土圧

c) せん断土圧

図 - 27にModel-5のせん断土圧の分布を示す。Model-2のせん断土圧の分布（図 - 14）と比較し大断面シールドトンネルの天端が開削トンネル下床版の中央に位置しているため、下床版の中央で増加の傾向にある。図 - 31に示した下床版のせん断土圧では、Model-2がModel-1より減少傾向を示したのに対し、Model-5は増加の傾向にある。特に、中央付近ではModel-1の約1.5倍となっている。また、上床版と側壁のせん断土圧は（図 - 28～図 - 30）、側壁では、減少する傾向にあり、上床版では増加する傾向にあるが、その量はわずかである。

d) 開削トンネルの断面力

図 - 32にせん断力の分布を示し、図 - 33に曲げモーメントの分布を示す。下床版のせん断土圧の増加に伴い、曲げモーメントおよびせん断力ともModel-5が幾分大きな値を示すが、ほぼ等しいものとなっている。下床版のせん断土圧の増加が断面力に与える影響は少ない結果を得た。

4. おわりに

本検討は、既設の開削トンネルの直下にシールドトンネルを新たに構築したモデルにレベル2地震動を作用させた場合、開削トンネルに与える影響がいかなるものか

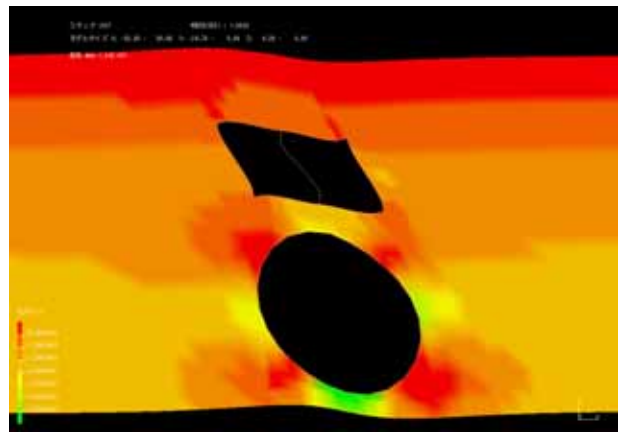


図 - 27 Model-5のせん断土圧分布

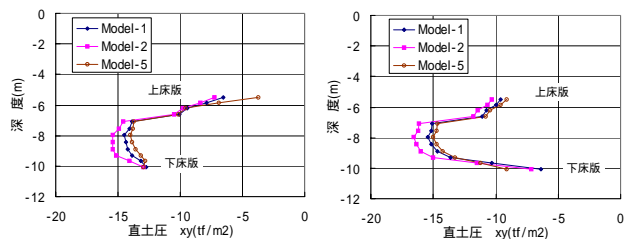


図 - 28 左側壁せん断土圧

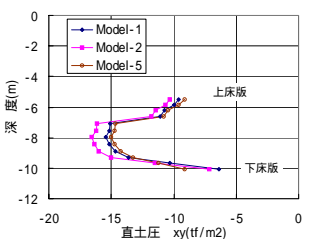


図 - 29 右側壁せん断土圧

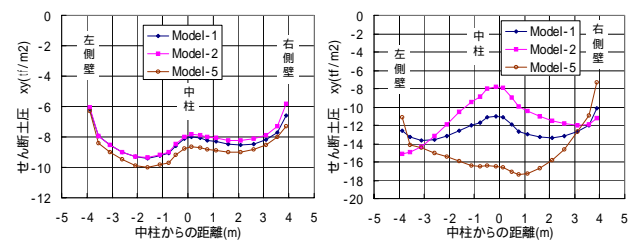


図 - 30 上床版せん断土圧

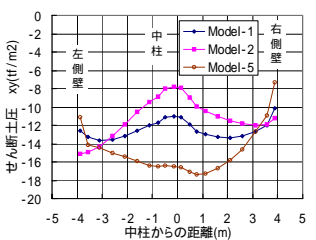


図 - 31 下床版せん断土圧

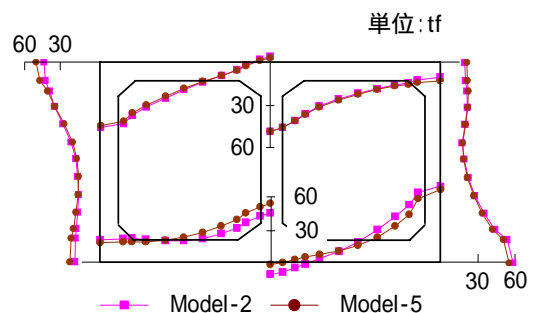


図 - 32 せん断力比較図

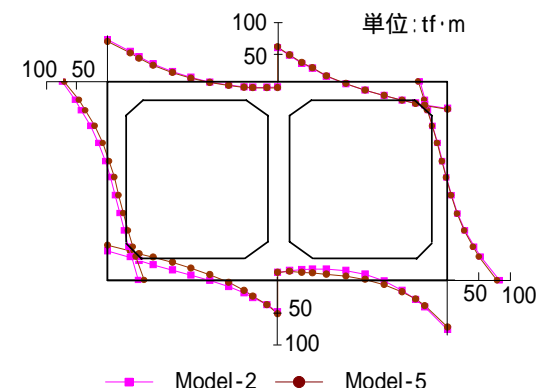


図 - 33 曲げモーメント比較

を位置，規模および形状を変化させて解析的に行った．その結果，以下の結論を得た．

開削トンネルの相対変位および加速度はシールドトンネルのある無しにかかわらず同じであり，トンネル周辺地盤の変形および応答を受ける．

開削トンネルに作用する土圧については，下床版においてシールドトンネルの形状の影響を受け増減する．その影響は双設シールドトンネルよりも大断面トンネルが大きく，特に，せん断土圧においては，開削トンネルのみのモデルと比較し約1.5倍（中央部）となる．

全体的に開削トンネルに作用する土圧の増減は少なく，断面力の変動は少ない．

以上より，本解析では，開削トンネルの地震時応答は，地盤の変形および応答の影響を強く受け，直土圧およびせん断土圧に大きな変動は無く，断面力も変わらない結果を得た．しかし，構造物の埋設深さや地盤との剛性比は様々であり，今後も検討を重ね，地下構造物の相互作

用について解明することが重要である．

謝辞：本検討は，首都大学東京大学院の岩楯研究室の研究活動の一環として行ったものである．(株)アーク情報システムを始め関係各位に対し，ここに記して謝意を表する．

参考文献

- 1) 土木学会：開削トンネルの耐震設計(トンネルライブラリー第9号)，平成10年10月
- 2) 建設省土木研究所：地盤の地震時応答特性の数値解析法 - SHAKE：DESRA - ，土木研究所資料第1778号，1982
- 3) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説(耐震設計)，平成11年10月