

近接して交差する2つの線状地下構造物の 地震時相互作用に関する研究

堤内 隆広¹・清野 純史²・小野 祐輔³

¹京都大学大学院工学研究科
(〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂)

E-mail:tsutsumiuchi@quake2.kuciv.kyoto-u.ac.jp

²京都大学大学院工学研究科教授 (〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂)

E-mail:kiyono@quake.kuciv.kyoto-u.ac.jp

³京都大学大学院工学研究科助教 (〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂)

E-mail:ysk@quake2.kuciv.kyoto-u.ac.jp

近年、都心部の直下において多数の地下構造物が近接して構築されており、複数の地下構造物と地盤からなる系の相互作用、近接作用を含めた地震時挙動は複雑なものとなる可能性があるが、特に3次元の相互作用、近接作用に着目した研究事例がないという現状がある。そこで本研究では、3次元領域でしか扱えない解析対象として、既設のトンネルの直下に3次元的に交差する形で新規にトンネルを構築した系を想定し、そのような系に地震動が作用した際の相互作用の影響について、主に既設トンネルの軸線の変形や横断面内での変形に着目して検討し、既設トンネルの応答が新規トンネルの直上付近で低減することで、軸線の曲げ変形や横断面内への変形に近接作用の影響が生じることを確認した。

Key Words : dynamic interaction, underground structure, three-dimensional FEM dynamic analysis

1. はじめに

近年、都心部の直下においては、地下鉄や道路トンネル、上下水道、及び電力施設など、多数の地下構造物が近接して構築されている。複数の地下構造物と地盤からなる系の地震時挙動は、地盤と地下構造物の相互作用や地下構造物同士の近接作用によって複雑なものとなる可能性がある。

近年は重要かつ複雑な形状を有する地下構造物に対しては、有限要素法などによる詳細な動的解析が行われている。山田、市村らは、曲線部を有するトンネルやトンネルランプ部を対象とした大規模な3次元有限要素法解析を行った¹⁾²⁾。また、複数の地下構造物の地震時の近接・相互作用に着目した研究事例としては、小林、岩楯らの研究がある。彼らは1層2径間の既設開削トンネルの直下にシールドトンネルを構築した際の近接作用の影響を、横断面内方向についての2次元有限要素法解析により検討を行い、既設開削トンネルへの影響は少ないという結果を得た³⁾。

しかし、複数の地下構造物間の相互作用について、3次元的な影響に着目した研究事例は見当たらない。

そこで本研究では、既設トンネルの直下に3次元的に交差する形で新規トンネルを構築するケースを

想定し、3次元有限要素法による動的解析を行い、3次元的な近接作用の影響について検討した。

2. 解析モデル及び解析条件

(1)基本モデル

本研究では、基本モデルとして、せん断波速度 $V_s=200\text{m/s}$ の単一の層からなる地盤中に、幅9.5m、高さ6m、壁厚0.5mの1層2径間の既設トンネルが位置し、その直下に6mの離隔で、軸線が直角を成すように新規トンネルが構築されるものとしてモデルを作成した。モデルの全体図を図-1に、トンネルの断面図を図-2に示す。

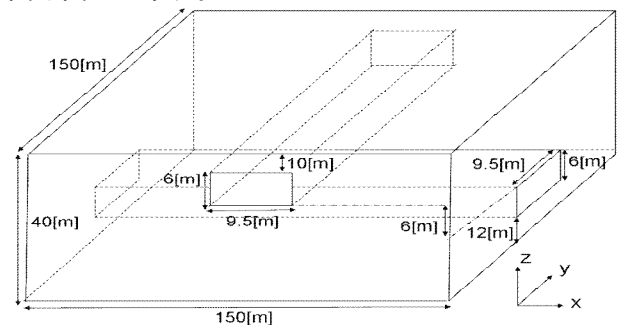


図-1 基本モデル全体図

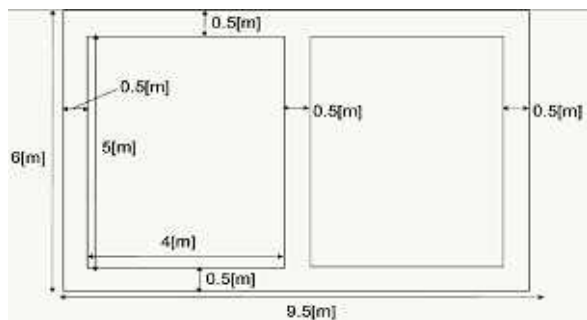


図-2 トンネル横断面図

(2)解析条件

基本モデルにおける解析では、地盤及び地下構造物に表-1に示すパラメータを設定した。解析領域は図-1に示すとおり、150m四方×深さ方向に40mを設定した。要素は全て8節点6面体要素を用いて分割し、節点数は362,900、要素数は341,275となった。境界条件は底面では固定境界とし、側面では鉛直固定、水平自由とした。

地盤及び地下構造物はいずれも線形弾性体を仮定し、地盤の非線形性については、4章で後述するとおり、基本モデルでの動的解析において発生する最大せん断ひずみが大きい領域のせん断剛性を下げるとい形で簡略的に考慮するものとした。

入力地震動は鉄道構造物等設計標準・同解説耐震設計編⁴⁾中のI2地震のスペクトルⅡ・G1地震動(最大加速度749.6gal)を採用し、既設開削トンネルの横断面方向(図-1中でx方向に相当)に入力した。入力地震動を図-3に示す。時間領域での積分には $\beta=1/4$ のNewmarkの β 法を用い⁵⁾、0.01秒間隔で15秒間の解析を行った。また、地盤及び構造物の減衰は、Rayleigh減衰を採用した⁶⁾。

表-1 基本モデルにおける物性パラメータ

	単位体積重量 γ [tonf/m ³]	ポアソン比	せん断波速度 V_s [m/s]
地盤	1.80	0.48	200.0
地下構造物 (トンネル)	2.45	0.20	2347.4

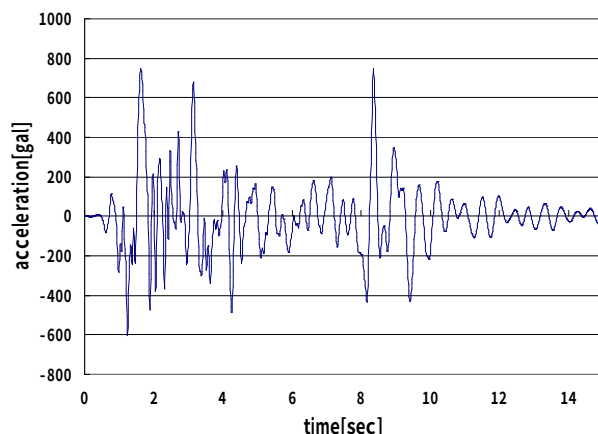


図-3 入力地震動

3. 基本モデルによる解析結果及び考察

(1)応答時刻歴の比較による考察

まず、軸線方向の位置によって上部トンネルの応答に違いが表れるかの比較を行った。図-4中に示す既設開削トンネル下床上の4点A～Dにおける変位の時刻歴を図-5に示す。なお図-4中で、点Cが下部トンネルの側壁の直上、点Dが下部トンネルの中壁の直上にそれぞれ位置し、点Cと点Bが20.25m、点Bと点Aが20m離れている。

本解析では、入力に位相差を考慮しないため、下部トンネルが存在しない場合は、上部トンネルは軸線方向の位置によらず一様の挙動を示す。それに対し、トンネルが交差して存在する場合は、図-5に示すように、点Cや点Dでは点Aに比べて変位応答が低減している。絶対加速度及び相対速度についても同様であり、点Dにおける絶対加速度、相対速度、相対変位の最大値はそれぞれ点Aにおける最大値の88.3%、88.9%、91.0%となった。

これは、地震動の入力方向が下部新規トンネルの軸線方向に一致しているため、トンネルの長手方向の見かけのせん断剛性が大きくなり、トンネル周辺の地盤の挙動が拘束された影響によるものと考えられる。この軸線方向の位置による応答の差により、軸線に曲げ変形が生じることが予想され、これは(3)において詳しく検討する。

また、既設トンネルの天端上の2点E、F(EはA、FはDのそれぞれ直上に位置する)で同様に絶対加速度、相対速度、相対変位を比較すると、点Fでの最大値はそれぞれ点Eでの最大値の92.5%、91.7%、93.4%であり、下床部に比べて応答の低減の割合は小さい。このことから、下部トンネルの影響は局所的なものであると考えられる。さらに、下床と天端で応答の低減の度合いが異なることから、下床-天端間での相対変位が変化し、横断面内での変形にも影響を及ぼすことが予想される。この点については、(2)で詳しく考察する。

下部トンネルの応答に関しては、軸線方向位置による応答の違いは見られなかった。これは既設開削トンネルが横断面内方向に地震動を受けており、その見かけの面内せん断剛性が周辺地盤のせん断剛性と大きな差が無かったためであると考えられる。よって、トンネル軸方向に対する地震動の入力方向が、近接作用の有無に影響するものと考えられる。

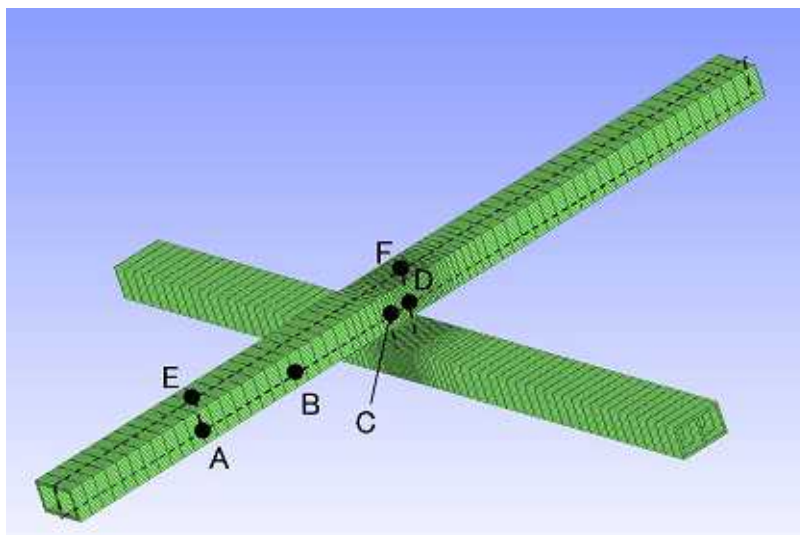


図-4 応答に着目する点

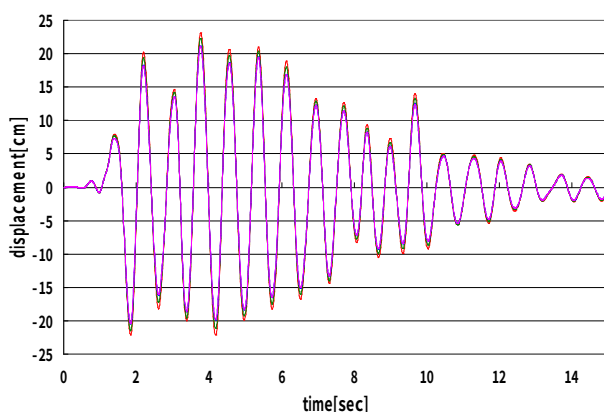


図-5軸線方向位置による開削トンネルの変位応答
(赤…点A 緑…点B 青…点C ピンク…点D)

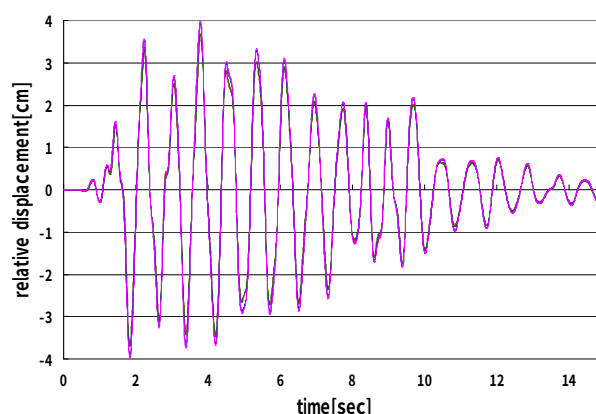


図-6 中壁における天端-下床の相対変位時刻歴
(赤…点A 緑…点B 青…点C ピンク…点D
をそれぞれ含む横断面)

(2)既設トンネルの横断面内での変形に関する考察

次に、上部トンネルの横断面内での変形に着目し、下部トンネルの近接作用の影響について考察を行う。

上部トンネルの中壁位置における下床-天端間の相対変位の時刻歴を、点Aから点Dのそれぞれを含む4つの横断面について示したものを図-6に示す。図-6より、下部トンネルの直上では、直上から離れた位置に比べ、相対変位が増大している。本解析条件において、この相対変位の最大値は、点Aを含む横断面で3.69cm、点Dを含む断面で4.00cmとなった。

これは、(1)でも考察を行ったとおり、下部トンネルの直上では、下床と天端で大きさが異なる応答の低減が生じ、それが相対変位が増大させたものと考えられる。このことから、下部トンネルが上部トンネルの横断面内での変形にも不利な影響を与えていることが分かる。

また、点Aを含むX-Z横断面での面内変形図と、点Dを含むX-Z横断面での面内変形図を、それぞれ図-7と図-8示す。これらの図より、点D含むX-Z横断面においては、下部トンネルの位置でほとんどせん断変形が生じておらず、点Aを含むX-Z横断面とは異なる変形状態を示している。一方で、上部トンネルの位置においては、ロッキングの影響はほぼ同程度であり、また変形モードも同じである。

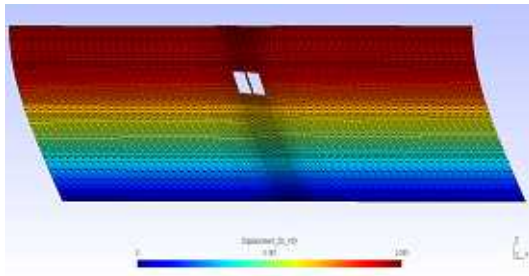


図-7 点Aを含むX-Z横断面の変形図

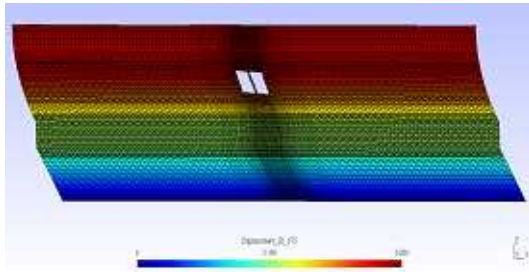


図-8 点Dを含むX-Z横断面内での変形図

(3) 上部トンネルの軸線方向の変形に関する考察

続いて、上部トンネルの軸線の曲げ変形に関する考察を行う。図-9に、上部トンネルの中壁位置における天端-下床間の相対変位が最大となる時刻におけるトンネルの軸線の曲げ変形状態を、Z軸正方向から見た図で示す。なお、図-9に示したような軸線の曲げ変形に対応して発生する応力成分として、トンネル要素に生じる直応力 σ_{yy} も示してある。

図-9より、トンネルが交差するモデルにおいては、上部トンネルの軸線方向位置による応答が一様でなくなるため、軸線の曲げ変形を生じ、この曲げ変形に対応する形で圧縮方向、引張方向の直応力が生じていることがわかる。直応力 σ_{yy} の最大値は 5800 kN/m^2 となり、またこの応力は左右の側壁でほぼ正負対称に生じているため、特に引張側の及ぼす影響について考慮する必要があるものと考えられる。

このような軸線の曲げ変形への影響は、横断面内での変形とは異なり、2次元での解析では捉えることのできない近接作用の影響として考慮する必要がある。

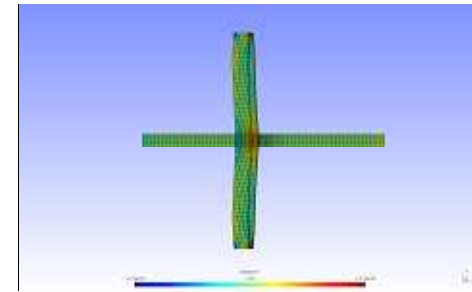
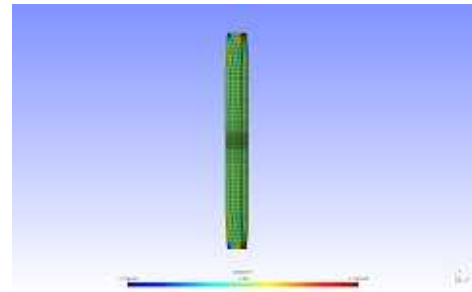


図-9 トンネルの軸線変形図及び σ_{yy} 分布図
(上…上部トンネルのみのモデル
下…トンネルが交差するモデル)

4. 地盤剛性を変化させたモデルの導入

基本モデルによる解析においては、地盤及びトンネルをいずれも線形弾性体として扱った。しかし、本研究で用いたようなレベル2地震動に対しては、地盤の非線形化を考慮する必要がある。本来は地盤の非線形モデルを導入するのが望ましいが、3次元の解析では非線形モデルを導入すると計算時間が非常に長くなってしまうこと、及び地盤剛性と相互作用、近接作用の大小のパラメトリックな傾向の把握を目的とするという理由から、基本モデルにおいて特に大きな地盤歪みの発生する箇所の地盤剛性を低下させたモデルを導入し、擬似的に地盤の非線形化が近接作用に与える影響について考察することとした。

本解析条件では、地盤の非線形化に最も影響するのは、せん断歪み γ_{zx} であると考えられる。基本モデルでの解析における、点Aを含むX-Z横断面と点Dを含むX-Z横断面内での地盤のせん断歪み γ_{zx} の最大値の分布をそれぞれ図-10、図-11に示す。

この2つの図の比較から、下部トンネルを含む横Z-X断面においては、下部トンネルよりさらに下方、及び下部トンネルの天端位置から上部トンネルの下床位置にかけてせん断ひずみが大きくなっていることが分かる。2本のトンネルの近接作用に特に影響を及ぼすのは、後者の領域の地盤剛性であると考えられるため、図-12に斜線で示す領域の地盤のパラメータを表-2に示す値に変更させたモデルについて解析を行った。

一方、実際に既設トンネルの直下に新規トンネルの近接施工を行う際には、施工に伴う既設トンネルの変形や沈下を防ぐために、アンダーピニング工法

などを用いることが多い⁷⁾。このとき、施工に伴い地盤の変形が生じ、また既設トンネルの荷重を受け替える構造が地中に残ることが多いため、近接施工部周辺の地震時挙動は複雑なものとなる可能性がある。しかし、このような地盤の特性や荷重の受け替え構造を詳細にモデル化するのは容易ではない。

そこで、アンダーピニング工法により、図-13に斜線で示す領域が、元の地盤に比べ平均的に剛性の高い構造となった場合を仮定し、表-2に示すような物性を持つものとしたモデルを導入し、同様の解析を行った。なお、以下ではこれら2つのモデルを「擬似非線形モデル」、「擬似アンダーピニングモデル」と呼ぶこととする。

表-2 剛性低下部及びアンダーピニング導入部の物性パラメータ

	単位体積重量 γ [tonf/m ³]	ポアソン比	せん断波速度 V_s [m/s]
剛性低下部	1.80	0.48	120.0
アンダーピニング導入部	2.00	0.30	350.0

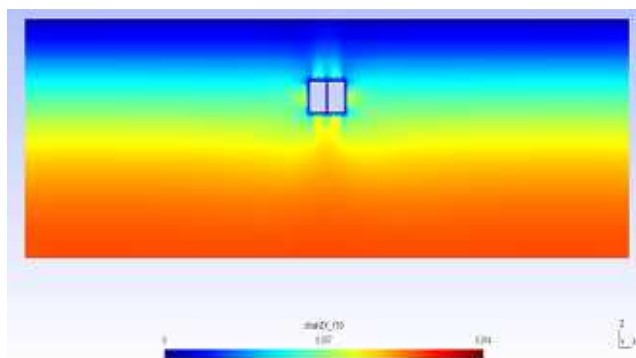


図-10 点Aを含むX-Z断面での最大せん断歪み γ_{zx} の分布

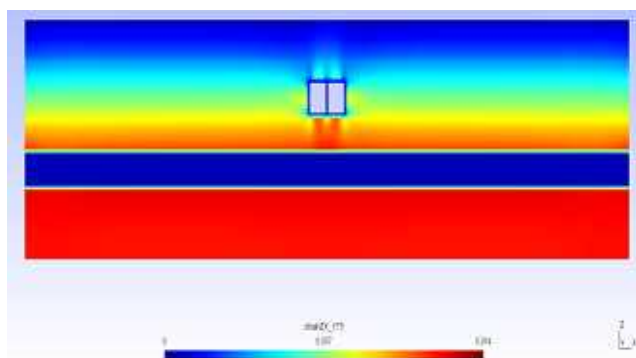


図-11 点Dを含むX-Z断面での最大せん断歪み γ_{zx} の分布

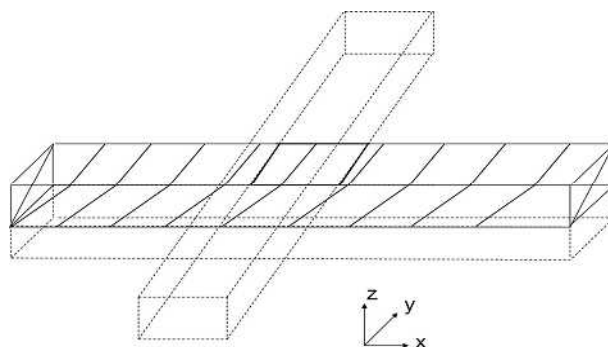


図-12 地盤の非線形化による剛性低下考慮部

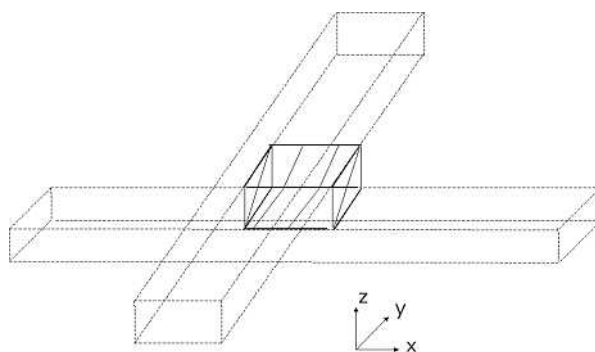


図-13 アンダーピニングによる剛性上昇考慮部

5. 擬似非線形モデル及び擬似アンダーピニングモデルによる解析結果及び考察

(1) 応答時刻歴の比較による考察

基本モデルと同様に、まず上部開削トンネルの軸線方向位置による応答の比較を、4点A～Dについて行った。

擬似非線形モデルにおける4点での変位応答の時刻歴を図-14、擬似アンダーピニングモデルにおける4点での相対変位応答の時刻歴を図-15に示す。これらの図より、地盤の非線形化による剛性低下を考慮したモデルでは、軸線方向位置による変位応答の差異がほとんどなくなっていること、逆にアンダーピニングによる剛性の上昇を考慮したモデルでは、軸線方向位置による変位応答の差が大きくなっていることが分かる。基本モデルと同様に点Aと点Dでの比較を行うと、擬似非線形モデルでは、点Dにおける絶対加速度、相対速度、相対変位の最大値は、それぞれ点Aにおける最大値の96.4%、97.1%、97.9%となり、また擬似アンダーピニングモデルでは、点Dにおける最大値は点Aにおける最大値のそれぞれ83.0%、83.8%、86.5%となった。また、天端上の2点E、Fでの比較では、擬似非線形モデルでは点Fの加速度、速度、変位の最大値が点Eにおける最大値の97.6%、97.9%、98.4%となり、擬似アンダーピニングモデルでは順に89.7%、89.4%、91.5%となった。

なお、点Aでの応答値は基本モデルを含めた3つのモデル間でほとんど差はなく、この応答の低減の差

は点Dでの応答の差によって生じたものであった。これより、特に2本のトンネルに挟まれる領域の地盤剛性が上部トンネルの応答低減効果の大小に影響を与えること、地盤の非線形化による剛性低下を考慮すると上部開削トンネルへの応答低減効果は小さくなること、逆にアンダーピニングなどにより剛性の高い構造となった場合には応答低減効果が大きくなることを確認できた。

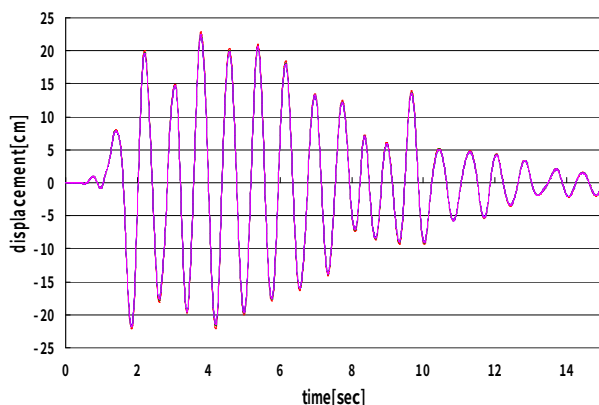


図-14 擬似非線形モデルでの軸線方向位置による上部トンネルの変位応答
(赤…点A 緑…点B 青…点C ピンク…点D)

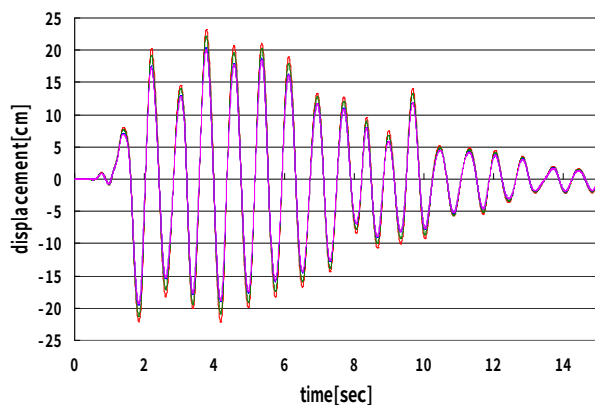


図-15 擬似アンダーピニングモデルでの軸線方向位置による上部トンネルの変位応答
(赤…点A 緑…点B 青…点C ピンク…点D)

(2)上部トンネルの横断面内での変形に関する考察

次に、上部トンネルの横断面内での変形について考察を行う。上部トンネルの中壁位置における下床-天端間の相対変位に着目し、基本モデルでの考察と同様に点A～点Dをそれぞれ含む4つの断面についてその時刻歴を表したものを図-16及び図-17に示す。

これらの図より、地盤の非線形化による剛性低下を考慮したモデルでは、点A～点Dを含むいずれの断面においても相対変位がほぼ等しい時刻歴となること、逆に剛性を上昇させたモデルでは断面位置による時刻歴の差が大きくなることから分かる。

擬似非線形モデルでは、点Aを含む横断面、点Dを

含む横断面のいずれの断面においても相対変位の最大値は3.70cmとなった。基本モデルでの結果と比較すると、点Dを含む横断面での相対変位の最大値が減少しており、下部トンネルの近接作用による影響が解消し、上部トンネルの横断面内での変形に対し有利になったことが分かる。一方、擬似アンダーピニングモデルでは、点Aを含む横断面で最大3.72cm、点Dを含む横断面で最大4.52cmとなり、地盤剛性を上昇させた部分の直上の断面で、基本モデルに比べても大きな値を示す結果となった。これは剛性上昇部付近において、上部開削トンネルの下床位置での応答の低減が大きくなった影響によるものと考えられる。

また、両モデルにおける、点Dを含むX-Z横断面内の変形状態図を、図-18及び図-19に示す。擬似非線形モデルでは、剛性を低下させた領域でせん断変形が大きくなっており、この領域に変形が集中することで免震層に近い役割を果たし、上部開削トンネルの相対変位が抑えられたと考えられる。ロッキングの影響も基本モデルと比較して同程度であり、変形性状に特に大きな変化は生じていないことも確認できる。

しかし、擬似アンダーピニングモデルでは、相対変位の増大以外に、ロッキングの状態や上部トンネルの横断面内での変形性状が若干異なっている様子が見受けられる。今回は平均的に地盤の剛性を上昇させたモデルによる検討であったが、実際の施工時には杭などにより支持されるため、その支持の方法などによっても上部トンネルが複雑なロッキング特性を示す可能性があり、その影響についても検討が必要になるものと考えられる。

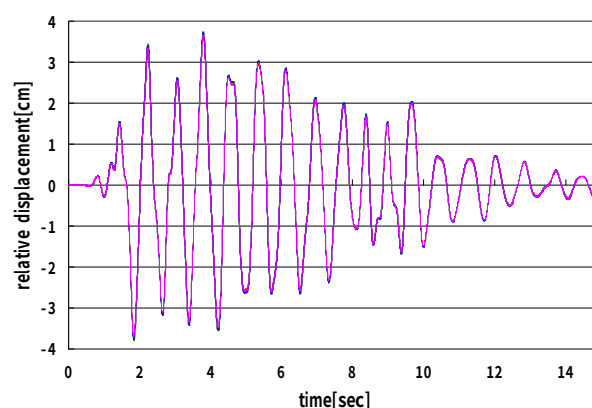


図-16 擬似非線形モデルでの中壁における天端-下床の相対変位時刻歴
(赤…点A 緑…点B 青…点C ピンク…点Dをそれぞれ含む横断面)

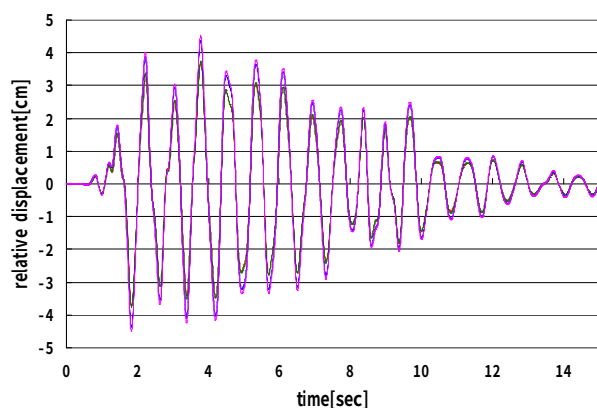


図-17 擬似アンダーピニングモデルでの中壁における
天端-下床の相対変位時刻歴
(赤…点A 緑…点B 青…点C ピンク…点D
をそれぞれ含む横断面)

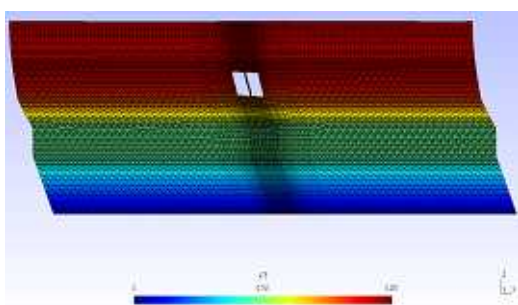


図-18 点Dを含むX-Z横断面内での変形図
(擬似非線形モデル)

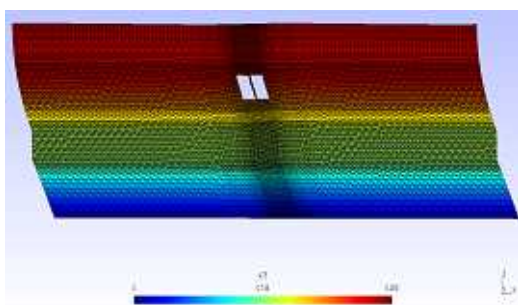


図-19 点Dを含むX-Z横断面内での変形図
(擬似アンダーピニングモデル)

(3) 上部トンネルの軸線方向の変形に関する考察

最後に、上部トンネルの軸線方向の曲げ変形に関する考察を行う。図-20に、上部トンネルの中壁位置における天端-下床間の相対変位が最大となる時刻におけるトンネルの軸線の曲げ変形状態を、Z軸正方向から見た図で示す。2つのモデルの差は顕著であり、擬似非線形モデルでは軸線の曲げ変形がほとんど生じていないのに対し、擬似アンダーピニングモデルでは基本モデルより大きな軸線の曲げ変形が生じている。それに伴い、場所によっては $10000[\text{kN}/\text{m}^2]$ を超える大きな直応力 σ_{yy} が発生している。よって、特に2本のトンネルに挟まれる領域の剛性が大きい場合は、3次元的な近接作用の影

響が大きくなり、実際の施工においても検討が必要となってくるものと考えられる。

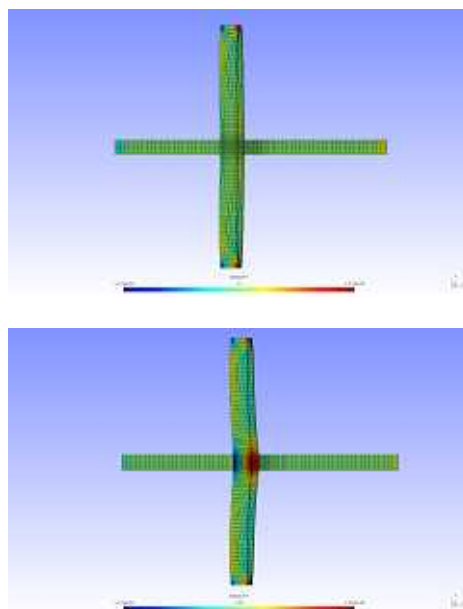


図-20 開削トンネルの軸線変形図及び σ_{yy} 分布図
(上…擬似非線形モデル
下…擬似アンダーピニングモデル)

6. まとめ

本研究では、近接した距離で軸線が交差する2本のトンネルと地盤からなる系が地震動を受けたときの相互作用、近接作用の影響を、主に上部開削トンネルの挙動に着目して考察した。得られた知見は以下のとおりである。

① 上部トンネルの横断面内方向に対する入力に対しては、下部トンネルの直上付近で上部トンネルの応答の低減が生じ、軸線方向位置による応答の差を生じることから、軸線に曲げ変形が発生する。このような影響は、2次元領域の解析では捉えることのできない近接作用の影響として考慮する必要がある。

② ①に示したような応答の低減の度合いは下部トンネルからの距離に左右されるため、上部トンネルの下床部と天端部での応答の低減の度合いが異なることから、下床-天端間の相対変位にも変化を生じ、横断面内での変形にも影響を及ぼす。

③ ①及び②で示したような近接作用の影響は、2本のトンネルに挟まれる領域の地盤剛性に大きく左右され、特にアンダーピニングなどによって剛性が高くなると近接作用の影響が大きくなる傾向にある。

今後の課題としては、実際に地盤に非線形モデルを導入した際に近接作用の影響がどの程度生じるかの検討、実際のアンダーピニング施工をより忠実に

反映した詳細なモデルでの検討が挙げられる。また、近接作用の影響を実際の設計においてどの程度考慮すべきかについての指針を得るため、上部トンネルの断面力への影響も含めた評価が必要であると考えられる。

参考文献

- 1) 山田岳峰、市村強、大保直人、佐茂隆洋、池田清宏、堀宗朗：大規模三次元FEM解析による地下複雑構造物の地震時挙動、応用力学論文集Vol.7、pp.909-916、2004 年8月
- 2) 土橋浩、市村強、大保直人、堀宗朗、山田岳峰：複雑な構造を持つ大型トンネルの地震応答に対する大規模三次元数値解析の必要性の検討、土木学会論文集A Vol.64 No.3、pp.639-652、2008年9月

- 3) 小林孝行、岩楯敏広、武菱邦夫、宇都宮博幸、篠崎哲也：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、地下構造物の合理的な耐震対策研究小委員会シンポジウム、2006年
- 4) 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
- 5) 柴田明徳：最新 耐震構造解析、森北出版、1981年
- 6) 土岐憲三：新体系土木工学11 構造物の耐震解析、技報堂、1981年
- 7) 市野道明：アンダーピニング工事における既設構造物の変位予測手法に関する研究、早稲田大学博士論文、2002年6月

Dynamic interaction between two crossing underground structures excited by strong ground motion

Takahiro TSUTSUMIUCHI, Junji KIYONO, and Yusuke ONO

Recently, many underground structures have been constructed in close distance in urban areas. The seismic behavior of those structures may be quite complex because of the interaction not only between soil and a structure but also among structures. In this paper, the seismic behavior of two tunnels crossing perpendicular each other are analyzed by the three dimensional dynamic FEM analysis. The results shows that response of the upper tunnel is reduced directly above the lower tunnel, which causes bending of the axis and increases cross-sectional deformation of the upper tunnel.