

十字交差建設の新設トンネル免震対策の既設トンネルへの影響に関する3次元解析的研究

馬 其万¹・土門 剛²・西村和夫³

¹学生会員 首都大学東京大学院 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)
E-mail:maikiman1980@yahoo.co.jp

²正会員 首都大学東京大学院 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)
E-mail:dom@tmu.ac.jp

³正会員 首都大学東京大学院 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)
E-mail:knishi@tmu.ac.jp

シールドトンネルは軟弱地盤に施工されることが多く、地震時には影響を受け易い。その地震時の影響を和らげる方法の一つとしてトンネルと地盤との境界に低剛性の裏込めを注入する工法がある。その一方で、都市地域においては地下空間の高度利用化が進むとともに、トンネルが近接で建設される場合も多い。この場合、近接の個所で地震時にトンネルの増分断面力はかなり大きくなる。その地震増分断面力を低減させるために、新設トンネルに免震対策工法を採用することが考えられる。現在、単一のトンネル場合の免震対策効果についての研究が多いが、近接で建設される新設免震トンネル及び既設トンネルへの相互影響についての課題があると考えている。

本論文では、既設シールドトンネルの下方に十字交差で新設シールドトンネルを建設し、交差個所の新設シールドトンネル全周面に免震対策した場合、新設シールドトンネルの免震効果及び既設シールドトンネルへの影響に関する検討を行った。

Key Words: shield tunnel, seismically isolation structure, earthquake response analysis, strong earthquake

1. はじめに

地下構造物は、一般には地震時に生じる地盤変位に追従して挙動する特徴がある。この場合、必ずしも、構造物の断面剛性を高めることが耐震安全性上有効な手段とは限らない場合がある。地下構造物の免震技術としては、地震時に地盤変形を地下構造物に伝えにくくする方法がある。この方法が地下構造物の周辺に柔らかい材料で免震層を配置するものである。大地震時に生じる地盤変位を免震層に吸収させて過大な変位を地下構造物に生じさせることなく、地震時の断面力を低減させる方法である。現在、図-1に示すような都市部において道路、地下鉄、共同溝、地下河川などの地下構造物が密に建設される。これらの構造物は、幾何学的、構造的に複雑な3次元構造を呈しており、構造の耐震設計・免震対策を行う上で構造物の3次元的な挙動を評価し、対応策を確立することが望まれている。

シールドトンネルの全周面免震対策手法については二次元、三次元の多くの研究があるが、近接施工の場合、近接にある既設トンネルからの相互影響があるので、新設トンネルは大きくなる地震時増分断面力を低減するた

め、新設トンネルに免震対策をした場合、新設トンネルの免震効果及び既設トンネルへの影響に関する3次元解析によるトンネルの挙動の評価について具体的な方法を示したものはほとんどない。

本研究では、トンネルの横断面と縦断面との免震メカニズムを検証することを目的とし、既設シールドトンネルの下方に十字交差で新設シールドトンネルを建設された構造を対象として、3次元有限要素法解析を行う。解析のプロローを図-2に示す。本解析では、3次元動的有限

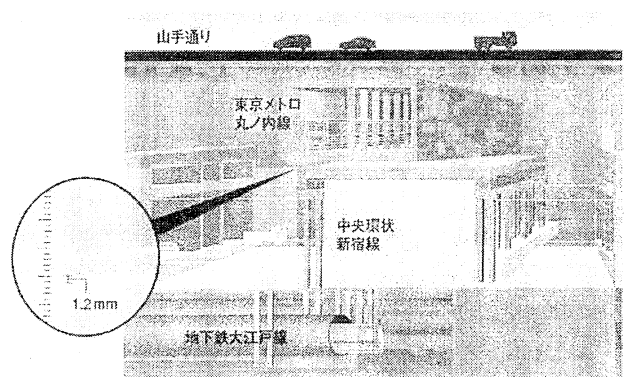


図-1 近接施工例(首都高の技術より引用)

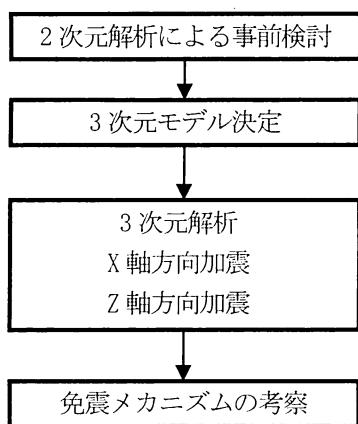


図-2 解析のフロー

要素解析は、既設シールドトンネルと新設シールドトンネルとの軸方向加振及び軸直方向加振それぞれに対して、免震対策有りの場合と無しの場合を実施した。

2. 解析手法

解析プログラムにはTDAPⅢを使用し、水平地震動のみをx、z軸方向(図-3)から入力し、地盤の非線形を等価線形化法で考慮する時刻暦応答解析手法による動的FEM解析を行う。地盤の非線形について、地震時における地盤の収束剛性の算出は、一次元地盤応答解析(解析コード:SHAKE)により行い、得られた収束せん断弾性係数を線形材料として扱う。

3. 地盤と免震材及びトンネルのモデル化

本解析では、150*150*22mの地盤としては、せん断弾性波速度 $V_s=197\text{m/s}$ の砂質土を想定し、表層地盤から深度22mにおいて工学的基盤面($V_s=300\text{m/sec}$)を設定した。地盤の物性値を表-1に示した。地盤のひずみ依存特性¹⁾については、等価線形法の地盤解析結果の最大ひずみレベルで、地盤の動的変形特性とR0モデルの非線形特性が合うように、R0モデルのパラメータを設定した。また、境界条件は側方をローラー境界及び底面を固定境界とした。境界条件は解析モデル概念図-3に示す。

本解析では、既設シールドトンネルの下方に建設された新設シールドトンネルの中心から両側へ各10m、合計20mの全周面免震層を配置した。免震材は、低剛性材料を弾性範囲で使用するもの、非線形性を示す低耐力を上限とする材料、滑り挙動を利用したもの、アスファルト系、ウレタン系、及びシリコーン系などの各種材料が開発されているが²⁾、免震材のせん断弾性係数は、地盤のせん断弾性係数の1/100に相当する 63.36tf/m^2 、ポアソ

表-1 地盤の物性値

地盤	層厚	重量密度	せん断剛性	ポアソン比	減衰定数
	m	kN/m^3	kN/m^2		
地層	22	16.7	6.3×10^4	0.45	0.1
基盤	-	20.0	1.8×10^5	0.3	-

表-2 免震材の物性値

配置	全周面
材料特性	等方均質弾性体
重量密度	$10(\text{kN/m}^3)$
ポアソン比	0.3
せん断弾性係数	$634(\text{kN/m}^2)$
厚さ	10cm
減衰係数	0.1

表-3 シールドトンネルの物性値

シールドトンネル				
厚さ	重量密度 (kN/m^3)	ヤング率 (kN/m^2)	ポアソン比	減衰係数
0.3m	25	2.5×10^7	0.2	0.05

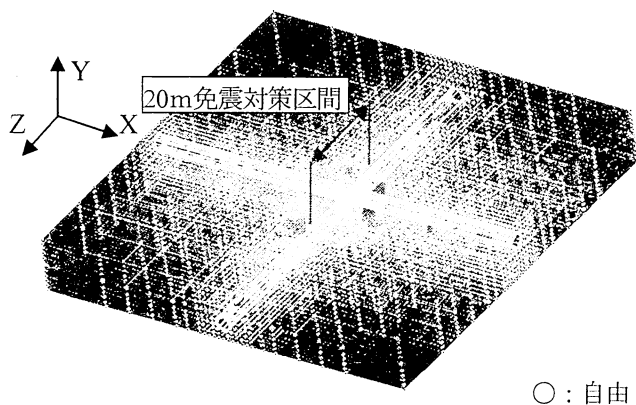
ン比は0.3、厚さ10cmとした。免震材の物性値は表-2に示す。

対象トンネルとしては外径6mのシールドトンネルを想定した。ここでは、セグメント厚は30cm、既設シールドトンネル土被りは4.1m、既設シールドトンネルの下方(1.8m)に十字交差で同サイズの新設シールドトンネルを配置した。トンネルの物性値は表-3に示す。本来、セグメントとリング継手を実構造のとおり忠実にモデル化しなければならないが、ここではあくまでも免震メカニズムの検討に重点を置くこととし、設定した剛性を有する円形のトンネルがあるものと仮定した。シールドトンネルのモデルは解析モデル概念図-3に示す。

要素について、地盤と免震材とトンネルはソリッド要素の六面体、シールドトンネルはシェル形要素のMindlinシェル要素を用いた。

4. 解析概要及び解析ケース

十字交差の近接で建設されたシールドトンネルは地震時の地盤変形が場所より異なるため構造物に生じる大きい応力を低減するように、下方にある新設シールドトンネルの真ん中に20mの全周面免震層を配置したモデルとする。解析モデル概念図-3に示す。



境界面の拘束条件 (X 軸方向加震) X : 固定

	δ_x	δ_y	δ_z	θ_x	θ_y	θ_z
XY前後面	○	○	X	X	X	○
YZ前後面	○	X	○	○	X	X
XZ底面	X	X	X	X	X	X
XZ地表面	○	○	○	○	○	○

境界面の拘束条件 (Z 軸方向加震)

	δ_x	δ_y	δ_z	θ_x	θ_y	θ_z
XY前後面	○	X	○	○	X	○
YZ前後面	X	○	○	○	X	X
XZ底面	X	X	X	X	X	X
XZ地表面	○	○	○	○	○	○

図-3 解析モデル概念図

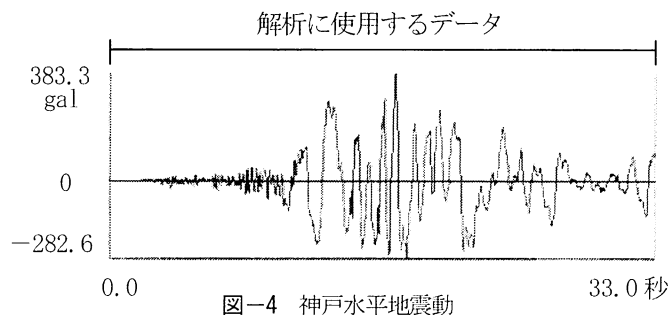


図-4 神戸水平地震動

入力地震動は新神戸変電所の地表で得られた兵庫県南部地震の観測記録を工学的基盤に引き戻した推定波形を用いる。地震動は図-4に示す。

解析ケースは、前述したように、本解析は軸方向、軸直方向加震について、また、免震層有りと免震層無しとの合計6ケースを実施した。解析ケースを表-4に示す。

5. 解析結果および考察

ここでは、シールドトンネルの軸方向加震時及び軸直方向加震時のトンネル横方向断面力と縦方向断面力に着

	Case1 既設のみ	X軸方向加震
	Case2 既設のみ	Z軸方向加震
	Case3 既設と新設(免震無し)	X軸方向加震
	Case4 既設と新設(免震無し)	Z軸方向加震
	Case5 既設と新設(免震有り)	X軸方向加震
	Case6 既設と新設(免震有り)	Z軸方向加震

表-4 解析ケース

目し、トンネル交差の位置でのトンネルに関する免震効果(断面力の増減)について考察する。

(1) 既設シールドトンネルの解析結果と考察

既設トンネル中心横断面の上端節点と下端節点との時刻暦変位差を図-5に示す。既設トンネルの軸方向(x方向)加震時、既設トンネルの軸方向断面力及び円周方向断面力を図-6に示す。また、既設トンネルの軸直方向(z方向)加震時、既設トンネルの軸方向断面力及び円周方向断面力を図-7に示す。

- 既設トンネルの相対変形：既設トンネル中心横断面の上端節点と下端節点との時刻暦変位差は図-5に示すように、既設トンネルの軸方向(x方向)加震時、新設トンネルに免震対策した場合の既設トンネル中心横断面の上端節点と下端節点との時刻暦変位差は新設トンネルに免震対策しない場合よりわずかに大きい。既設トンネルの軸直方向(z方向)加震時、新設トンネルに免震対策した場合の既設トンネル中心横断面の上端節点と下端節点との時刻暦変位差は新設トンネルに免震対策しない場合より小さいことがわかる。
- 既設トンネル軸方向加震：既設トンネルの軸方向(x方向)加震時、既設シールドトンネルの最大軸力と最大曲げモーメントについて、図-6(左)に示すように解析モデル中央(交差位置)の既設トンネル横断面の断面力は、トンネル下端に最大値があることが分る。そして、既設トンネルの下方に新設トンネルを近接で建設した場合(case3)と新設トンネルに全周面免震対策した場合(case5)、既設トンネルの断面力が増加することが分る。図-6(右)に示すように既設トンネル下部の縦断面の断面力は、解析モデル中央(交差位置)を頂点とした、三角形形状の分布を呈する。また、既設トンネルの軸方向軸力と円周方向軸力、トンネルの軸方向曲げモーメントと円周方向曲げモーメントと比べると、既設トンネルの軸方向

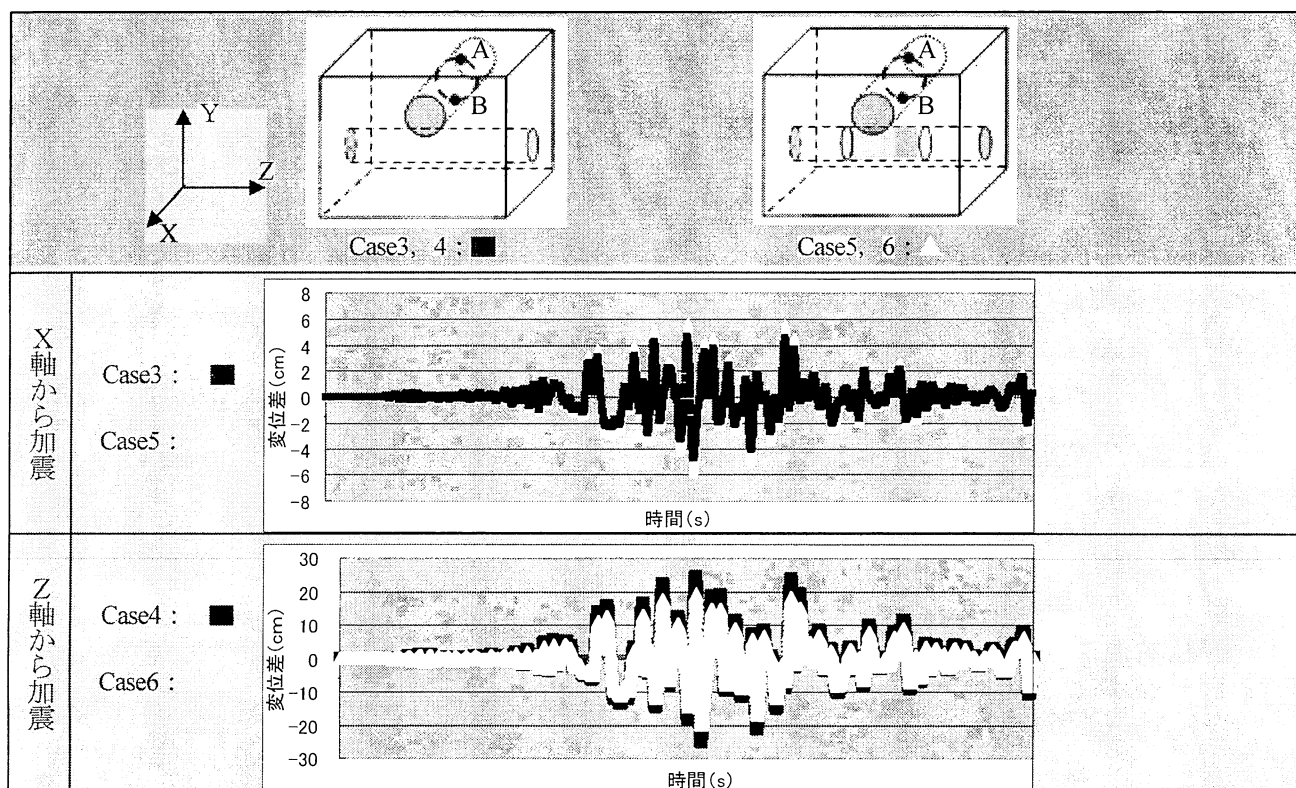


図-5 既設トンネル中心横断面の上端節点と下端節点との時刻暦変位差

(x 方向) 加震時それぞれ軸方向の断面力が大きいことが分る。

- c) 既設トンネル軸直角方向加震：既設トンネルの軸直角方向 (z 方向) 加震時、既設トンネルの最大軸力と最大曲げモーメントは、図-7 (左) に示すように既設トンネル下部の 45 度方向に発生する。また、既設トンネルの下方に新設トンネルを近接で建設した場合 (case4)、既設トンネルの断面力が増加し、特に既設トンネル下部の 45 度個所の断面力は 15~35%程度大きく増加したが、新設トンネルに全周面免震対策した場合 (case6)、既設トンネルの断面力は減少し、本解析で既設トンネルのみ (新設トンネルを建設されてない case2) 場合より小さくほどまで 28~54%程度減少した。図-7 (右) に示すように既設トンネル下部 45 度方向の縦断面の断面力は上述した横断面の断面力の増減と同様の推移であることが分る。
- d) 加震方向の違いの比較：既設トンネルの軸方向 (x 方向) 加震 (図-6) の断面力と既設トンネルの軸直方向 (z 方向) 加震 (図-7) の断面力と比べると z 軸方向加震場合に既設シールドトンネルの断面力は当然大きい。一方、既設トンネルの軸方向 (x 方向) 加震時、新設トンネルに全周面免震対策した場合、既設トンネルの断面力が増加するが、この断面力最大値は既設トンネルの

軸直方向 (z 方向) 加震時の断面力最大値よりかなり小さいので、新設トンネルに免震対策することは既設トンネル躯体の断面におおきな影響がないと考えられる。b)により考えると既設トンネルの下方に十字交差で新設トンネルを建設される場合、新設トンネルに全周面免震対策することは既設トンネルにも良い影響があることが分る。

(2) 新設シールドトンネルの解析結果と考察

免震効果：新設シールドトンネル軸方向 (z 方向) 加震及び軸直方向 (x 方向) 加震時、新設シールドトンネルの最大軸力と最大曲げモーメントについて、図-8 に示すように新設トンネルに免震対策なし場合、既設トンネルからの影響のために、新設トンネル縦断面の断面力は十字交差位置の中心の断面力が大きく増えることが分る。新設トンネルに免震対策した場合、既設トンネルからの影響のため、交差位置での新設トンネルの断面力は大きく低減し、免震効果があることが確認できる。本解析では、免震効果が大体 5%~77% ぐらいとなった。しかし、新設シールドトンネル軸方向 (z 方向) 加震時、新設トンネルの免震材の配置区間端部付近では逆に断面力を増加する部分も認められるが、トンネル交差箇所部 (中央) より値として小さく、免震対策しない場合より断面力分布が平滑化した。

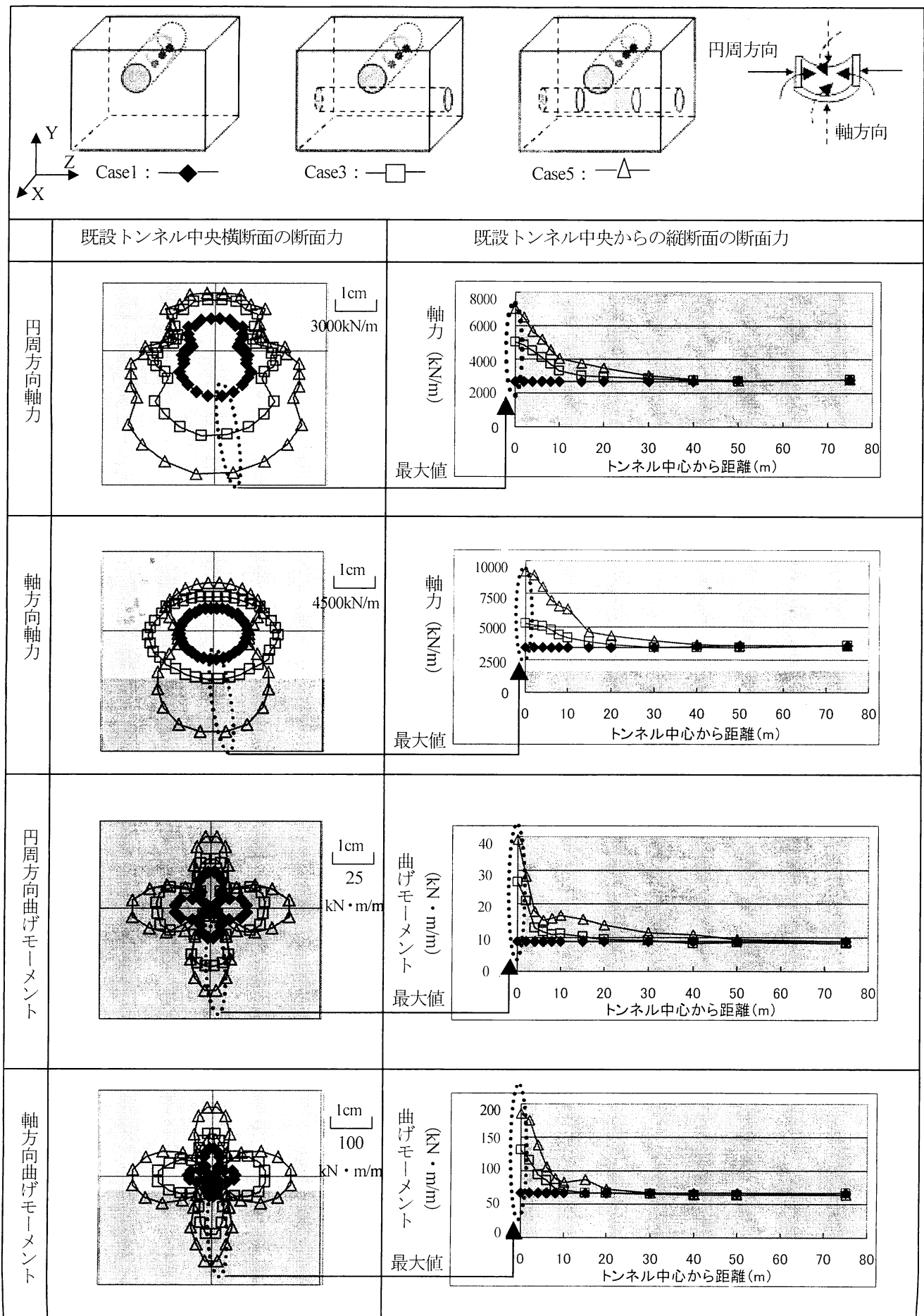


図-6 既設トンネル軸方向（x 方向）加震時の既設トンネルの軸方向断面力及び円周方向断面力

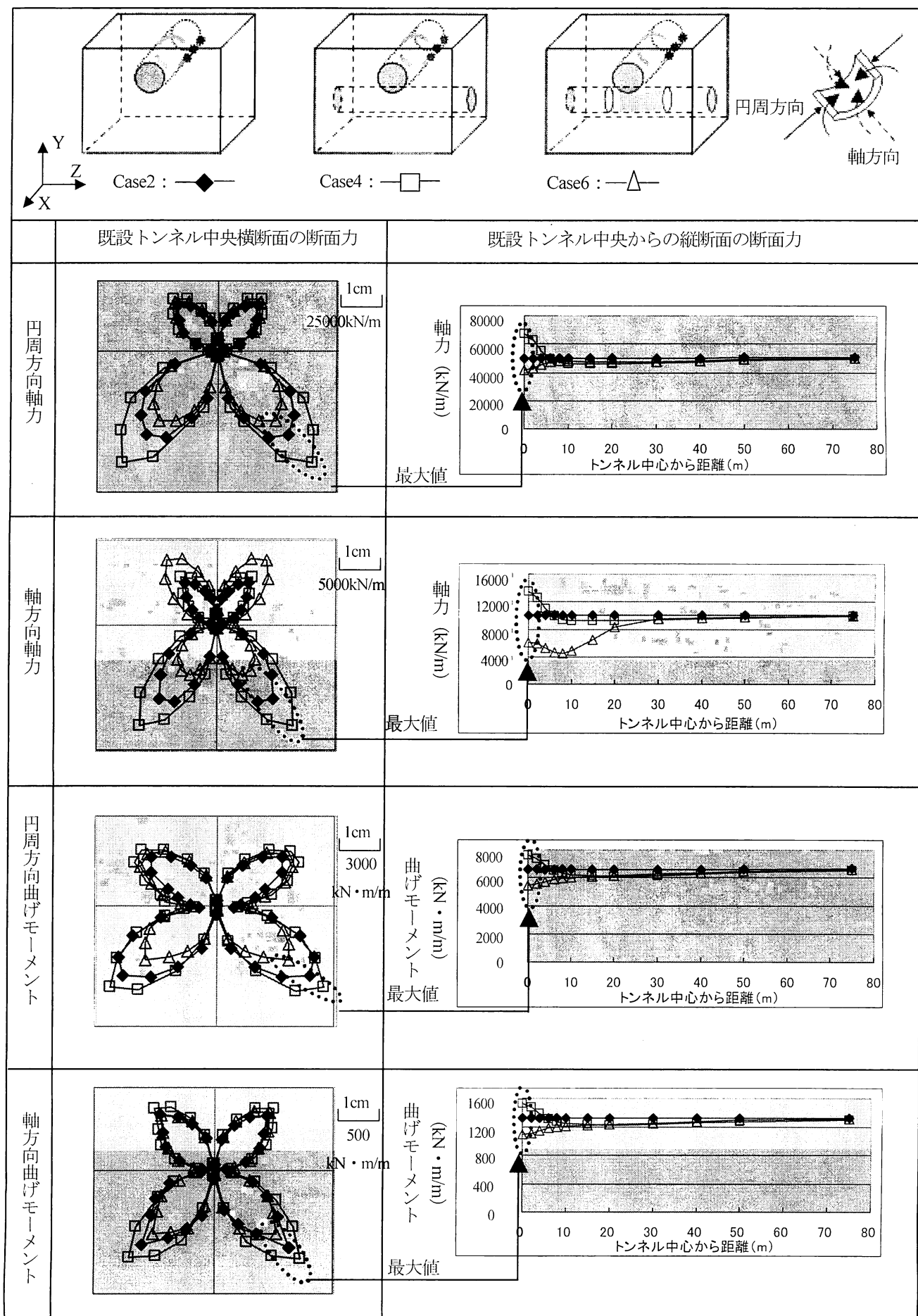


図-7 既設トンネル軸直方向 (Z 方向) 加震時の既設トンネルの軸方向断面力及び円周方向断面力

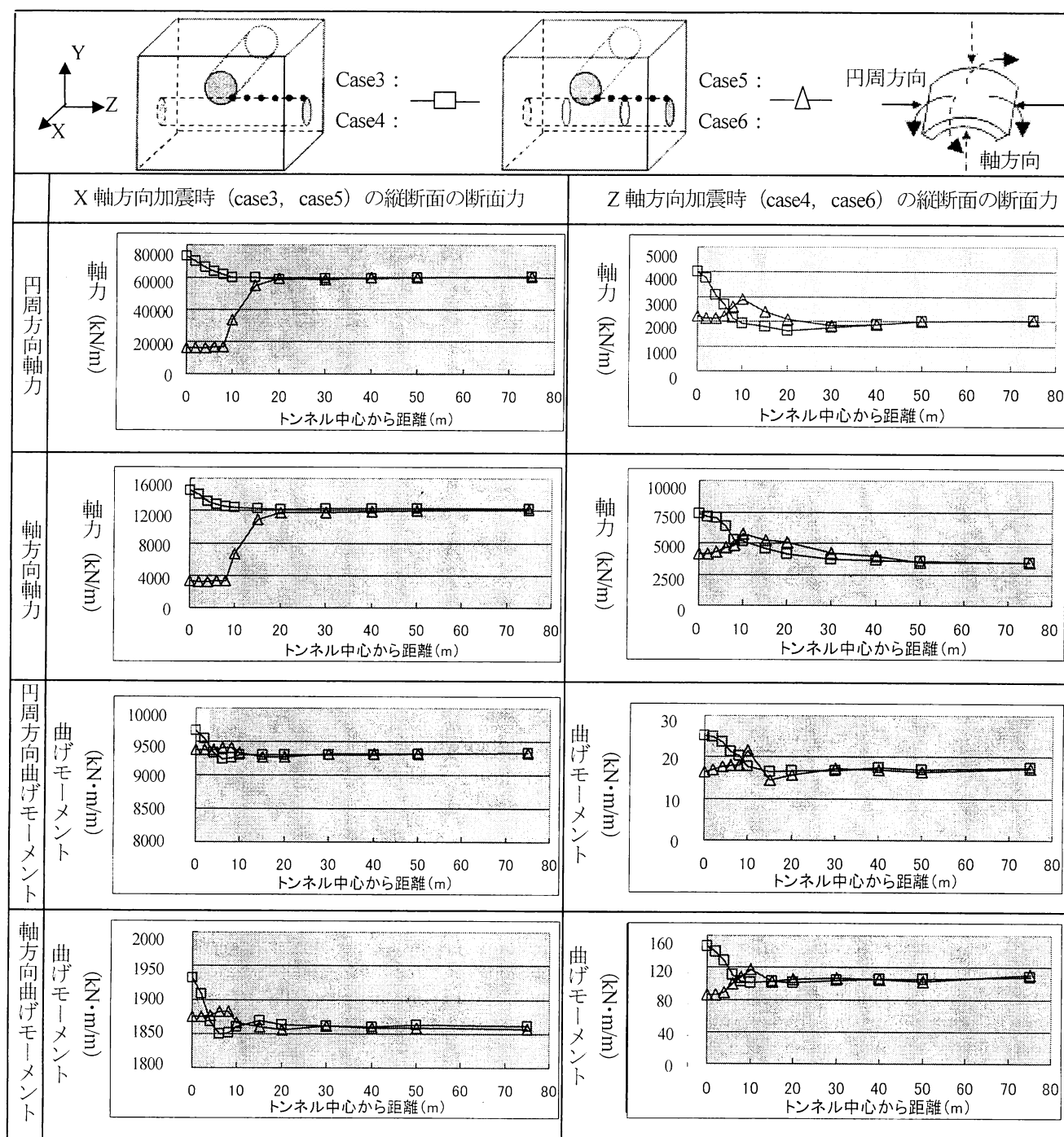


図-8 新設トンネル中央から上部の縦断面の断面力

6. まとめ

今回の条件で得られた既設シールドトンネルと新設シールドトンネルによる十字交差建設時に新設トンネルに免震対策した場合、既設トンネルへの影響及び新設トンネルの免震効果についてまとめると以下の通りである。

a) 既設シールドトンネルの下方に新設シールドトンネル(免震層なし)を十字交差で建設した場合、水平加震(xとz方向)で既設トンネルの断面力が10%~50%ぐ

らい増加した。既設トンネル軸方向(x方向)に加震した時、既設トンネルの増加した断面力は小さいので既設トンネルに大きな影響がないと考えられるが、既設トンネル軸直方向(z方向)に加震した時、既設トンネルの交差位置での断面力の増加は大きい。

b) 既設シールドトンネルの下方に新設シールドトンネル(免震層あり)を十字交差で建設した場合、既設トンネル軸方向(x方向)に加震した時、(1)と同様に既設トンネルの交差位置に増加している断面力は小さいので既設トンネルに大きな影響がないと考えられる。既設トンネル軸直方向(z方向)に加震した時、既設トンネル

の交差位置の断面力は減少し既設トンネルにも免震効果があることが分る。

c) 新設シールドトンネルについて、免震層なし場合と免震あり場合と比べると大きい免震効果があり、本解析で5%~77%ぐらい低減できた。

総括すると既設シールドトンネルの下方に新設シールドトンネルを十字交差で建設する場合、新設シールドトンネルに全周面免震対策する時、新設シールドトンネルに免震効果があり、既設シールドトンネルには大きな悪影響はないと考えられる。

7. 今後の課題

今回の解析は免震材の物性値は1つのある値として行った。現在のいろいろな免震材が開発されているが、免震材の物性値、免震層の長さなど免震材のパラメータとして立体交差建設されるトンネルへの再適用値の検討を継続して行う予定である。

参考文献

- 1) 建設省土木研究所：地下構造物の免震設計に適用する免震材の開発，土木研究所資料第3535号，pp.9-121，1998.
- 2) 建設省土木研究所：大規模地下構造物の耐震設計法・ガイドライン（案），土木研究所資料第3119号，1992.
- 3) 建設省土木研究所：3次元FEMモデルを用いた開削トンネル縦断方向に対する免震材配置の検討，土木研究所資料第3535号，pp.353-370，1998.
- 4) 河西寛，笹川基史，嶋村貞夫，春海正和：既設地下構造物の横断面内の免震対策，第一回免震・制震コロキウム講演論文集，1996.
- 5) 土木学会地震工学委員会：「地下構造物の合理的な地震対策研究」小委員会報告/シンポジウム発表論文集，pp.333-348，2006.
- 6) 小林雅彦，大竹省吾，井上陽介：開削トンネルの縦断方向の地震時挙動に関する一考察，トンネル工学報告集，第19巻，pp.263-268，2009.

(2012.9.3 受付)

Three-dimensional analytical study on influence of new tunnel with seismic isolation on existing tunnel in crisscross position

Qiwán Ma, Tsuyoshi Domon, Kazuo Nishimura

Recently tunnel structures such as underground roads, subways, underground revers and so on are constructed within a short distance in the big cities. These structures were located in complicated positions in three-dimensional space. Because these structures suffer much dynamic interaction effect by earthquake, it is necessary to take some seismic countermeasures to a new structure. Many two-dimensional or three-dimensional studies were carried out on seismic isolation techniques of single tunnel as seismic countermeasures. In this paper, the effect of new tunnel with seismic isolation on existing tunnel without seismic countermeasure in crisscross position was studied. The bad influence of new tunnel on existing tunnel is limited.