

箇所別の違いを考慮した入力地震動による不整形地盤及び 地中構造物縦断方向の応答解析に関する研究

A study on response analysis of irregular ground and axial direction of underground structure
using input ground motion considering the difference of each location

橘義規*, 大塚久哲**, 古川愛子***, 矢野恵美子****

Yoshinori Tachibana, Hisanori Otsuka, Aiko Furukawa, Emiko Yano

*(株)オリエンタルコンサルタンツ 東京事業本部 (〒150-0023 東京都渋谷区南平台町16-28)

**工博 九州大学大学院教授 工学研究院建設デザイン部門 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

***九州大学大学院 工学研究院建設デザイン部門 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

****九州大学大学院 工学府建設システム工学専攻 修士課程 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

It is necessary to consider the seismic wave propagating effect in seismic design of underground structures in axial direction. This effect is generally modeled as the phase delay of input ground motions. In this paper, authors analyzed irregularly layered grounds by 2-D FEM and underground structures in axial direction by seismic displacement method considering different waves types. These were waves without phase difference, waves considering phase difference and waves generated using fault model. From results of analyses, input method of ground motions was investigated for seismic design of underground structures in axial direction.

Key Words: Fault model, ground motion at each location, irregularly layered ground, underground structure in axial direction

キーワード: 断層モデル, 箇所別地震動, 不整形地盤, 地中構造物縦断方向

1. はじめに

地中構造物縦断方向の耐震設計において用いられる耐震設計上の基盤面における地震動は、震源特性、震源から基盤までの伝播経路、および耐震設計上の基盤面以深の地盤の影響を受けており、本来一様ではないと考えるべきである。沈埋トンネルなどの耐震設計実務では、基盤面に地震波が到達する時刻をずらした位相差入力を行うことにより入力地震動の違いを簡易的に考慮している。ここで、兵庫県南部地震以降、内陸部で発生する直下型の大規模地震に対する設計が行われるようになったが、このような地震に対しても箇所別の地震動の違いを位相差で考慮し、時間ずれを表す見かけの伝播速度もプレート境界型の地震と同等の1~2km/sが用いられている場合が多い。地震波の見かけの伝播速度に関する研究を土田ら¹⁾が行っており、羽田空港における基盤面地震動の到達時間の差と震源からのS波伝播モデルによる解析を比較し、概ね実測と解析で傾向が一致することを確認している。また、岩楯ら²⁾は、原子力発電所建設地点における高密度平面アレー観測から、地震動

は一様でなく位相差を有することを確認するとともに、この影響を平面波の斜め入射で近似的に模擬できることを示している。

伝播速度の分析に加え、基盤面における見かけの伝播速度の影響を調べた研究として、川島ら³⁾は位相差入力と地盤剛性の箇所別の違いの影響度合を比較している。さらに竹内ら⁴⁾は、均質地盤と急変地盤をFEMで解析し、位相差を考慮しない場合に地盤ひずみが最大となる結果が得られている。いずれにしても、位相差入力に関しては伝播速度をいくらにするかも含め、未だ課題が多い。

本研究では、まず断層モデルを用いて複数の着目地点における地震動を作成した。次に、断層モデルから算出した地震波と位相ずれを考慮した地震波を入力した場合の不整形地盤や地中構造物縦断方向の応答について比較を行うことで、一般的に用いられている位相ずれ入力の妥当性について検討し、地中構造物縦断方向の耐震設計における地震波の入力方法について考察を行う。

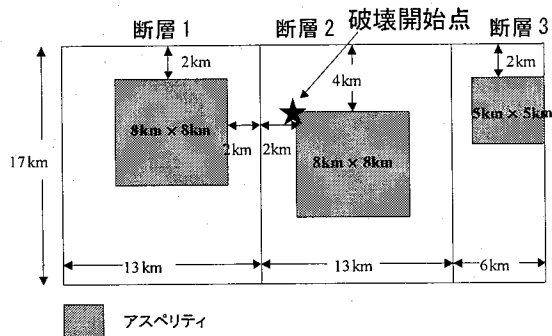


図-1 断層モデル

表-1 断層パラメータ

	断層1	断層2	断層3
断層長さ (km)	13	13	6
断層幅 (km)	17	17	17
傾斜角 (DEG)	65	65	65
せん断波速度 (km/sec)	3.5	3.5	3.5
破壊伝播速度 (km/sec)	2.5	2.5	2.5
地震モーメント (dyne·cm)	5.55×10^{25}	5.55×10^{25}	2.56×10^{25}
ライズタイム (sec)	0.7	0.7	0.5
アスベリティの面積 (km ²)	8km × 8km	8km × 8km	5km × 5km

表-2 地盤構造

	深度 (m)	厚さ (m)	せん断波速度 V_s (m/s)	単位体積重量 γ (kN/m ³)
地表面	0			
	4	4	220	19
	58	54	450	19
工学的基盤面	110	52	540	19
	152	42	640	19
	162	10	1100	19
	184	22	1100	23
	210	26	2200	23
地震基盤面	290		2200	23
	500	10000	3500	26

GL ± 0m ~ -210m : 長久手ボーリングデータによる
 $V_s = 3500$ m/s の深さ : 名古屋地盤図による

2. 断層を用いた基盤地震波の作成

2.1 解析手法⁵⁾

(1) 対象断層モデルと地盤構造

中部地方のある断層を図-1のようにモデル化し、工学的基盤面における箇所別地震動を算出した。断層パラメータを表-1に示す。破壊開始点は図-1に示す位置とする。また、地表面から断層までの地盤構造を表-2に示す。地盤構造はKiK-net(防災科学技術研究所の基盤強震観測網)より得られた断層近傍の長久手地区のボーリングデータと名古屋地盤図⁶⁾を参考に決定した。

(2) 解析条件

断層モデルから大規模地震動を合成する手法として入倉・釜江の方法⁷⁾を採用した。当該断層において要素地震動として利用できる観測記録が得られていなかったため、本研究ではBooreの方法⁸⁾により要素地震動を経験的に求めた。表-3に要素地震の諸元を示す。要素地震の断層の大きさは1km × 1kmとした。

また、地震基盤面から工学的基盤面までの地震波の増幅は一次元解析で考慮し、工学的基盤面で抽出した地震動を合成に用いる要素地震動とした。一次元重複反射理論により地震基盤から工学基盤への増幅率を考慮する方法は、壇ら⁹⁾が関東地震の広域地震動の評価に用いている。各断層毎の要素地震動の増幅前後の時刻歴加速度波形を図-2に示す。

2.2 工学的基盤面における地震波

工学的基盤面における地震波の抽出は、図-3に示すように断層の中心点直上から東西に500mずつ、計1kmに対して20m間隔で行った。

図-4に工学的基盤面における抽出対象地点の地震波の例として、抽出地点の左端部、中心部、右端部の時刻歴変位波形を示す。同図によれば、同一の波形が位相ずれを起こしているのではなく、波形そのものが異なっている。これは、地震波の抽出地点が破壊開始点に近く、また破壊開始

表-3 要素地震の諸元

	断層1	断層2	断層3
震源距離 (km)	10	10	10
せん断波速度 (km/sec)	3.5	3.5	3.5
密度 (gf/cm ³)	2.7	2.7	2.7
応力降下量 (bar)	50	50	50
要素地震モーメント (dyne·cm)	1.08×10^{23}	1.08×10^{23}	2.05×10^{23}
マグニチュード	4.6	4.6	4.9
継続時間 (sec)	4.5	4.5	5.6

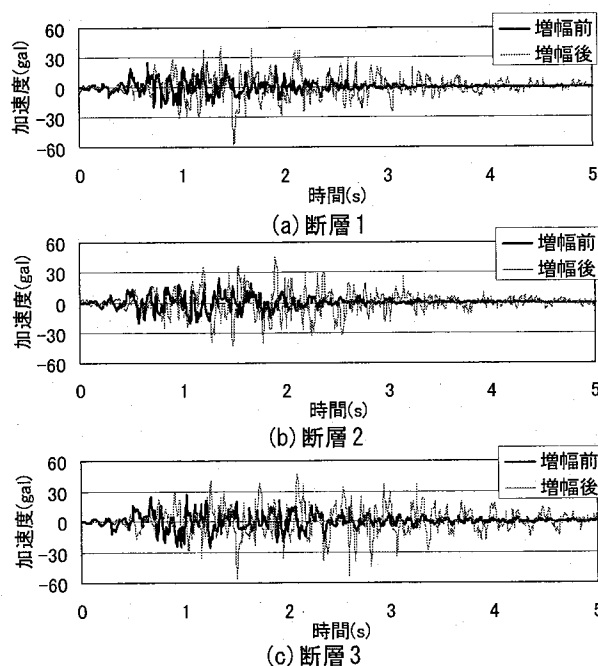


図-2 増幅前後の要素地震動

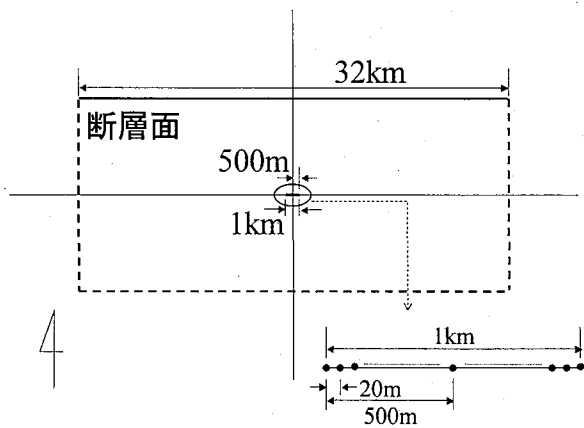
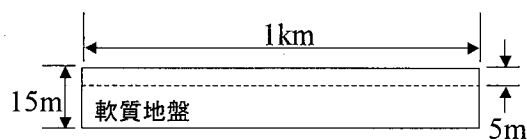


図-3 地震波の抽出地点

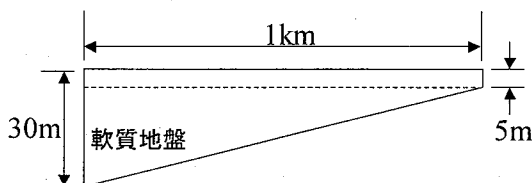
点が断層の中心近くに位置するため、断層破壊の進展に伴い小断層から放出される各要素地震動の到来方向が複雑であることによると考えられる。また、地震波の右端部と中央部、中央部と左端部に対してそれぞれ相互相関関数を算定した。相互相関関数が最大となる位相ずれから算出される伝播速度は、右端部と中央部間は8.3km/s、中央部と左端部間は10km/sとなり、各地点の地震動波形の位相のずれはほとんどないことが確認できる。なお、相互相関関数の最大値は各々0.61、0.33である。また、図-5に示した各地震波のフーリエスペクトルを比較すると、低い振動数領域では各地震波のスペクトルが似通っているが、1Hz以上の領域では異なる振動特性を示しており、特に1.5Hz付近でその差が最も大きい。

3. 2次元不整形地盤解析

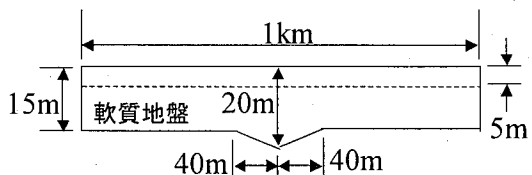
前章で算出した工学的基盤面における箇所別地震動を入



(a) 水平成層モデル



(b) 基盤面傾斜モデル



(d) 埋没谷モデル

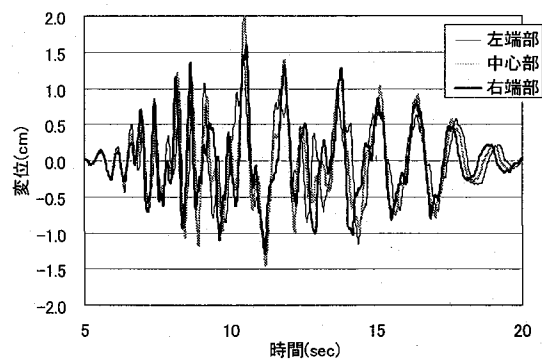


図-4 基盤地震波の例(時刻歴波形)

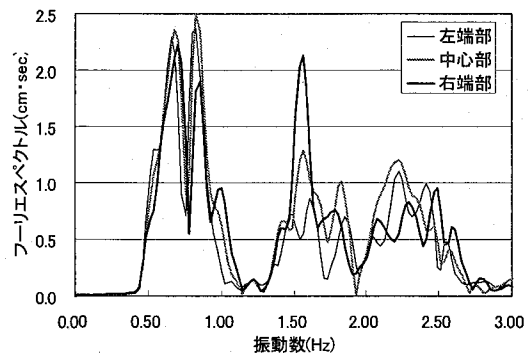


図-5 基盤地震波の例(フーリエスペクトル)

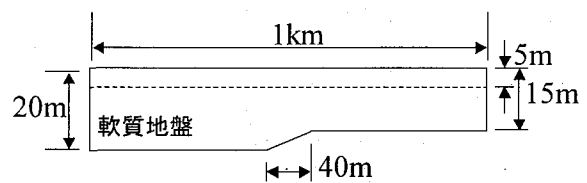
力した場合と同一地震波を位相差入力した場合について不整形地盤の応答解析を2次元FEMモデルを用いて実施する。これにより、地盤の応答に及ぼす入力方法の影響を地盤の不整形とも関連させて検討する。

3. 1 対象地盤モデル

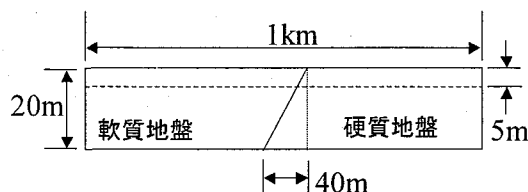
対象地盤モデルは図-6に示すような5モデルである。(a)

表-4 地盤物性値

	ポアソン比 ν	せん断波速度 V_s (m/sec)	単位体積重量 γ (kN/m ³)	減衰定数 h
軟質地盤	0.45	100	18	0.15
硬質地盤	0.45	300	20	0.05



(c) 基盤面段差モデル



(e) 硬質地盤露頭モデル

図-6 対象地盤モデル(波線はひずみ評価深さを示す)

表-5 入力地震波ケース

考慮なし	同一波形を一樣入力した場合
考慮あり	断層モデルから算出した箇所別地震動を考慮する場合
位相ずれ入力1km/s	「考慮なし」の波形に位相ずれを考慮した場合 (1, 2, 5km/sは見かけの伝播速度)
位相ずれ入力2km/s	
位相ずれ入力5km/s	

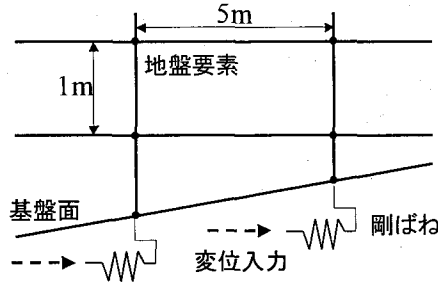


図-7 地震波の入力方法の概念

は深さ15mの成層地盤である。(b)は基盤面が同一勾配で傾斜しており、傾斜角は1/40である。(c)は基盤面の中央部に長さ40m、高低差5mの傾斜を有している。(d)は基盤面の中央部に長さ80mの谷のある左右対称なモデルである。(e)は軟質地盤中に硬質地盤が露頭しているモデルである。解析に用いる地盤物性値を表-4に示す。

3.2 解析条件

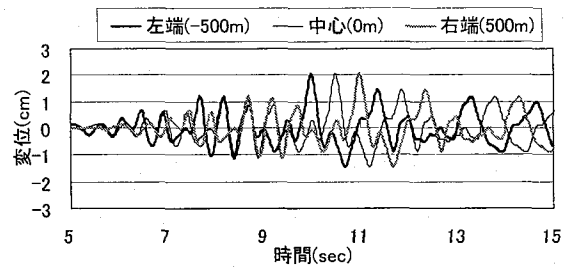
地震応答解析は2次元FEMモデルを用いて行う。モデルの全長は1kmとし、メッシュ間隔は水平方向5m、鉛直方向1mとする。側方の境界条件については、使用ソフトの制約から多点入力を行う場合は粘性境界を用いることができないため自由境界としている。このため、応答値の評価は側方境界の影響を受けないモデルの中央部200mに対して行う。軸方向加振を行い、モデルの自由度は水平、鉛直の2自由度を与えた。

地震波の入力方法は図-7に示すように、地盤モデル底面の不整形面に沿った各節点に対して、変位波形を剛ばねを介して入力する多点入力の方法である。

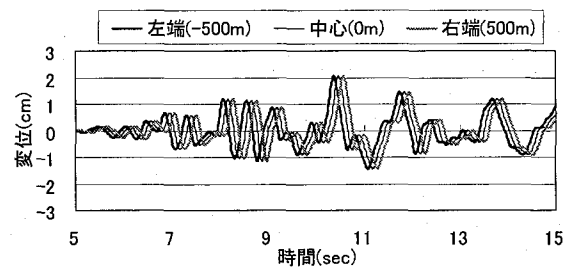
次に、入力地震波は表-5に示すように5ケースを想定している。

(1)「考慮なし」は、箇所別地震動を考慮せず地盤底面の全節点に同一の地震波を入力する。ここでの地震波は、断層モデル中心の直上で抽出された図-4(b)の地震波である。

(2)「考慮あり」は箇所別地震動を考慮する場合で、前章の断層モデルより求めた箇所毎の地震波を各節点に入力する。具体的には、地盤モデルの端から20m間隔で点を取り、1kmの直線上に並ぶ51地点の地震動を断層モデルより作成する。地盤中央点の地震波は上記の「考慮なし」と同一の地震波である。より正確な応答を見たい中央部200m区間については、有限要素節点ごとに線形補間した時刻歴波形を各節点多点入力し、そのほかの区間では、3～4節点ずつ同



(a) 位相ずれ入力1km/s



(b) 位相ずれ入力5km/s

図-8 伝播速度による位相のずれ
(地盤モデル左端から波が到達する場合)

表-6 各地盤モデルにおける1次の固有振動数

	固有振動数 (Hz)
水平成層モデル	1.67
基盤面傾斜モデル	0.90
基盤面段差モデル	1.25
埋没谷モデル	1.67
硬質地盤露頭モデル	1.25

じ地震波を入力していく。

(3)「位相ずれ入力」各ケースは、地盤モデルの中央位置における地震波(図-4(b))を用い、その位相をずらすことによって各箇所の地震波を作成する。この際、耐震設計では一般的に見かけの伝播速度を1～2km/sとしているが、本研究では、この見かけの伝播速度を1 km/s, 2km/s, 5km/sとし、地震波がモデルの左端と右端からそれぞれ到達するものとして、地震波の作成および地盤の応答解析を行った。図-8に示すように、伝播速度が速いほど生じる位相のずれは小さくなる。

3.3 固有値解析結果

地震応答解析に先立ち、地盤の基本的な振動特性と箇所別地震動の周波数特性の関係を把握するために、表-6に示した各地盤モデルの1次の固有振動数と、図-5に示した箇

所別地震動のフーリエスペクトルの比較を行った。

各地盤の固有振動数は、入力地震動の箇所別の違いが最も大きく表れる1.5Hz付近ではない。

3. 4 地震応答解析結果

地盤の水平位置400mから600mにおける地中深さ5mの位置の最大地盤ひずみ分布を図-9から図-13に示す。各図(a)は地震波が地盤モデルの左端から到達する場合、(b)は地震波がモデル右端から到達する場合である。なお、「考慮なし」と「考慮あり」の応答は地震波の伝播方向に関係ないため、(a)(b)共に同一のひずみ分布である。解析結果については、箇所毎の地震動を作成して入力する方法「考慮あり」を実挙動を最も反映していると考え、これを基準として他を比較する。

(1) 水平成層モデル

図-9のような成層地盤において、箇所別地震動を考慮しない場合は地盤ひずみがゼロに評価され、考慮する場合は箇所別地震動の影響のみが地盤ひずみに表れている。さらに、見かけの伝播速度が大きくなるにつれて「考慮なし」の応答に近づくことが確認できる。

次に、図-10から図-13に示した不整形地盤の結果より、地盤の応答に及ぼす地震波の影響と地盤の不整形性の影響について検討する。

(2) 基盤面傾斜モデル

図-10に示した不整形の程度が小さい基盤傾斜モデルでは、「考慮あり」と「考慮なし」の場合は、層厚が薄くなるにつれてひずみが大きく評価され、両ケースの差は大きくない。位相差を考慮した場合については、地震波がモデル右端から到達する場合には上記の2ケースと同様に層厚の薄い方がひずみが大きくなる傾向が見られるが、地震波がモデル左端から到達する場合にはひずみ分布自体が異なっている。また、地震波がモデル右端から到達する場合には、見かけの伝播速度が小さい方が地盤ひずみは大きくなるが、モデル左端から到達する場合には明確な傾向はない。

(3) 基盤面段差モデル

図-11の不整形性の大きい基盤面段差モデルでは、「考慮なし」と「考慮あり」とで同様のひずみ分布を呈し、段差部に大きなひずみが発生しており、このケースについてもひずみの値自体の差は小さい。一方、地震動の違いを位相差で考慮した場合の応答は地震波の到達する方向により、ひずみの評価は大きく異なる。軟質地盤の深いモデル左端から地震波が到達する場合は、段差部でのひずみが見かけの伝播速度が小さいほど小さくなる傾向になるが、右端から到達する場合は逆の傾向となる。

(4) 埋没谷モデル

地盤モデル中央で対称となる不整形を有する図-12の埋没谷モデルでは、傾斜の開始地点よりも浅い部分で大きな

ひずみが発生する。「考慮なし」は地震波を一様入力しており地盤モデルも対象であるため、ひずみ分布が左右対称となる。また、「考慮あり」も「考慮なし」と似たひずみ分布、値となっている。これに対し、地震動の違いを位相差で考慮した場合は、軟質地盤の傾斜方向によって地盤ひずみの評価が異なり、地震波の入射方向に沿って深くなる傾斜では見かけの伝播速度が小さいほど地盤ひずみは大きくなり、地震波の入射方向に沿って浅くなる傾斜では逆の傾向になる。この傾向は基盤面段差モデルにおける入射方向と斜面の方向の関係と同様である。

(5) 硬質地盤露頭モデル

地盤剛性の違いにより不整形を考慮した図-13の硬質地盤露頭モデルでは、軟質地盤側と硬質地盤側でひずみの評価が異なり、軟質地盤側で大きなひずみが発生する。軟質地盤側では、地震波がモデル右端から到達する場合、位相差を考慮した場合の方が箇所別地震動の違いを考慮した場合よりも大きくなっているが、地震波がモデル左端から到達する場合は逆に評価される。このモデルについても「考慮なし」と「考慮あり」の差は小さい。

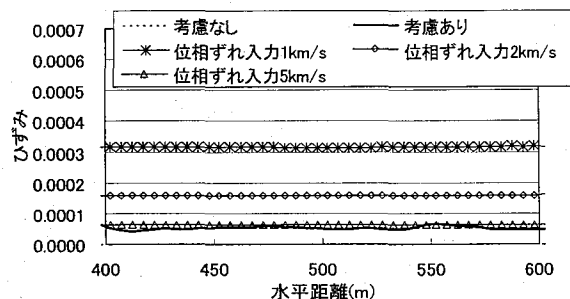
(6) 地震波の入力方向の違いによる影響

図-10から図-13に示した不整形地盤の最大ひずみ分布より、不整形地盤における地盤ひずみの大小関係や分布傾向は、地盤の傾斜方向あるいは地盤の周期特性と、地震波の入射方向の組み合わせで似通った傾向を示すことがわかった。このような傾向を示す原因を考察するために、基盤面段差モデルにおける位相ずれ入力1km/sの場合を例として、位相差を考慮しない「考慮なし」の場合に最大ひずみを生じる地点(水平位置500m)の時刻歴ひずみ分布を図-14、図-15に地震波の入力方向別に示した。各図の(a)は地盤の不整形部により生じたひずみであり、図-14、図-15で同様の波形を示している。(b)は入力地震動の位相差により生じたひずみ、(c)は前述の(a)と(b)を重ね合わせたひずみ、(d)は地盤の不整形性と入力地震動の位相差を同時に考慮したひずみである。

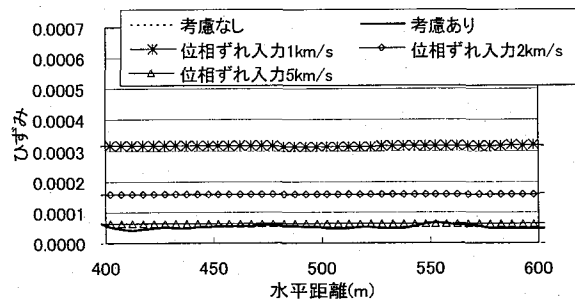
各図の(c)と(d)はほぼ等しい波形をしており、不整形地盤に対する位相ずれ入力の影響は、地盤の不整形性により生じたひずみ((a))と入力地震動の位相ずれにより生じたひずみ((b))を重ね合わせることで評価できることがわかる。その際、前述の通り(a)のひずみ波形は図-14と図-15で等しいが、(b)では地震波の入力方向の違いにより図-14と図-15でひずみの位相が逆になるため、(a)と(b)を重ね合わせると、ひずみが増加あるいは減少することになる。以上より、不整形地盤において位相ずれを考慮すると、地震動の入力方向により地盤に生じるひずみの大小関係が変化したと考えられる。

(6) まとめ

以上より、断層直上の地盤において地震応答解析を行っ

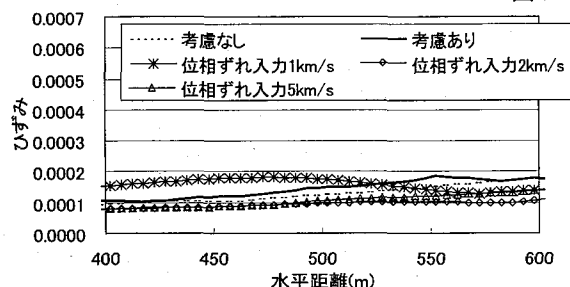


(a) 地震波がモデル左端から到達する場合

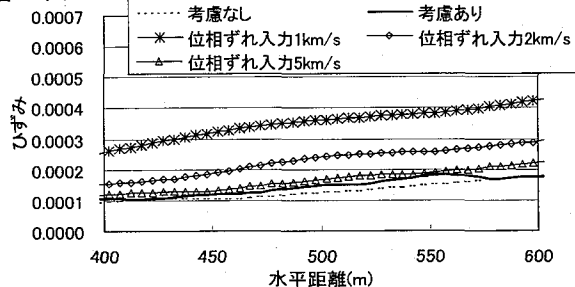


(b) 地震波がモデル右端から到達する場合

図-9 水平成層モデル

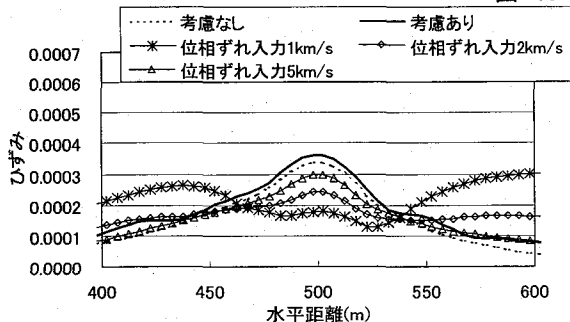


(a) 地震波がモデル左端から到達する場合

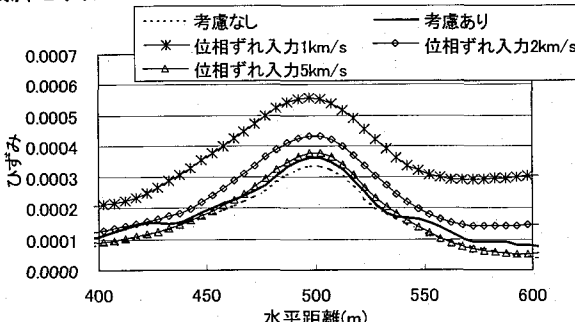


(b) 地震波がモデル右端から到達する場合

図-10 基盤面傾斜モデル

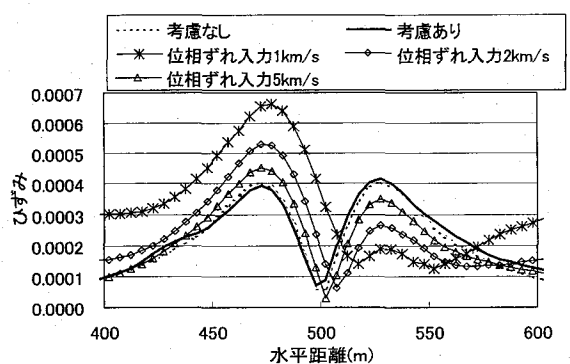


(a) 地震波がモデル左端から到達する場合

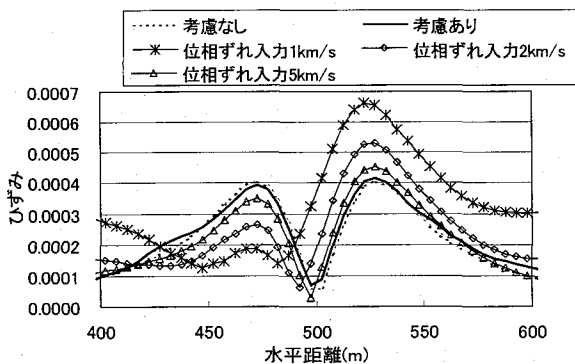


(b) 地震波がモデル右端から到達する場合

図-11 基盤面段差モデル

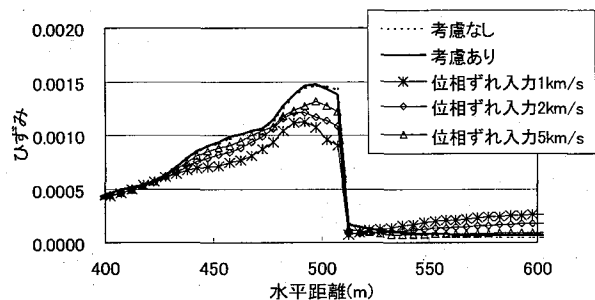


(a) 地震波がモデル左端から到達する場合

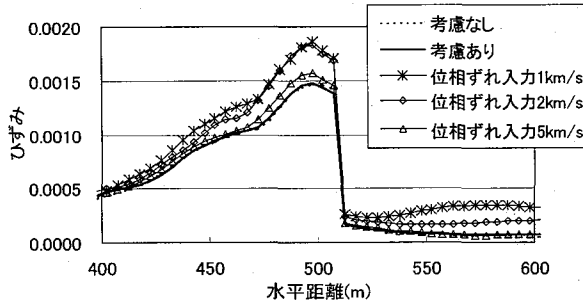


(b) 地震波がモデル右端から到達する場合

図-12 埋没谷モデル



(a) 地震波がモデル左端から到達する場合



(b) 地震波がモデル右端から到達する場合

図-13 硬質地盤露頭モデル

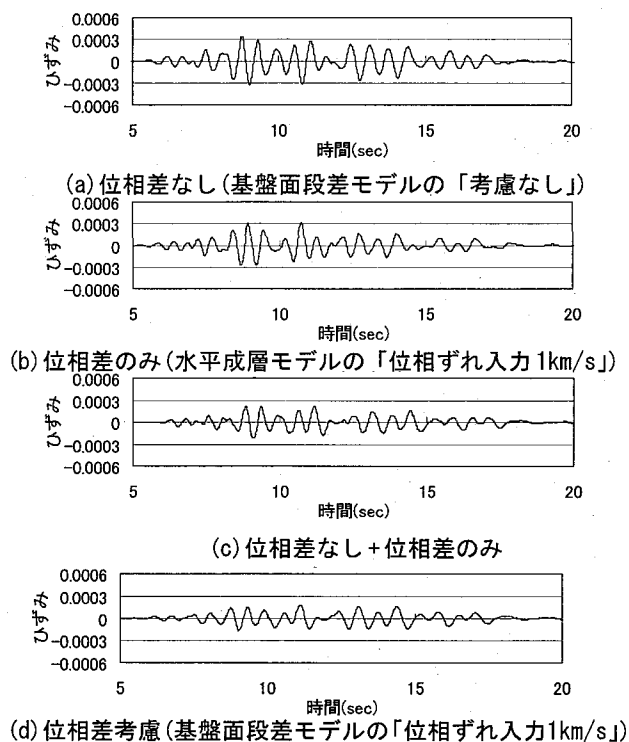


図-14 最大ひずみ発生地点の時刻歴ひずみ
(基盤面段差モデル左端から入力する場合)

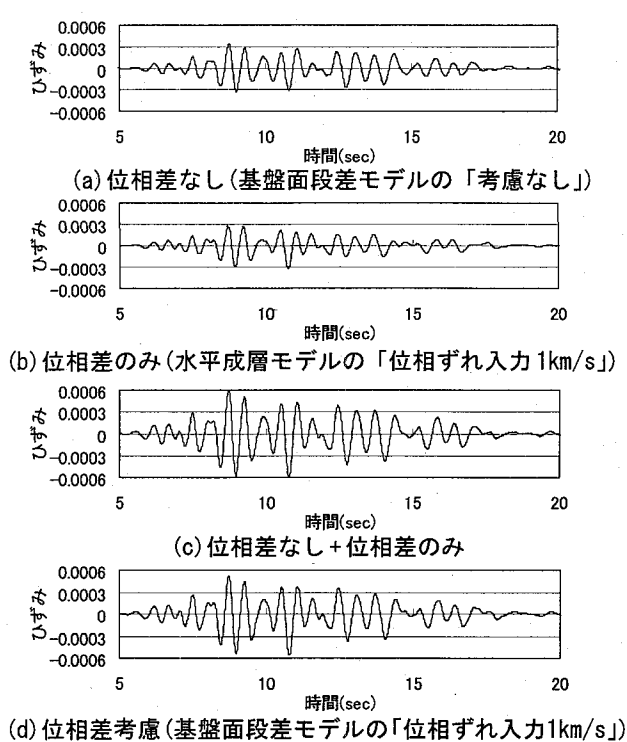


図-15 最大ひずみ発生地点の時刻歴ひずみ
(基盤面段差モデル右端から入力する場合)

た結果、地盤ひずみに及ぼす箇所別地震動の違いの影響はあまり大きくないことがわかった。一方で、あまりに小さな見かけの伝播速度を考慮すると、図-10～12に示すように地盤ひずみを過大、あるいは過小に評価してしまう。見かけの伝播速度としては5km/s程度とし、地震波の入力方向を2方向考慮すれば、やや安全側ではあるが箇所別地震動を考慮した場合と概ね同じ結果が得られた。

ネル解析を行った。図-17に開削トンネルにおけるトンネル軸方向の構造モデルの概要を示す。

はりの剛性については、開削トンネルは全断面有効の剛性とし、シールドトンネルはセグメントとボルトの直列ばねモデルと変形が同等となる等価剛性とした。

地盤ばねはトンネル軸方向に設置し、以下に示す近似式(1)より算出した¹⁰⁾。

4. トンネルの静的解析

前章で用いた2次元不整形地盤にトンネルを設置した場合のトンネルの応答解析を応答変位法を用いて行った。

4.1 対象構造物

本研究では図-16のような開削トンネル及びシールドトンネルを対象とした弾性床土のはりばねモデルによりトン

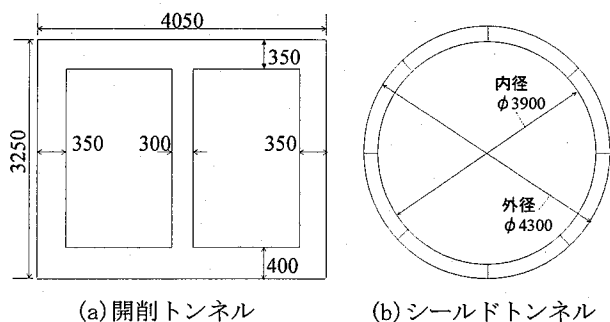


図-16 対象トンネルモデル(単位:mm)

$$K_L = \{c_1(b+2h+2D_0)/H_1 + c_2\}G \quad (1)$$

K_L : 軸方向の地盤ばね定数

b : 構造物の幅

h : 構造物の高さ

D_0 : 土被り厚さ

H_1 : 基盤から構造物底辺までの高さ

G : 地盤のせん断剛性

c_1 : 係数(=0.45)

c_2 : 係数(=1.24)

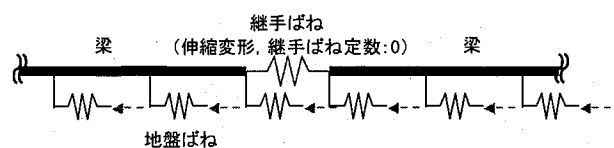


図-17 開削トンネル1のモデル化概要

表-7 トンネルケース

	トンネル剛性	可撓継手間隔(m)
	EA (kN)	
開削トンネル1	1.30×10^8	30
開削トンネル2	1.30×10^8	なし
シールドトンネル	6.13×10^6	なし

継手ばねはトンネル軸方向に設置した。継手ばね定数に関しては、後述の解析ケースで詳細に説明する。

4.2 解析条件

トンネルの応答解析は、構造物とその周辺地盤を弾性床上のはりにモデル化し、前章の地盤の動的解析によって得られた地中深さ5mの位置における地盤変位を地盤ばねを介して構造物に静的に作用させる応答変位法を採用している。

トンネルの解析ケースを表-7に示す。開削トンネルでは可撓継手の有無の影響について検討する。一般的な可撓継手は、躯体間相互の軸方向変位及び回転の結合がフリーの構造となっているため、継手ばね定数をゼロとした場合(開削トンネル1)について検討する。

地震波が地盤モデル左端から到達する場合と右端から到達する場合についてそれぞれトンネル解析を実施する。トンネル軸方向解析を行い、加振方向のみを自由とし、その他の方向は全て拘束とした。解析ステップは0.01秒刻みの3000ステップとした。

4.3 トンネル解析結果

水平距離400mから600mの位置におけるトンネルの最大軸力分布について、水平成層モデルを図-18, 19に、基盤面傾斜モデルを図-20, 21に、基盤面段差モデルを図-22, 23に、埋没谷モデルを図-24, 25に、硬質地盤露頭モデルを図-26, 27に、地震波の入力方向別に示す。軸力図ではトンネル(はり要素)の軸力を図示している。継手部(ばね要素)の軸力はゼロとなるが図示していない。なお、軸力分布を見やすくするために各図の縦軸のスケールを一致させていない。また、図-28～32に「開削トンネル1」における継手変形量を示す。

(1) 地盤ひずみとトンネル軸力の比較

まず、継手を設置しない「開削トンネル2」、「シールドトンネル」の発生軸力と地盤ひずみを比較する。

可撓継手を設置しない「開削トンネル2」の軸力分布と地盤ひずみ分布を比較すると、トンネル軸力は、トンネル剛性の影響を受けて地盤ひずみに比べ平滑化された分布となっている。一方、「シールドトンネル」の軸力分布は、剛性の大きな「開削トンネル2」よりも軸力の平滑化の程度は小さく、地盤ひずみ分布に近い。

箇所別地震動の有無について比較すると、表-8に示すよ

表-8 構造物の応答に対する箇所別地震動の影響
(考慮あり/考慮なし)

	地盤ひずみ	トンネル軸力		
		開削トンネル1	開削トンネル2	シールドトンネル
基盤面傾斜モデル	1.21	1.30	1.38	1.25
基盤面段差モデル	1.07	1.10	1.19	1.12
埋没谷モデル	1.03	1.19	1.26	1.12
硬質地盤露頭モデル	1.01	1.00	0.97	1.00

うに、箇所別地震動の考慮の有無により生じた地盤ひずみの差に比べ、トンネル軸力の差はより顕著となっている。また、「開削トンネル2」では、水平成層モデルで箇所別地震動を考慮した場合の増分軸力は約7000kNであるが、不整形地盤モデルにおける増分はそれと等しいかそれ以下となっている。一方「シールドトンネル」では、水平成層モデルで箇所別地震動を考慮した場合の軸力増分は約500kNであるが、不整形地盤モデルにおける増分はそれ以下となっている。

箇所別地震動を位相ずれにより考慮した場合は、ケース間の断面力の差が地盤ひずみに比べより顕著となっており、地盤不整形が最も強い硬質地盤露頭モデルを除くと、みかけの伝播速度として5km/sを考慮した場合でも、箇所別地震動を考慮した場合に比べて過大評価の傾向が地盤ひずみより顕著となった。その傾向は、トンネル剛性の大きい「開削トンネル2」においてより顕著である。

(2) 可撓継手

可撓継手を設置した「開削トンネル1」の大きな断面力が発生している躯体中央に着目すると、入力ケース間の軸力の大小関係は地盤ひずみの場合とほぼ一致した。これは、継手によりトンネル全体の剛性が低下し、トンネルが地盤の挙動を反映しやすくなったためと考えられる。また、各継手部における「考慮なし」と「考慮あり」の継手変形量を結んだ図-28～32と地盤ひずみの分布図-9～13はほぼ等しい分布形状をしている。これは、継手ばね定数が0であるため、地盤の影響をより精密に反映したと考えられる。したがって、本研究における継手変形量に及ぼす箇所別地震動の影響は地盤ひずみの場合と同程度であるといえる。その結果、表-8における開削トンネル1と地盤ひずみにおける(考慮あり/考慮なし)の比率が他のトンネルケースと比較して近くなったと考えられる。

一方、箇所別地震動を位相ずれにより考慮した場合の継手変形量についても、地盤ひずみ分布の場合と同様に見かけの伝播速度が小さいと過大、あるいは過小に評価された。

(3) まとめ

以上より、箇所別地震動の考慮の有無により生じた地盤ひずみの差は、トンネルの応答において一層大きくなり、トンネルの全体剛性が大きい場合にその傾向は強く現れた。一方、箇所別地震動を位相ずれにより考慮した場合には、地震波の入射方向と地盤の傾斜方向の組み合わせによって

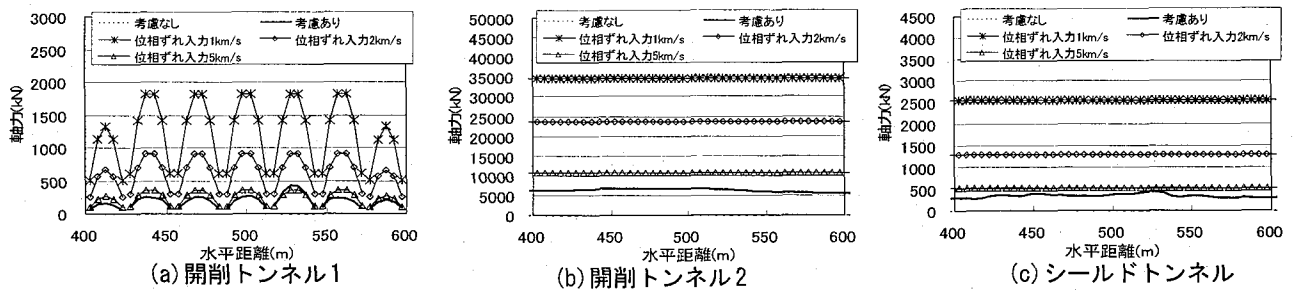


図-18 水平成層モデル(地震波がモデル左端から到達する場合)

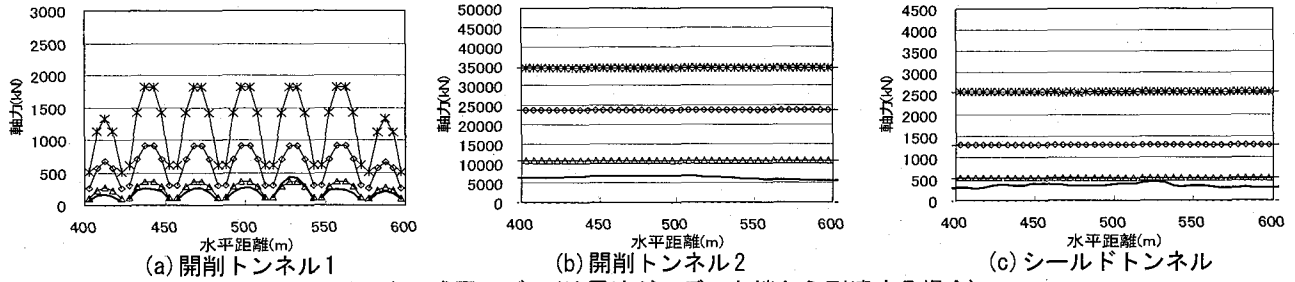


図-19 水平成層モデル(地震波がモデル右端から到達する場合)

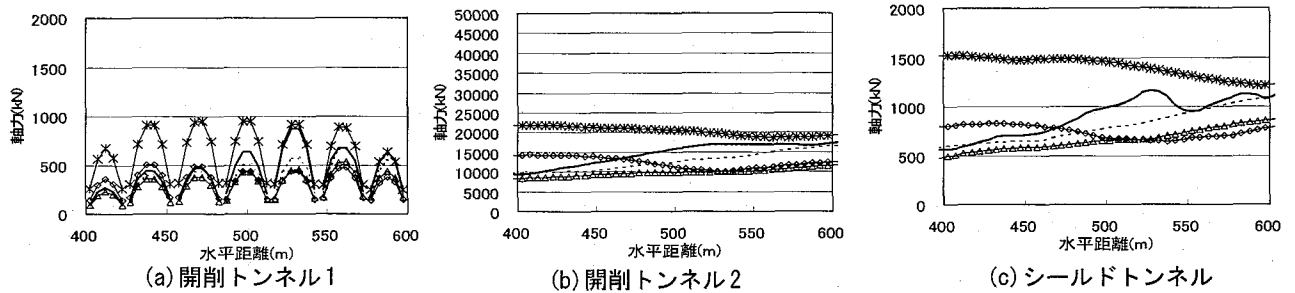


図-20 基盤面傾斜モデル(地震波がモデル左端から到達する場合)

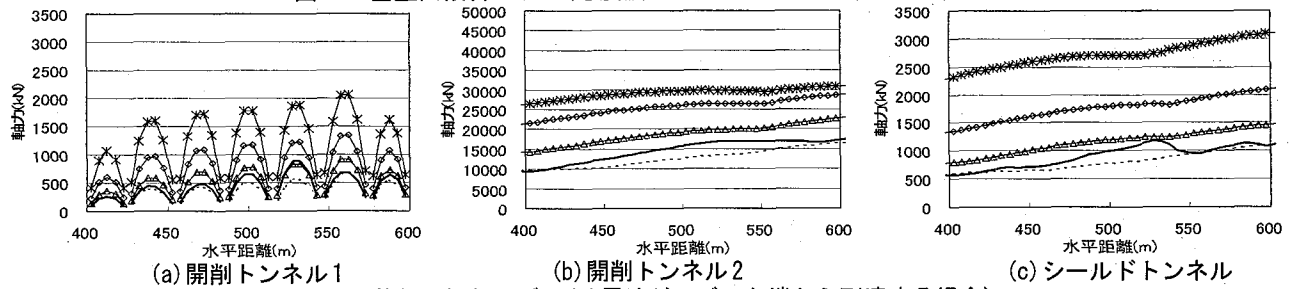


図-21 基盤面傾斜モデル(地震波がモデル右端から到達する場合)

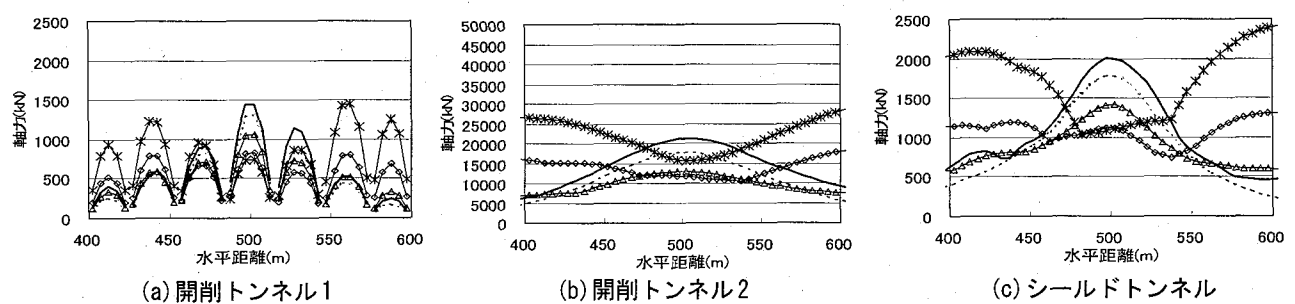


図-22 基盤面段差モデル(地震波がモデル左端から到達する場合)

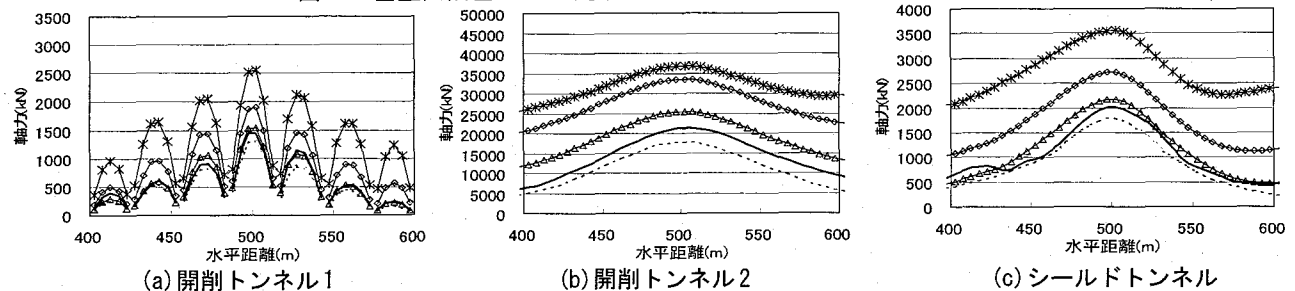


図-23 基盤面段差モデル(地震波がモデル右端から到達する場合)

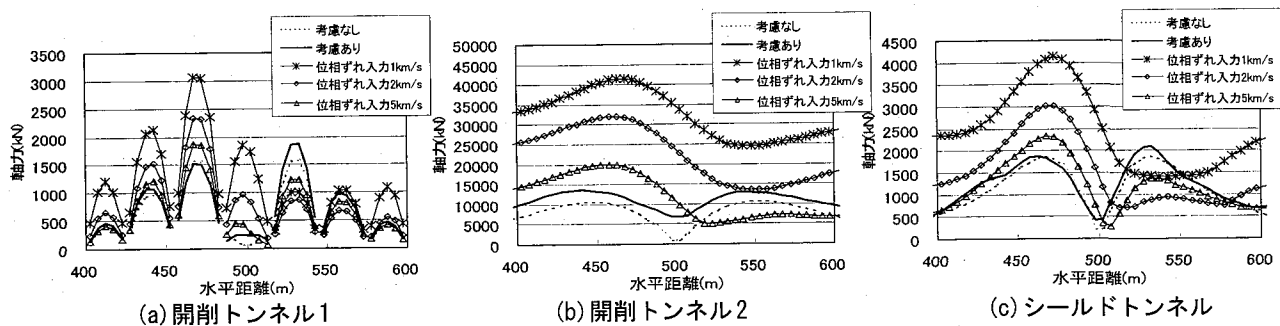


図-24 埋没谷モデル(地震波がモデル左端から到達する場合)

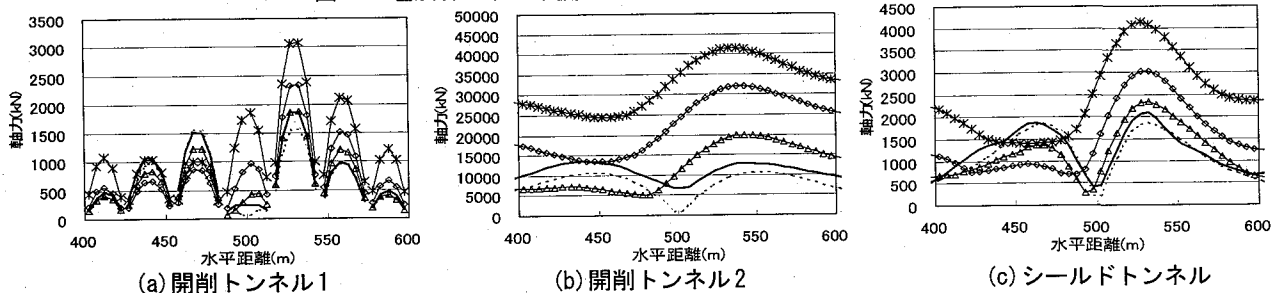


図-25 埋没谷モデル(地震波がモデル右端から到達する場合)

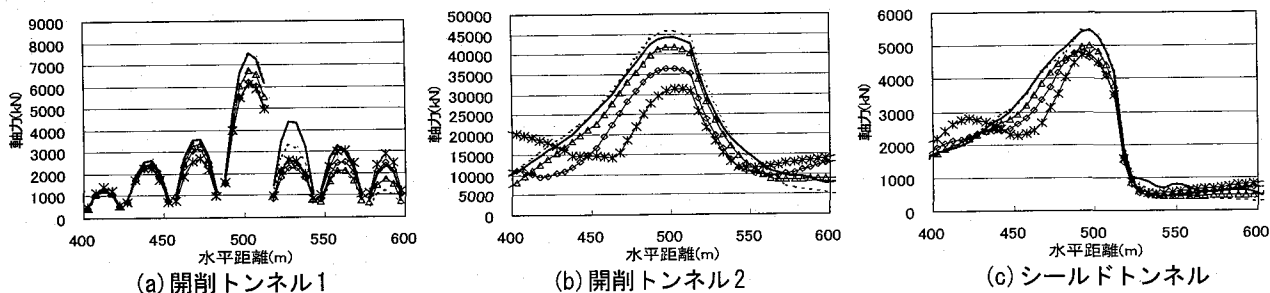


図-26 硬質地盤露頭モデル(地震波がモデル左端から到達する場合)

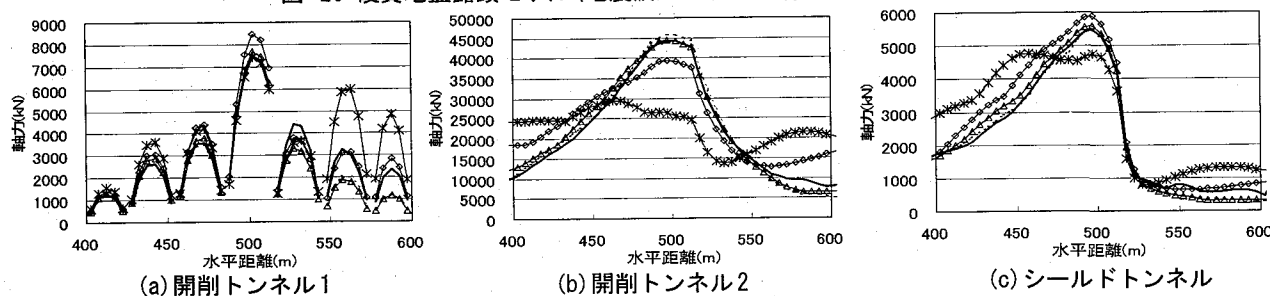


図-27 硬質地盤露頭モデル(地震波がモデル右端から到達する場合)

は、地盤ひずみに見られた大小関係がトンネル軸力で逆転する場合があった。また、可撓継手を設置した場合にはトンネル全体の剛性が低下し、トンネル軸力や継手変形量に及ぼす箇所別地震動の影響や、見かけの伝播速度の違いによる評価の差は地盤ひずみの場合と同程度となった。

5. 結論

本研究において得られた主な知見をまとめると以下のようである。

(1)断層モデルを用いて地中構造物縦断方向の耐震設計に用いる地震動の評価を試みた。1 計算結果から導かれたものではあるが、従来のトンネル耐震設計で考慮されていたよ

うに、同一波形に位相ずれが生じたものと考えたよりも、波形自体やスペクトルが異なる地震動が作用していると考えの方が妥当である。

(2)合成した地震動を用いて地盤の地震応答解析を行った結果、地盤ひずみに及ぼす箇所別地震動の違いの影響は小さいことがわかった。一方で、あまりに小さな見かけの伝播速度を考慮すると、地盤ひずみを過大、あるいは過小に評価してしまう。また、見かけの伝播速度として5km/sを考慮し、地震波の入力方向を2方向考慮すれば、やや安全側ではあるが箇所別地震動を考慮した場合と概ね同じ結果が得られた。ただし、今回の検討は一断層モデルによるものであり、箇所別地震動の違いがトンネル応答に及ぼす影響の定量的評価や、上記の位相速度5km/sの妥当性について

は今後検討の必要がある。

(3) (1), (2)を踏まえて応答変位法によるトンネルの応答解析を行った。その結果、箇所別地震動の考慮の有無により生じた地盤ひずみの差は、トンネルの応答において一層大きくなり、トンネルの全体剛性が大きい場合にその傾向は強く現れた。一方、箇所別地震動を位相ずれにより評価し

た場合には、地震波の入射方向と地盤の傾斜方向の組み合わせによっては、地盤ひずみに見られた大小関係がトンネル軸力で逆転する場合があった。また、可撓継手を設置した場合にはトンネル全体の剛性が低下し、トンネル軸力や継手変形量に及ぼす箇所別地震動の影響や、見かけの伝播速度の違いによる評価の差は地盤ひずみの場合と同程度となった。

(4) 箇所別の地震動を位相差入力として考慮する場合、考慮する見かけの伝播速度や伝播方向によっては、設計断面力ばかりでなく、発生位置も適切に評価できない。特に伝播速度として小さな値を考慮する場合は注意が必要で、位相差入力を行わないケースの解析との比較も実施した上で、設計で考慮すべきか否かを判断すべきと考える。

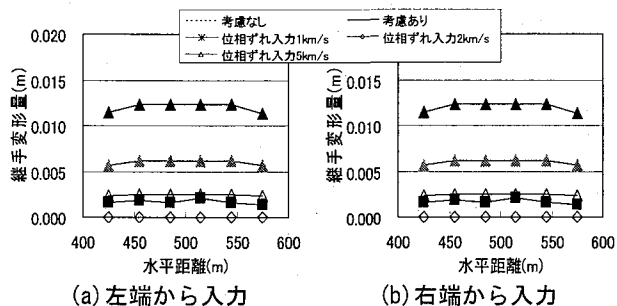


図-28 水平成層モデルの継手変形量

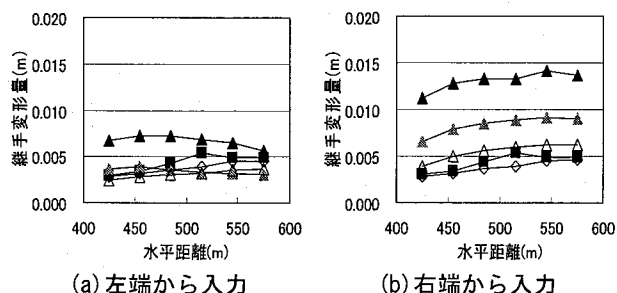


図-29 基盤面傾斜モデルの継手変形量

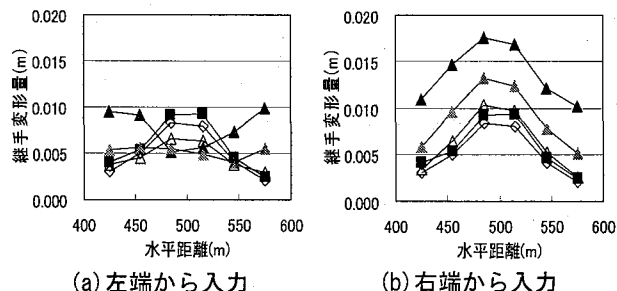


図-30 基盤面段差モデルの継手変形量

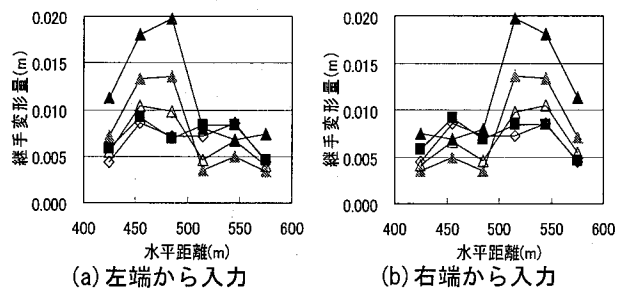


図-31 埋没谷モデルの継手変形量

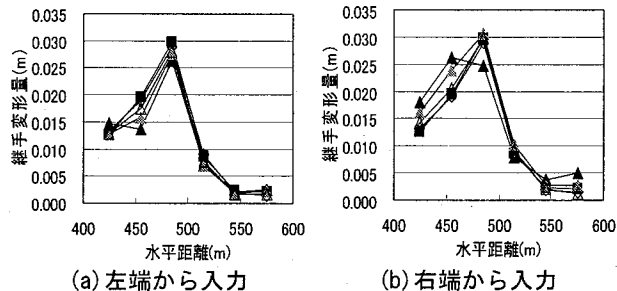


図-32 硬質地盤露頭モデルの継手変形量

参考文献

- 1) 土田, 井合, 倉田: 2次元アレーによる地震動の観測と解析(第1報) - 1977年6月4日東京湾北部の地震 -, 港湾技術研究所報告, 第22巻, 第2号, 1983.
- 2) 岩橋敏広, 大友敬三, 佐藤清隆, 上島照幸, 沢田義博: 実効地震入力の合理的評価と建屋応答の低減, 電力中央研究所報告, 1988.
- 3) 川島一彦, 大日方尚己, 後藤勝志, 加納尚史: 沈埋トンネルの地震応答に及ぼす地盤剛性の箇所別の変化の影響, 土木技術資料27-6, pp. 32-37, 1985.
- 4) 竹内幹雄, 高橋忠, 元山宏, 渡辺啓行: 地盤剛性急変部の線状地中構造物の地震時応力評価法, 土木学会論文集第422号 / I-14, pp. 323-332, 1990.
- 5) 橋義規, 大塚久哲, 古川愛子, 矢野恵美子, 田中宏典: 箇所別に異なる入力地震動を考慮した不整形地盤の応答に関する研究, 土木学会地震工学論文集, 第28巻, 2005, 8.
- 6) 土質工学会中部支部: 最新名古屋地盤図, 1988.
- 7) Irikura K. and Kamae K.: Simulation of strong ground motion based on fractal composite faulting model and empirical Green's function, 第9回日本地震工学シンポジウム, pp. E-019 ~ E-024, 1994
- 8) Boore D.M.: Stochastic simulation of high frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra, Bull. Seim. Soc. Am., Vol. 73, No. 6, pp. 1865-1894, 1983.
- 9) 壇一男, 渡辺基史, 佐藤俊明, 宮腰淳一, 佐藤智美: 統計的グリーン関数法による1923年関東地震(MJMA7.9)の広域地震動評価, 日本建築学会構造系論文集, 第530号, pp. 53-62, 2000.
- 10) 星隈順一, 運上茂樹, 村井和彦: 梁ばねモデルにおける地下構造物縦断方向の耐震設計に用いる地盤ばね定数, 土木学会第53回年次学術講演会講演概要集1B, pp. 776-777, 1998.

(2005年9月10日受付)