

不整形地盤に位置するトンネルの地震時挙動

菊地 拓洋¹・土門 剛²・西村 和夫²

¹学生会員 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:kikuchi-takuyo@ed.tmu.ac.jp

²正会員 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)

近年、トンネルの地震被害では、成層地盤における地震時応答では起こりえない変形モードに起因する覆工天端部の被害が報告されている。本研究では、不整形地盤に位置するトンネルの地震時挙動を明らかにするために、不整形地盤および成層地盤をFEMを用いモデル化して数値解析を行なった。その結果、不整形地盤に位置するトンネルでは、成層地盤に位置するトンネルよりも大きな最大軸力発生していた。また、最大断面力の発生方向は、成層地盤では、アーチ肩部などの45度方向に発生しているのに対して、不整形地盤の発生方向は、45度方向から天端部方向に回転した。さらに、天端部に作用する最大断面力は、不整形地盤では、成層地盤の約6倍であることがわかった。

Key Words : seismic response, topographical irregularity of ground, two-dimensional FEM, dynamic analysis

1. はじめに

従来、トンネルの耐震設計では、地盤を成層であると仮定して、下方から基盤面に垂直に入射するせん断波の影響が最も大きいと考えた解析を行なっている。その結果、トンネルの質量は周辺地盤のみかけの質量と比較して相対的に小さいので、トンネルの変形モードは地盤の振動モードに追従する。そのため、トンネル覆工に作用する断面力は、アーチ肩部やインバート端部など45度方向で卓越し、天端部方向ではほとんど発生しない。しかし、実際の地震時のトンネル覆工の被害では、アーチ肩部やインバート端部の他に、成層地盤における地震時応答では起こりえない変形モードに起因すると考えられる天端部の覆工被害も生じている。

本研究では、不整形地盤に位置するトンネルを考え、その中でもより単純な2層の不整形地盤の二次元FEMモデルを用いた。そして、従来の成層地盤モデルと比較して、不整形地盤に位置するトンネルの地震時挙動を明らかにすることを目的とした。

2. 解析手法

本解析では、基盤と表層を有する2層の成層地盤と、傾斜境界を有する不整形地盤の二次元FEMモデルを用いた。また、解析コードとして、有限要素解析プログラム

TDAPⅢを用いた。

(1) 解析モデル

トンネル横断面の地震時挙動に目的を絞って、二次元モデルとした。なお、研究の第一段階として地山およびトンネルともに材料特性は線形弾性とした。

a) 地盤モデル

地盤モデルは図-1、図-2のように、解析領域が幅1000m深さ100mの1000-100モデルと、図-3、図-4のように、解析領域が幅1000m深さ180mの1000-180モデルの2つとした。不整形地盤モデルの傾斜部は45度とした。物性値は表-1のように、せん断波速度Vsを表層が200m/s、基盤が700m/sとした。その他、せん断弾性係数G、単位体積重量 γ 、およびポアソン比 ν は表-1の通りに設定した。

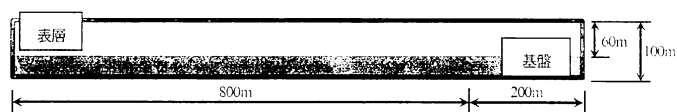


図-1 成層地盤モデル(1000-100m)

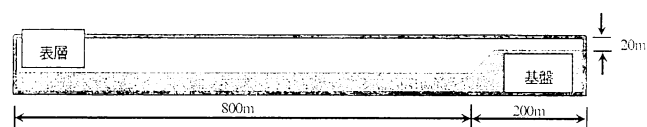


図-2 不整形地盤モデル(1000-100m)

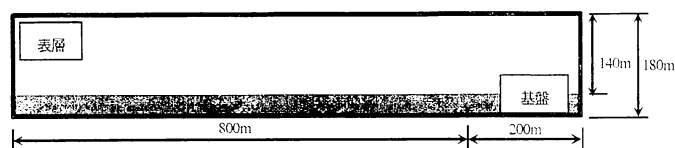


図-3 成層地盤モデル(1000-180m)

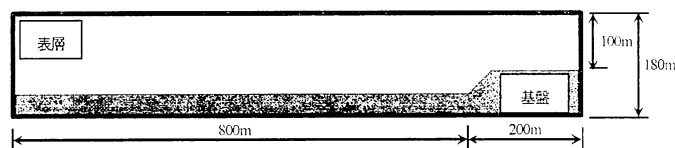


図-4 不整形地盤モデル(1000-180m)

表-1 地盤物性値

	Vs(m/s)	G(MN/m ²)	γ (kN/m ³)	ν
表層	200	77	21	0.3
基盤	700	950	25	0.25

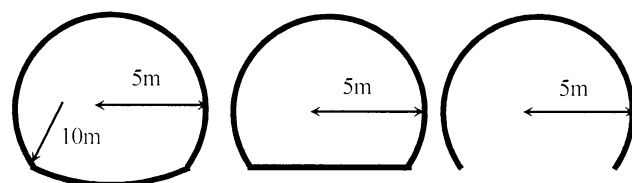


図-5 トンネルモデル

b) トンネルモデル

トンネルモデルは、図-5左から曲率インバート有、直線インバート有、インバート無の3パターンとし、覆工厚は500mmとした。またトンネル覆工の物性値は、表-2のようにした。

c) 入力地震波

入力地震波として、新神戸変電所における兵庫県南部地震の観測記録をVsが780m/sの岩盤まで引き戻した波を用いた。また、その波を基盤から垂直入射させた。入力地震波の波形を図-6に示す。なおこの地震波は、最大加速度が383.3gal、時間刻みDT=0.004である。

3. 地盤応答解析

トンネルの変形モードは、周辺地盤の振動モードに大きな影響を受ける。したがって、トンネル配置位置検討にあたり、不整形地盤における地盤応答解析を行ない、成層地盤とは異なった振動モードが発生する箇所を調べた。なお、最大主応力方向は、水平からのなす角として示すのではなく、図-7のように、成層地盤における最大主応力方向、すなわち45度方向からの偏角 θ の最大値とし

表-2 トンネル覆工物性値

弾性係数 E_c (kN/mm ²)	単位体積重量 γ_c (kN/m ³)	せん断弾性 係数 G_c (kN/mm ²)	ポアソン比 ν
28	23.5	11.7	0.2

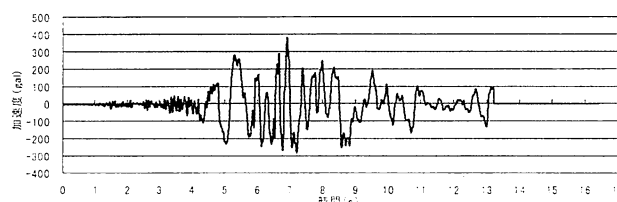


図-6 入力地震波

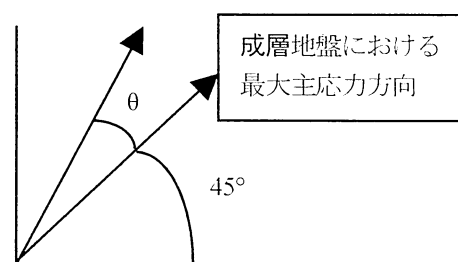


図-7 最大主応力方向の偏角 θ

て示している。また、解析結果は、いずれの領域モデルもほぼ同じ結果が得られたので、ここでは、1000-100mの結果のみ示す。

(1) 水平軸ひずみ

図-8は、成層地盤、不整形地盤モデルの1000-100モデルにおける水平軸ひずみのコンター図である。この図をみると、不整形地盤モデルでは、成層地盤モデルと比較して、相対的に大きな軸ひずみが生じているのがわかる。また、不整形地盤モデルにおける水平軸ひずみ発生箇所は、傾斜境界付近であるのがわかる。

(2) 垂直軸ひずみ

図-9は、成層地盤、不整形地盤モデルの1000-100モデルにおける垂直軸ひずみのコンター図である。水平軸ひずみと同様に、垂直軸ひずみも、成層地盤モデルと比較して、不整形地盤モデルでは、相対的に大きな垂直軸ひずみが発生しており、また、発生箇所も、傾斜境界付近であるのがわかる。

(3) 最大主応力方向

図-10は、成層地盤、不整形地盤モデルの1000-100モデル

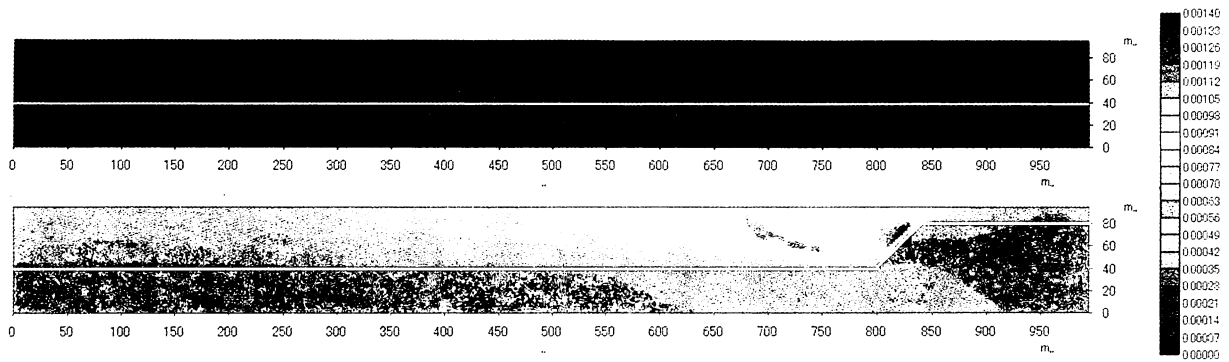


図-8 水平軸ひずみ(上:成層地盤 下:不整形地盤)

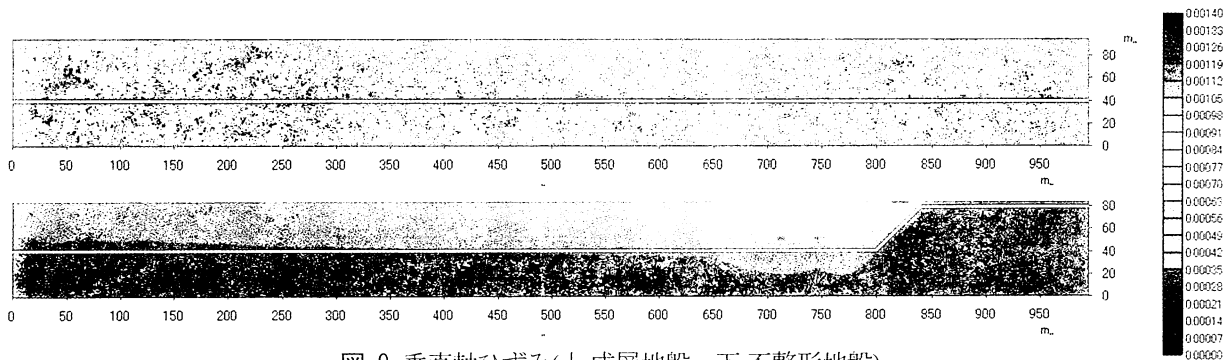


図-9 垂直軸ひずみ(上:成層地盤 下:不整形地盤)

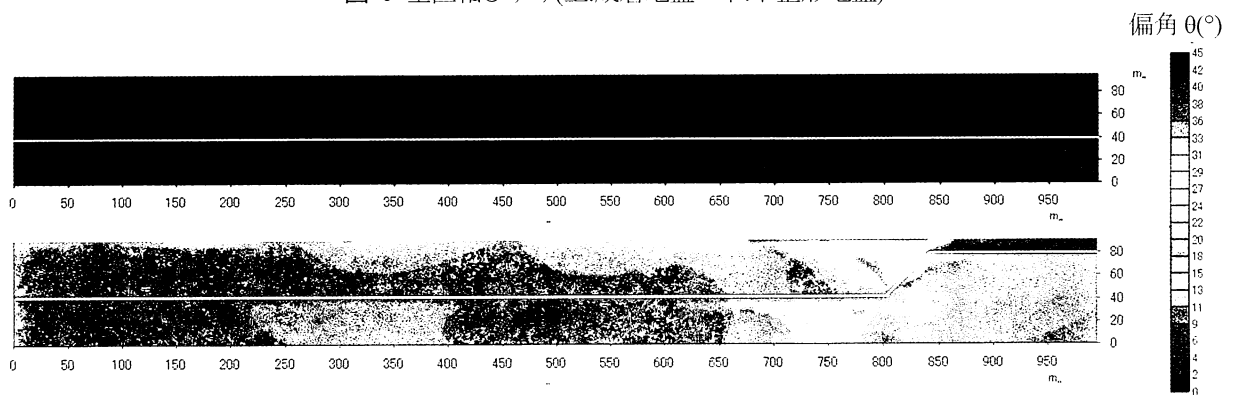


図-10 最大主応力方向(°)(上:成層地盤 下:不整形地盤)

ルにおける最大主応力方向のコンター図である。この図を見てみると、成層地盤では、45度から、ほとんど回転していないのに対して、不整形地盤では、傾斜境界から、表層にかけて、45度から回転しているのがわかる。

また、不整形地盤における偏角は、傾斜付近よりも、地表付近で、大きく回転しているのがわかる。

4. トンネル-地盤応答解析

地盤応答解析の結果を踏まえ、実際にトンネルを配置して解析を行なった。

(1) 配置位置

配置するに当たり、地盤の左端から800m、下端から

40mの傾斜開始の位置を(0,0)として、表層が小さくなる右方向を+x、基盤から離れる上方向を+yとして地盤内座標を作成した。

トンネルの配置位置は、不整形地盤の地盤応答解析より、傾斜境界付近において成層地盤とは異なった振動モード示していたので、傾斜境界付近とした。また、傾斜境界からの距離や、土被りによるトンネルの変形モードを調べるために、配置位置を変えて複数ケース解析を行なった。図-11に地盤モデル1000-100モデルにおけるトンネル配置位置、図-12に地盤モデル1000-180モデルにおけるトンネルの配置位置を示す。なお成層地盤では、地盤応答解析より、水平方向の配置による影響はなかったため、水平方向は一定(x=0)とし、土被りだけを変えて解析を行なった。

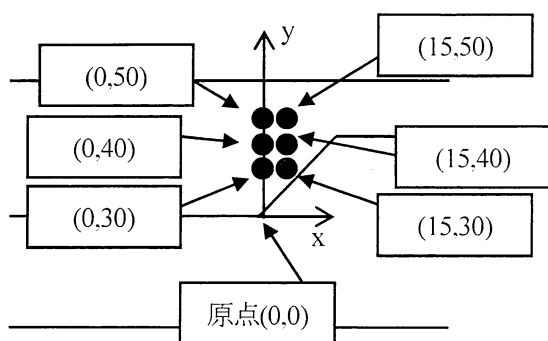


図-11 トンネル配置位置(1000-100 モデル)

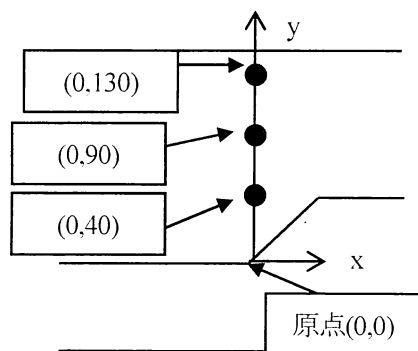


図-12 トンネル配置位置(1000-180 モデル)

(2) トンネル覆工に生ずる断面力

a) 断面力の最大値

表-3、表-4に、曲率インバート有モデルの成層地盤および不整形地盤それぞれの解析ケースにおける最大断面力を示す。なお、最大値は、応力集中が発生するインバート端部以外の箇所から抽出した。

表-3、表-4をみると、最大軸力の値は、すべての解析ケースで、不整形地盤の方が成層地盤よりも卓越して発生しているのがわかる。曲げモーメントについてみると、土被りが小さいケースでは、不整形地盤の方が卓越しているが、土被りが大きいケースでは、不整形地盤と成層地盤でほとんど同等の値を示している。また、トンネル位置が(0,30)と(15,30)のケースで不整形部分からの距離で比較してみると、不整形地盤よりも成層地盤の方が、やや大きい値を示しているのがわかる。これは、不整形地盤では、成層地盤に位置するトンネルで起きる通常のせん断変形の他に、軸力による変形が起きているためであると思われる。

なお、他のトンネルモデルにおいても、同様のことが確認できた。

b) 最大断面力の方向

図-13および図-14に地盤が1000-100モデル、トンネル配置位置が(0,40)におけるインバート無モデルの最大断面力図を示す。なお、矢印は、最大値の方向を表している。

表-3 断面力の絶対値の最大値(1000-100)

トンネル 位置	N (kN)		M (kN・m)	
	成層	不整形	成層	不整形
(0,30)	936	1218	381	388
(0,40)	652	1154	267	328
(0,50)	292	1001	139	256
(15,30)	936	1365	381	361
(15,40)	652	1271	267	324
(15,50)	292	1044	139	254

表-4 断面力の絶対値の最大値(1000-180)

トンネル 位置	N (kN)		M (kN・m)	
	成層	不整形	成層	不整形
(0,40)	1454	2053	538	652
(0,90)	973	1267	376	441
(0,130)	195	686	88	156

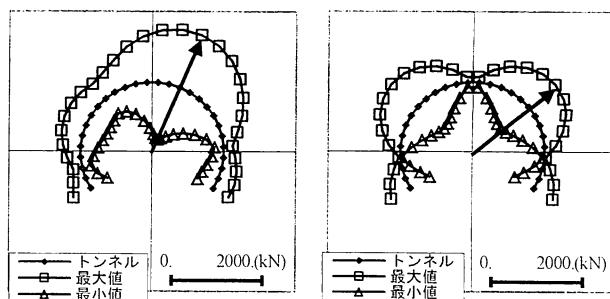


図-13 最大軸力(左:不整形 右:成層)

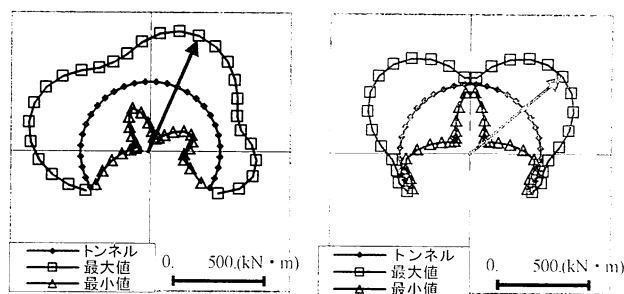


図-14 最大曲げモーメント(左:不整形 右:成層)

図-13および図-14をみると、最大軸力と最大曲げモーメントともに、最大値の発生方向が、成層地盤では45度方向に発生しているのに対して、不整形地盤では、45度から天端部寄りに大きく回転して発生しているのがわかる。また、天端部付近に着目すると、成層地盤では、ほとんど発生していないのに対して、不整形地盤では、やや大きく発生しているのがわかる。軸力についてみると、

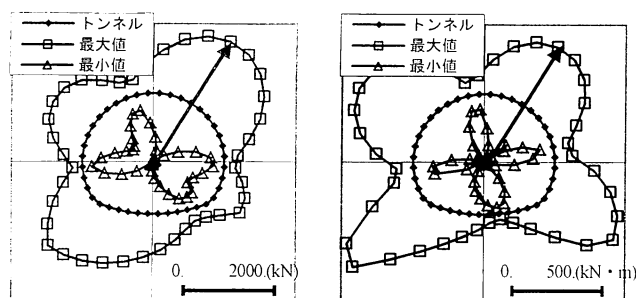


図-15 最大断面力(トンネル位置(0,40), 1000-180 モデル)(左:軸力 右:曲げモーメント)

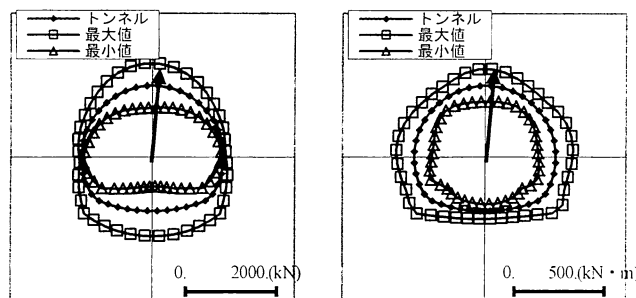


図-16 最大断面力(トンネル位置(0,130), 1000-180 モデル)(左:軸力 右:曲げモーメント)

成層地盤では、左右のアーチ肩部にほぼ同じ大きさで発生しているのに対して、不整形地盤では軸力が左右対称とはならず、不整形部分側のアーチ肩部で卓越して発生している。最大値の発生方向も、やや傾斜部側に傾いて、天端部方向に発生している。曲げモーメントも同様に、不整形部分側のアーチ肩部で応力が卓越しているが、対称軸は、見つけることができ、対称軸も回転しているのがわかる。

なお、同様なことは、他のトンネルモデルでも確認できた。

次に土被りを変えて比較した結果を示す。

図-15に、地盤が1000-180モデル、トンネル位置(0,40)の曲率インバート有モデルの最大断面力を示す。また、図-16に、地盤モデル、トンネルモデルが同じで、トンネル位置が(0,130)の最大断面力図を示す。

図-15、図-16をみると、軸力は、土被りが大きいケースでは、断面力がアーチ肩部から天端部にかけて大きな断面力が発生しているが、土被りが小さいケースでは、最大値の発生方向が、アーチ肩部から、45度位回転しており、天端部とインバート中央部において、他の覆工部分よりも断面力が卓越している。また曲げモーメントも同様に、アーチ肩部ではほとんど発生せず、天端部においてアーチ肩部よりも相対的に大きく発生している。

これは、図-10の地盤応答解析の最大主応力方向のコンター図で、地表付近において、傾斜付近よりも相対的に

表-5 天端部の最大断面力(1000-100)

トンネル 位置	N (kN)		M (kN・m)	
	成層	不整形	成層	不整形
(0,30)	143	939	53	239
(0,40)	96	860	37	217
(0,50)	43	714	20	187
(15,30)	143	1107	53	269
(15,40)	96	947	37	234
(15,50)	43	719	20	189

表-6 天端部の最大断面力(1000-180)

トンネル 位置	N (kN)		M (kN・m)	
	成層	不整形	成層	不整形
(0,40)	230	983	100	272
(0,90)	140	674	58	187
(0,130)	21	574	16	134

表-7 M-N図に関する覆工コンクリート物性値

設計基準強度 f_{ck} (N/mm ²)	圧縮鉄筋 直径(mm)	引張鉄筋 直径(mm)	鉄筋ヤング率 Es (kN/mm ²)
30	16	16	210

大きく回転しているためと考えられる。したがって、地表付近にトンネルが位置するケースでは、最大断面力の発生方向が、それよりも深い位置にトンネルを配置したケースよりも、相対的に大きく回転したと考えられる。

なお、同様なことは、他のトンネルモデルでも確認できた。

c) 天端部断面力

表-5および表-6に、実際の地震の際に被害が発生している天端部における断面力を示す。なお、これはトンネルが直線インバート有モデルにおける結果である。

すべての解析ケースにおいて、不整形地盤では、成層地盤の約6倍の断面力が発生しているのがわかる。

なお、同様なことは、他のトンネルモデルでも確認できた。

d) 覆工破壊評価

覆工に生ずる最大断面力を各要素ごとに抽出し、それらをM-N図にプロットして、破壊点を調べた。抽出方法は、不整形地盤では、成層地盤に比べて軸力が卓越しているので、各要素ごとに最大軸力、最小軸力が発生する時間断面を調べ、その時の軸力と曲げモーメントを抽出した。なお、M-N図の破壊曲線の作成に当たり使用したトンネル覆工に関する物性値を表-7に示す。また、表-7の値の他に、表-2の値も用いた。

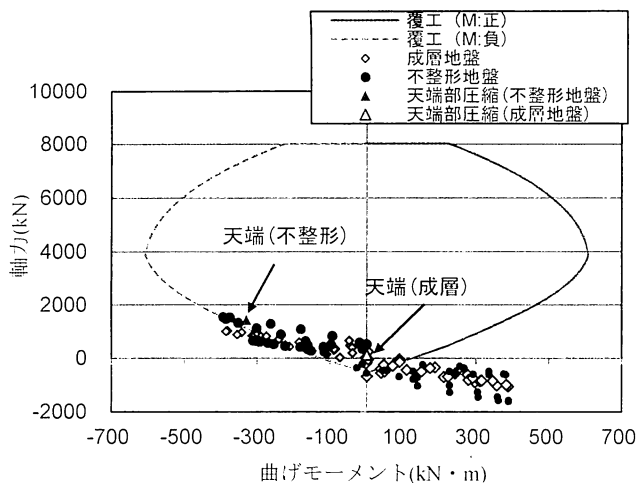


図-17 M-N図(1000-100, (0,40), インバート無し)

図-17に、地盤モデル1000-100、トンネル位置(0,40)におけるインバート無モデルのM-N図を示す。

図-17を見てみると、成層地盤のほうが耐力強度を超えた断面が多いのが確認できる。

また、天端部に着目すると、不整形地盤に位置するトンネルの天端部のほうが、成層地盤に位置するトンネルの天端部より、破壊曲線近傍に位置していることが確認できる。

なお、同様なことは、他のトンネルモデルでも確認できた。

5. 考察

解析結果より、不整形地盤に位置するトンネルでは、主に以下のことが確認できた。

- ① 最大断面力発生方向が回転
- ② 覆工に作用する軸力が卓越

この2つのことについて、以下に考察を述べる。

(1) 最大断面力発生方向が回転

解析では、下方から基盤面に垂直に入射するせん断波の影響が最も大きいと考え解析を行なっている。したがって、成層地盤では、下方から鉛直に入射したせん断波が、屈折することなく、基盤から表層に伝達していく。しかし、傾斜境界が存在する場合、基盤に入射したせん断波は、傾斜境界で屈折を起したり、P波が発生する。そのため、最大断面力方向が回転したり、複雑な挙動を示すと思われる。図-18に概念図を示す。

(2) 覆工に作用する軸力が卓越

トンネルの質量は周辺地盤のみかけの質量と比較して相対的に小さいので、地震には、地盤の振動モードに支配される。

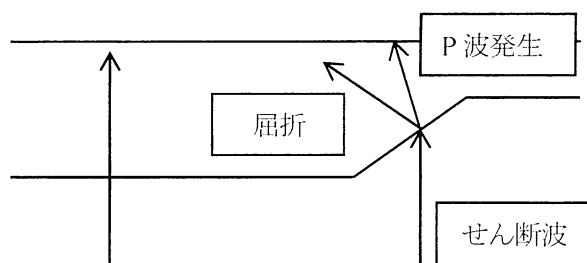


図-18 最大断面力回転の概念図

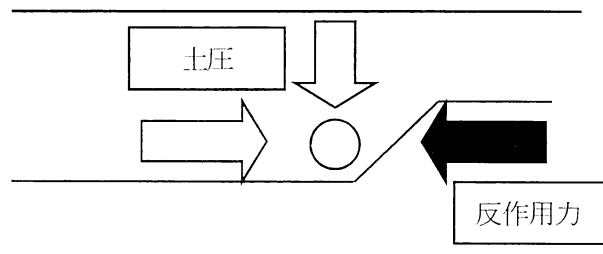


図-19 軸力卓越の概念図

傾斜部を有する不整形地盤では、基盤の傾斜部が、表層に対して壁のような役割を果たす。よって、基盤部のひずみは、表層部のひずみと比べて相対的に小さくなるので、不整形近傍に位置するトンネルでは、表層部からの土圧と、基盤からの反作用力により、圧縮力が発生するために、軸力が卓越すると考えられる。図-19に概念図を示す。

6. まとめ

本研究により明らかになったことを以下にまとめる。

- (1) 最大軸力の値は、ほとんどの位置で、成層地盤に位置するトンネルよりも、不整形地盤に位置するトンネルの方が相対的に、大きく発生している。
- (2) 不整形近傍に位置するトンネルの最大曲げモーメントは、同じ位置の傾斜角が0度(成層地盤)のトンネルの最大曲げモーメントよりも低い値を示している。
- (3) 最大断面力の発生方向は、不整形地盤に位置するトンネルでは、45度から回転して発生している。
- (4) 土被りを小さくしていくと、最大断面力の発生方向の回転角は大きくなる。
- (5) 天端部に働く断面力は、不整形地盤に位置するトンネルでは、成層地盤に位置するトンネルと比較して、大きな断面力が発生する。
- (6) トンネル覆工の破壊は、不整形地盤に位置するトンネルは、通常のせん断変形の他に、体積変化が生じるので、耐力強度を超える断面が多い。

(7) 天端部覆工の破壊では、成層地盤に位置するトンネルでは、破壊曲線の内側にあるのに対し、不整形地盤に位置するトンネルでは、破壊曲線近傍にある。以上より、不整形地盤に位置するトンネルでは、断面力の値や生じる方向が成層地盤とは大きく異なることが

示された。したがって、耐震設計では、実際の地質構造を再現した数値解析を行なうことが必要であると考えられる。

(2012.9.3 受付)

SEISMIC RESPONSE ON TUNNEL LINING IN THE GROUND WITH TOPOGRAPHIC IRREGULARITY

Takuyo KIKUCHI, Tsuyoshi DOMON and Kazuo NISHIMURA

We investigate seismic response on tunnel lining in the ground with topographic irregularity by dynamic analysis. As a result, it became obvious that the maximum axial force of tunnel lining in the ground with topographic irregularity is larger than that in horizontally layered ground, the direction of maximum cross-section force of tunnel lining in the ground with topographic irregularity is trend in tunnel crown and the maximum cross-section force of tunnel crown lining in the ground with topographic irregularity is larger than that in horizontally layered ground.