

隅角部付近の地盤剛性が開削トンネルの応答特性に及ぼす影響

川西智浩¹・室野剛隆²・井澤淳³

¹正会員 工修 京都大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻（〒615-8530 京都市西京区京都大学桂船井交流センター）

²正会員 工博 （公財）鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部（〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38）

³正会員 工博 （公財）鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部（〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38）

1. はじめに

開削トンネルの耐震検討において部材の耐力が不足した場合には耐震対策を実施する必要があるが生じるが、特に既設トンネルを対象とする場合には、中柱以外の部材を耐震補強することは施工性の面から容易ではない。そこで近年では、開削トンネル部材の耐力を増大させる耐震補強ではなく、トンネルに作用する地震力を低減させることで部材の断面力も減らし、耐力以下に抑えることを目的とした免震工法も検討されている。例えば著者の一人はポリマーを開削トンネルの両側に施工する免震工法¹⁾を開発し、この工法は横浜市営地下鉄において実用化されている。

一方、上下床版や側壁で耐力が不足するのは通常隅角部付近であることから、開削トンネルの側面全体ではなく、隅角部周辺の地盤を改良する方法も考

えられる。この場合、地盤から伝わる変位や応力が軽減されるのに加え、四隅の地盤剛性が低下することでトンネルの回転成分が増えてせん断挙動が抑えられる可能性があり、これらの影響により部材の断面力が低減し、所定の要求性能を確保することも可能であると考えられる。

そこで本検討では、開削トンネル隅角部周辺の地盤剛性やその改良範囲を変化させて応答解析を実施することにより、隅角部付近の地盤剛性がトンネル応答に及ぼす影響について基本的な検討を実施する。

2. 検討方法

(1) 解析の概要

本検討に用いる解析モデルを図-1に示す。深さ17mの1層地盤（粘性土を想定）中に幅16.3m×高

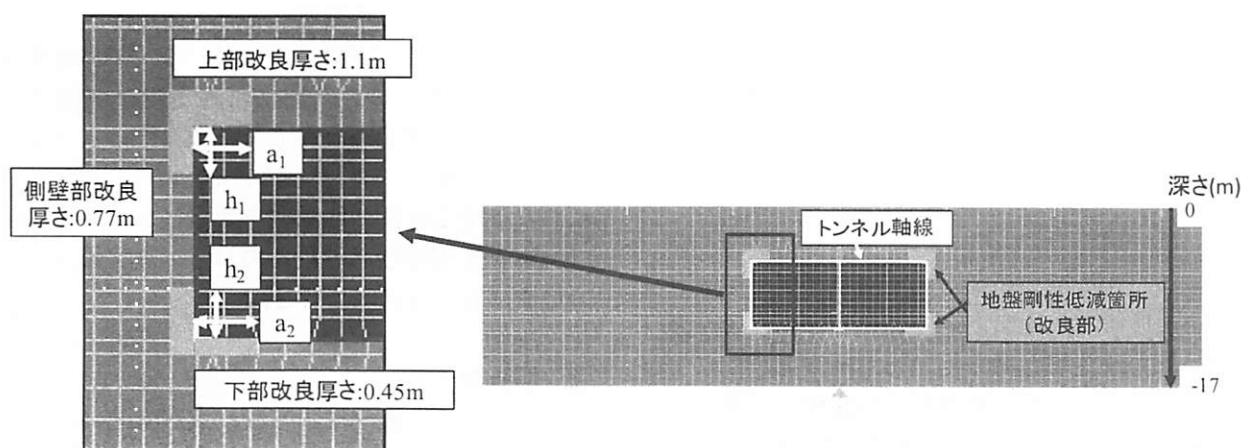


図-1 解析モデル

表-1 地盤、免震層の物性値

	単位体積重量(kN/m ³)	せん断弾性係数(kN/m ²)	ポアソン比	非線形特性
地盤	18	115532	0.49	GHE-Sモデル (粘性土標準パラメータ) ²⁾
免震層	18	地盤の1/10あるいは1/100	0.49	GHE-Sモデル (粘性土標準パラメータ) ²⁾

表-2 構造物の物性値

単位体積重量(kN/m ³)	弾性係数(kN/m ²)
24	3.07×10^7

表-3 解析ケース

ケースNo.	改良幅		改良高さ		剛性 低減率	備考
	a ₁ (m)	a ₂ (m)	h ₁ (m)	h ₂ (m)		
Case0	—	—	—	—	—	改良なし
Case1-0	0.85	0.95	1.47	1.48	1/10	改良幅のみ変更
Case1-1	1.60	1.85				
Case1-2	3.10	2.67				
Case1-3	4.35	4.31				
Case2-1	1.60	0.95	2.62	2.54	1/100	Case1-1に対し 改良高さのみ変更
Case3-1			6.345（全範囲）			
Case1-1a	1.60	1.85	1.47	1.48	1/100	Case1-1, Case1-3について剛性 低減率を1/100にしたケース
Case1-3a	4.35	4.31				

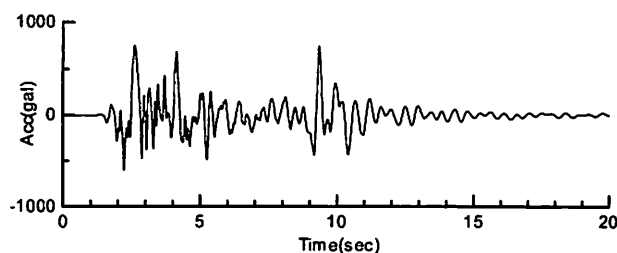


図-2 入力地震波

さ6.345m (軸線間の距離) の1層2径間の開削トンネルを設置する。地盤および構造物の物性値を表-1、表-2に示す。地盤と構造物の初期剛性比が1 : 1となるように1層地盤の地盤剛性を設定し、次にトンネル隅角部付近において地盤剛性を低減させる範囲

(以下、改良部と呼ぶ。)を設定してその箇所のみ地盤剛性を低減させることとする。構造物は線形とし、地盤についてはGHE-Sモデル²⁾を用いて非線形を考慮する。入力地震波として、図-2に示す鉄道耐震標準におけるL2地震動スペクトルⅡ(G1地盤用)³⁾を用い、解析プログラムには鉄道総研が開発したAFIMEX-JRを用いる。そして、改良部の大きさ(図-1における幅a₁、a₂および高さh₁、h₂)および改良部における地盤剛性の低減率を変化させて地盤の動的FEM解析を実施し、これらのパラメータがトンネルの地震応答に及ぼす影響を調べる。

(2) 解析ケース

解析ケースを表-3に示す。改良部を設けないケース (Case0) のほか、Case1-1を基本パターンとして

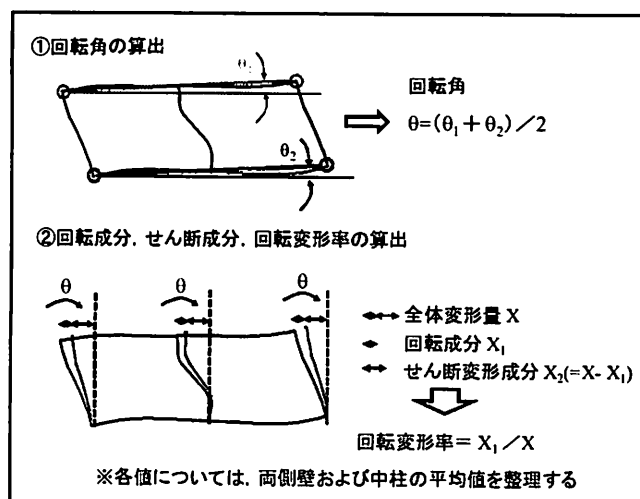


図-3 回転成分、せん断成分、回転変形率の算定方法

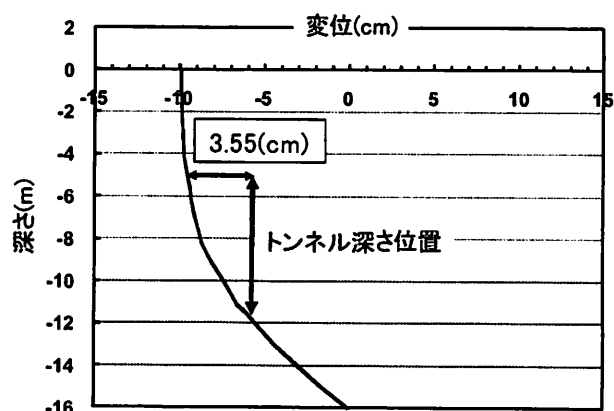
改良範囲の幅を変えたケース (Case1-0~Case1-3) , Case1-1を基本パターンとして改良範囲の高さを変えたケース (Case2-1, Case3-1)を解析対象とする。また、地盤剛性の低減率は1/10を基本とするが、一部ケースについては低減率1/100のケースも実施し、地盤剛性低減率による影響も調べる。なお、図-1で示した改良範囲はCase1-1に対応している。

(3) 回転成分とせん断成分の算出

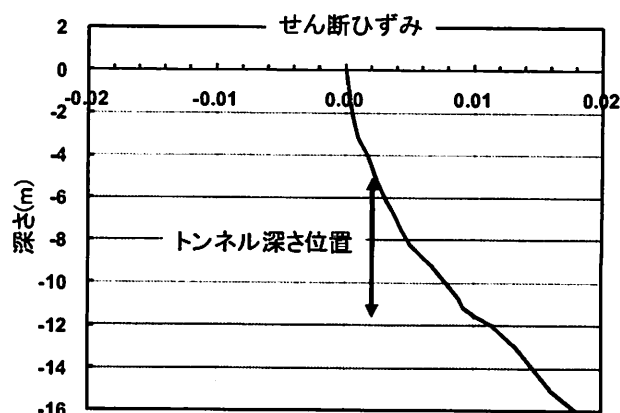
1. で述べたように、トンネル隅角部周辺の地盤剛性を低減させた場合、トンネルの回転成分が増えてせん断挙動が抑制される可能性がある。そこで本検討では、各ケースにおけるトンネルの変形を比較するにあたり、以下に示す手順によりトンネルの回転成分およびせん断成分を算出することとした (図-3)。

- ① トンネルの上床版と下床版における左端と右端の変位から傾き (角度) を算出し、両者の平均値を回転角と定義する。(厳密にはこの回転角には上下床版の変形も含まれているが、ここではその変形も含めた形で回転角を定義することにした。)
- ② ①で算定した回転角の分だけ変形を戻し、戻った変形の水平方向成分(X_1)を回転成分とする。そして、水平方向における全体変形(X)から回転成分(X_1)を差し引いた値をせん断変形成分($X_2 = X - X_1$)とする。また、全体変形(X)に対する回転成分(X_1)の割合を回転変形率と定義する。

なお本検討では、両側壁と中柱それぞれについて全体変形、回転成分、せん断変形成分および回転変形率を求め、その平均値を解析ケース毎に比



(a) 変位分布



(b) せん断ひずみ分布

図-4 着目時刻 (開始後2.86秒) における自然地盤の応答

較することにより、各パラメータによってトンネルの変形状態がどのように変わるのかを調べることとした。

3. 自然地盤の応答

以下では、トンネル上下床版間に対応する深さ (深さ-5.20m~-11.545m) における、自然地盤 (トンネルから十分離れた位置) の相対変位が最大となる時刻に着目し、その時刻におけるトンネルの応答値を比較することで、隅角部周辺の地盤改良部の範囲や地盤剛性による影響について検討することとする。

上記着目時刻 (開始後2.86秒) における自然地盤の変位分布およびせん断ひずみ分布を図-4に示す。トンネル上下床版位置に対応する部分の相対変位は3.55cmである。また、自然地盤のせん断ひずみは上床版位置で 2.44×10^{-3} 、下床版位置で 1.02×10^{-2} である。

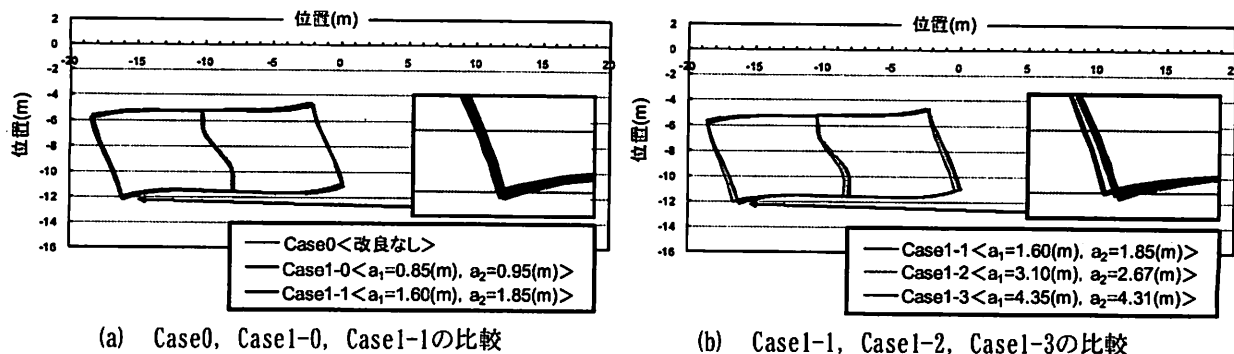


図-5 トンネル変形の比較（改良幅による影響）＜地震時増分を100倍に拡大表示＞

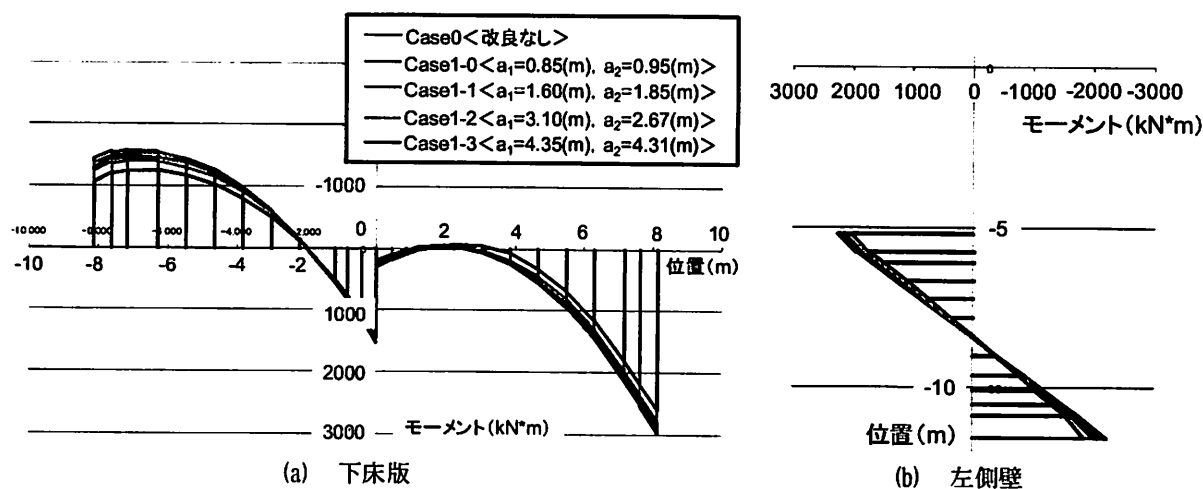
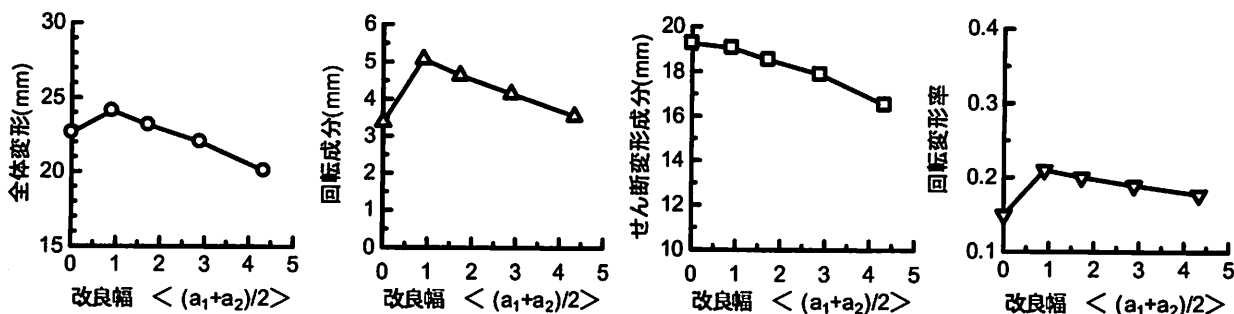


図-7 モーメント分布の比較（改良幅による影響）

4. 改良幅がトンネルの応答に及ぼす影響

(1) トンネルの変形の比較

改良幅を変えたCase1-0～Case1-3および改良なしのCase0について、トンネルの変形を比較した結果を図-5に、水平方向の全体変形，回転成分，せん断変形成分および回転変形率を図-6に，それぞれ示す。図-5において，トンネル変形の地震時増分については100倍に拡大して表示している。

改良幅がそれほど大きくない場合には，隅角部の鉛直方向への変形が増大し，トンネル全体がより回

転するような挙動になっており，図-6における回転成分の値も増加している。一方，改良幅を増加させていくと，周辺地盤の変形が大きくなるためトンネル全体の変位も増大するが，上下床版の相対変位は減少し，回転成分も小さくなっていくことがわかる。また，せん断変形成分は，改良幅が大きくなるにつれて小さくなっていくことがわかる。

最後に回転変形率に着目すると，上下床版の隅角部周辺の地盤剛性を低減させることにより，改良なしのケースに比べて回転変形率が大きくなるが，改良幅が大きくなるにつれて回転変形率が減少し，せ

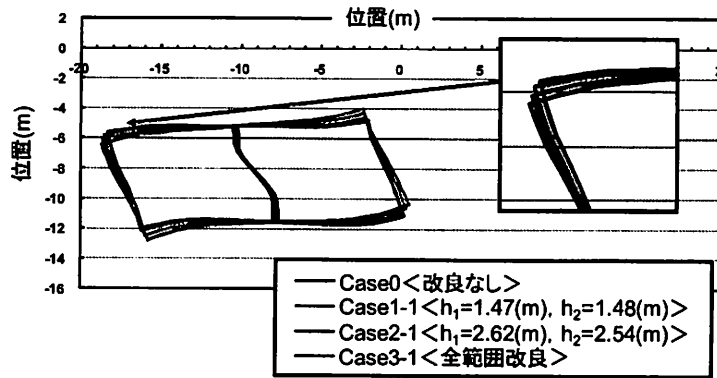


図-8 トンネル変形の比較（改良高さによる影響）＜地震時増分を100倍に拡大表示＞

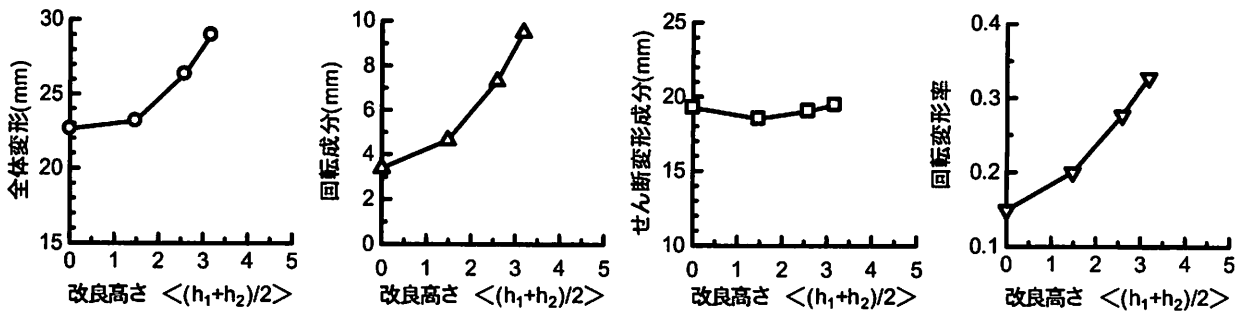


図-9 変形，回転変形率の比較（改良高さによる影響）

ん断変形の割合が高まることがわかる。

(2) モーメントの比較

次に，下床版と左側壁のモーメント分布を比較した結果を図-7に示す。改良幅を大きくするにつれて，隅角部付近における部材の断面力が低減していることがわかる。つまり，トンネル下部の改良範囲が限定的な場合には，隅角部が下部に沈みこむような回転モードが卓越することでせん断変形を抑制して全体の断面力が低減する一方，トンネル下部の改良範囲が広がると，トンネル下部から伝わる地震力が単純に減少し，これによりトンネルの断面力も低減すると推察される。このように，改良範囲によりトンネルの挙動メカニズムが異なるものの，改良範囲を広げるほどトンネルの断面力を低減させる効果が大きくなると言える。ただし，トンネル下部の改良範囲を広げすぎると，トンネル自体の安定性の問題が生じるため，改良範囲の検討には注意を要する。

5. 改良高さがトンネルの応答に及ぼす影響

(1) トンネルの変形の比較

改良高さを変えたCase1-1，Case2-1，Case3-1およ

び改良なしのCase0について，トンネルの変形を比較した結果を図-8に，水平方向の全体変形，回転成分，せん断変形成分および回転変形率を図-9に，それぞれ示す。図-8において，トンネル変形の地震時増分については100倍に拡大して表示している。

改良高さを増やすことにより隅角部の鉛直方向への変形が増大し，トンネル全体がより回転するような挙動になる。図-9における回転成分の値も改良高さの増大によって急激に大きくなっている。4.の改良幅に関する検討では，改良幅により変形のメカニズムが異なっていたが，改良高さを変更した場合にはトンネル下部からの地震力の増大には直接影響しないので，回転挙動が大きくなるメカニズムは改良高さが変わっても同一である。

ただし，せん断変形成分に注目すると，Case1-1程度の改良高さであればせん断変成分が減少し，耐震効果が得られるが，それ以上に改良高さを大きくすると，改良なしのケースと比べてもせん断変形の抑制効果が小さくなっており，今回のように改良幅を固定して改良高さをむやみに大きくしても，回転成分のみが単純に増加してしまい，せん断変形の減少にはあまり結びつかないことがわかる。

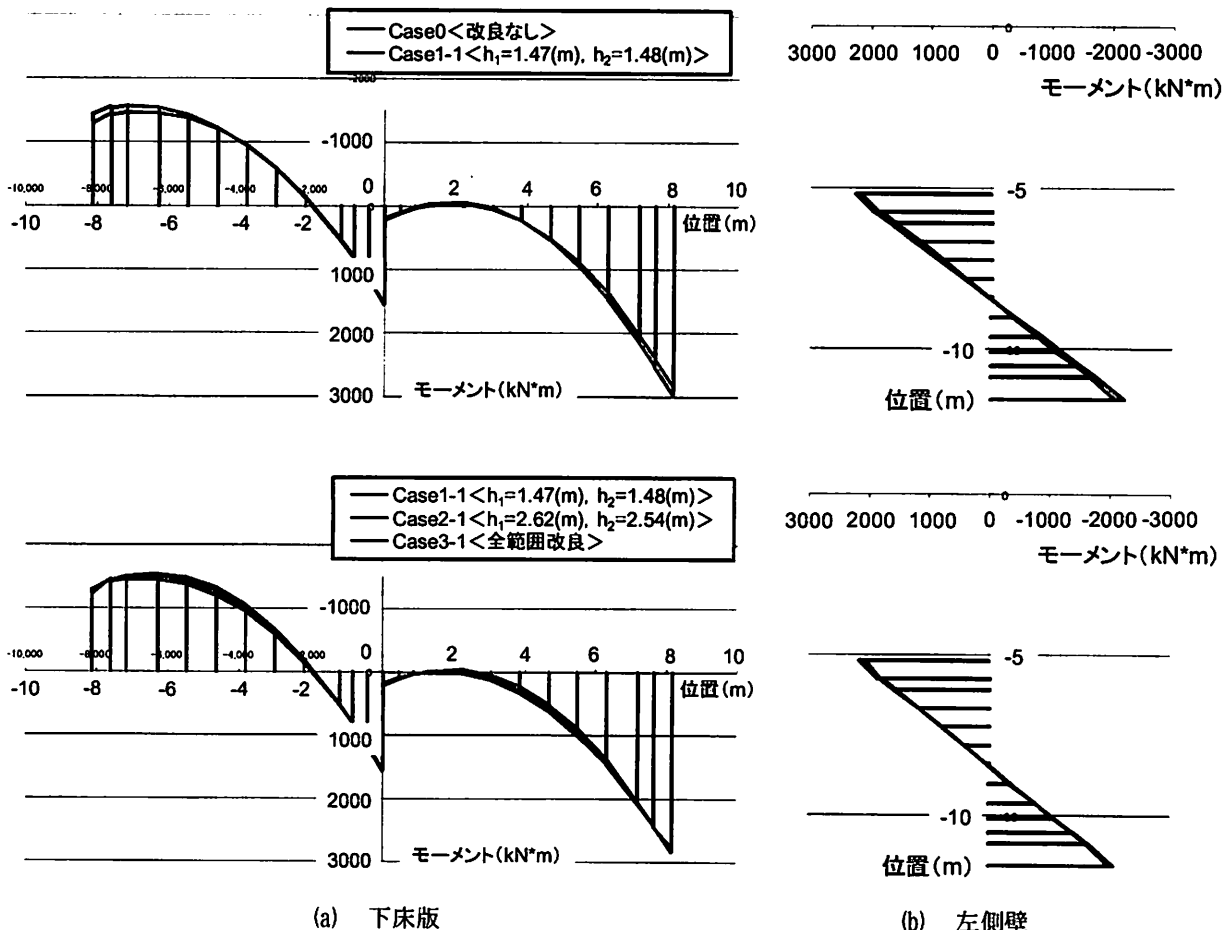


図-10 モーメント分布の比較 (改良高さによる影響)

(2) モーメントの比較

次に、下床版と左側壁のモーメント分布を比較した結果を図-10に示す。Case1-1程度の改良高さであれば断面力の低減効果が見られるが、改良高さの範囲をそれ以上大きくしても、側壁における断面力低減効果は薄いうえ、回転変形が過度に卓越する影響で、下床版において隅角部から少し離れた位置（地盤剛性が硬い部分と接している部分）の断面力が大きくなりすぎてしまう。つまり、本検討のように隅角部を廻りこむように改良部を設ける場合には、側壁位置の改良高さはあまり大きくせず、回転変形をある程度に留めておくことが断面力を低減させるためのポイントであることがわかる。

6. 地盤剛性低減率がトンネルの応答に及ぼす影響

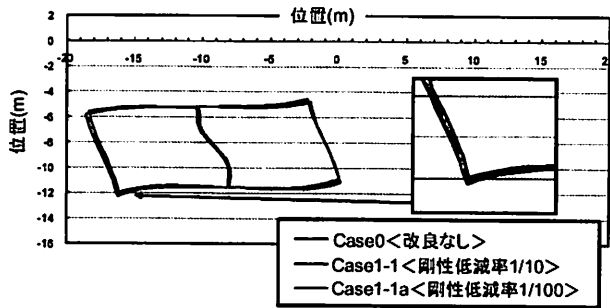
(1) トンネルの変形の比較

改良部の地盤剛性低減率を変えたケース（Case1-1およびCase1-1a, Case1-3およびCase1-3a）と改良なしのCase0について、トンネルの変形を比較した結果を図-11に、水平方向の全体変形、回転成分、せん断変形成分および回転変形率を図-12に、それぞれ示す。図-11において、トンネル変形の地震時増分については100倍に拡大して表示している。

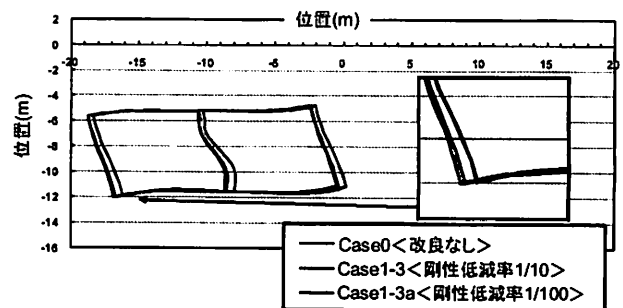
地盤剛性低減率を小さくするほどトンネルの回転変形が増大する一方でせん断変形は逆に減少しており、当然ながら回転変形率も地盤剛性低減率が小さくなるほど大きな値となる。ただし、剛性低減率1/10と1/100の場合では、せん断変形分にそれほど大きな差はないため、せん断変形を抑制する目的からすると、むやみに剛性を低減させる必要はないことがわかる。

(2) モーメントの比較

次に、下床版と左側壁のモーメント分布を比較した結果を図-13、図-14に示す。モーメントについても、地盤剛性低減率を低くするほど小さくなる傾向になるが、剛性率1/10でも1～3割程度の断面力低減効果があり、剛性低減率1/10と1/100のケースにおけるモーメントには大きな差がないことがわかる。したがって、周辺よりある程度小さな剛性を有するように地盤改良をしておけば、免震対策としては十分であると言える。



(a) Case0, Case1-1, Case1-1aの比較



(b) Case0, Case1-3, Case1-3aの比較

図-11 トンネル変形の比較（地盤剛性低減率による影響）＜地震時増分を100倍に拡大表示＞

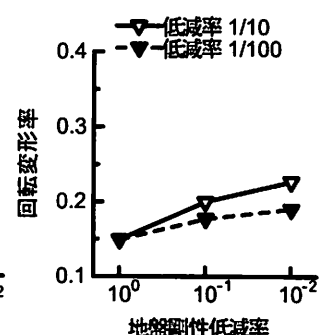
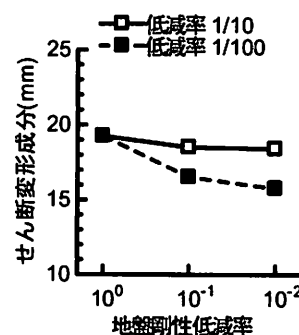
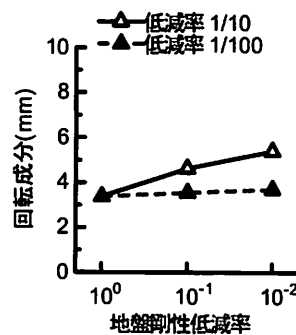
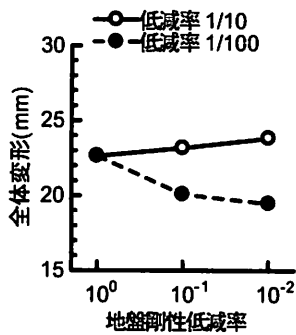
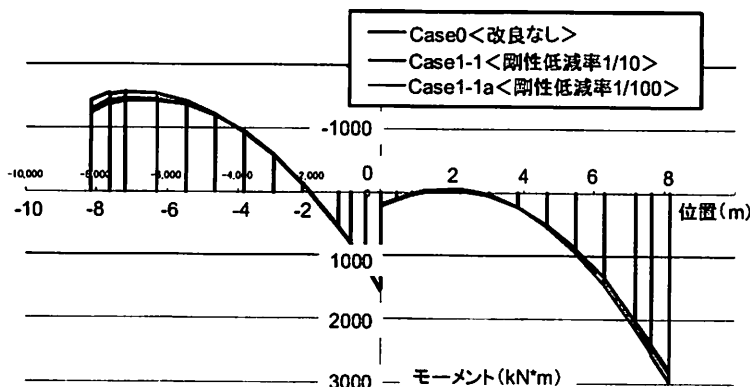
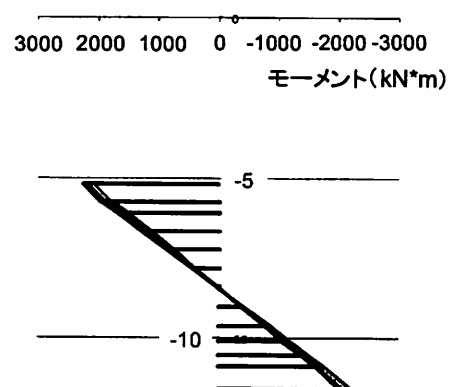


図-12 変形，回転変形率の比較（地盤剛性低減率による影響）

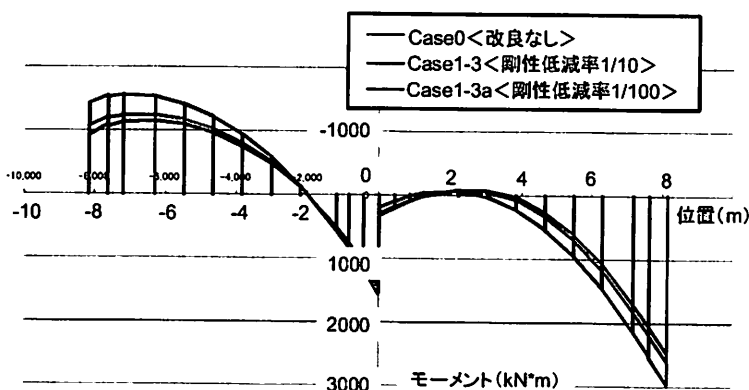


(a) 下床版

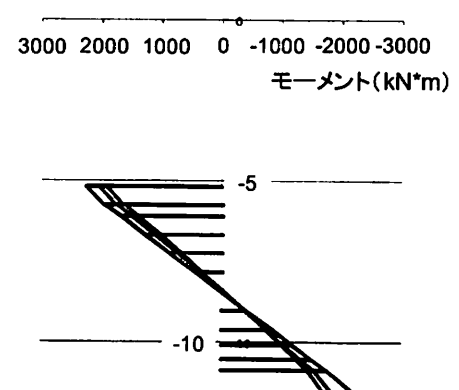


(b) 左側壁

図-13 モーメント分布の比較（地盤剛性低減率による影響）＜Case0, Case1-1, Case1-1aの比較＞



(a) 下床版



(b) 左側壁

図-14 モーメント分布の比較（地盤剛性低減率による影響）＜Case0, Case1-3, Case1-3aの比較＞

7. まとめ

本研究では、トンネル隅角部周辺を地盤改良した場合の免震効果について確認するために、隅角部付近の地盤改良部の幅、高さおよび地盤剛性低減率の各パラメータを変えてトンネルの応答を算定するとともに、応答の回転成分およびせん断変形成分を求めることで、それぞれのパラメータがトンネルの応答に及ぼす影響を調べる基礎的な検討を行った。その結果得られた知見を以下に示す。

- ・ 上下床版に接する部分の改良幅をある程度小さな範囲に抑えると、トンネル変形に及ぼす回転成分の割合が大きくなるが、改良幅が大きくなるにつれて回転成分は減少していく。また、改良幅を増やすほどトンネルのせん断変形成分や断面力が低減するが、トンネル下部の地盤剛性が弱くなるため、トンネルの安定性には注意が必要である。
- ・ 左右側壁に接する部分の改良高さを大きくするにつれて、トンネル変形に及ぼす回転成分の割合が大きくなるが、改良幅一定で改良高さを増やした場合には、回転成分が増える一方でせん断変形成分が減少せず、断面力低減効果も薄く

なることから、側壁位置の改良高さはそれほど大きくせず、回転変形をある程度に留めておくことがポイントである。

- ・ 地盤剛性低減率を小さくするほどトンネルの断面力が低減するが、低減率をある程度確保しておけば、せん断変形の抑制や断面力低減に対する一定の効果は得られると言える。

参考文献

- 1) 室野剛隆，桐生郷史，舘山勝，小林正介：ポリマー材を用いた開削トンネルの免震工法，土木学会地震工学論文集，Vol.28，2005.
- 2) 野上雄太，室野剛隆：S字型履歴曲線を有する土の非線形モデルとその標準パラメータの設定，土木学会地震工学研究発表会論文集，Vol.30，2009.
- 3) (財)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，1999.