

事前地山改良工の改良形状が小土被りトンネルの地震時挙動に与える影響に関する実験的研究

小西 魁¹・澤村 康生²・岸田 潔³・木村 亮⁴

¹ 学生会員 京都大学修士課程 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)
E-mail:konishi.kai.77v@st.kyoto-u.ac.jp

² 正会員 京都大学助教 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)
E-mail:sawamura.yasuo.6c@kyoto-u.ac.jp

³ 正会員 京都大学教授 工学研究科都市社会工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)
E-mail:kishida.kiyoshi.3r@kyoto-u.ac.jp

⁴ 正会員 京都大学教授 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)
E-mail:kimura.makoto.8r@kyoto-u.ac.jp

事前地山改良工などの補助工法の技術開発により, 小土被り未固結地山のトンネル掘削でも NATM が頻繁に採用されている. 事前地山改良工により地表面の沈下が抑制され, 切羽の安定性が高まることが確認されているが, 同構造の地震時挙動については十分な検討が行われていない. 本研究では, 事前地山改良工の有無および改良パターンが, 小土被りトンネルの地震時挙動に与える影響を把握することを目的に, 遠心力 50 G 場での振動台実験を実施した. その結果, トンネル脚部まで改良した場合, 改良体によってトンネルのせん断変形が抑制されることを確認した. 一方, トンネル上部のみを改良した場合, トンネル上部に重量が集中することで応答が増幅し, 周辺地盤と改良体の境界部分でトンネルに大きなせん断変形が生じることを確認した.

Key Words: *Shallow tunnel, Seismic behavior, Ground improvement, Centrifuge test*

1. はじめに

従来, 小土被りの未固結地山では開削工法やシールド工法によるトンネル掘削が主流であった. しかし, 山岳トンネルにおける補助工法の技術開発により, 小土被りの未固結地山でのトンネル掘削にも NATM が頻繁に採用されるようになってきている. NATM はシールド工法や開削工法よりも経済性の面で優れた工法であるといえるが, 周辺地山にグランドアーチが形成されることと切羽の自立が前提である. そのため, 地山の剛性が低く, 切羽の不安定化や地表面沈下が懸念される小土被りの未固結地山では, 補助工法が必要となる.

そこで, トンネル天端と切羽の安定性の確保や, 地表面沈下の抑制を目的として, 地上部の制約が少ない区間ではトンネル掘削前に事前地山改良工が適用されている^{1) 2)}. 事前地山改良工は, トンネル天端および側方の地山を置換工法あるいは混合処理工法等により改良した後, トンネル掘削を行う補助工法である. トンネル周辺地盤を改良することで, 切羽の安定性が向上し, 地表面沈下

が抑制できる. また, 先受け工などの補助工法も軽減できるなど安全かつ経済的なトンネル施工ができる^{1) 2)}.

これまでは主にトンネル掘削時を対象として, 事前地山改良工による地表面沈下抑制効果や切羽の安定性に関する検討が進められてきた^{3) 4) 5)}. 一方で, 地震時において事前地山改良工がトンネルおよびトンネル周辺地盤へ与える影響については明らかになっておらず, 以下のことが懸念される.

- 1) 事前地山改良工を施すことで周辺地盤よりも改良を施した領域(以下, 改良体と呼ぶ)の剛性が高くなり, 改良体と地盤の境界に応力が集中することで, トンネルに過大な曲げ変形が生じる.
- 2) トンネル上部に重量が集中することで, 地震時の応答が増幅し, トンネルおよび周辺地盤の被害が拡大する.

そこで本研究では, 事前地山改良工の有無および改良パターンの違いが小土被りトンネルの地震時挙動に与える影響を把握することを目的に, 遠心加速度 50G において振動台実験を実施した.

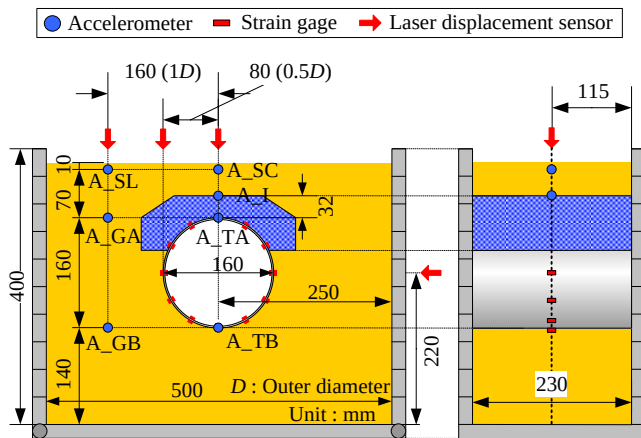


図-1 トンネル模型および計測機器設置位置 (Case-2)

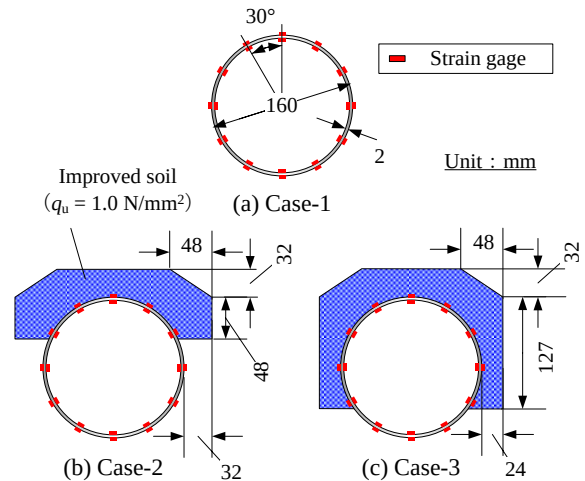


図-2 実験ケース

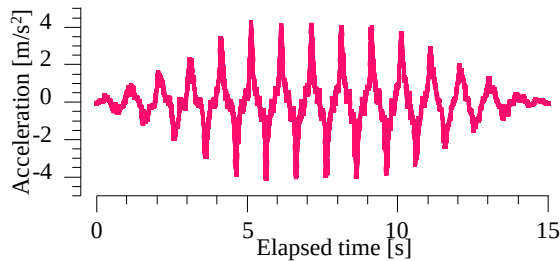


図-3 入力加速度 (Case-1)

2. 遠心模型実験の実験条件

(1) 実験概要

図-1 に実験の概略図を示す。実験は、単純せん断モードで変形を与えるせん断土槽（幅 500 mm×高さ 400 mm×奥行 230 mm）を使用した。模型地盤は乾燥豊浦砂を用いて、突き固め法により相対密度 85 %に調整して作製した。図-2 に実験ケースを示す。Case-1 は改良を施していないケース、Case-2 はトンネル上半上部のみ改良したケース、Case-3 はトンネル下半脚部まで改良したケースである。Case-1 は、地山改良が必要な条件であるにも関わらず、地盤改良を行わずにトンネルを掘削したケースである。したがって、実際には施工されない条件であるが、比較のためのケースとする。入力波は変位制御の振動載荷装置により、図-3 に示す 1 Hz 15 波テーパ付き正弦波を最大加速度 4.0 m/s² となるように調整して使用した。

実験の前提として、吹付けコンクリートやロックボルトはモデル化が困難であること、またトンネルの地震時挙動に対して与える影響は小さいと考えられることからモデル化は行っていない。また、トンネル掘削に伴う応力解放に相当する機構は有していない。

(2) トンネルのモデル化

トンネル模型は、新幹線標準断面の NATM トンネルを参考に、土槽壁面からの影響や寸法、曲げ剛性を考慮してモデル化を行った。その結果、アルミ製で外径 160 mm、覆工厚 2 mm、奥行き 225 mm で真円のものを使用した。本実験では、地震時のせん断変形の影響を評価することを目的としていること、また実際のトンネルの形状をモデル化するのは困難であることから、模型は真円でモデル化した。

(3) 事前地山改良工のモデル化

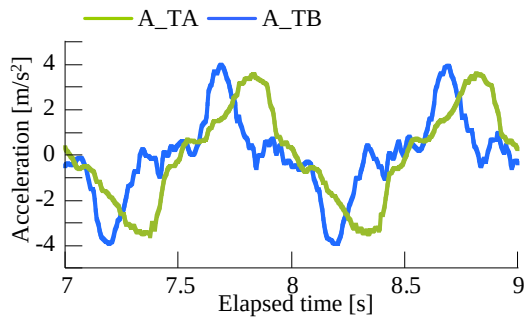
事前地山改良工は、実際の施工事例⁴⁾を参考にモデル化を行った。改良体は一軸圧縮強さ $q_u = 1.0 \text{ N/mm}^2$ を目標に、笠岡粘土 ($w_p = 29.6 \%$, $w_L = 62.1 \%$) : 早強セメント : 水 = 5 : 1 : 3.75 の混合比で打設した。

本実験では実験条件の簡略化と改良体の作製精度を向上させることを目的に、あらかじめトンネル模型に改良体を打設した。その際、アルミ製のトンネル模型では改良体との間に十分な摩擦力が期待できないため、改良体を打設する Case-2 および Case-3 においてはトンネル模型と改良体の付着を強固にするために、計測領域を避けてトンネル端部に数か所ねじ穴を開け、トンネル模型内側からねじを取り付けた。

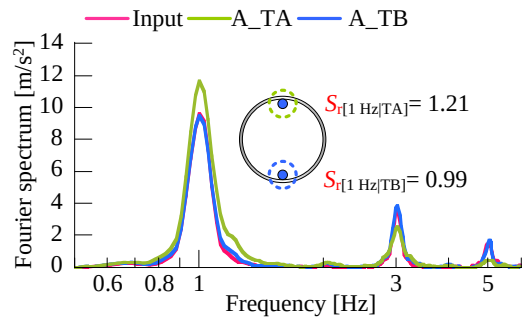
3. 実験結果

(1) トンネルと周辺地盤の地震時応答

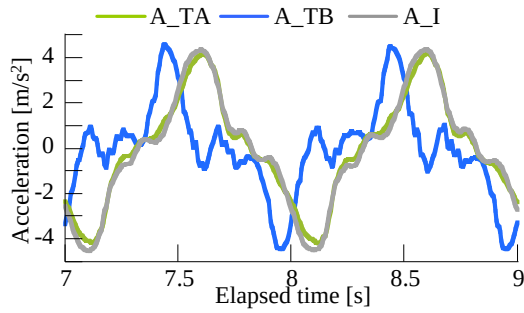
図-4 に振動台の入力加速度が最大となる $t = 7 \sim 9 \text{ s}$ でのトンネルおよび改良体の応答加速度の時刻歴とそのフーリエスペクトルをそれぞれ示す。同図には、周波数 1 Hz におけるフーリエスペクトルの応答倍率(S)を併記している。応答倍率は、応答加速度のフーリエスペクトル



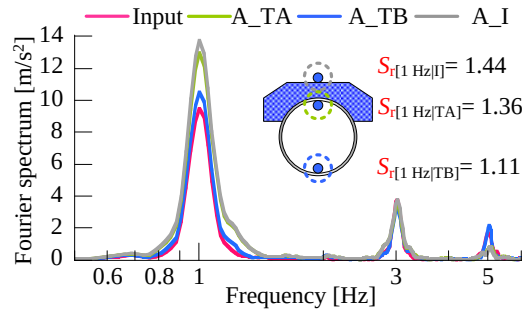
(a) 応答加速度の時刻歴 (Case-1)



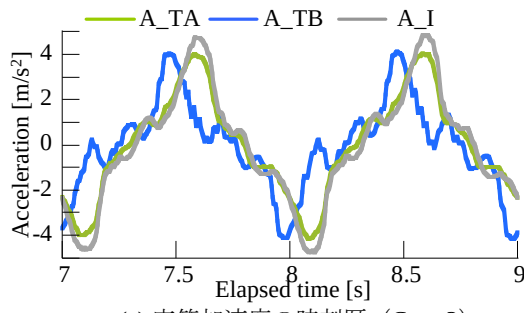
(b) フーリエスペクトル (Case-1)



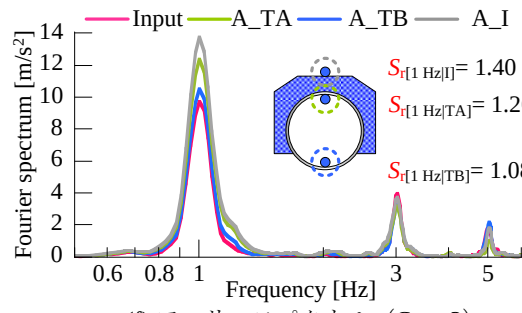
(c) 応答加速度の時刻歴 (Case-2)



(d) フーリエスペクトル (Case-2)



(e) 応答加速度の時刻歴 (Case-3)



(f) フーリエスペクトル (Case-3)

図-4 トンネルおよび改良体の応答加速度とそのフーリエスペクトル

を入力加速度のフーリエスペクトルで除した値と定義する。いずれのケースにおいても、トンネル底部 (A_TB) よりもトンネル天端 (A_TA) での応答が大きいことが確認できる。それぞれのケースで比較すると、Case-2 の A_TA において応答倍率が最大となった。改良体は周辺地盤よりもトンネルへの付着が強固であり、トンネルと一体的に挙動すると考えられる。そのため、上半上部まで改良体を打設したケースでは、トンネルの上部に重量が集中した不安定な構造物となり、地盤のせん断変形によって受ける慣性力が増大したと考えられる。

つぎに、応答加速度の時刻歴に着目すると、いずれのケースにおいても、A_TB よりも A_TA が遅れて応答している。この時、A_TB の応答に対する A_TA の応答の位相差を定量的に評価するため、図-5に A_TB の応答加速度に対する A_TA の応答加速度の相互相関関数を示す。図-5より、相互相関関数のピークにおける A_TB に対する A_TA の位相の遅れが、Case-1 で 0.11 s, Case-2 で 0.135 s, Case-3 で 0.08 s となり、Case-2 > Case-1 > Case-3 の順に

大きくなっている。このことから、Case-1 と比較して Case-2 ではトンネル上部に大きな慣性力が作用するためトンネルに大きなせん断変形が生じ、その結果、トンネル底部と天端の位相差が大きくなったと考えられる。一方、Case-3 では、改良体をトンネル脚部まで打設したことで、トンネルのせん断変形が抑制され、トンネル底部と天端の位相差が小さくなったと考えられる。

また、図-4における A_TA と改良体上部 (A_I) の加速度応答に着目すると、Case-2 では両者の位相、応答とも一致しているが、Case-3 では位相は一致しているが応答は A_I の方が大きい。これは、Case-2 ではトンネル上部での応答が大きく、トンネルのせん断変形が卓越するのに対して、Case-3 では、剛性の高い改良体によってトンネルのせん断変形が抑制され、トンネル全体の回転運動が卓越したためであると考えられる。以上の考察から、図-6に示すように、Case-2 ではトンネルのせん断変形が卓越し、Case-3 でトンネルの回転運動が卓越する、という応答モードが示唆された。

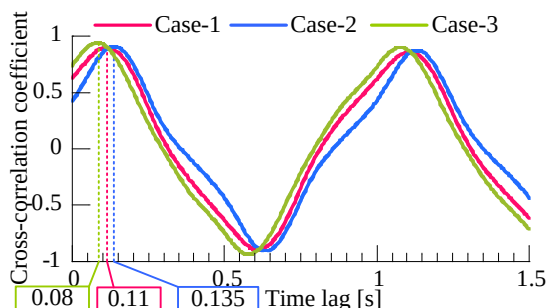


図-5 相互相関関数 (A_TB vs A_TA)

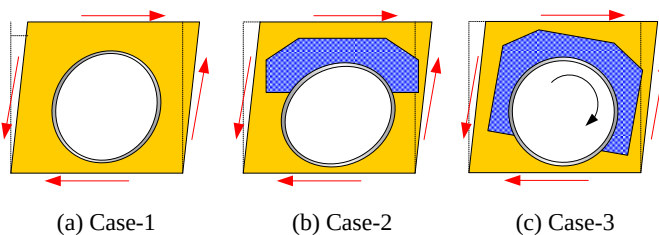


図-6 各ケースで予想される地震時応答モード

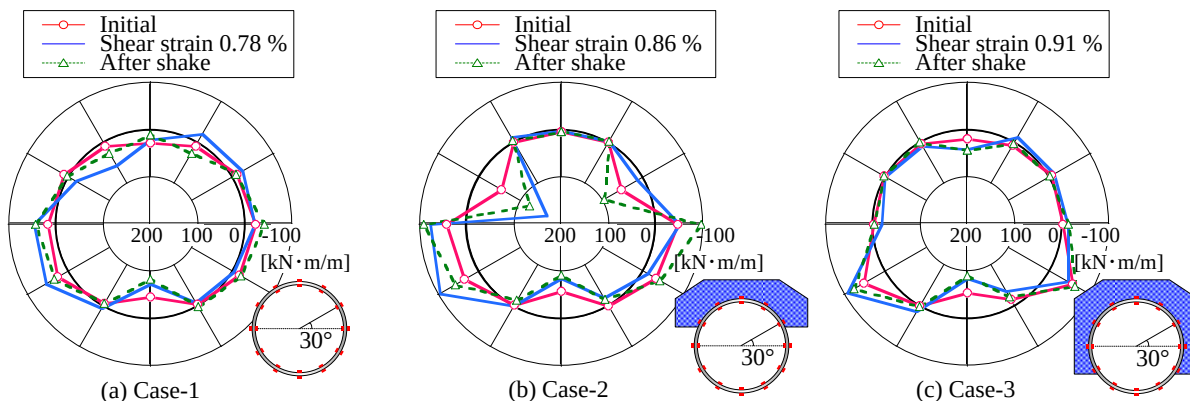


図-7 地盤のせん断ひずみが最大となる時刻における曲げモーメント分布

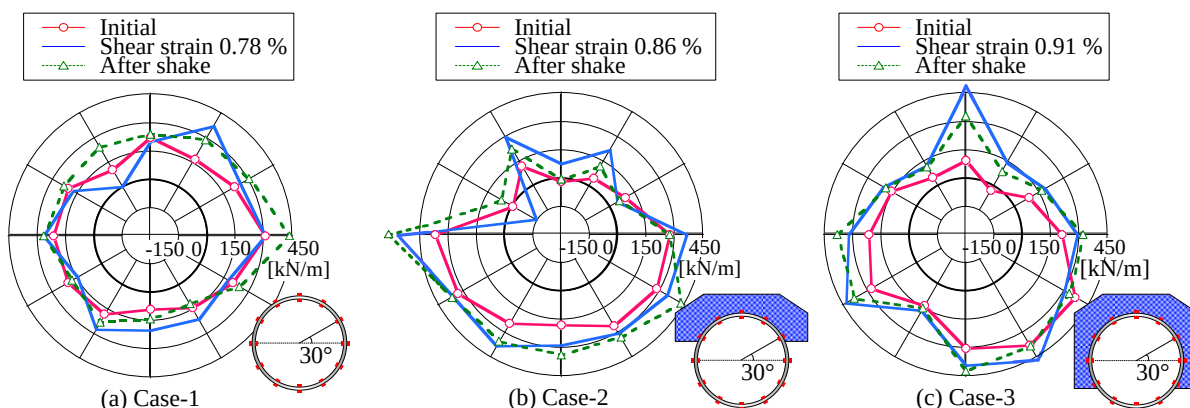


図-8 地盤のせん断ひずみが最大となる時刻における最大の軸力分布

(2) トンネルに発生する断面力

図-7, 8 に地盤のせん断ひずみが右向きに最大となった時刻にトンネルに発生する曲げモーメント分布(内曲げ：正)および軸力分布(圧縮：正)をそれぞれ示す。また、同図に加振前および加振後の値も併記している。

Case-1 では、加振時に地盤のせん断変形を受けることで、トンネルは斜め方向に楕円形の変形を起こしている。この時、トンネル肩部での曲げ変形が卓越しており、トンネル左肩部では内曲げ、右肩部では外曲げが発生する。これは、円形トンネルの地震時挙動⁹⁾と定性的に一致しており、本実験においてトンネルの地震時挙動を再現できているといえる。また、内曲げが発生するトンネル左

肩部で軸力が減少し、外曲げが発生するトンネル右肩部で軸力が増加した。

Case-2 では、Case-1 との比較から改良体を打設した領域において加振時の曲げモーメントが抑制されていることがわかる。一方で、改良体と周辺地盤の境界部分において、その剛性差から応力が集中し、トンネルに大きな内曲げが発生した。この時、大きな内曲げが発生した改良体の境界部分において軸力が減少して負の値となり、引張りが発生した。また、加振後においても改良体の境界部分に残留する曲げモーメントが大きくなった。

Case-3 では、Case-2 と同様に改良体を打設した領域において加振時の曲げモーメントが抑制されている。改良

体の境界部分で応力が集中することで、改良体の境界部で外曲げが卓越する。しかし、Case-2 と異なり、曲げモーメントの変化量は小さい。一方で、加振時のトンネル天端での軸力の増加が顕著である。これは、改良体を打設したことでトンネルに作用する上載荷重が増加したこと、また、改良体によってトンネルのせん断変形が抑制され、トンネル天端に大きな圧縮力が発生したことが原因であると考えられる。

以上から、Case-1 および Case-2 では、トンネルに発生する内曲げが大きくなる領域においては軸力が減少し、特に Case-2 では引張りが発生することを確認した。また、Case-3 では、改良体によってトンネルのせん断変形が抑制され、曲げモーメントの変化量が小さくなった。

4. まとめ

本研究では、事前地山改良工を模擬した改良体を含むトンネル模型に対して、1 Hz、15 波のテーパー付き正弦波を最大入力加速度 4.0 m/s^2 となるように調整して入力した。改良体の有無および改良パターンがトンネルの地震時挙動に与える影響について、本研究で得られた知見は以下の通りである。

- 1) トンネル上半上部のみ改良した Case-2 では、トンネルの上部に重量が集中する不安定な構造物となり、慣性力が大きく作用することで、トンネル底部と天端での応答の位相差が大きくなる。その結果、改良体の境界部分でトンネルに大きなせん断変形が生じる。また、内曲げが卓越する領域で引張りが発生することから、トンネル覆工への警戒が必要になると考えられる。
- 2) トンネル下半脚部まで改良した Case-3 では、トン

ネル周辺の地盤の剛性が増加することでトンネルのせん断変形が抑制され、回転運動が卓越する。

本研究では、改良パターン別にトンネルの地震時挙動について定性的な評価を行った。しかし、トンネル掘削に伴う応力開放を考慮した実験機構とはなっていない。今後、応力解放を再現できるような遠心模型実験および数値解析を通じて、地震時挙動を引き続き確認する必要がある。

参考文献

- 1) 蓼沼慶正, 磯谷篤実, 小西真治, 西山達也, 奥津一俊: 地山改良工を併用した低土被りトンネルの施工, トンネル工学研究発表会論文・報告集, 13 巻, pp. 207–212, 2003.
- 2) 齋藤荘英, 石山民一, 田野彰一, 芳賀宏: 側壁キャブに軟弱層を伴う地山を地表より改良—東北新幹線上北トンネル, 赤平トンネル—, トンネルと地下, Vol.39, No.6, pp. 399–406, 2008.
- 3) 北川隆, 飯田廣臣, 蓼沼慶正, 奥津一俊, 玉井靖広: 低土被り土砂地山における地山改良工法の検討, 構図工学論文集, A I, 50A, pp. 45–52, 2004.
- 4) 野々村政一, 井浦智実, 崔瑛, 岸田潔, 木村亮: 小土被り未固結地山における事前地山改良工による地山安定性評価に関する一考察, 地盤工学ジャーナル, Vol.8, No.2, pp.165-177, 2012.
- 5) 崔瑛, 野々村政一, 井浦智実, 岸田潔, 木村亮: 小土被りの土砂地山でのトンネル掘削における事前地山改良工の効果に関する解析的研究, 土木学会論文集 F1, Vol.68, No.3, pp.27-37, 2012.
- 6) Wang, J.N.,: Seismic Design of Tunnels: A Simple State-of-the-Art Approach, Parsons Brinckerhoff Quade and Douglas Inc., Vol 7, pp.1-147, 1993.

(2018.8.10 受付)

EXPERIMENTAL STUDY ON INFLUENCE OF SHAPE OF PRE-GROUND IMPROVEMENT ON SEISMIC BEHAVIOR OF SHALLOW OVERBURDEN TUNNEL

Kai KONISHI, Yasuo SAWAMURA, Kiyoshi KISHIDA and Makoto KIMURA

NATM is frequently adopted in an excavation of a shallow overburden mountain tunnel due to the technical development of the auxiliary method such as pre-ground improvement. The settlement of ground surface is suppressed and the stability of the tunnel face is improved by the ground pre-improvement. However, the seismic behavior of the tunnel is not clearly discussed. In this study, dynamic centrifugal model experiments under a gravitational acceleration of 50 G were conducted to clarify the influence of the shape of the ground improvement on the dynamic behavior of the shallow overburden tunnel. From the results, it was confirmed that when the ground around all the cross-sections of the tunnel was improved, the shear deformation of the tunnel is suppressed by the improved ground. On the other hand, when the ground around the crown of the tunnel and the top section was improved, the response of the tunnel was amplified by the concentration of the weight on the upper part of the tunnel, and the large shear deformation occurred in the tunnel at the boundary between the improved and unimproved ground.