

トンネル上部に地山改良を施した小土被りトンネルの地震時挙動に関する遠心模型実験
 Centrifuge tests on seismic behavior of shallow overburden tunnel
 with ground pre-improvement above tunnel

○小西 魁・澤村康生・岸田 潔・木村 亮
 ○Kai KONISHI, Yasuo SAWAMURA, Kiyoshi KISHIDA, Makoto KIMURA

In the pre-ground improvement method, the ground around the tunnel is applied by the replacement method or the improvement method. In this study, dynamic centrifugal model experiments under a gravitational acceleration of 50 G were conducted to clarify the dynamic behavior of the shallow tunnel with pre-ground improvement. Two cases; (1) the simple tunnel without ground improvement, and (2) the tunnel with ground pre-improvement above tunnel, were investigated. From the results, when ground above tunnel was improved, the response of the tunnel was amplified by the concentration of the weight at the upper part of the tunnel. Moreover, large cross-sectional forces were generated at the boundary between the improved and unimproved ground. Therefore, when ground above tunnel was improved, tunnel lining may become unstable.

1. はじめに

山岳トンネル掘削時における事前地山改良工など補助工法の技術開発により、小土被りの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って改良した後に、トンネル掘削を行う補助工法である。地山改良により切羽の安定性が向上し、地表面沈下が抑制される。一方で地震時には、トンネル上部の密度増加により応答が増幅することや、剛性の高い改良体と周辺地盤の境界に応力が集中し、トンネル覆工に被害が発生することが懸念される。そこで、本研究ではトンネルの地震時挙動に地山改良工が与える影響を把握することを目的として、遠心加速度 50 G での動的遠心模型実験を実施した。

2. 実験の概要

図-1 に実験の概略図を示す。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 はトンネル上部を改良したケースである。実験は、単純せん断モードで変形を与えるせん断土槽を使用した。地盤模型は、豊浦砂を用いて、突固め法により相対密度 D_r が 85 % となるように作製した。トンネル模型は外径 160 mm、厚さ 2 mm のアルミ製で真円のもの、改良体は実現場の施工事例を参考にモデル化を行い、一軸圧縮強さ $q_u =$

1.0 N/mm² のモルタルを使用した。入力波は、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。

3. 実験結果のまとめ

図-3 に振動台の入力加速度とトンネルの応答加速度のフーリエスペクトルを示す。同図内には周波数 1 Hz におけるフーリエスペクトルの応答倍率 (S_r) も併記している。応答倍率は、応答加速度のフーリエスペクトルを入力加速度のフーリエスペ

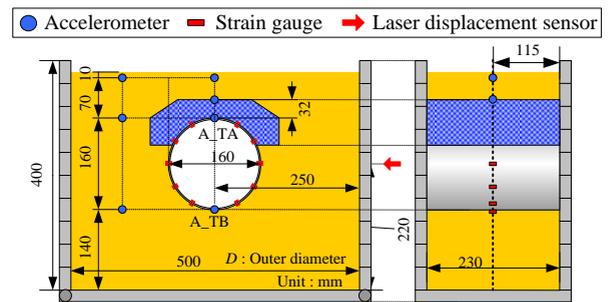


図-1 トンネル模型および計測機器設置位置 (Case-2)

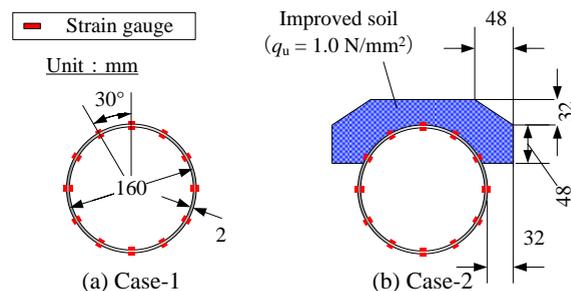
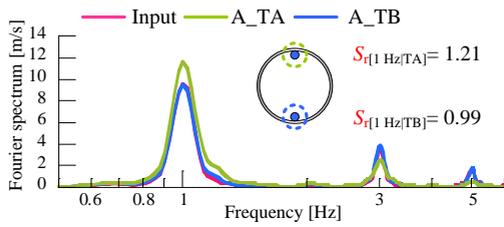
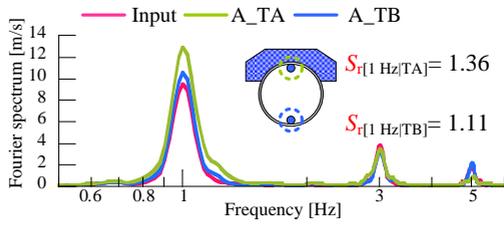


図-2 実験ケース

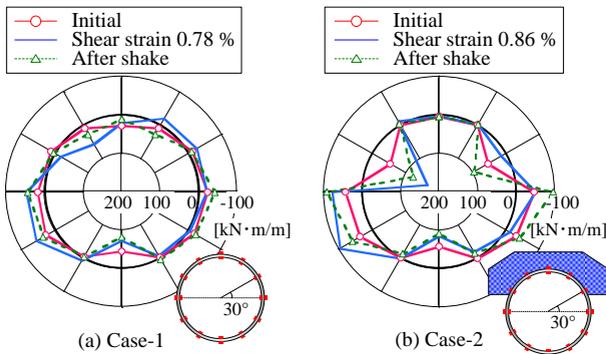


(a) Case-1



(b) Case-2

図-3 応答加速度のフーリエスペクトル

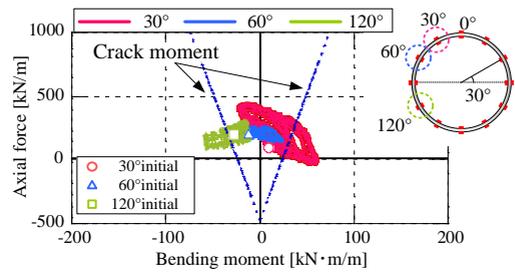


(a) Case-1

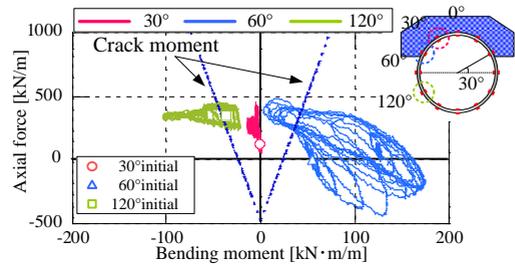
(b) Case-2

図-4 地盤のせん断変形が最大時の曲げモーメント分布

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)での加速度スペクトルが大きい. また, それぞれのケースを比較すると, Case-2のA_TAにおける加速度スペクトルの応答倍率が最大となった. これは, Case-2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ためと考えられる. 図-4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)を示す. また, 同図内には加振前と加振後の値も併記している. Case-1では, 加振時にトンネルは左右肩部での内曲げ, 外曲げが卓越している. これは, 円形トンネルの地震時挙動¹⁾と定性的に一致しており, 地震時挙動を再現できているといえる. Case-2では, Case-1との比較から改良体を打設した領域で加振時の曲げが抑制されている. 一方, 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, 大きな内曲げが発生した. 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



(a) Case-1



(b) Case-2

図-5 曲げモーメントと軸力の関係

きくなった. 以上から, トンネル上部に改良を施すことで, 地震時の応答が増大する. また, 加振時に改良体の境界部分に応力が集中することで, トンネルに大きなせん断変形が発生する.

次に, 加振時のトンネルに発生している断面力からトンネル覆工の安定性について考察する. 図-5に加振時における曲げモーメントと軸力の関係を示す. 通常, 山岳トンネルの覆工には無筋コンクリートが用いられる. そこで同図には参考のため, 一般的な設計基準強度 18 N/mm^2 で覆工厚 0.3 m を想定したコンクリートの曲げひび割れモーメントを併記している²⁾. 曲げひび割れモーメントからもわかるように, コンクリート部材は一般に引張力への耐性が小さい. Case-1では, トンネル 30° 方向において曲げモーメントが増加する時, 軸力が減少するため地震時にトンネル覆工が損傷しやすいといえる. また, Case-2では, 改良体の境界部分であるトンネル 60° 方向において, Case-1よりも大きな曲げモーメントおよび引張力が発生している. そのため, Case-2では特にトンネル覆工への警戒が必要であると考えられる.

参考文献

- 1) 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.
- 2) (公社)土木学会トンネル委員会: トンネル標準示方書 山岳工法・同解説, (公社)土木学会, p.107, 2006.