

京都大学大学院 学生会員
 京都大学大学院 正会員
 京都大学大学院 正会員
 京都大学大学院 正会員

○小西 魁
 澤村 康生
 岸田 潔
 木村 亮

1. はじめに

山岳トンネル掘削時における，補助工法の技術開発が進展したことにより，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，地震時においては，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，改良パターン別のトンネルの振動特性を把握することを目的として，動的遠心模型実験を実施した．

2. 実験概要

図1に実験の概要図を示す．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．地盤模型は，豊浦砂を用いて，突き固め法により相対密度 D_r が85%となるように作製した．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まで改良体を打設したケース，Case-3はトンネル下半脚部まで改良体を打設したケースである．改良体は，山岳トンネル事前地山改良工法設計施工の手引き¹⁾を参考にモデル化を行い，一軸圧縮強さ $q_u = 1.0 \text{ N/mm}^2$ ，ヤング率 $E = 2.92 \times 10^5 \text{ kN/m}^2$ のものを使用した．打設方法として，型枠を用いて改良体をトンネル模型に打設した後，水中養生し，気中で乾燥させた．入力波は，1 Hz 15 波テーパー付き正弦波を最大加速度 4.0 m/s^2 となるように調整して使用した．

3. 実験結果

図3に振動台入力加速度とトンネル応答加速度のフーリエスペクトル（FFT）および応答倍率（ S_f ）を示す．応

答倍率は，図中に示すように，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_TD）よりもトンネル天端（A_TU）での応答が大きいたことが確認できる．応答倍率に着目すると，Case-2の応答が最も大きいたことが分かる．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．

図4に入力加速度が最大となる $t = 7 \sim 9 \text{ s}$ でのトンネル

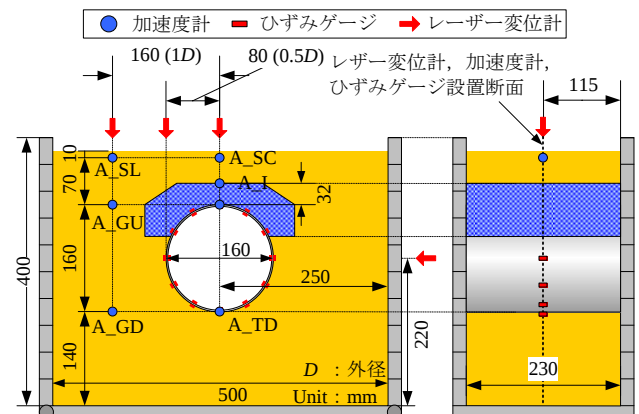


図1 トンネル模型および計測機器設置位置 (Case-2)

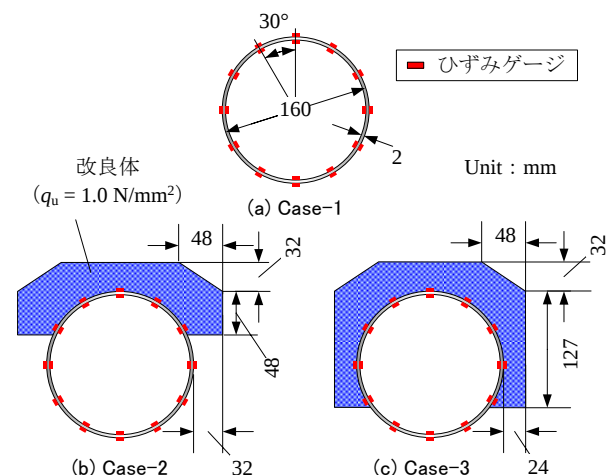


図2 実験ケース

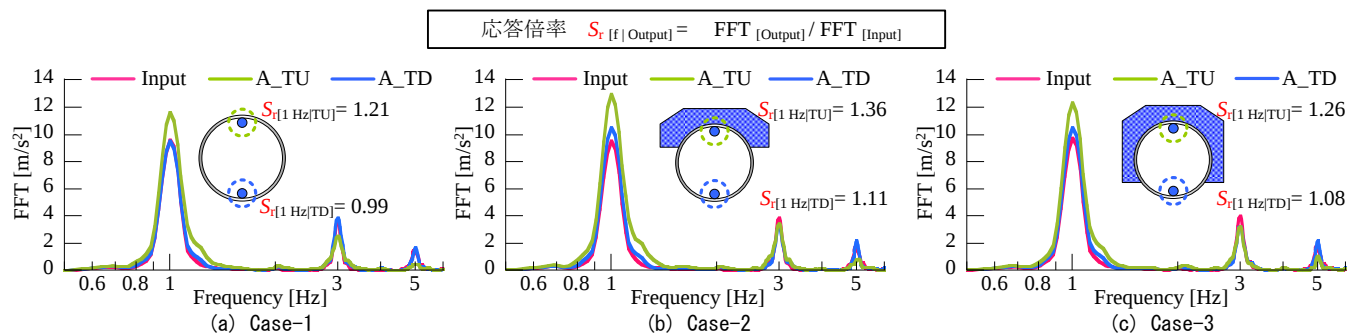


図3 振動台入力加速度およびトンネル応答加速度のフーリエスペクトル

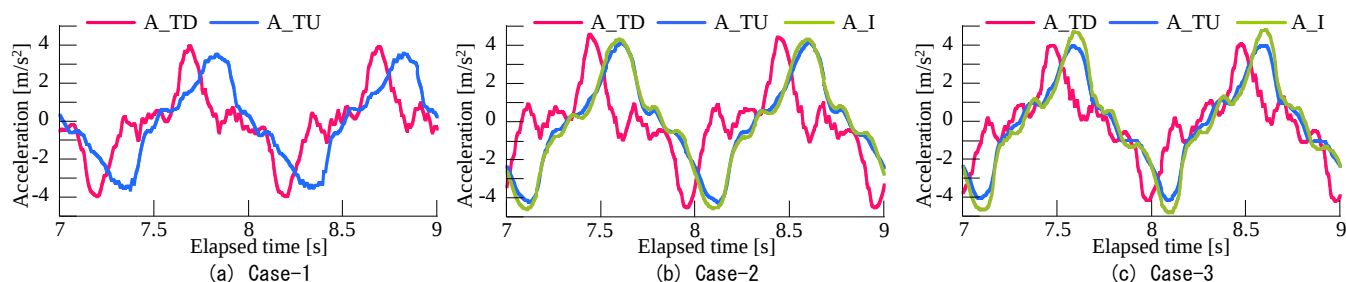


図4 トンネルおよび改良体の応答加速度

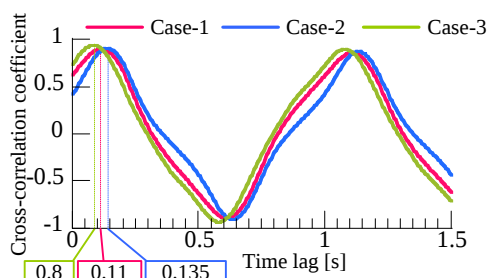


図5 相互相関関数 (A_TD vs A_TU)

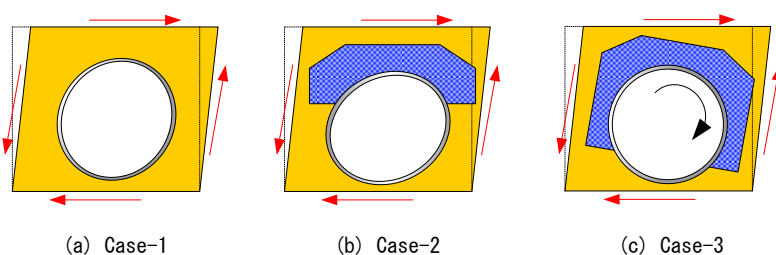


図6 各ケースで予想される地震時応答モード

および改良体の応答加速度、図5にA_TDに対するA_TUの相互相関関数を示す。図4より、いずれのケースにおいても、A_TDよりもA_TUが遅れて応答していることがわかる。この時、図5の相互相関関数に着目すると、トンネル底部に対するトンネル天端の位相の遅れが、Case-2 > Case-1 > Case-3の順に大きくなっている。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、トンネル底部と天端の位相差が大きくなる。その結果、トンネルに大きなせん断変形が生じたと考えられる。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たため、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のA_TUとA_Iに着目すると、Case-2では両者の応答が一致している。一方で、Case-3ではA_Iの方が応答が大きい。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に対して、Case-3では、改良体によってトンネル周辺部の

剛性が高くな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では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。

4. 結論

改良体をトンネル上半部まで打設したケースでは、トンネル上部に大きな慣性力が作用するため、応答が大きくなる。その結果、トンネル底部と天端での応答の位相差が大きくなり、トンネルに大きなせん断変形が生じることが予想される。一方、改良体をトンネル下半脚部まで打設したケースでは、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、回転運動が卓越する。

参考文献

- 1) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構：山岳トンネル事前地山改良工法設計施工の手引き，2012。