

周辺地盤の液状化による開削トンネルの浮上がり挙動に関する振動実験

鉄道総合技術研究所 正会員 ○ 渡辺健治 澤田 亮

篠田昌弘 舘山 勝

東京大学生産技術研究所 正会員 古関潤一

1. 研究の背景 大地震時において周辺地盤が液状化することにより、下水道管、ガス管などの埋設管やマンホールなどの地中構造物が浮上がる被害事例が多く報告されている¹⁾。開削トンネルなどの大規模な地中構造物についても同様に、周辺地盤の液状化に伴う浮上がりの可能性があるため、鉄道の耐震設計²⁾においては鉛直方向の力のつりあいから算出した浮上がり安全率により浮上がりの照査を行なっている。

このような周辺地盤の液状化に伴う地中構造物の浮上がり挙動については過去に多くの模型振動実験が実施されており、浮上がり量の算定法、有効な浮上がり防止工に関する検討がなされている¹⁾。しかしながら、これらの実験では埋設管など比較的小規模な地中構造物を対象とした検討が多く、地下鉄道の開削トンネルのような大規模な地中構造物を対象とした検討は少ない。また模型実験においては地盤中の過剰間隙水圧や応答加速度の計測は行なわれているが、地中構造物に作用する荷重や加振中の地盤の変形量を詳細に計測した事例はない。

以上を考慮して本研究では、開削トンネル模型を用いた振動実験を行ない、トンネルに作用する荷重やトンネルの浮上がりに伴う周辺地盤の変形量を計測したので報告する。

2. 実験模型、実験方法 実験には 20 分の 1 スケールの開削トンネル模型（1 層 2 径間を想定）を用いた。トンネルは幅 40cm、高さ 20cm、奥行き 59cm である。図 1 に示すように、トンネルの周囲には 16 個の分割 2 方向ロードセルを配置し、さらに水がロードセル内に流入しないようにシーリングを施し、トンネルに作用する土水圧の軸力成分、せん断力成分を計測した。液状化地盤模型は珪砂 6 号（ $G_s=2.652, e_{\max}=0.903, e_{\min}=0.582$ ）で作成し、相対密度（ D_r ）の異なる 2 ケースの振動実験を行なった（Case1： $D_r=60\%$ 、Case2： $D_r=80\%$ ）。液状化地盤は固定土槽（幅 206cm、高さ 101cm、奥行き 60cm）内に空中落下法により作成し、その中央部にトンネルを設置した。その後、地盤を飽和させ地下水位を地表面に合わせた。実地盤において開削トンネルの周辺地盤全てが液状化することは想定しづらいが、今回の振動実験では浮上がり挙動におよぼす影響因子を検証することを目的としているために、できるだけ単純化した模型に対し実験を行なった。模型地盤中やトンネル模型表面には加速度計、間隙水圧計を設置した。また地盤中には 5cm おきに標点を設置し、高速度 CCD カメラ³⁾を用いて土槽側面（強化ガラス面）を通じて撮影することにより地盤の 2 次元的な変形量を計測した。入力波形としては正弦波（3Hz）を用い、10 波毎に加速度を 100gal づつ 400gal まで連続的に増加させた。

3. 実験結果および考察 図 2 にトンネルの上面、側面、下面においてトンネルに作用する荷重の時刻歴（上下面は軸力、側面はせん断力）、トンネル近傍地盤の過剰間隙水圧、トンネルの浮上がり量、浮上がり安全率、振動台加速度の時刻歴を示す。振動台加速度、浮上がり量以外のデータはローパスフィルターを施すことにより低周波成分（漸増成分）のみを抽出している。過剰間隙水圧の時刻歴を見ると、トンネルの上面、側面、下面いずれの場所においても $D_r=60\%$ 時には加振直後に、 $D_r=80\%$ 時には 200gal 加振時に上昇している。浮上がり量の時刻歴を見ると、 $D_r=60\%$ 時には 100gal 加振途中（7.3 秒付近）から浮上がり始め、200gal 加振時に浮上がり速度が速くなっている。それに対して $D_r=80\%$ 時には 200gal 加振途中（10.5 秒付近）から浮上がり始め、300gal 加振時に浮上がり速度が速くなった。いずれの実験においてもトンネルの浮上がりは、周辺地盤（特にトンネ

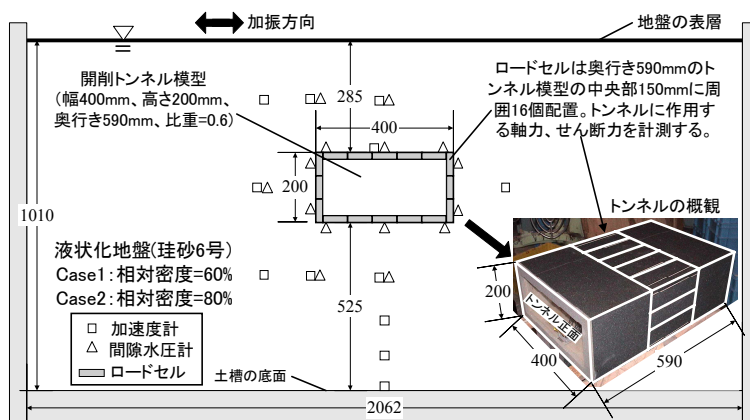


図 1 計測器の配置図、トンネルの概観図（単位：mm）

キーワード：液状化、浮上がり、開削トンネル、地盤の流動

連絡先：東京都国分寺市光町 2-8-38 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 基礎・土構造 Tel.042-573-7261 Fax.042-573-7248

ル下面)の過剰間隙水圧の上昇時に浮上がり始める、浮上がり始めた直後は急速には浮上らず、その次の加振ステップにおいて急速に浮上がり始める、という共通した現象が見られる。また、トンネルの直下の地盤(以下:直下地盤)の鉛直上向き変位量(画像解析システムにより算出)はトンネルの浮上がり量に遅れて増加し始めることから、トンネルの浮上りに追従して直下地盤が鉛直上向きに変位していることが分かる。また、図3に示した周辺地盤の移動ベクトルを見ると直下地盤の上向き変位に追従して側方の周辺地盤が直下地盤に向かって移動していることが分かる。

トンネルに作用する荷重については、上下面では液状化と共に減少し、特に下面における減少が大きい。またトンネル側面のせん断力は液状化時にもゼロにはならず複雑に増減を繰り返している。現行の設計標準に基づいて算出した浮上がり安全率(トンネルに作用する荷重の測定値から算定)を見ると、相対密度の差が安全率の大きさに反映されており、浮上がり判定法としてはある程度妥当であることが分かる。しかしながら、前述したようなトンネルが急速に浮上がり始めるタイミングや加振後の累積浮上がり量については評価できない。これはトンネルの浮上がりが鉛直方向の力のつりあいだけではなく、液状化の継続時間や図3に示したような周辺地盤の移動などにも大きく依存しているためであると考えられ、今後の検討が必要である。

4.おわりに 2方向ロードセルにより作用力を計測できる開削トンネル模型を作成し、液状化に伴うトンネルの浮上がり実験を行なった。今後も系統だった振動実験を通じてトンネルに作用する荷重、地盤の2次元変形を計測し、相互の関連性を評価することにより、浮上がり挙動に支配的な影響因子を評価していきたい。

謝辞: 本研究は国土交通省からの補助金を受けて得られた研究成果の一部である。

参考文献: 1)地盤工学会: 液状化による地中埋設構造物の浮上り被害に関する研究 報告会資料、2003 2)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 3)渡辺健治: 画像解析システムによる地盤の破壊現象の可視化、可視化情報学会誌、第24巻92号、2004。

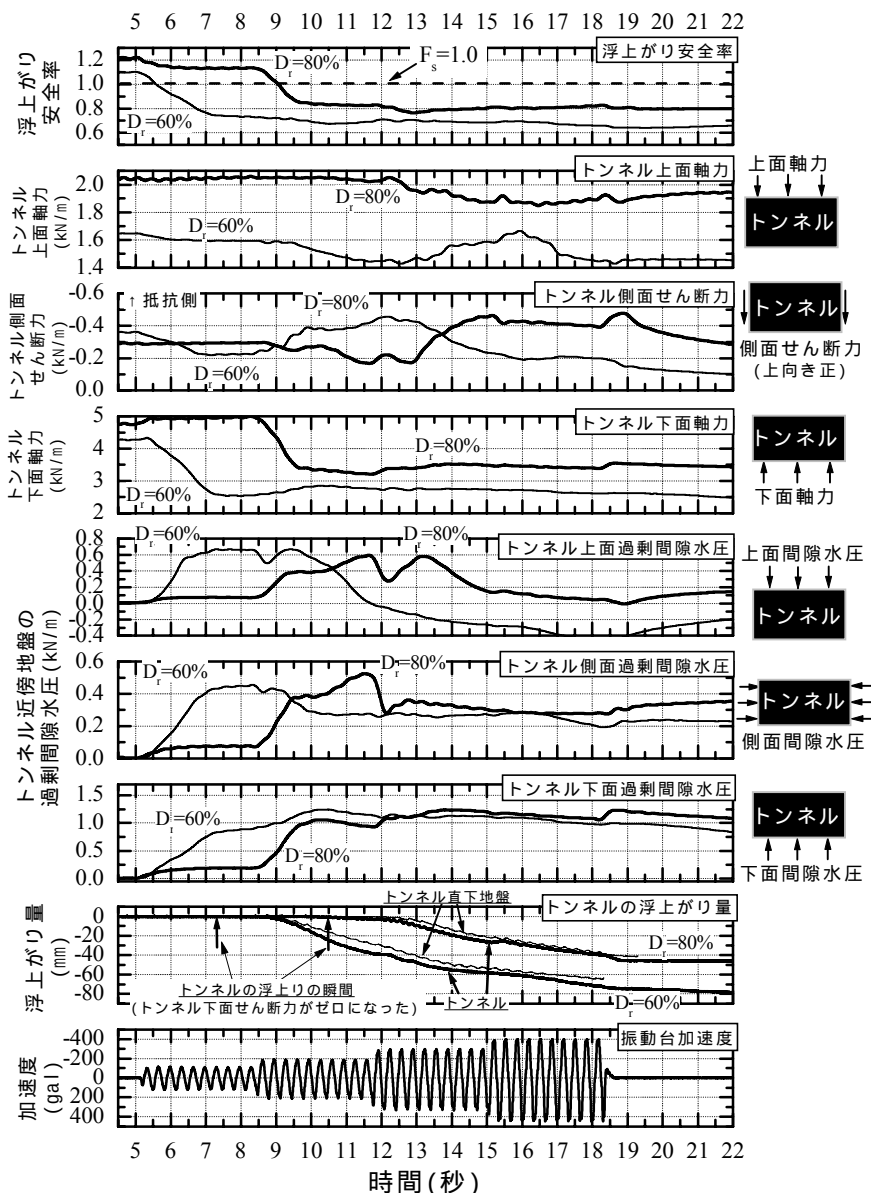


図2 振動台加速度、トンネルの浮上がり量、周辺地盤の間隙水圧、トンネルに作用する全応力、浮上がり安全率の時刻歴

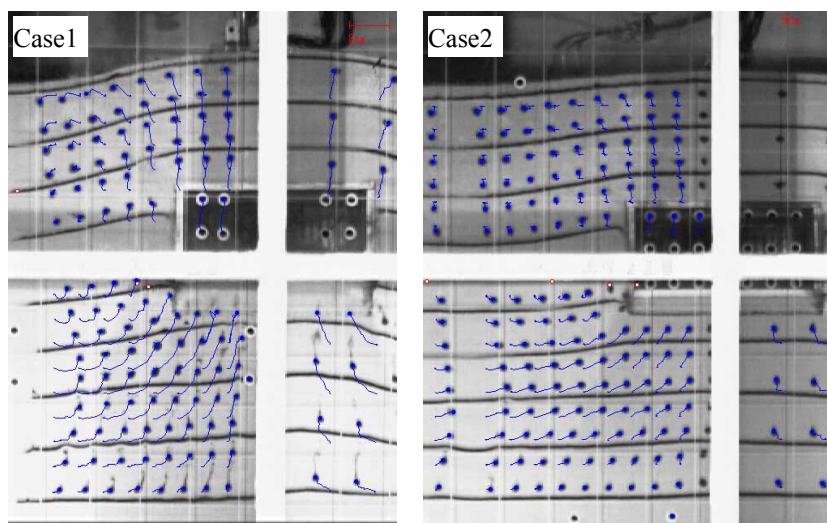


図3 周辺地盤の変形状況(加振16.77秒後)