

周辺地盤の液状化による開削トンネルの 浮上がり量の評価法

渡辺 健治* 澤田 亮**
館山 勝*** 古関 潤一#

Simple Method to Evaluate the Residual Uplift Displacement of Open Cut Tunnel Caused by Liquefaction

Kenji WATANABE Ryo SAWADA
Masaru TATEYAMA Junichi KOSEKI

In recent years, there has been serious uplift damage to underground structures which is caused by the liquefaction. In the current earthquake design procedure, the possibility of uplift of underground structures such as open cut tunnel is evaluated by the safety factor in which only the vertical force equilibrium of the structure is considered. It is difficult to estimate the residual uplift displacement of underground structures. In this study, therefore, a series of shaking table tests were conducted to investigate the uplift mechanism of open cut tunnel in liquefied ground. Based on these test results, a new method to evaluate the uplift displacement of the open cut tunnel is suggested.

キーワード：液状化，浮上がり，開削トンネル，振動実験，液状化指数

1. はじめに

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、地下駐車場等、地盤よりも軽い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⁾。このため、大規模な地中構造物である鉄道の開削トンネルにおいても周辺地盤の液状化に伴い浮上りを生じ、軌道位置で過大な変形を引き起こす可能性が指摘されている。

現行の耐震標準²⁾では、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りの照査を行っている。浮上がり安全率による評価は簡便であるため、鉄道以外の地中埋設構造物や共同溝設計指針等^{3), 4)}の実務設計においても広く用いられている手法である。しかしながら、安全率が1以下になると浮上りが生じると判定されるものの、浮上りの程度は評価されないため、抜本的な対策が必要と判断されるなどの問題がある。また、既往の研究により地震時に浮上がり安全率が過渡的に1を下回っても、液状化の範囲・程度が限定的であれば地中構造物は大きく浮き上がらないとの検討事例もある⁵⁾。

液状化による地中構造物の浮上がり挙動に関しては、過去に多く研究が実施されているが、現段階では浮上が

り量を精緻に求められる実務的手法は確立されていない。これは液状化時の地盤と構造物の挙動や、構造物への作用の特性に不明な点が多いためであると考えられる。

以上を考慮して本研究では、開削トンネル模型を用いた系統的な振動実験を行った。実験ではトンネルに作用する荷重や周辺地盤の変形量を計測した。その結果を基に、液状化によるトンネルの浮上がり挙動に及ぼす主要な影響因子を評価し、浮上がり量を簡易に評価する手法を提案したので報告する。

2. 現在の耐震設計の考え方

現行の耐震標準²⁾で用いられている浮上がり安全率は、図1に示すように地盤の液状化による過剰間隙水圧の発生による上向きの力の増加と、下向きの摩擦抵抗力の減少など開削トンネルに作用している鉛直方向の力を式(1)により比較して、浮上がり安全率 F_s によって評価している。

$$F_s = \gamma_i \frac{U_s + U_D}{W_s + W_B + 2Q_s + 2Q_B} \leq 1.0 \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここで、

W_B ：開削トンネルの自重 (kN/m)

W_s ：鉛直方向外力 (水の影響含む) (kN/m)

Q_s ：上載土のせん断抵抗 (kN/m)

Q_B ：開削トンネル側面の摩擦抵抗 (kN/m)

($F_L < 1$ の土層は $Q_s = Q_B = 0$)

U_s ：トンネル底面の静水圧による揚圧力 (kN/m)

* 構造物技術研究部 基礎・土構造研究室
** 構造物技術研究部 基礎・土構造研究室 (現 総務部)
*** 構造物技術研究部
東京大学生産技術研究所 教授

特集：構造物の耐震設計技術

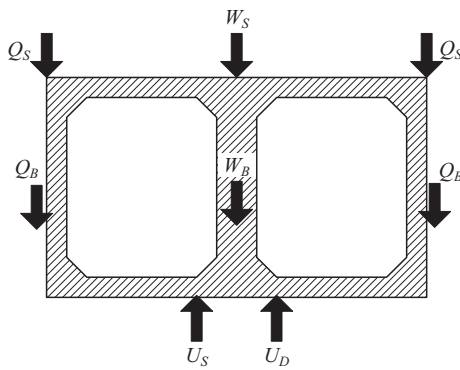


図1 開削トンネルの浮上がり安全率の算定

U_D ：過剰間隙水圧による揚圧力 (kN/m)

γ ：構造物係数, F_L ：液状化抵抗率

である。

浮上がり安全率は、鉛直方向の力のつり合いから浮上がりが生じるか否かの判断を行っており、浮上がり量を直接評価する指標ではない。浮上がりの程度により開削トンネルの耐震性能を照査するためには浮上がり量を算定する必要がある。

3. 開削トンネル模型を用いた模型振動実験

3.1 実験の概要

本研究では、1層2径間を想定した20分の1スケールの開削トンネル模型（以下：トンネルと表記）を用い、鉄道総研で所有する中型振動台で実験を行った。トンネルは幅400mm、高さ200mm、奥行き590mmである（図2）。

液状化に伴う地中構造物の浮上がり挙動に関しては過去に多くの模型振動実験がなされているが、地中構造物に作用する外力や加振中の地盤の変形量を詳細に計測した事例は少ない。そこで本研究では、トンネルの周囲に16個の分割型2方向ロードセルを配置し、トンネルに作用する土水圧の直応力（法線方向）、せん断応力（接線方向）を計測した（図2）。液状化地盤模型は珪砂6号（土粒子の比重： $G_s=2.652$ ，最大間隙比： $e_{max}=0.903$ ，最小間隙比： $e_{min}=0.582$ ）で作製した。実地盤において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、振動実験は浮上がり挙動におよぼす影響因子や対策工の効果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を用いた。

表1に全ケースの実験条件を示す。液状化地盤は固定土槽（幅2062mm、高さ1010mm、奥行き600mm）内に空中落下法により作製し、その中央部にトンネルを設置した。地盤作製後に土槽底面から二酸化炭素を供給し、地盤の間隙を二酸化炭素で置換した後、土槽底面から水を供給することにより地盤を飽和させた。表1に示すAシリーズ（Case1～3）では、土槽底面から水を供給する

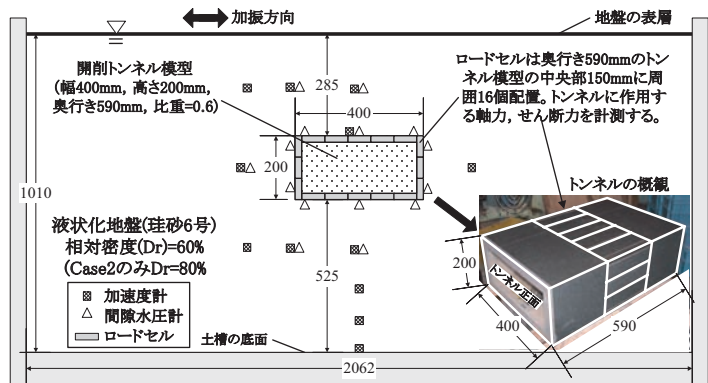


図2 トンネル模型の外観と計測器の配置（単位:mm）

際に水位が地表面に達した段階で水の供給を停止した。一方、Bシリーズでは、液状化地盤の飽和度を向上させるため水位が地表面到達後も水の供給を継続し、地盤の間隙体積の約3倍に相当する水を循環させた。

液状化地盤の相対密度 Dr は60%、トンネル下の液状化層厚は525mmを基本条件とするが、地盤の密度や液状化層厚の影響を検証するためにCase2では相対密度を80%、Case3では液状化層厚を約半分（268mm）と設定した。また、Case5, 9, 10, 12, 13では対策工の効果を検証するために、地盤改良あるいは矢板による対策を模擬した実験を行った。地盤改良を模擬した実験では、既設トンネルの周辺地盤に薬液注入を行うことを想定し、注入地盤をポリマー溶液により固着させた砂礫により模擬した。実験では改良位置、改良深さ、改良体の比重（比重小：1.0，比重大：2.0）を変化させた。また、矢板対策を模擬した実験（Case9）ではIV型矢板を想定した矢板模型をトンネルの両側面に設置した。矢板上端は地表面高さとし、矢板下端は支持地盤（密な礫地盤）に根入れした。

地盤中には50mmおきに標点を設置し、高速度CCDカメラにより、加振中の地盤の2次元的な変形量を計測した。標点は珪砂6号を黒色に彩色し、直径15mm程度の団子状にした状態で冷凍することにより作製した。

入力波形としては、各ケースともに同一とし、正弦波（3Hz）を用い、10波毎に加速度を100galずつ400galまで連続的に増加させた。

3.2 実験結果および考察

図3にCase6, 12における実験後の模型の変形状況を示す、トンネルの浮上がりに伴い、トンネル下部に向かって周辺地盤が流入していることが分かる。以下に、浮上がり始めるまでのトンネルの挙動、浮上がり始めた後のトンネルと地盤の挙動、対策工に効果について考察する。

(1) 浮上がり始めるまでのトンネルの挙動

図4にCase1～3の加速度、浮上がり量、浮上がり安全率の時刻歴を示す。浮上がり安全率については、現行の設計標準に基づき式(1)により算出しているが、式(1)

表1 実験条件

シリーズ	実験ケース名	地盤の相対密度	対策工の有無	対策箇所	備考
A	Case1	60%	なし	-	トンネル下の液化化地盤層厚をCase1,2の半分(268mm)に設定
	Case2	80%			
	Case3	60%			
B	Case5	60%	地盤改良	トンネル下部(10cm)を改良	改良体の比重小(=1.0)
	Case6		なし	-	-
	Case9		矢板	トンネル両側面に矢板を設置	矢板は支持地盤に根入れ
	Case10		地盤改良	トンネル下部(10cm)を改良	改良体の比重大(=2.0)
	Case12			トンネル下部(25cm)を改良	
	Case13			トンネル上部を全面改良	

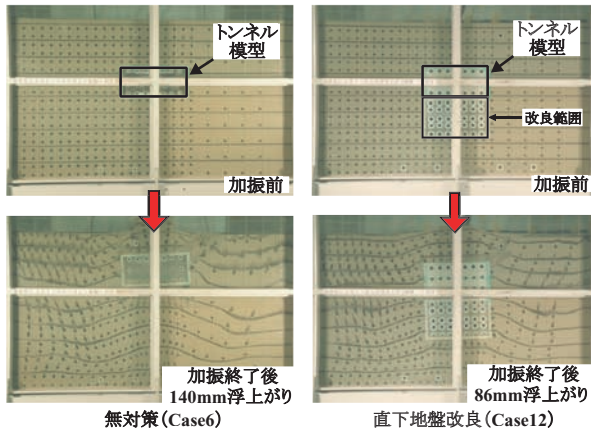


図3 トンネル模型の浮上がりと周辺地盤の変形の様子

中の Ws と Qs についてはその合力がトンネル上面のロードセルに測定されていると考えて、安全率を計算している。また、図5にCase1～3におけるトンネル下面のせん断力の時刻歴を示す。まず図5より加振数秒後に下面のせん断力はほぼゼロに近い値になっていることが分かる。これはトンネルが浮上がり始め、トンネルとその直下の地盤が剥離したためであり、Case1では100gal加振の途中、Case2,3では200gal加振の途中で浮上がり始めた。これに対して、浮上がり変位量が急速に進展し始めるのは、Case1で200gal加振時、Case2,3では300gal加振時であり(図4)、前述のトンネルが浮上がり始めた時点と時間差が見られた。この時間差はCase1,2では2秒程度、Case3では4秒程度であり、Case1,2と比較してCase3の方が時間差が大きかった(表2参照)。

一方、図4の浮上がり安全率の時刻歴を見ると、安全率が1を下回る時刻は、図5で求めたトンネルが浮上がり始める時刻より若干早いものの、相対密度の違いは表現されており、浮上がり始める時期をある程度反映していると言える。

以上より、いずれの実験においても浮上がり安全率により浮上がり始める時刻を概ね評価できること、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ことが分かった。

(2) 浮上がり始めた後のトンネルおよび地盤の挙動

図4には、画像解析システムにより算出したトンネル

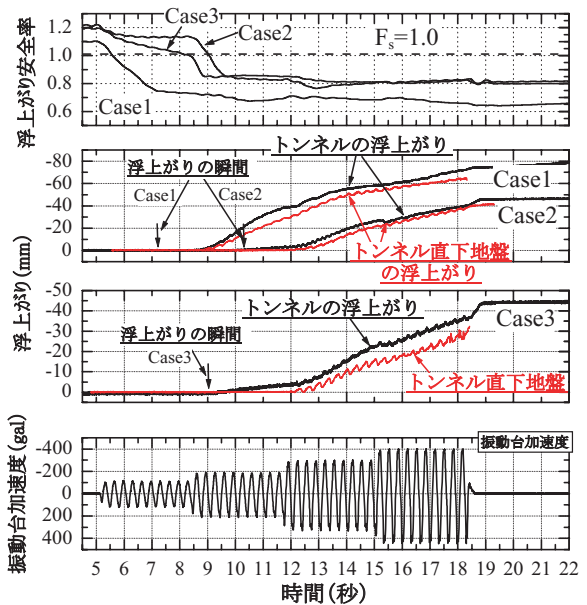


図4 加速度、浮上がり量、浮上がり安全率の時刻歴

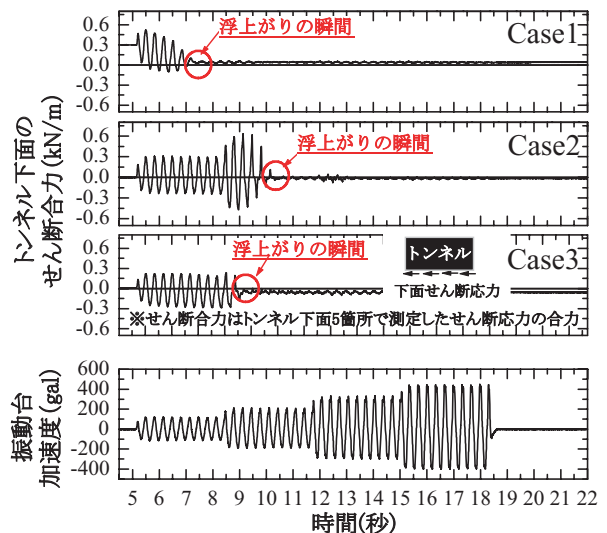


図5 トンネル下面に作用するせん断力の時刻歴

の直下の地盤(以下、直下地盤)の鉛直上向き変位量の時刻歴データも合わせてプロットしている。これを見ると、直下地盤の鉛直上向き変位量はトンネルの浮上がり量に遅れて増加している。これは直下地盤の上向き変位

特集：構造物の耐震設計技術

はトンネルの浮上がりに追従して発生したものであり、必ずしも直下地盤が直接的にトンネルを押し上げているわけではないことが分かる。

また、画像解析による周辺地盤の変形状況を見ると、直下地盤の液状化層厚を半分としたCase3では、トンネルから離れた場所の地盤がトンネル直下に向かって流入していた⁶⁾。これはトンネル下の液状化層厚が薄かったため、より遠くの地盤が直下地盤に向かって流入したためである。今回の実験では、必ずしも直下地盤がトンネルを直接的に押し上げたわけではないが、トンネルが浮上がるためにはトンネル直下へ地盤が流入される必要がある。そのため、表2に示したようにCase3はCase1と比較して「浮上がり開始時刻」と「浮上がりが急速に進展し始める時刻」の差が大きかったと考えられる。このことは、トンネル直下あるいは直上地盤を部分的に地盤改良するだけでも、トンネルの浮上がり量をある程度低減できる可能性を示している。

(3) 対策工の効果

対策工を模擬した実験では、既設の開削トンネルに対する薬液注入による地盤改良工法、および新設の開削トンネルに対する鋼矢板締切り工法を模擬した。

地盤改良工法を模擬した実験(図3)では、一般的な既設の開削トンネルにおける用地境界を考慮し、改良範囲はトンネルの上下部に限定した。前述したCase1とCase3の比較において、トンネル直下地盤の液状化範囲が浮上がり挙動に及ぼす影響が大きかったことを考慮し、直下地盤の改良を模擬した実験では改良範囲を変化させた実験も行った。

図6にトンネルの浮上がり量の時刻歴を示す。これよりいずれの対策工であっても200gal加振時においては、無対策の場合と比較して浮上がり量が軽減され、一定の効果が確認できる。しかしながら、加振レベルが300gal~400galに至り周辺地盤が完全に液状化した状態が継続すると地盤改良の範囲が限定的であったケース(Case5, Case10)や矢板対策(Case9)の場合は無対策(Case6)とほぼ同レベルの浮上がり量に至った。一方で、トンネル上部あるいは下部において地盤改良の範囲を広げた場合(Case12, 13)では浮上がり量を40%程度低減する効果が得られた。

4. 浮上がり量の簡易評価方法の提案

本章では振動実験結果に基づき、鉛直方向の運動方程式、および液状化指数を用いて浮上がり量の簡易評価方法を提案する。鉛直方向の運動方程式を用いる方法とは、実験時に浮上がり開始後の浮上がり速度には大きな違いが見られなかったことを考慮し、浮上がり量を直接算定する方法である。一方、液状化指数を用いる方法は、実験で見られたように地震時に浮上がり安全率が過渡的に1.0を下回っても、液状化の範囲・程度が限定的であれば大きな変位に至らないことを考慮した方法である。

表2 トンネル浮上がり開始時刻の比較

	浮上がり開始時刻		浮上がりが急速に進展し始める時刻
	トンネル下面のせん断力がゼロ	浮上がり安全率がゼロ	
Case1	100gal 加振時 (7.3秒付近)	100gal 加振時 (5.6秒付近)	200gal 加振時 (9秒付近)
Case2	200gal 加振時 (10.3秒付近)	200gal 加振時 (9.0秒付近)	300gal 加振時 (12.5秒付近)
Case3	200gal 加振時 (9秒付近)	200gal 加振時 (8.4秒付近)	300gal 加振時 (13秒付近)

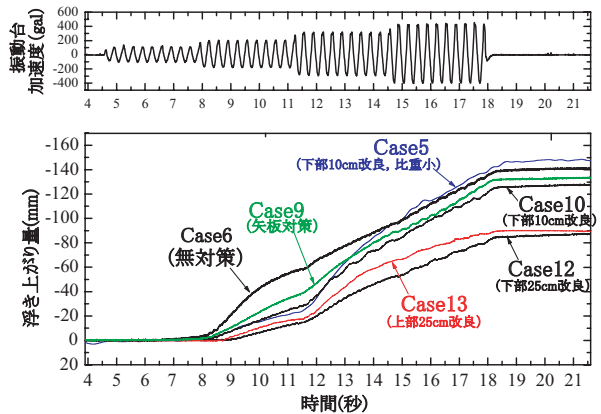


図6 トンネルの浮上がり量、振動台加速度の時刻歴

4.1 鉛直方向の運動方程式を用いる方法

既往の研究⁷⁾では液状化時の地中構造物の浮上がり量を予測する手法として、次に示す鉛直方向の運動方程式を用いた手法を提案している。

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{C}{M} \frac{dx}{dt} + \frac{\rho_{sat}bg}{M} x = -\frac{\{M - \rho_{sat}(h_0 - h_w)b\}g}{M} \dots\dots(2)$$

ここで、 x : 浮上がり量、 C : トンネルの浮上がり速度に比例する液状化地盤の抵抗係数、 M : 地中構造物および上載土の質量、 ρ_{sat} : 地盤の飽和単体重量、 h_0 : トンネルの底面深さ、 h_w : 地下水位の深さ(=0)、 b : トンネルの幅、 g : 重力加速度、である。

ここでは、浮上がり時に地中構造物には構造物と上載土の自重、浮力、および浮上がり速度に比例した抵抗が作用すると仮定し、鉛直方向の運動方程式を導いている。ここで、浮上がり速度の変化は小さいため左辺第一項の慣性項を無視し、初期条件($t=0$ で $x=0$)のもとで解くと、

$$x = -\frac{(\rho_{sat}h_0b - M)g}{\rho_{sat}bg} \{1 - \exp(-\frac{\rho_{sat}bg}{C}t)\} \dots\dots(3)$$

となり、抵抗係数 C のみが未知数となる。

図7に実験で得られた浮上がり量の時刻歴を式(3)でフィッティングさせた結果を示す。厳密に言えば、トンネルの浮上がりに伴い、水面よりも上に隆起した地盤により抵抗力は増加するが、ここではその影響を無視している。加速度の増加に伴い周辺地盤の液状化程度が変化するため、浮上がり始めから加振終了までの全体を同一の抵抗係数 C でフィッティングさせることはできない

が、各加振段階毎には抵抗係数 C をパラメータとしておおよそ良好にフィッティングできることが分かる。

表3に各加振段階における抵抗係数 C を示す。抵抗係数 C は加振加速度，すなわち液状化程度の影響を受けるが、周辺地盤が液状化し、トンネルが急速に浮上がり始めた後（300gal加振以降）は、地盤の相対密度や液状化層厚の影響をあまり受けず、同レベルの抵抗係数で浮上がり挙動を表現できる。

一方、式(3)は地盤を粘性流体として扱っているため、周辺地盤が液状化に至る過程での浮上がり量の推定には適用できないが、浮上がり量が急増する以後の浮上がり挙動を表現できると考えられる。そのため、浮上がり安全率により浮上がり開始時点だけを推定すれば、式(3)により、浮上がり量をある程度の精度で算定できると考えられる。しかし、既往の研究⁸⁾では液状化した地盤の粘性抵抗は拘束圧、相対密度の影響を受けると指摘されており、実地盤の抵抗係数 C を算定することは難しいため、詳細については今後の検討が必要である。

4.2 液状化指数を用いる方法

現行標準において液状化程度を表す指標としては P_L 値がある²⁾が、 P_L 値は液状化による地表面付近の構造物（盛土等）の被害の程度を予測する指標であり、地表面付近の液状化程度に重み付けを行っている（図8参照）。

$$P_L = \int_0^{20} (1 - F_L) w dz \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$w = 10 - 0.5z \quad \dots\dots\dots(5)$$

ここで、 x ：地表面からの深さ（m）、 F_L ：液状化抵抗率、 w ：液状化抵抗率の深さ方向の重み関数、である。

前述したようにトンネルの浮上がりの場合、トンネル直上、直下地盤の液状化程度が大きな影響を及ぼすため、ここではトンネル直上、直下地盤に重み付けをする方法により P_L 値（以下、浮上がり判定用の P_L 値）を算定し、実験で得られた浮上がり量との相関性を考察する。

図9および図10に「現行 P_L 値」、「浮上がり判定用の P_L 値」と、浮上がり量の実験値との関係を示す。ここで、 P_L 値の算定に際しては、模型地盤に用いた珪砂6号の振動三軸試験結果と、模型地盤の密度および飽和度を考慮して液状化強度比 R を算定した⁹⁾。また、浮上がり量としては実験での測定値 δ を最大浮上がり量 δ_{max} で正規化した値を示している。この最大浮上がり量とは周辺地盤が完全に液状化した場合に構造物が浮き上がり得る浮上がり量である。また、矢板対策を想定した実験（Case9）では、矢板による地盤の拘束効果を考慮し、 P_L 値算定時における静止土圧係数を1.3倍（ $K=0.65$ ）とした。これはトンネル側壁ロードセルで計測された動土水圧に基づいたものである。これらの図より以下が考察できる。

- ・ 現行 P_L 値で評価した場合、トンネル上部に非液状化層

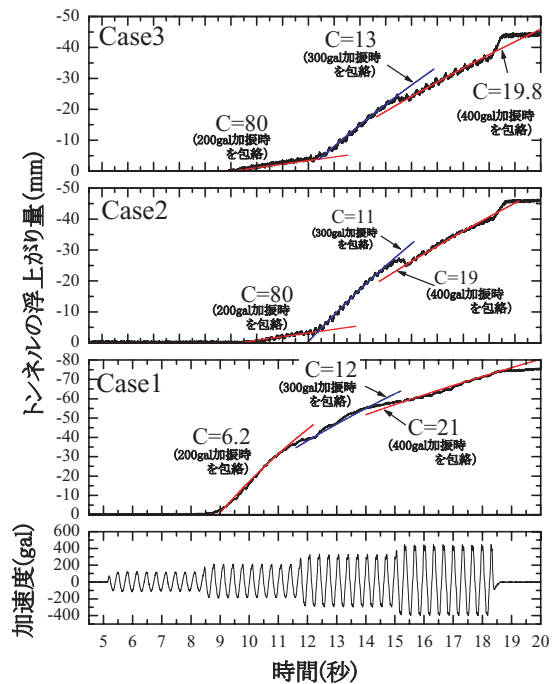


図7 浮上がり量の時刻歴と抵抗係数 C を変化させた運動方程式によるフィッティング

表3 各加振段階における抵抗係数 C の逆算値

	100gal 加振時	200gal 加振時	300gal 加振時	400gal 加振時
Case1	0	6.2	12.0	21.0
Case2	0	80	11.0	19.0
Case3	0	80	13.0	19.8

（単位：kg/sec・cm）

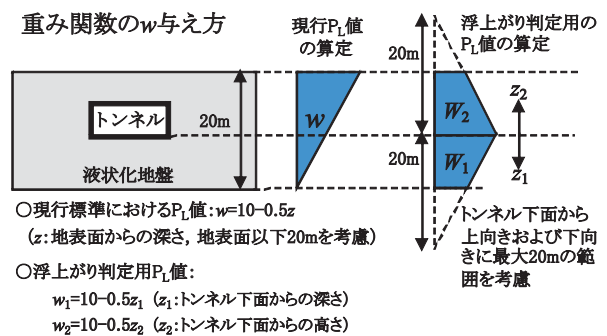


図8 浮上がり判定用の P_L 値の算定に用いる重み関数

がある場合やトンネル下部の液状化層厚が小さい場合の評価が難しいことが分かる。これは、現行 P_L 値では地表面近くの液状化程度に重み付けがされるためである。

- ・ 現行法と比較して、浮上がり判定用の P_L 値の方が実験値と良好な相関関係が見られる。

以上の検討結果を踏まえ、改訂予定の耐震標準では「浮上がり判定用の P_L 値」を新たな評価指標として導入し、以下のようにトンネルの安定レベルの照査に用いる。

- ・ 浮上がり安全率を算定し、これを満足した場合は安定レベル1（トンネルが浮上がらない状態）を満足する

特集：構造物の耐震設計技術

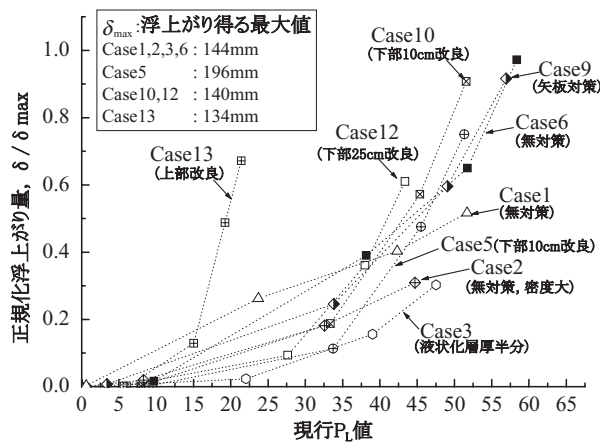


図9 現行 P_L 値と正規化浮上り量の関係

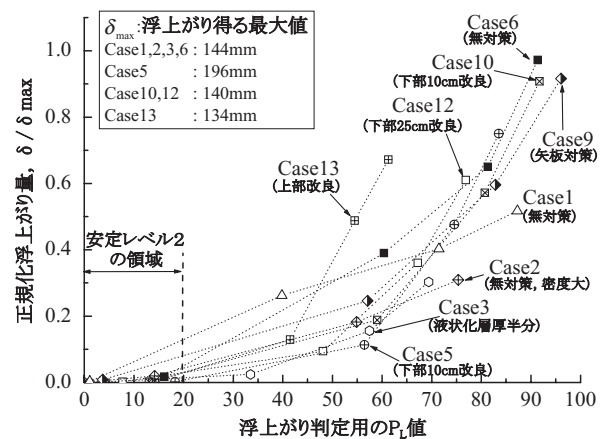


図10 浮上り判定用の P_L 値と正規化浮上り量の関係

と判定する。

- ・ 浮上り安全率が1以下でも、「浮上り判定用の P_L 値」が0～20程度である場合は安定レベル2（液状化は生じるがその範囲・程度は限定的であり、浮上りは生じない、あるいは地震後の列車の走行性に及ぼす影響が小さい状態）を満足すると判定する（図10）。

5. まとめ

本研究で実施した実験で得られた知見を以下に示す。

- ① 浮上りは周辺地盤の過剰間隙水圧が上昇した時に開始される。「浮上り開始時刻」は現行標準で適用されている浮上り安全率により概ね評価できる。
- ② 浮上り開始直後にトンネルは必ずしも急速に浮上るわけではない。加振を継続し、液状化程度が増加した段階で急速に浮上り始める。逆に、浮上り安全率が1.0を下回っても液状化の範囲・程度が限定的であれば大きな変位に至らない。これらの現象は浮上り安全率では説明できない。
- ③ 浮上りが急速に進展し始めた後の浮上り速度には大きな違いは見られない。

④ 「浮上り開始時刻」から「浮上りが急速に進展し始める時刻」までの時間差は実験条件によって異なり、特にトンネル直下および直上地盤の液状化程度、範囲の影響を大きく受ける。すなわち加振レベル、加振継続時間が重要な影響因子である。

⑤ トンネルの直下および直上地盤を部分的に地盤改良することにより、浮上り量を効果的に抑制できる。これは地盤改良により「浮上りが急速に進展し始める時刻」が遅れるためである。

これらの実験事実を踏まえ、以下に示す2通りの浮上り量の評価法を提案した。

- ・ 方法1：鉛直方向の運動方程式を用いる方法

浮上り開始時刻は現行標準²⁾の浮上り安全率により評価し、その後の浮上り挙動は鉛直方向の運動方程式を用いる。この手法は、地震動の継続時間の影響を考慮でき、浮上り量を直接算定することができるが、液状化地盤の浮上り速度に比例する抵抗係数 C の評価について今後の検討が必要である。

- ・ 方法2：液状化指数 (P_L 値) を用いる方法

現行標準²⁾で適用されている液状化指数 (P_L 値) において、トンネルの直下および直上地盤の液状化程度に重みづけをした「浮上り判定用の P_L 値」を用いる。この手法により、大地震後の浮上り量自体を直接算定することは難しいが、浮上りは開始するものの急速には進展しない段階（安定レベル2に相当）を評価できる。

今後は周辺地盤の液状化レベル・範囲を考慮し、浮上り量を直接評価可能な数値解析手法の開発が望まれる。

文献

- 1) (社)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) 運輸省鉄道局監修，鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計），丸善，1999
- 3) 日本道路協会：共同溝設計指針，1986
- 4) 日本下水道協会：下水道施設の耐震対策指針，1997
- 5) 石田英毅，東畑郁生，中井則之：液状化による地中構造物の浮上り軽減のための地中壁の利用，第11回日本地震工学シンポジウム論文集，pp.897-900，2002
- 6) 渡辺健治，澤田亮：液状化による開削トンネルの浮上りに対する各種対策工法の効果の検討，第28回地震工学研究発表会，土木学会地震工学委員会，2005
- 7) 佐々木哲也，田村敬一：地中構造物の浮上り予測手法に関する検討，第11回日本地震工学シンポジウム論文集，pp.1065-1070，2002
- 8) 濱田政則：液状化砂の流動特性に関する実験的研究，土木学会論文集 No.792 / III -71，pp.13-25，2005
- 9) (社)地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説，2009