

トンネル発生土を用いた 盛土の施工管理法の開発

構造物技術研究部 基礎・土構造研究室
主任研究員 笠原 康平

背景・目的

変位制限や地震時残留変位に厳しい制約がある新幹線盛土等では、従来、安定供給や品質確保の観点から**購入土が多く使用**されていた

↓
しかしながら…

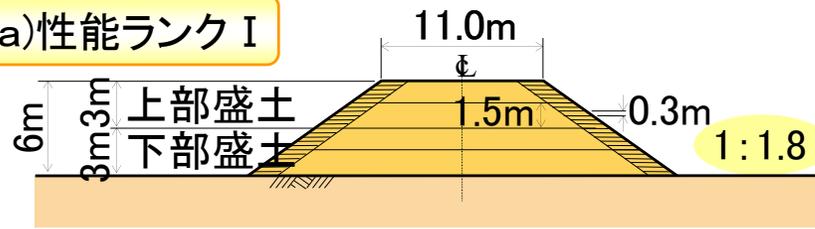
近年は、**低コスト化や環境負荷低減の観点から、トンネル掘削工事での発生土(トンネル発生土)の有効活用**が求められている。

↓

トンネル発生土を対象

- ・系統的な土質試験を行い材料特性を確認
- ・トンネル発生土を用いた盛土の施工管理法を構築

(a)性能ランク I



盛土施工実績(北陸・九州新幹線)
⇒ **購入土(C-40、M-40)**

購入土 (C-40)	トンネル発生土 (巨礫を含む)
	

1. トンネル発生土を盛土に用いる上での主要課題
2. 材料条件の適用範囲の整理(課題1)
3. 粗石を含むトンネル発生土の最大乾燥密度推定法の構築(課題2)
4. 試験盛土による提案法の検証
5. まとめと成果の活用

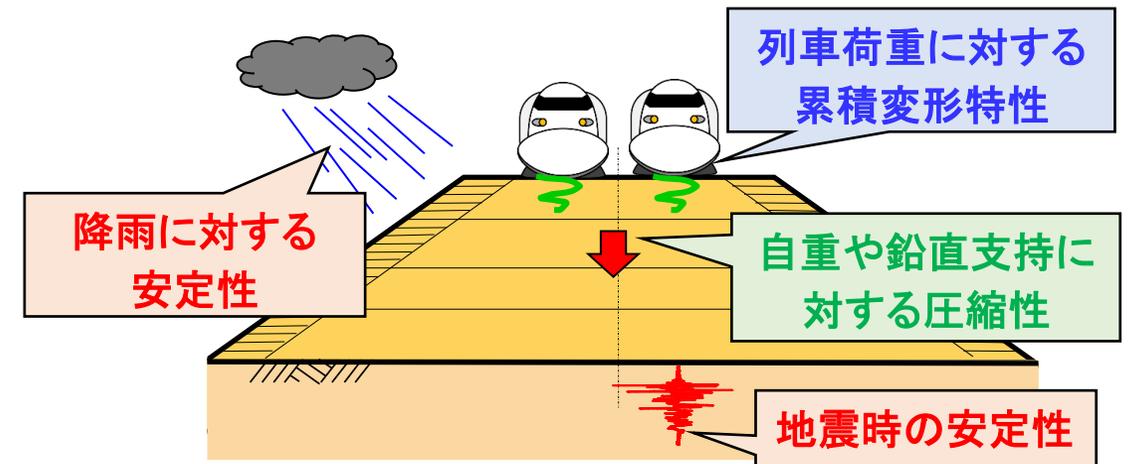
トンネル発生土を盛土に用いる上での主要課題

課題1: 盛土に適用可能なトンネル発生土の材料条件が十分に整理されていない

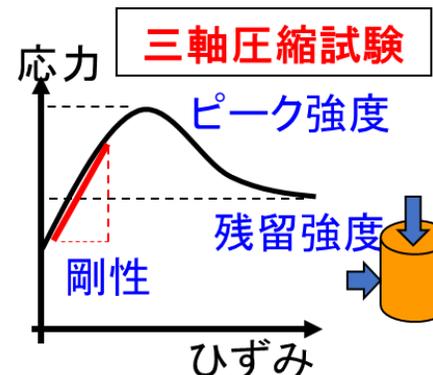
- 盛土に用いる材料として、適切な締固めが可能な材料か？
- 降雨や地震に対する安定性を確保するための所要の強度を発揮できるか？

締固めの意義・目的

目的	締固めの効果
安定の確保	間隙率、透水性↓、強度・剛性↑
沈下の減少	間隙率、圧縮性↓
路床剛性の確保	剛性↑ 累積沈下↓



系統的な土質試験を行い
トンネル発生土の材料特性を確認

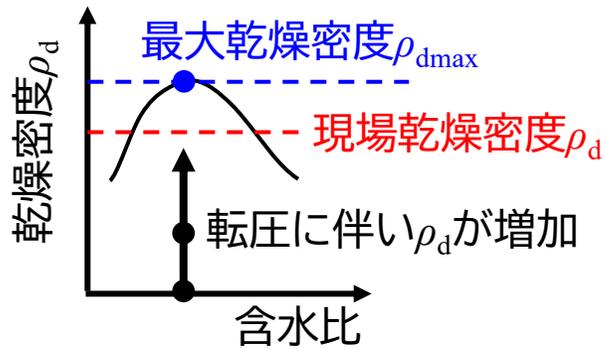


トンネル発生土を盛土に用いる上での主要課題

課題2:トンネル発生土を用いる場合の施工管理法が確立されていない

一般的な盛土材料の場合

室内締固め試験



$$\text{締固め度 } D_c = \rho_d / \rho_{dmax} \times 100$$

密度試験



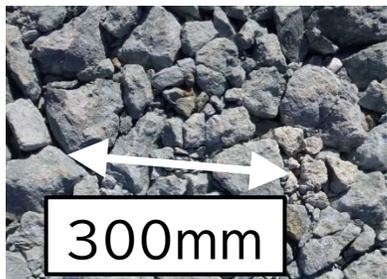
現場乾燥密度 ρ_d を計測

室内締固め試験で得られた最大乾燥密度 ρ_{dmax} に対して、現場乾燥密度 ρ_d が所要の締固め度 D_c を満足するまで転圧を実施



重機による
転圧

トンネル発生土の場合

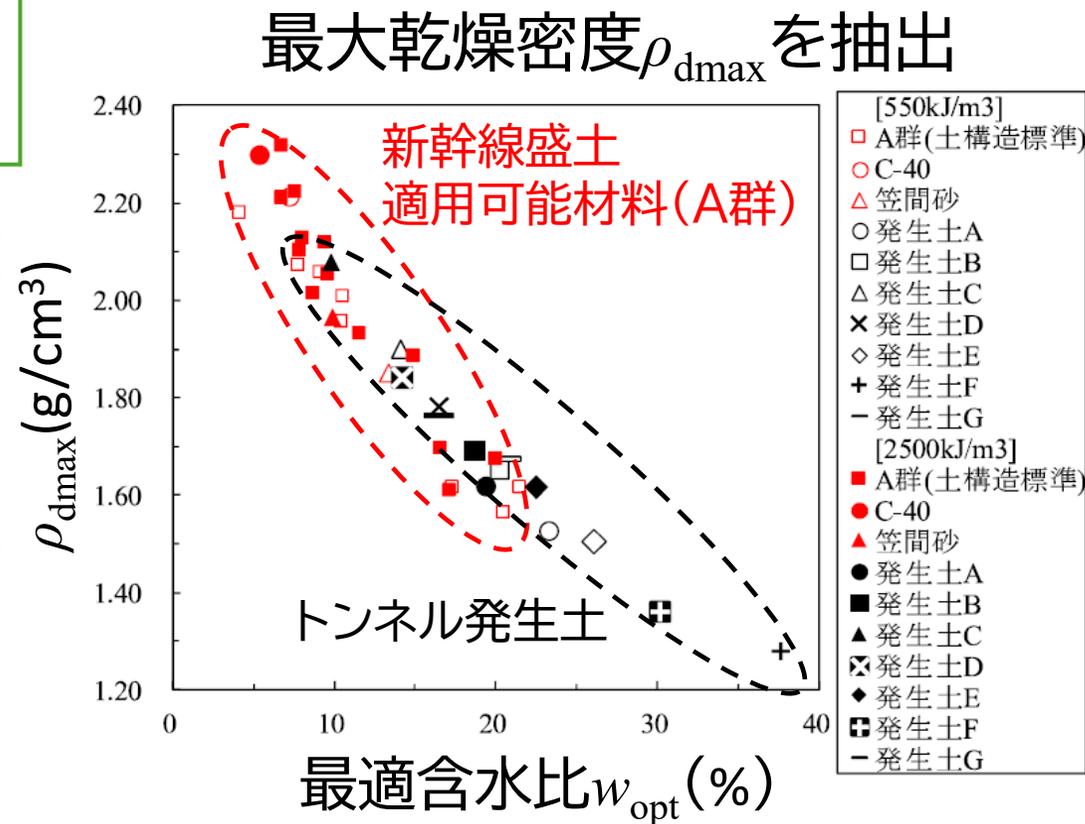
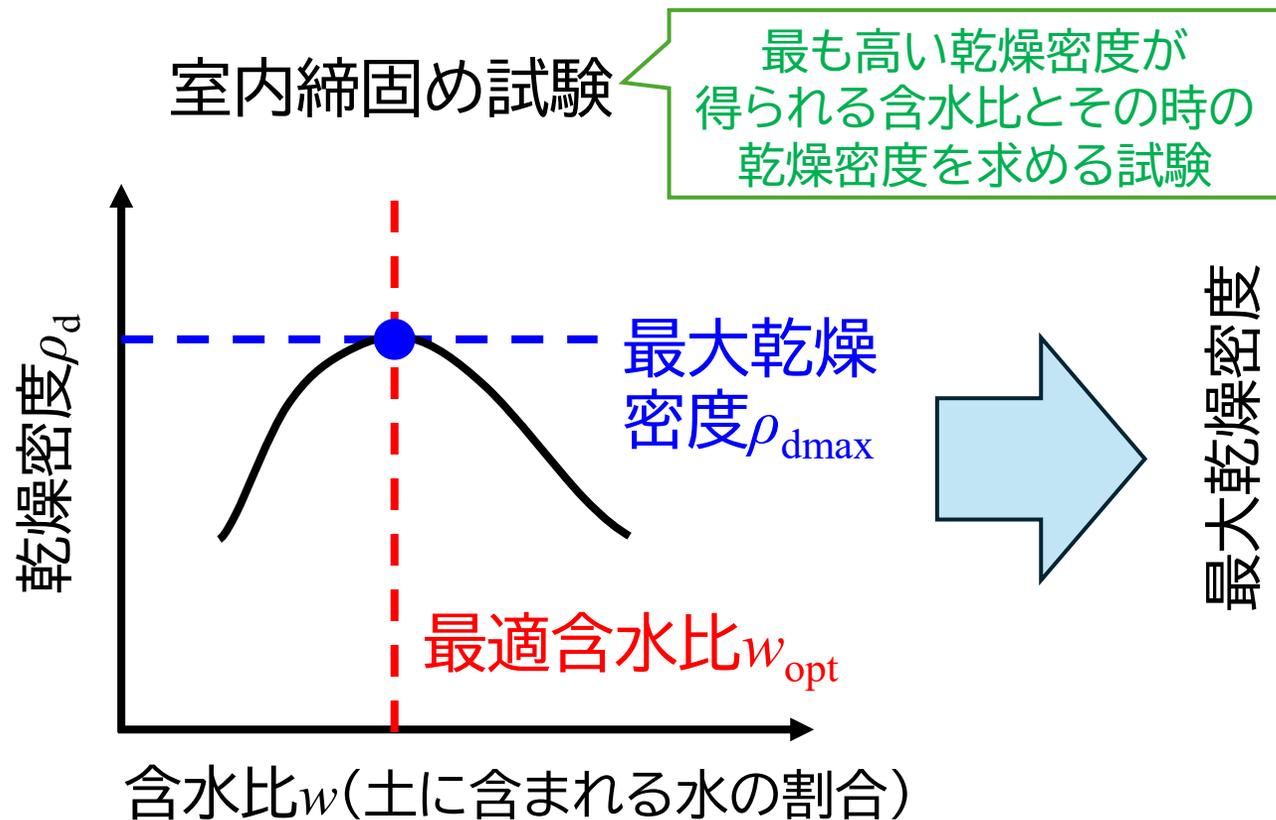


- 室内締固め試験の適用範囲(37.5mm)を超える巨礫を含むため、施工管理に必要な情報(ρ_{dmax})を取得できない。
- 既存の ρ_{dmax} 推定法は適用範囲が狭く使用が限定的(礫率40%まで)

1. トンネル発生土を盛土に用いる上での主要課題
2. 材料条件の適用範囲の整理(課題1)
3. 粗石を含むトンネル発生土の最大乾燥密度推定法の構築(課題2)
4. 試験盛土による提案法の検証
5. まとめと成果の活用

材料条件の適用範囲の整理(課題1)

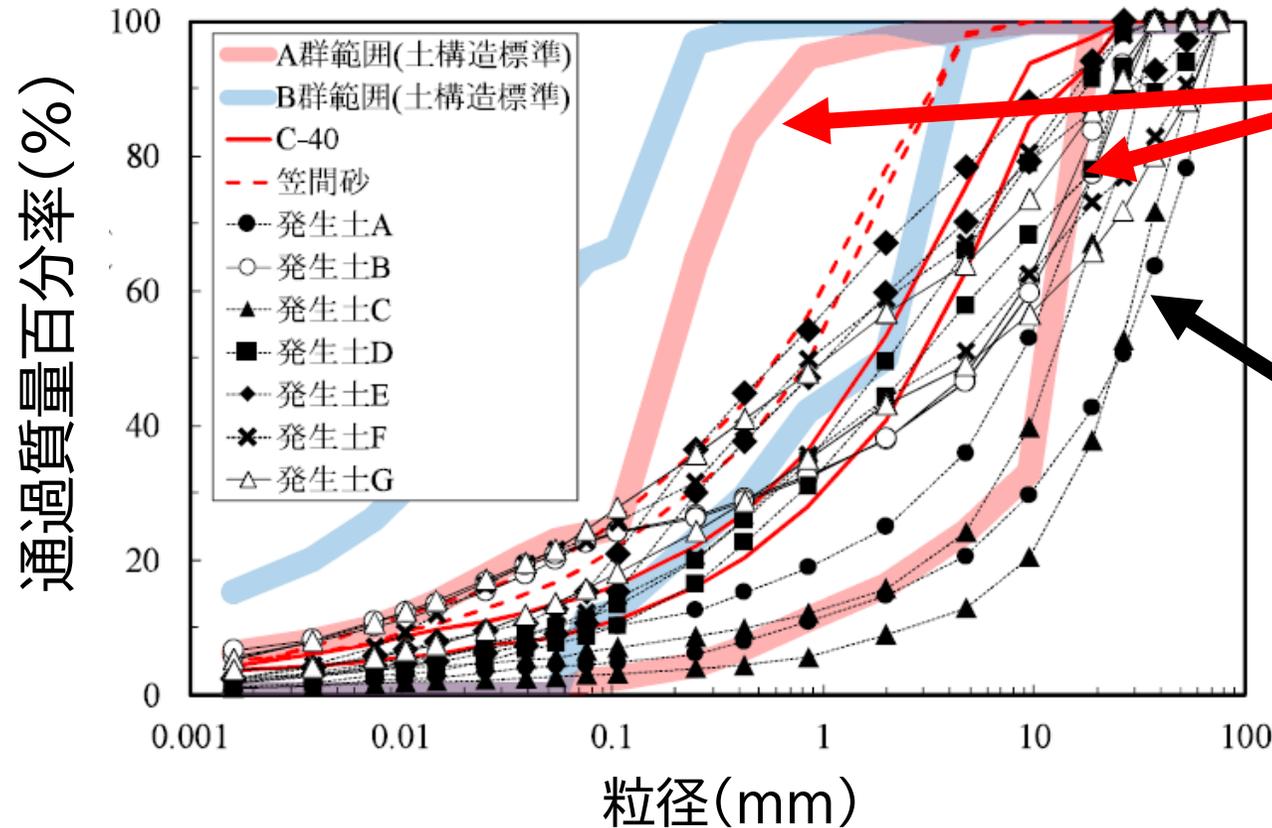
締固め特性の確認のため、室内締固め試験を実施(37.5mm以下のふるい分け試料)



一部を除いて、大半のトンネル発生土が新幹線盛土 適用可能材料(A群)の分布範囲に収まっている

材料条件の適用範囲の整理(課題1)

粒度特性の確認のため、室内粒度試験を実施



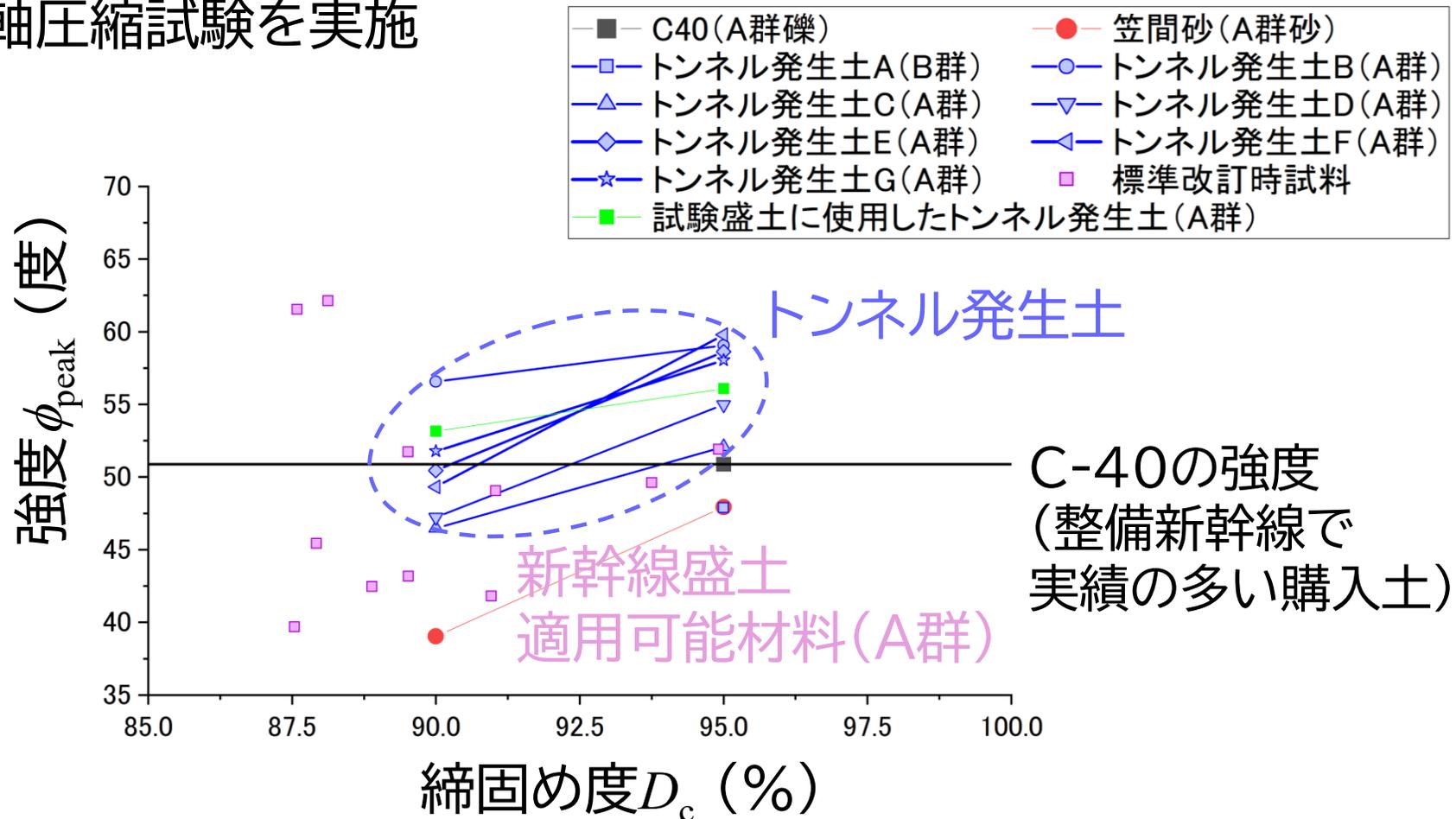
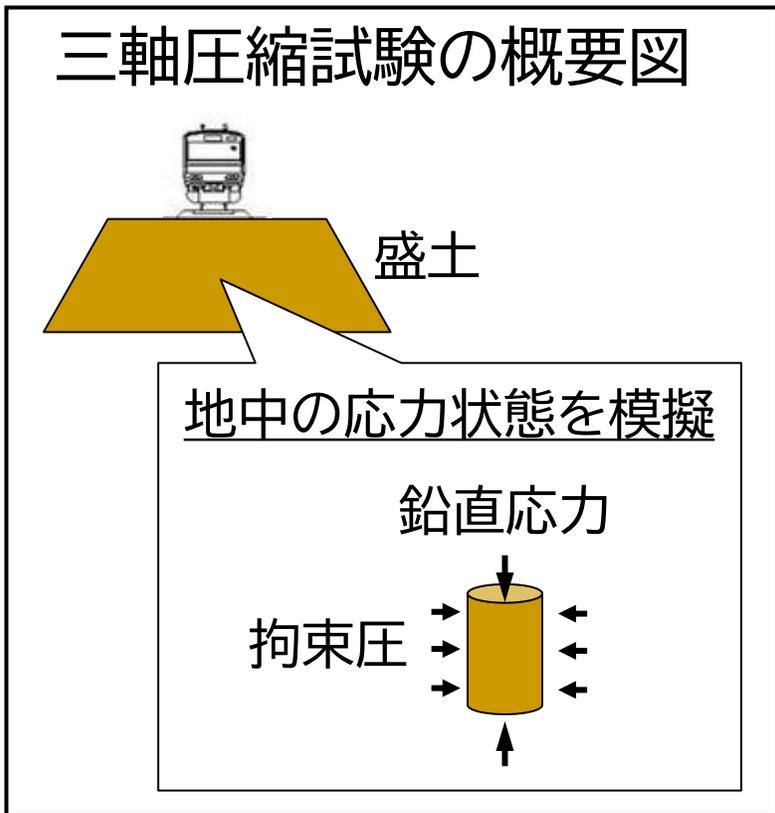
新幹線盛土
適用可能材料(A群)の
粒度分布の範囲

一部の発生土で
粗粒分が多い

一部のトンネル発生土で粗粒分が多い傾向がみられるものの、
大半が新幹線盛土 適用可能材料(A群)の分布範囲に収まっている

材料条件の適用範囲の整理(課題1)

強度特性の確認のため、三軸圧縮試験を実施



- $D_c=90\%$ で新幹線盛土 適用可能材料(A群)と同程度の強度
- $D_c=95\%$ でC-40(整備新幹線で実績の多い購入土)よりも大きな強度

材料条件の適用範囲の整理(課題1)

締固め試験・粒度試験・三軸圧縮試験の結果や、その他実施した室内試験結果(繰返し三軸試験、圧密試験、スレーキング試験)等を踏まえ、締固め特性や強度・剛性等の観点から、材料条件の適用範囲を整理した。

トンネル発生土を盛土材料として使用する場合の材料条件

項目	使用可能な条件	備考
最大粒径 D_{max}	$D_{max} \leq 150\text{mm}$	
細粒分含有率 F_c	$F_c \leq 15\%$	A群材料相当
最大乾燥密度 ρ_{dmax}	$\rho_{dmax} \geq 1.6\text{g/cm}^3$	締固めエネルギー $4.5E_c$ のE法(修正プロクター)により設定
一軸圧縮強度	25MPa以上	
スレーキング指数	スレーキング指数が0	
均等係数 U_c 曲率係数 U_c'	$U_c \geq 10$ $1 < U_c' < \sqrt{U_c}$	締固め特性

1. トンネル発生土を盛土に用いる上での主要課題
2. 材料条件の適用範囲の整理(課題1)
3. 粗石を含むトンネル発生土の最大乾燥密度推定法の構築(課題2)
4. 試験盛土による提案法の検証
5. まとめと成果の活用

粗石を含むトンネル発生土の最大乾燥密度推定法の構築(課題2)

Railway Technical Research Institute

一般的な盛土材料
(C-40、M-40等)

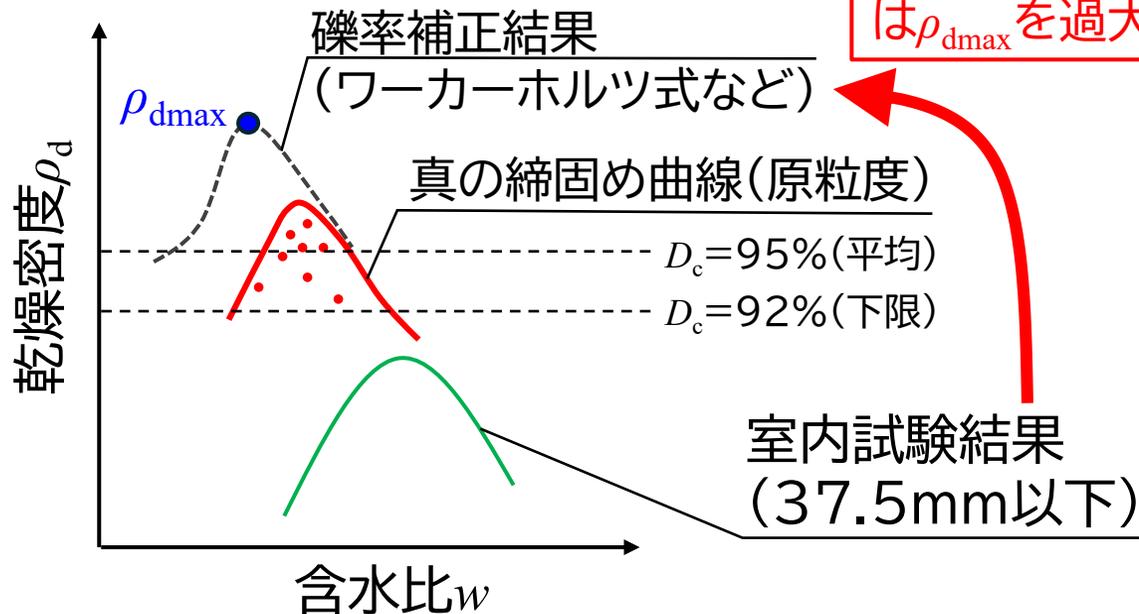
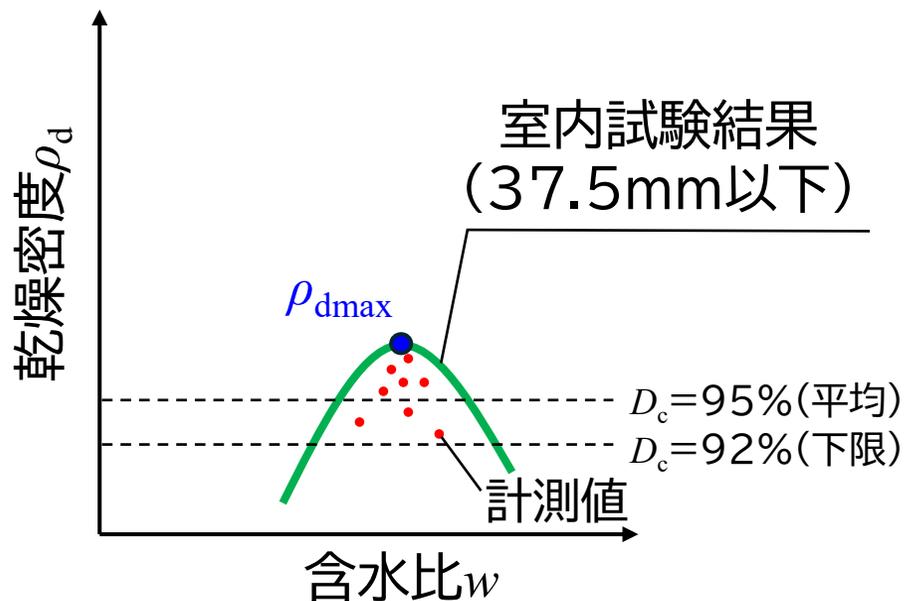


粒径の大きな盛土材料
(トンネル発生土)



[既存推定法の課題]
礫を含む量によって
は ρ_{dmax} を過大評価

概念図



施工
管理

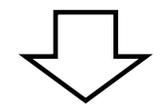
室内締固め試験で得られた ρ_{dmax} に対して所定の締固め度 D_c を確保

一定の仮定のもとで推定した ρ_{dmax} に対して所定の締固め度 D_c を確保

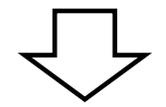
トンネル発生土の施工管理を行うための合理的な最大乾燥密度推定法の構築が求められていた

粗石を含むトンネル発生土の最大乾燥密度推定法の構築(課題2)

STEP1
室内締固め試験の実施
(37.5mm以下)

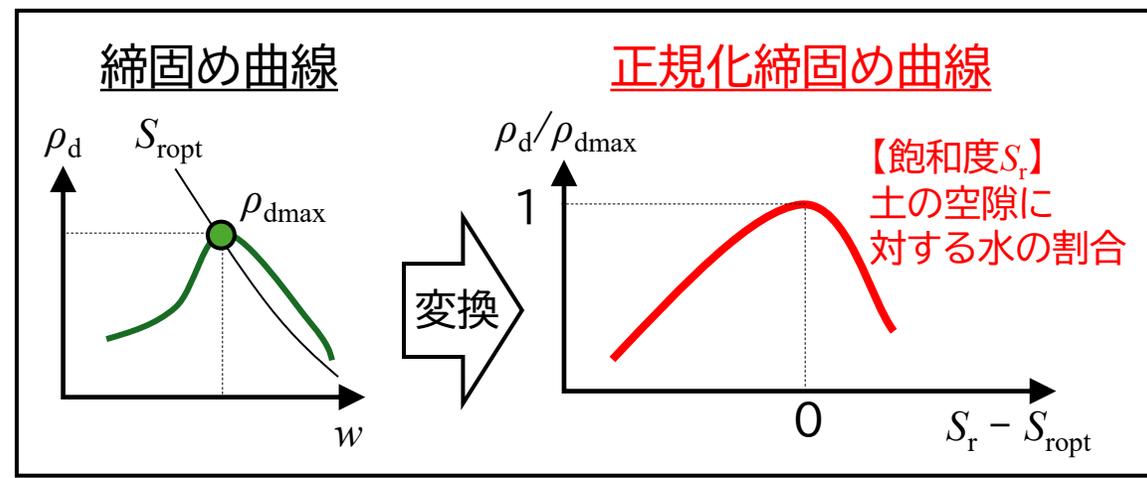


STEP2
転圧試験の実施
(粗石含む、現地試験)

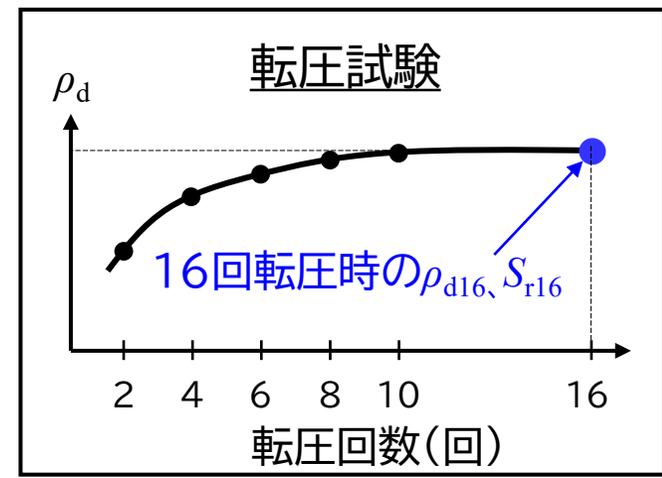


STEP3
正規化締固め曲線から
16回転圧時の ρ_d を
補正して ρ_{dmax} を推定

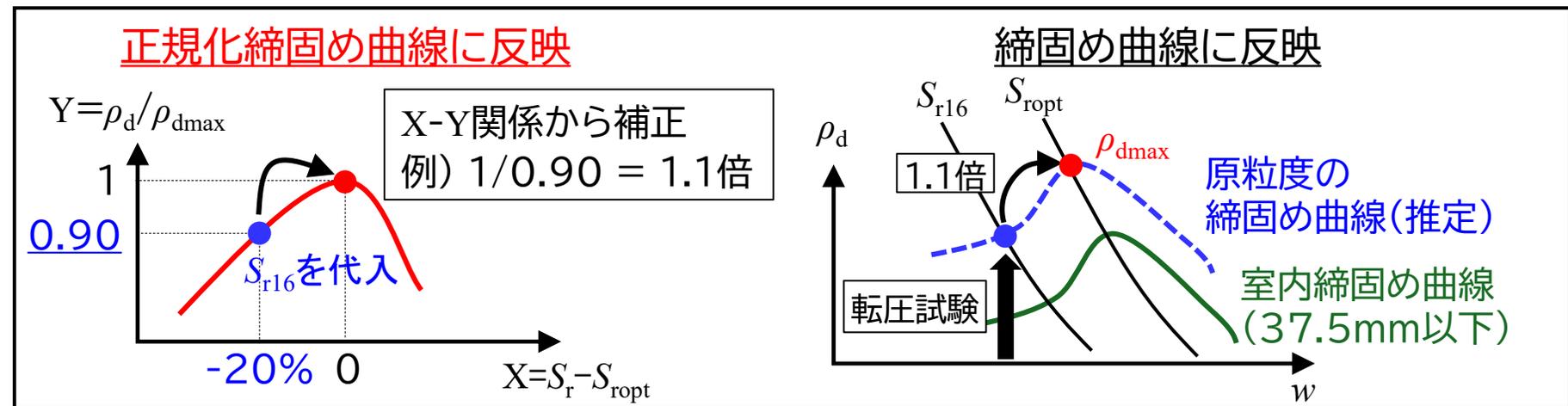
STEP1



STEP2



STEP3



トンネル発生土の施工管理を行うための最大乾燥密度推定法を構築

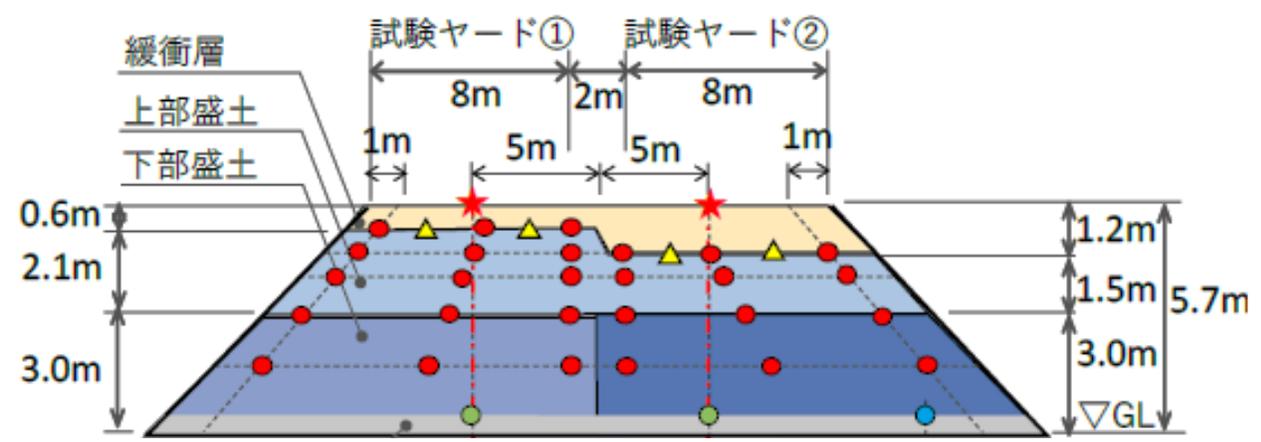
1. トンネル発生土を盛土に用いる上での主要課題
2. 材料条件の適用範囲の整理(課題1)
3. 粗石を含むトンネル発生土の最大乾燥密度推定法の構築(課題2)
4. 試験盛土による提案法の検証
5. まとめと成果の活用

試験盛土による提案法の検証(転圧試験)

Railway Technical Research Institute

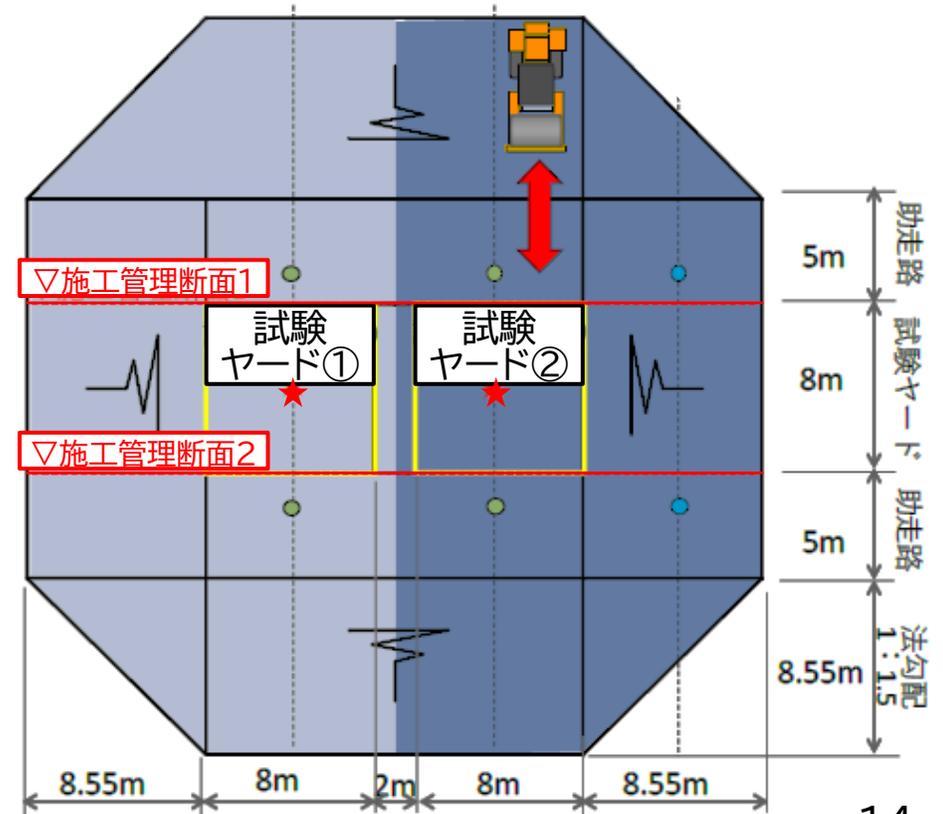
提案法の検証のため、試験盛土の転圧試験を行った

断面図

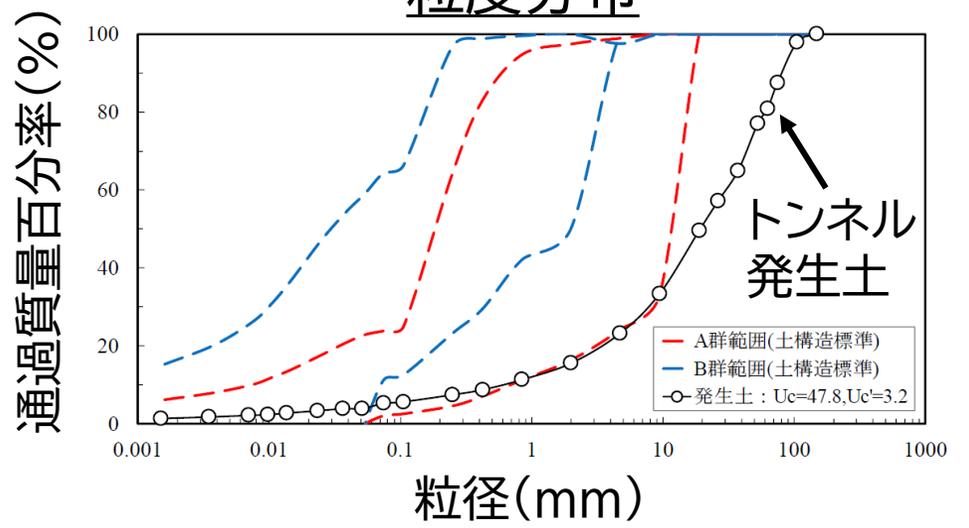


- ★ : 層別沈下計
- ▲ : K_{30} 値測定 (小型FWD)
- : 密度測定 (SRID)
- : 密度測定 (転圧試験用: SRID)
- : 密度測定 (転圧試験用: SRID, ANDES, 水置換)

平面図



粒度分布



10t級振動
ローラ

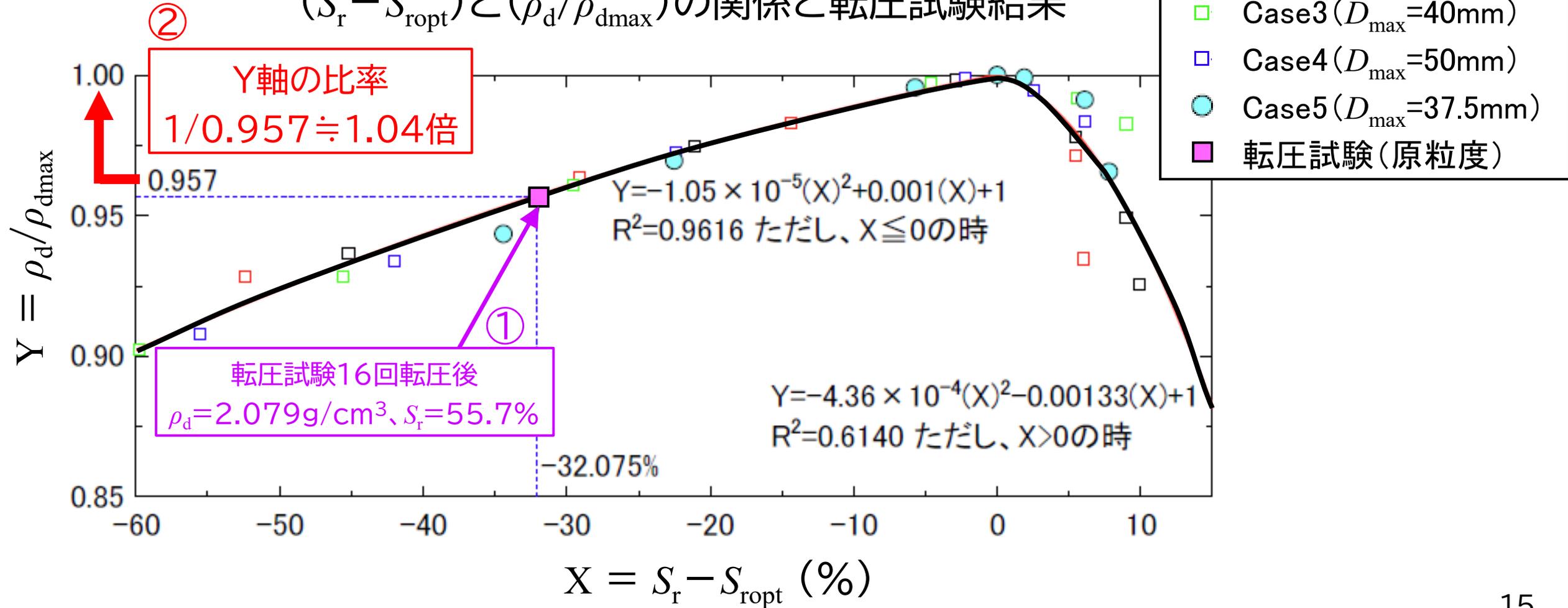


試験盛土による提案法の検証(転圧試験)

Railway Technical Research Institute

成果2を用いてトンネル発生土の最大乾燥密度を推定した

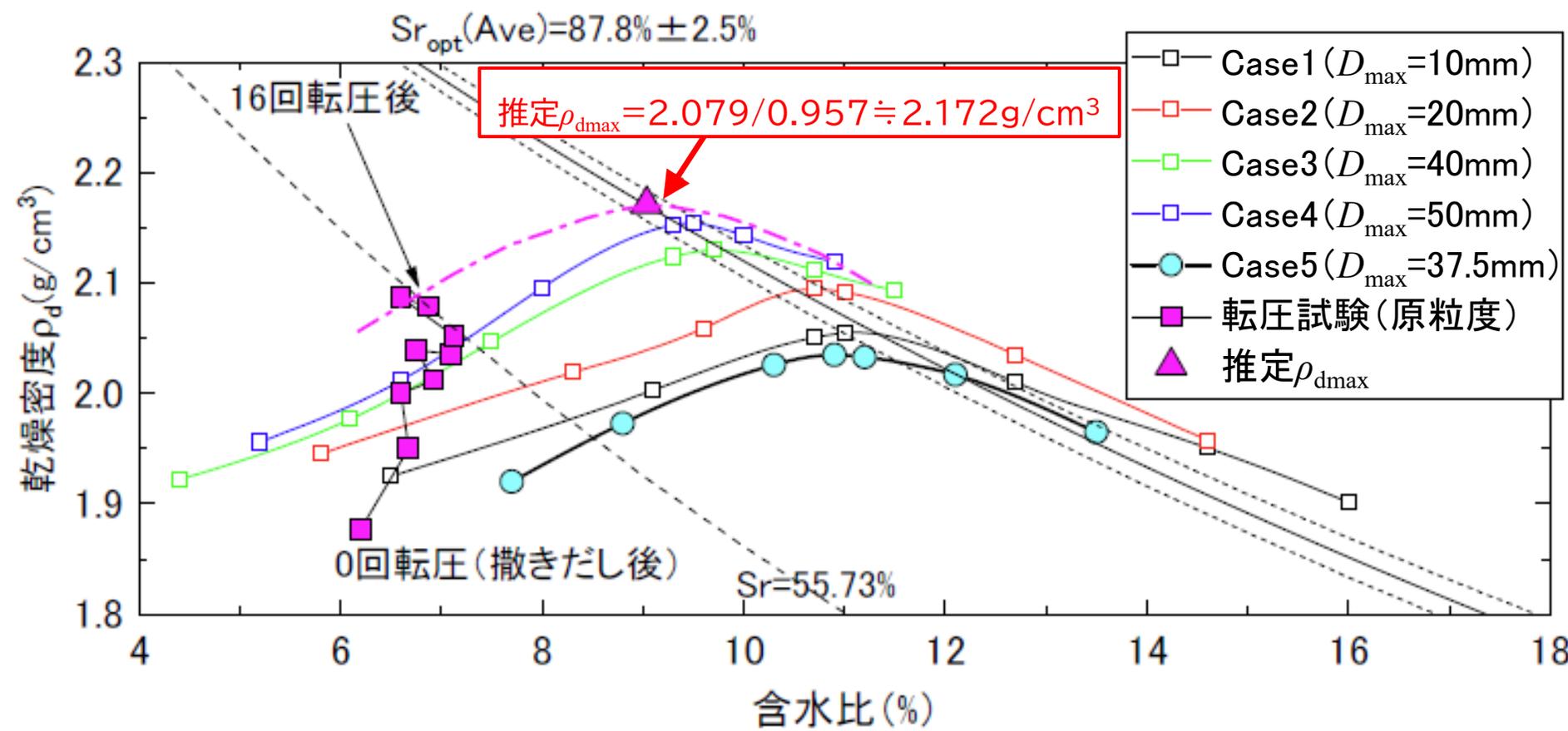
($S_r - S_{ropt}$)と(ρ_d / ρ_{dmax})の関係と転圧試験結果



試験盛土による提案法の検証(転圧試験)

成果2を用いてトンネル発生土の最大乾燥密度を推定した

締固め曲線・転圧試験結果と推定最大乾燥密度

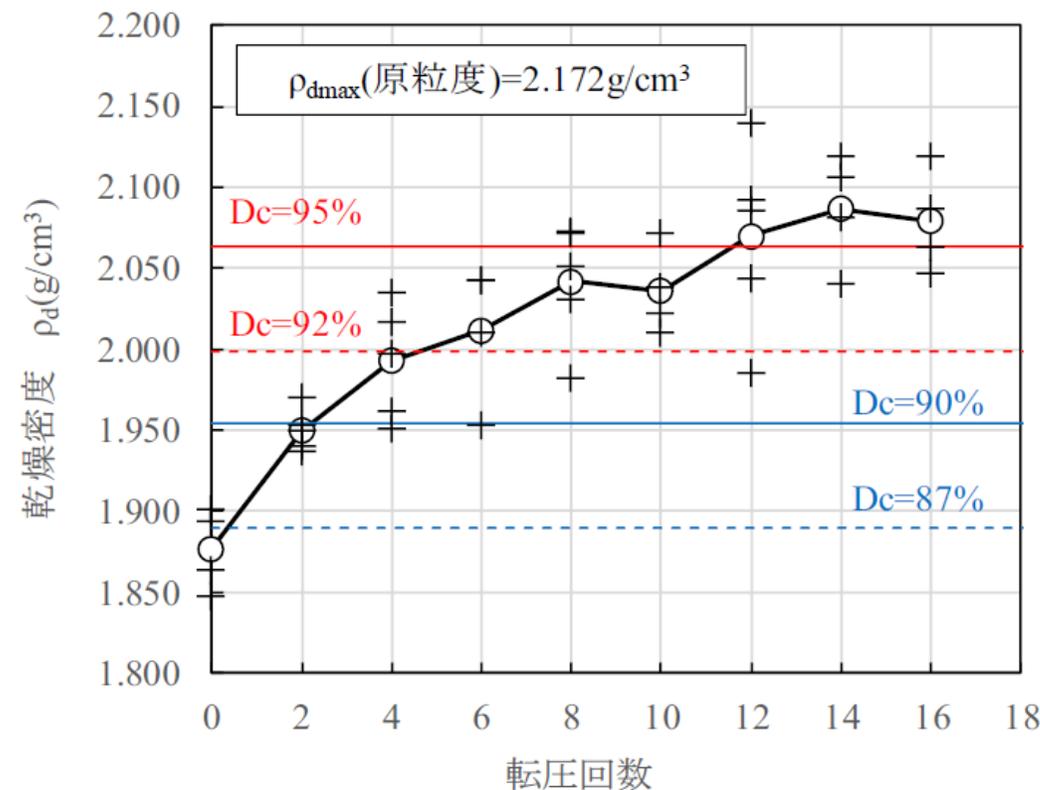
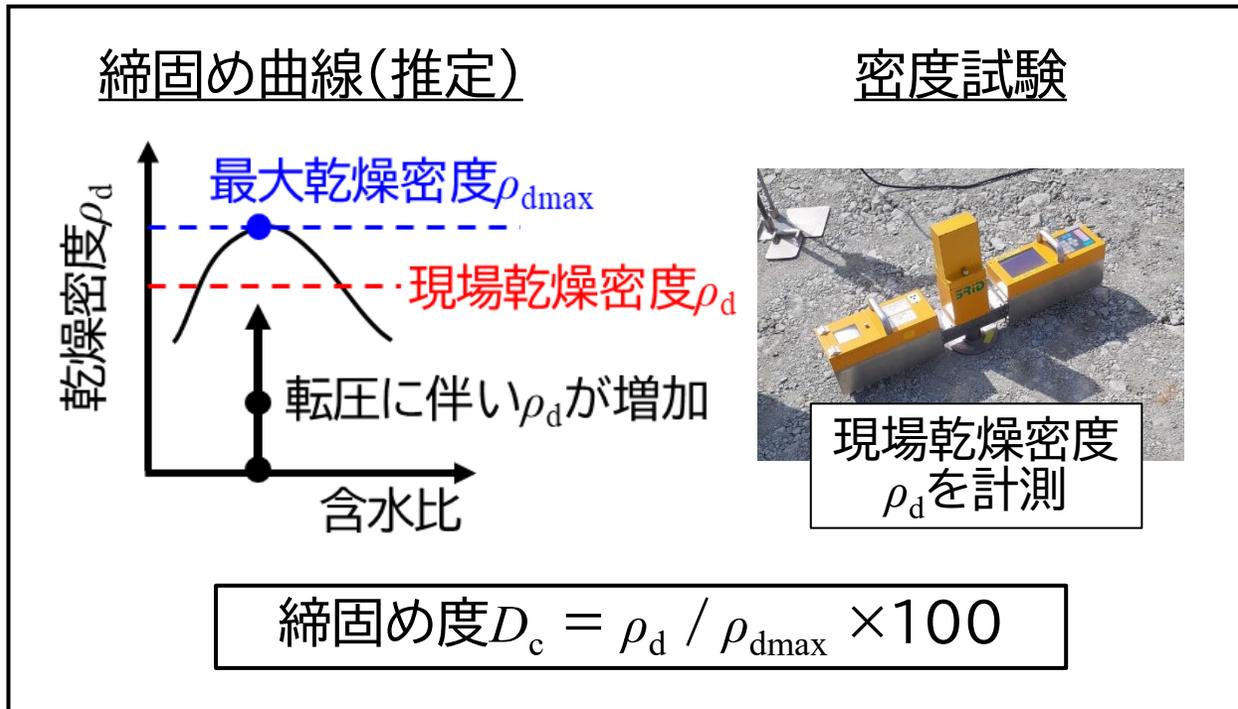


本トンネル発生土の最大乾燥密度は $\rho_{dmax} = 2.172 \text{ g/cm}^3$ と推定された

試験盛土による提案法の検証(転圧試験)

成果2で推定した最大乾燥密度を用いて、転圧試験の施工管理を実施

転圧試験の結果



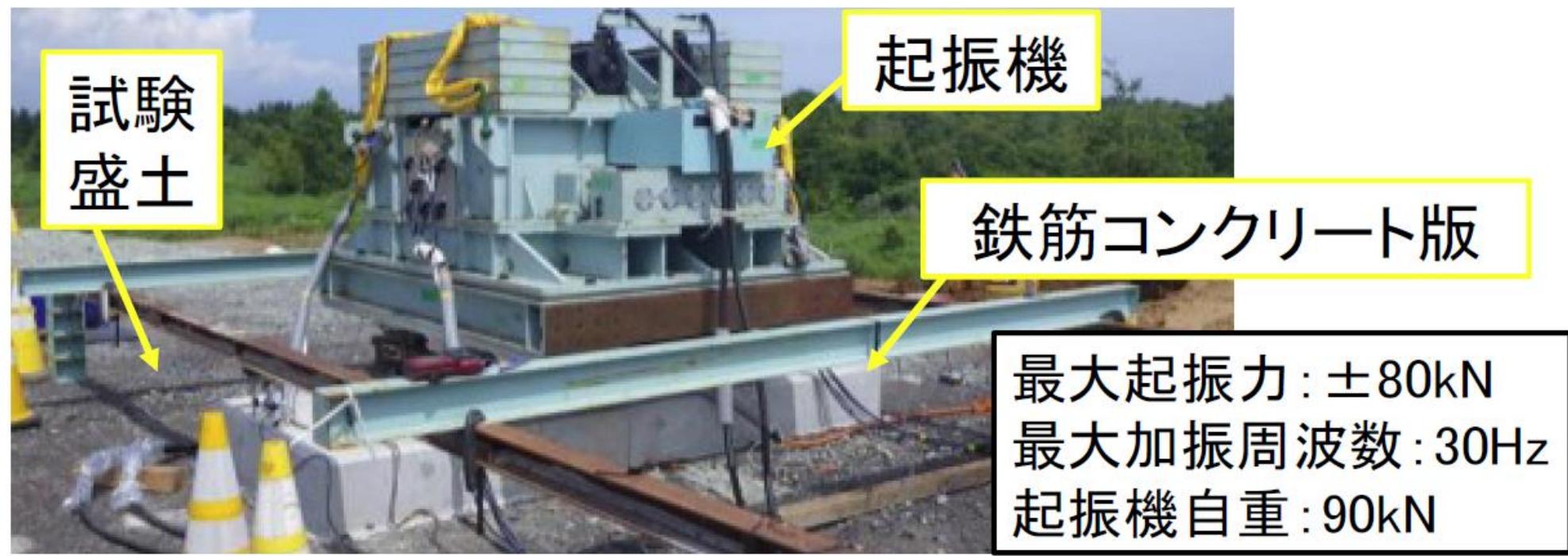
目標締固め度を満たす転圧回数

- 平均 $D_c = 90\%$, 下限 $D_c = 87\%$ を4回転圧で満足
- 平均 $D_c = 95\%$, 下限 $D_c = 92\%$ を14回転圧で満足

提案法を用いた施工管理の実現性を確認した

試験盛土による提案法の検証(起振機試験)

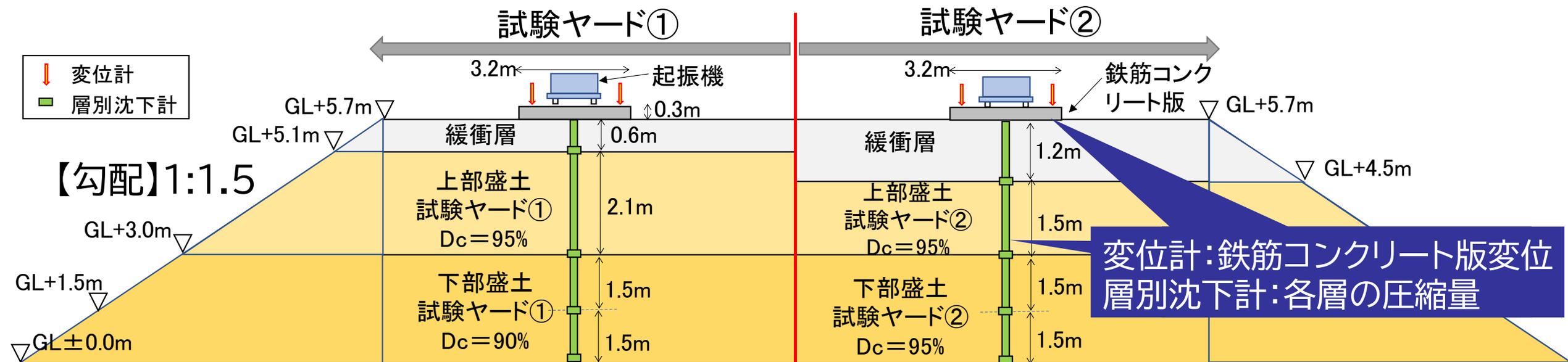
提案法で構築した盛土の列車支持性能を確認するため、
新幹線の列車荷重を模擬した起振機試験を実施



試験盛土による提案法の検証(起振機試験)

- 試験盛土の構成: 緩衝層(C-40)、発生土を用いた上部盛土および下部盛土
- 試験ヤード①と試験ヤード②は、緩衝層の層厚および上部盛土の層厚と下部盛土の締固め度 D_c が異なる条件とした

発生土を用いた試験盛土の断面と計測配置

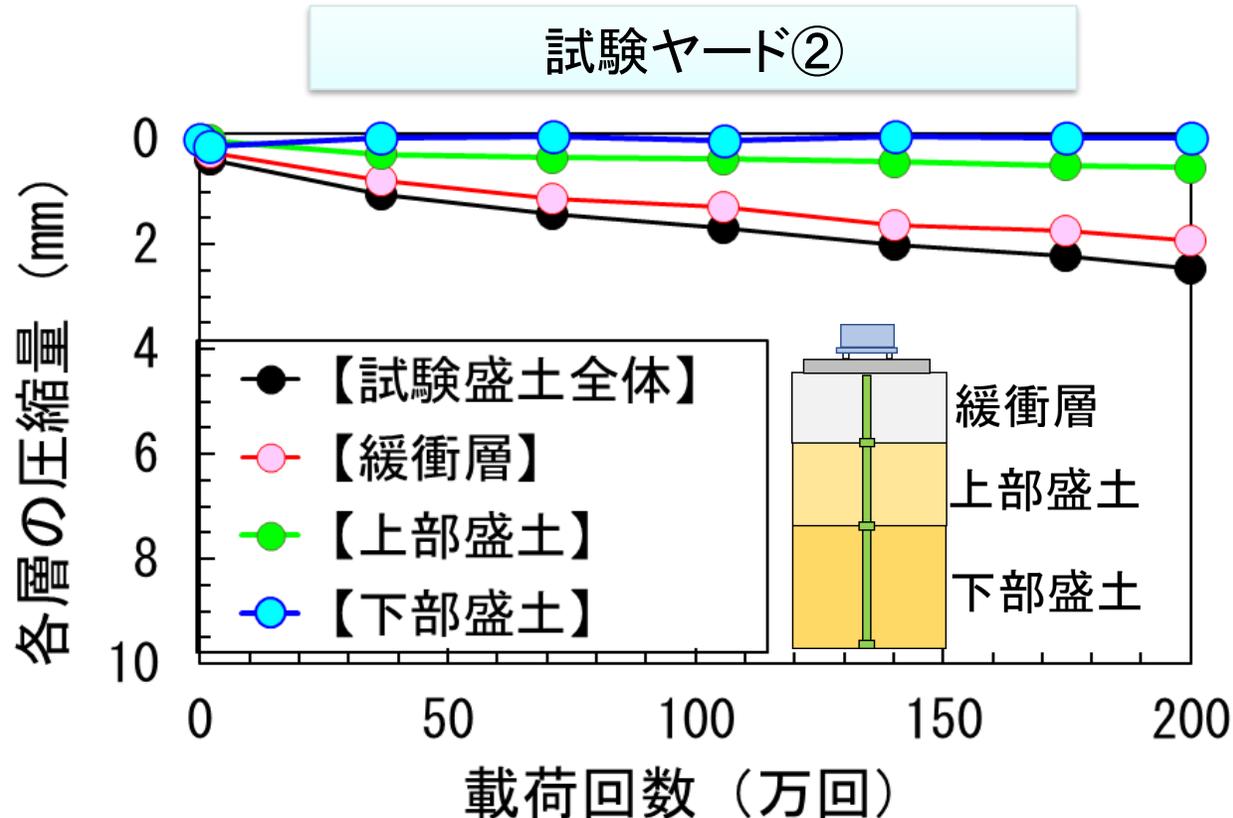
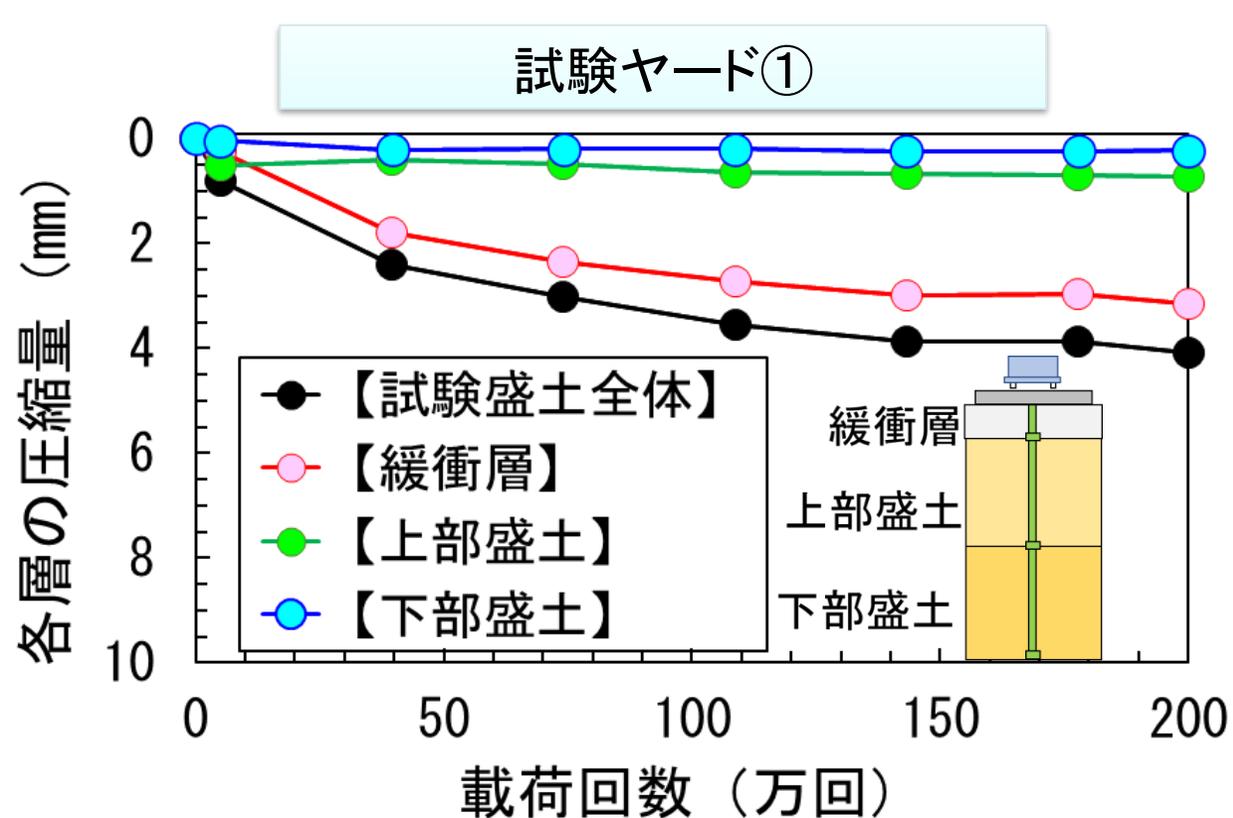


【試験ヤード①】緩衝層: 薄い
上部・下部盛土: 設計標準準拠

【試験ヤード②】緩衝層: 厚い
下部盛土: 密締め

試験盛土による提案法の検証(起振機試験)

起振機試験の結果



トンネル発生土を用いた上部盛土および下部盛土とも沈下量はそれぞれ1mm未満

提案法で構築した盛土は、列車荷重の繰返し载荷に対して十分な支持性能を有していると考えられる

1. トンネル発生土を盛土に用いる上での主要課題
2. 材料条件の適用範囲の整理(課題1)
3. 粗石を含むトンネル発生土の最大乾燥密度推定法の構築(課題2)
4. 試験盛土による提案法の検証
5. まとめと成果の活用

まとめと成果の活用

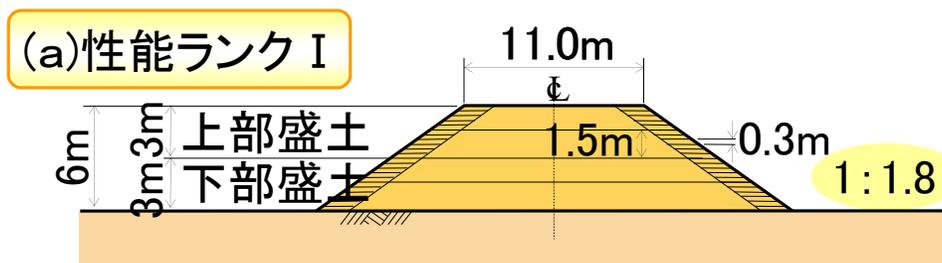
まとめ

- 系統的な土質試験を行い、トンネル発生土を用いる場合の材料条件を整理した **成果1**
- 施工管理に必要な情報である最大乾燥密度を推定する手法を提案した **成果2**
- 転圧試験および起振機試験を行い、提案法による施工管理の実現性を確認するとともに、提案法で構築した盛土が十分な列車支持性能を有していることを確認した **成果3**

成果の活用

盛土施工時に本成果を活用 ⇒ **トンネル発生土の利活用が可能**

**低コスト化
環境負荷の低減**



- 中島 進, 笠原 康平, 中村 貴久, 景山 隆弘, 川中島 寛幸, 阪田 暁, 千代 啓三, 石黒 健, 平田 昌史:トンネル発生土の新幹線盛土への適用性及び施工管理法に関する研究, 地盤工学ジャーナル, Vol. 20, No. 1, pp. 153-172, 2025
- 川中島寛幸, 曾我大介, 磯谷篤実, 白根岳, 倉上由貴, 中島進:新幹線土構造物における盛土材料の分類見直しに関する研究(その2)ートンネル建設発生土の物理・力学特性ー, 第55回地盤工学研究発表会, 2020
- 中村貴久, 景山隆弘, 伊藤吉記, 石川太郎, 川中島寛幸, 阪田暁:トンネル発生土を用いた鉄道試験盛土の繰返し載荷試験, 第58回地盤工学研究発表会, 2023