# 振動ローラの振動計測による締固め施工管理手法の確立に向けた研究WG

#### 成果報告会

#### 令和3年12月24日(金)

公益社団法人 土木学会 建設用ロボット委員会 一般社団法人 日本建設機械施工協会 共催

#### 【本日の報告予定】

	報告内容	報告者	予定時間	
	開会にあたって(研究WG設立の経緯と目的)	委員長:建山和由(立命館大学)	13:00~13:20	
	WG活動及び本日の報告概要	幹事:石黒 健(前田建設工業)	13:20~13:30	
	振動ローラ加速度応答法とは-計測原理と理論的背景-	藤山 哲雄(原子力発電環境整備機構)	13:30~14:00	
	振動ローラ加速度法を取りまく現状と技術的課題	橋本 毅(土木研究所) 中村 洋丈(中日本高速道路(株))	14:00~14:30	
	振動ローラ加速度応答法の技術的課題と検討事例	永井 裕之 ((株)安藤ハザマ)	14:30~15:00	
	休憩		15:00~15:10	
	振動ローラ加速度応答法の現場適用事例	石黒 健(前田建設工業)	15:10~15:50	
	海外における振動ローラ加速度応答法適用の現状	内山 恵一(酒井重工)	15:50~16:10	
<b>—</b>	まとめと今後の展望	建山和由(立命館大学)	16:10~16:30	
	質疑応答(会場およびWEB)		16:30~17:00	•

活動成果の報告

# 振動ローラの振動計測による締固め 施工管理手に関する研究報告会



#### 土木学会

# 建設用ロボット委員会 新技術小委員会 振動締固めに関する研究WG 2018年2月~2021年3月



# 振動ローラの振動挙動の計測例



4



#### 利用した地盤剛性評価手法



#### 衛星測位による位置特定





。スポット管理











#### 転圧回数8回

#### A B C D E F G H I J K L M N O P Q R S T







地盤剛性~密度 関係 含水比の影響



# 加速度応答法の課題

#### 加速度応答の定量化手法

- ・周波数分析結果
- 地盤反力~変位関係 • 前後進の違い? 含水比の影響? 土質による適用性の違いは? 計測深さ?

#### 【本日の報告予定】

	報告内容	報告者	予定時間
	開会にあたって(研究WG設立の経緯と目的)	委員長:建山和由(立命館大学)	13:00~13:20
	WG活動及び本日の報告概要	幹事:石黒 健(前田建設工業)	13:20~13:30
	振動ローラ加速度応答法とは-計測原理と理論的背景-	藤山 哲雄(原子力発電環境整備機構)	13:30~14:00
活	振動ローラ加速度法を取りまく現状と技術的課題	橋本 毅(土木研究所) 中村 洋丈(中日本高速道路(株))	14:00~14:30
<u></u> 到 成 果	振動ローラ加速度応答法の技術的課題と検討事例	永井 裕之 ((株)安藤ハザマ)	14:30~15:00
の 報	休憩		15:00~15:10
告	振動ローラ加速度応答法の現場適用事例	石黒 健(前田建設工業)	15:10~15:50
	海外における振動ローラ加速度応答法適用の現状	内山恵一(酒井重工)	15:50~16:10
	まとめと今後の展望	建山和由(立命館大学)	16:10~16:30
	質疑応答(会場およびWEB)		16:30~17:00

<u>WG活動及び本日の報告概要</u>		研究WGの活動内容	活動成果の概要	
		振動ローラ加速度応答法とは 計測原理と理論的背景	① 振動ローラ加速度応答法の基本原理	
			② 振動ローラ加速度応答を用いた締固め程度の評価方法	
		可別ホモこ生喘り有泉	③ 締固めの進行に応じた振動ローラ挙動の変化に関する理論的な解釈	
		振動ローラ加速度応答法を取りまく 現場締固め管理の現状と技術的課題	① 現状の締固め施工管理手法と現場計測方法	
活動内容	時期		② NEXCO・国土交通省における締固め品質管理基準	
研究WGの発足	2018年2月(2年計画)		③ 加速度応答法の課題と現場締固め管理への期待	
		振動ローラ加速度応答法 の技術的課題と検討事例 振動ローラ加速度応答法の 現場及び設計への適用事例	① 振動ローラ加速度法の評価深さ	
WG活動(既往・最新の研究及び現場の限集と議会)	2018年4月~2020年2月(WEB含む)		② 振動ローラ加速度応答の前後進時の違いについて	
物週用争例の収集と 調査			③ 土質・含水比・飽和度の影響	
ICT土工に関する日米Work Shop	2019年4月(地盤工学会)		① ロックフィルダムにおける適用事例	
大規模土工現場視察及び現地WG	2020年12月(ネクスコ新名神)		② 飽和度管理およびダム遮水材への適用事例	
			③ 道路路床への適用事例	
古動報告の取りまとめ	2020年10月~2021年8月		④ 道路路盤・空港への適用事例	
成果活動報告会	2021年12月		⑤ 道路路床の性能設計への展開事例	
			⑥ 転圧基盤剛性検出手法としての現場適用事例(廃棄物処分場)	
			⑦ 振動ローラ加速度応答と他手法を連携した複眼的ICT土工品質管理	
			+ 法の試行事例 	
			<ol> <li>米国における適用状況</li> </ol>	
		海外における振動ローフ加速度応答法   の研究と適用の現状	② 欧州・中国における適用状況	
•			③ 国際会議(ISIC)の創設及び日米ワークショップ実施報告	

#### 研究WG委員および執筆担当一覧

役割	氏名	所 属	執筆担当
WG 長	建山和由	立命館大学 理工学部 環境都市工学科	第1章, 2.1~2.3節, 3.1~3.2節, 第 7章
幹事	石黒 健	前田建設工業(株) ICI 総合センター	4.1~4.2 節,5.1 節,5.4~5.7 節
委員	内山恵一	酒井重工(株)技術開発部	2.2.1 項, 5.7 節, 第6章
委員	永井 裕之	(株)安藤ハザマ 建設本部土木技術統括部技 術第二部	4.3 節,5.2 節
委員	中村 洋丈	中日本高速道路(株)東京支社	3.3 節, 5.3 節, 5.7 節
委員	橋本 毅	土木研究所 技術推進本部 先端技術チーム	2.2.2 項, 第3章
委員	藤山 哲雄	原子力発電環境整備機構(NUMO)技術部	2.1~2.3 節, 5.1 節, 5.5 節
委員	古屋 弘	(株)大林組 技術研究所	4.1 節, 5.7 節
委員	横山隆明	立命館大学 理工学部 環境都市工学科	2.2.2 項, 4.3 節
委員	松尾健二	前田建設工業(株) DX 推進室	
委員	佐藤 正憲	大林道路(株) プロジェクト推進部	5.4 節
委員	青山俊也	大林道路(株) プロジェクト推進部	

\*) オブザーバー:月本行則(酒井重工業)

5.2.2 執筆:坂本 博紀((独)水資源機構)

#### 【本日の報告予定】

		報告内容	報告者	予定時間	
		開会にあたって(研究WG設立の経緯と目的)	委員長:建山和由(立命館大学)	13:00~13:20	
	_	WG活動及び本日の報告概要	幹事:石黒 健(前田建設工業)	13:20~13:30	
		振動ローラ加速度応答法とは-計測原理と理論的背景-	藤山 哲雄(原子力発電環境整備機構)	13:30~14:00	
活		振動ローラ加速度法を取りまく現状と技術的課題	橋本 毅(土木研究所) 中村 洋丈(中日本高速道路(株))	14:00~14:30	
動成用		振動ローラ加速度応答法の技術的課題と検討事例	永井 裕之 ((株)安藤ハザマ)	14:30~15:00	
未 の 報		休憩		15:00~15:10	
告		振動ローラ加速度応答法の現場適用事例	石黒 健(前田建設工業)	15:10~15:50	
		海外における振動ローラ加速度応答法適用の現状	内山恵一(酒井重工)	15:50~16:10	
		まとめと今後の展望	建山和由(立命館大学)	16:10~16:30	
		質疑応答(会場およびWEB)		16:30~17:00	•

# 振動ローラ加速度応答法とは -計測原理と理論的背景-

#### 令和3年12月24日(金)

### 原子力発電環境整備機構(NUMO) 藤山 哲雄

# 振動ローラ加速度応答法の概要

# 振動ローラ加速度応答法のメリット



<u>従来の締固め評価法</u> (RI法, 平板載荷試験など)

- ・離散的な評価
- ・転圧後の事後評価
- ・現場での人力計測作業

#### 振動ローラ加速度応答法

- ➡ 施工面全体にわたる評価(品質の把握精度向上)
  - ▶ 転圧中のリアルタイム評価(均質地盤の施工可能)
- ➡ 作業員不要の自動計測(省力化・安全性向上)



# ローラ加速度波形が変化する理由



跳ね上がった振動輪が地表面に衝突する際、上向きに衝撃的な 加速度成分が付加 地盤が固いほどこれが大きくなり、波形が変化すると推察

# 開発の黎明期の状況

#### 1980年頃にヨーロッパで提案



- 加速度の周波数分析を行うと、地盤が固くなるにつれて、基本振動数(振動ローラの起振振動数)以外の振動数成分が出現してくることに着目
  - → 加速度の変化を表す指標として CMV(Compaction Meter Value)を提案
- 1980年代にヨーロッパのメーカーがCMVをアナログ で連続的に取り出す管理装置を商品化
- ドイツやスウェーデンでは、道路の路床管理におけるRIや平板載荷試験の補完手段として早くから実用化

(Floss et al., 1983年)

### わが国における研究開発

#### 1985年頃より、建設省土木研究所、大学、振動ローラメーカー、ゼネコン、 舗装会社などが研究成果を発表

基本振動数の整数倍の振動 数に対するスペクトル(高調 波スペクトル)の出現

基本振動数の1/2の整数倍 の振動数に対するスペクトル (1/2分数調波スペクトル) も出現



建設省土木研究所の測定例(嶋津ら、1985年)

• 19

→ 締固め密度や地盤剛性~加速度指標(ひずみ率)には正の相関が あることを実験的に確認

# ローラ加速度の定量化方法

#### ① 加速度の周波数分析を用いる方法

加速度の周波数分析を行い、基本スペクトルに対する高調波スペクトルや1/2分数調波スペクトルの出現比率により加速度応答を定量化。地盤密度や剛性との相関を取得

- CMV (Geodynamic社)
- ひずみ率(建設省土木研究所)
- CCV (酒井重工業)
- 乱れ率(建山・藤山, 2000)



振動数 (Hz)

### ② 加速度波形の最大振幅を用いる方法

締固めの進行に応じて加速度波形の最大振幅が増加することを利用

- ・ 畠・建山(1983)
   ・ 阿部・鬼木(1987)
- ③ 加速度を積分した変位から地盤反力係数を求める方法 加速度の積分から変位を求め、振動方程式から地盤剛性に相当する値を算出
  - Evib (BOMAG社) 横山ら (2017)

# 加速度を積分した変位から地盤反力係数を評価する方法 (BOMAG)



# 振動ローラ加速度応答に対する 土質条件や機械条件の影響

### 現場転圧試験による検証例(周波数分析を用いた「乱れ率」)



#### 加速度応答値は地盤剛性との相関性が高い

#### 現場転圧試験による検証例(加速度応答値と密度の関係)



2 飽和度が低い(低含水比)材料で、比較的材料が均一で あれば、加速度応答から密度の評価は可能

# 振動ローラ機種による加速度応答の違い



18t級振動ローラ SV160D





4t級振動ローラ TW500W

同一地盤上における2種類の振動ローラ加速度の実測例



#### 振動ローラ機種の影響(数値シミュレーション結果)



### 振動ローラ機種の影響を除去した地盤剛性評価方法(藤山・建山)



### 現場転圧試験による地盤変形係数の評価検証事例



→ 藤山・建山の提案手法により、機種・土質材料によらず 平板載荷試験相当の(割線)変形係数を評価可能

# 締固め管理手法としての適用上の留意点

- 振動ローラ加速度応答の定量化指標はいくつか提案されている。
- 加速度応答と地盤の密度との相関性は、特に粗粒系の材料は良好。
   ただし、材料によって両者の相関性は異なるため、転圧試験などによって 材料ごとに相関性を取得する必要あり。
- ・ 地盤の飽和度が高い場合は、加速度応答と密度の相関性は低い。
- 加速度応答と地盤剛性の相関は良好。
- 同一地盤上でも振動ローラの機種が異なれば加速度応答が異なる。
- 振動ローラ機種に依存せず地盤変形係数を推定する手法が提案されている。

# 振動ローラ加速度応答の変化に関する 理論的な解釈

# ローラ加速度波形が変化する理由(再掲)



跳ね上がった振動輪が地表面に衝突する際、上向きに衝撃的な 加速度成分が付加 地盤が固いほどこれが大きくなり、波形が変化すると推察

### 数値シミュレーションによる1周期分の加速度波形と周波数特性の考察



→ 跳ね上がったローラが地表面に衝突する際、振動ローラ~地盤系の 固有振動数に相当する加速度成分が付加されると推察

# 基本振動数の整数倍振動数のスペクトルが現れる理由



連続波形の場合、周波数解析の性質上、固有振動成分が 基本振動数の整数倍で表現される

# 締固めにともなう振動挙動変化の特徴(数値シミュレーション)



→ 締固めにともなう振動挙動の変化はカオスに至る過程と類似

# 締固め施工管理システムの構成

# 締固め管理システムの構築例(加速度計と解析演算装置)



加速度計



- 2.0秒間の加速度波形に対して乱れ率を 算出し、密度や地盤変形係数を評価
- GPSによる位置情報を同期


# 締固め管理システムの構築例(測定結果リアルタイム表示機能)



- PC上に施工面をメッシュ(0.5~2m程度)で表示し、 判定した地盤剛性の大きさに合わせて色別表示
- GPSにより自動判定された転圧回数も表示可能
- 無線LANを介して現場事務所でもモニター可



# ご清聴ありがとうございました



- Floss, R., Gruber, N., Obermayer, J.: A Dynamical Test Method For Continuous Compaction Control, Proceedings of the 8th European Conference on Soil and Foundation Engineering, vol.1, pp.25~30, 1983.
- 嶋津晃臣, 見波 潔, 中田公基, 嶋田 功, 足立賢一: 振動ローラによる盛土の締固めに関する調査, 土木研究所資料第2184号, pp.37~76, 1985.
- 北村佳則, 西尾貴至, 内山恵一: ローラ振動加速度応答を用いた盛土品質評価, 第25回日本道路会議, 2003.
- 藤山哲雄, 建山和由: 振動ローラの加速度応答を利用した転圧地盤の剛性評価手法, 土木学会論文集No.652,Ⅲ-51,115-123, 2000.
- 畠昭治郎, 建山和由: 振動ローラの振動加速度振幅による締固めの判定, テラメカニックス研究会第3回研究会講演, pp.64~68, 1983.
- 阿部 裕, 鬼木剛一, 北本幸義: 盛土の振動締固め管理手法に関する研究(その1), 鹿島建設技術研究所年報第35号, pp.179~184, 1987.
- BOMAG. VarioControl. On-line: https://www.bomag.com/ww-en/technologies/efficient/variocontrol/, Accessed: 24/03/2021.
- 横山隆明,藤村貢,建山和由:振動ローラの加速度計測を利用した地盤剛性値の算出について,建設機械施工,日本建設機械施工協会誌69(2), pp.79-85, 2017.
- D'Appolonia, D.J., Whitman, R.V., D'Appolonia, E.D.: Sand Compaction with Vibratory Rollers, ASCE.vol.95, SM1, pp.263~284, 1969.
- Ditto,W.L., Pecora,L.M.: カオスの制御と応用,金野秀敏訳,日経サイエンス10月号, pp.70~80, 1993

## 【本日の報告予定】

活動成果の報告

	報告内容	報告者	予定時間	
	開会にあたって(研究WG設立の経緯と目的)	委員長:建山和由(立命館大学)	13:00~13:20	
	WG活動及び本日の報告概要	幹事:石黒 健(前田建設工業)	13:20~13:30	
	振動ローラ加速度応答法とは-計測原理と理論的背景-	藤山 哲雄(原子力発電環境整備機構)	13:30~14:00	
	振動ローラ加速度法を取りまく現状と技術的課題	橋本 毅(土木研究所) 中村 洋丈(中日本高速道路(株))	14:00~14:30	
	振動ローラ加速度応答法の技術的課題と検討事例	永井 裕之 ((株)安藤ハザマ)	14:30~15:00	
	休憩		15:00~15:10	
	振動ローラ加速度応答法の現場適用事例	石黒 健(前田建設工業)	15:10~15:50	
	海外における振動ローラ加速度応答法適用の現状	内山恵一(酒井重工)	15:50~16:10	
	まとめと今後の展望	建山和由(立命館大学)	16:10~16:30	
	質疑応答(会場およびWEB)		16:30~17:00	•

3.2.現状の締固め施工管理手法 3.1.1.密度による施工管理 (1) D值管理法 (2) Ds值管理法 (3) 双曲線近似法 3.1.2.空気間隙率、飽和度による施工管理 3.1.3. 土の力学特性による管理 3.1.4.工法規定方式による施工管理 3.2.現場における計測方法 3.2.1.密度の計測方法 (1)砂置換法 注砂法(規格・基準JIS A 1214) (2)砂置換法 突き砂法(規格・基準 JGS1611) (3)水置換法(規格・基準 JGS1612) (4)コアカッター法(規格・基準 JGS1613) (5)ラジオアイソトープ(RI)法 (規格・基準 JGS1614) 3.2.2.含水比の計測方法 3.2.3.強度,剛性,変形性の計測方法 (1)平板載荷試験(規格・基準 JIS A 1215) (2) CBR(規格・基準 JIS A 1211) (3) プルーフローリング試験 (4)衝撃荷重式たわみ試験 (5)重錘落下試験 3.2.4.工法管理における実施方法



3.2.現状の締固め施工管理手法

3.1.2.空気間隙率, 飽和度による施工管理



空気間隙率 : na=(Va/V)×100 飽和度 : Sr=Vw/Vv

#### 3.1.3.土の力学特性による管理

土の強度や剛性

#### 3.1.4.工法規定方式による施工管理

締固め機械の機種,まき出し厚,転圧回数などを決めておき, 現場においてこの施工法が履行されていることを確認する



#### (3)水置換法(規格・基準 JGS1612)



#### (4)コアカッター法(規格・基準 JGS1613)



(5) ラジオアイソトープ(RI)法(規格・基準 JGS1614)



RI 計器の概略

計器の寸法 約 W320×D360×H130 mm 計器の重量 約 10~15 kgf 湿潤密度測定範囲 1~2.5(g/cm<sup>3</sup>) 水分量測定範囲 0~1.5(g/cm<sup>3</sup>)

#### 3.2.2.含水比の計測方法

乾燥する前後の質量を計測して算出する 乾燥する方法は,乾燥炉,電子レンジ,フライパン,など







#### (3) プルーフローリング試験

(4)衝撃荷重式たわみ試験

FWD試験器



小型FWD試験器













## 3.2.4.工法管理における実施方法



3.4.国土交通省における現 状の品質管理基準	関東地方整備局	土木工事施工管理基準及び規格値
		建関技調第96号
		平成 7年10月23日制定
		建関技調第69号
		平成 8年 7月15日一部改正
		建関技調第29号の2
		平成10年 3月20日改定
		建関技調第34号の2
		平成12年 4月 3日改定
		国関技調第 3号
		平成15年 4月 3日改定
		国関技調第 7号
		平成17年 4月 4日改定
		国関整技調第 2号
		平成17年 4月 6日改定
		国関整技調第 2号
		平成19年 4月 6日改定
		国関整技調第 8号
		平成21年 4月 1日改定
		国関整技調第 5号
		平成23年 4月 1日改定
		国関整技調第13号
		平成25年 4月 1日改定
		国関整技調第 3号
		平成27年 4月 1日改定
		国関整技調第 2号
		平成28年 4月 1日改定
		国関整技調第 3号
		平成29年 4月 5日改定

#### 土木工事施工管理基準

この土木工事施工管理基準(以下、「管理基準」とする。)は、「土木工事共通様書 (案) [R3.3] 、第1編1-1-24施工管理」に規定する土木工事の施工管理及び規格値の 基準を定めたものである。

#### 1. 目 的

この管理基準は、土木工事の施工について、契約図書に定められた工期、工事目的物の出来形及び品質規格の確保を図ることを目的とする。

#### 2. 適 用

この管理基準は、国土交通省地方整備局が発注する土木工事について適用する。ただ し、設計図書に明示されていない仮設構造物等は除くものとする。また、工事の種類、 規模、施工条件等により、この管理基準によりがたい場合、または、基準、規格値が定 められていない工種については、監督職員と協議の上、施工管理を行うものとする。

#### 3.構成

	工程管理
施工管理	 出来形管理
工事写真を含む)	品質管理

#### 4. 管理の実施

- (1)受注者は、工事施工前に、施工管理計画及び施工管理担当者を定めなければならない。
- (2)施工管理担当者は、当該工事の施工内容を把握し、適切な施工管理を行わなければならない。
- (3) 受注者は、測定(試験)等を工事の施工と並行して、管理の目的が達せられるよう速やかに実施しなければならない。
- (4)受注者は、測定(試験)等の結果をその都度管理図表等に記録し、適切な管理のもとに保 管し、監督職員の請求に対し速やかに提示するとともに、工事完成時に提出しなければ ならない。

#### 5. 管理項目及び方法

(1)工程管理

受注者は、工事内容に応じて適切な工程管理(ネットワーク、バーチャート方式など) を行うものとする。ただし、応急処理又は維持工事等の当初工事計画が困難な工事内容 については、省略できるものとする。

#### (2)出来形管理

受注者は、出来形を出来形管理基準に定める測定項目及び測定基準により実測し、設計値と実測値を対比して記録した出来形管理図表を作成し管理するものとする。 なお、測定基準において測定箇所数「○○につき1ヶ所」となっている項目については、小数点以下を切り上げた箇所数測定するものとする。

#### (3)品質管理

受注者は、品質を品質管理基準に定める試験項目、試験方法及び試験基準により管理 するものとする。

この品質管理基準の適用は、試験区分で「必須」となっている試験項目は、全面的に 実施するものとする。

また、試験区分で「その他」となっている試験項目は、特記仕様書で指定するものを実施 するものとする。

#### 6. 規格値

受注者は、出来形管理基準及び品質管理基準により測定した各実測(試験・検査・計測)値は、すべて規格値を満足しなければならない。

	目	次			
1 セメント・コンクリート ・・・・			П	_	1
(転圧コンクリート・コンクリートダ	ム・覆エコンク	リート・吹付けコンクリートを除く)			
2 プレキャストコンクリート製品	(JIS I 類)		Π	_	5
3 プレキャストコンクリート製品	(JIS Ⅱ類)		Π	_	5
4 プレキャストコンクリート製品	(その他)		Π	_	5
5 ガス圧接 ・・・・・			Π	_	6
6 既製杭 ·····			Π	_	7
7 下層路盤			Π	_	8
8 上層路盤 ••••••			Π	_	10
9 アスファルト安定処理路盤 ・・			Π	_	13
10 セメント安定処理路盤 ・・・・・		• • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	Π	—	13
11 アスファルト舗装 ・・・・・・・・		• • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	Π	—	14
12 転圧コンクリート ・・・・・・・・		••••••	Π	—	22
13 グースアスファルト舗装 ・・・・	• • • • • • • • • • • • •	••••••	Π	—	24
14 路床安定処理工 ·····		••••••	Π	—	28
15 表層安定処理工(表層混合処理)	)	•••••••••••••••••••••••••••••••••••••••	Π	—	29
16 固結工	• • • • • • • • • • • • •	•••••••••••••••••••••••••••••••••••••••	Π	—	29
17 アンカーエ ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	• • • • • • • • • • • • •	•••••••••••••••••••••••••••••••••••••••	Π	_	30
18 補強土壁工 ••••••	• • • • • • • • • • • • •	•••••••••••••••••••••••••••••••••••••••	Π	—	30
19 吹付工	• • • • • • • • • • • • •	••••••	Π	_	30
20 現場吹付法枠工 ••••••	• • • • • • • • • • • • •	••••••	Π	_	33
21 河川土工 ·····	• • • • • • • • • • • • •	••••••	Π	_	35
22 海岸土工 ••••••	• • • • • • • • • • • • •	••••••	Π	_	35
23 砂防土工 ••••••	• • • • • • • • • • • • •	••••••	Π	_	36
24 道路土工 ••••••	• • • • • • • • • • • • •	• • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	Ш	_	36
25 捨石工		• • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	Ш	_	37
26 コンクリートダム ·····	• • • • • • • • • • • • •	• • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	Ш	_	38
27 復上コングリート (NATM)			Ш	_	40
28 吹付けコンクリート (NATM,	)		Ш	_	42
29 ロックホルト (NATM) ・・ 20 敗し玉 –	• • • • • • • • • • • • •		Ш	_	44
30 路上冉生路盛上 ······			Ш	_	45
31			ш	_	45
32 俳小性舗装工・透小性舗装工			ш	_	40
33 ノフント円生舗装上 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・			ш	_	52
04 上勿殺「F上 (判問用判例) ・ 95 ガラ扫版工			ш	_	53
30 万 ク 切 刷 上 96			ш	_	53
30 俗(女上 27 由屋浪へ加理			ш	_	55
31 干眉比口观理			ш		00

2 品質管理基準及び規格値

#### 品質管理基準及び規格値

		品質管理基準及び規格値							
	工種	種別	試験 区分	試験項目	試験方法	規格値	試験基準	摘要	試験成績 表等によ る確認
7	下層路盤	施工	必須	現場密度の測定	<ul> <li>舗装調査・試験法</li> <li>便覧 [4]-256</li> <li>砂置換法(JIS A 1214)</li> <li>砂置換法は、最大</li> <li>粒径が53mm以下の 場合のみ適用できる</li> </ul>	最大乾燥密度の93%以上 X10 95%以上 X6 96%以上 X3 97%以上 歩道箇所:設計図書による	<ul> <li>・締固め度は、個々の測定値が 最大乾燥密度の93%以上を満足 するものとし、かつ平均値について以下を満足するものとする。</li> <li>・締固め度は、10孔の測定値の 平均値X10が規格値を満足する ものとする。また、10孔の測定 値が得がたい場合は3孔の測定 値が得がたい場合は3孔の測定 値が得がたい場合は3孔の測定</li> <li>値の平均値X3が規格値を満足する ものとするが、X3が規格値を はずれた場合は、さらに3孔の データを加えた平均値X6が規格 値を満足していればよい。</li> <li>・1工事あたり3,000m2を超える 場合は、10,000m2以下を1ロッ トとし、1ロットあたり10孔で 測定する。</li> <li>(例) 3,001~10,000m2:10孔 10,001m2以上の場合、</li> <li>10,000m2の場合:</li> <li>(000m2/1ロット毎に10孔、合 計20孔 なお、1工事あたり3,000m2以下の場合(維持工事を除く) は、1工事あたり3孔以上で測定</li> </ul>		
7	下層路盤	施工	必須	プルーフローリン グ	舗装調査・試験法 便覧 [4]-288		・全幅、全区間で実施する。	・荷重車については、施工時に 用いた転圧機械と同等以上の締 固効果を持つローラやトラック 等を用いるものとする。	
7	下層路盤	施工	その他	平板載荷試験	JIS A 1215		1,000m2につき2回の割で行う。	<ul> <li>・セメントコンクリートの路盤</li> <li>に適用する。</li> </ul>	
7	下層路盤	施工	その他	骨材のふるい分け 試験	JIS A 1102		<ul> <li>・中規模以上の工事:異常が認 められたとき。</li> </ul>	中規模以上の工事とは、管理図 を描いた上での管理が可能な工 事をいい、基層及び表層用混合 物の総使用量が3,000t以上の場 合が該当する。	
7	下層路盤	施工.	その他	土の液性限界・塑 性限界試験	JIS A 1205	塑性指数PI:6以下	<ul> <li>・中規模以上の工事:異常が認 められたとき。</li> </ul>	中規模以上の工事とは、管理図 を描いた上での管理が可能な工 事をいい、基層及び表層用混合 物の総使用量が3,000t以上の場 合が該当する。	
7	下層路盤	施工	その他	含水比試験	JIS A 1203	設計図書による	<ul> <li>・中規模以上の工事:異常が認められたとき。</li> </ul>	・中規模以上の工事とは、管理 図を描いた上での管理が可能な 工事をいい、舗装施工面積が 10,000m <sup>2</sup> あるいは使用する基層 及び表層用混合物の総使用量が 3,000t以上の場合が該当する。	

		品質管理基準及び規格値							
	エ種	種別	試験 区分	試験項目	試験方法	規格値	試験基準	摘 要	試験成績 表等によ る確認
8	上層路盤	施工	必須	現場密度の測定	舗装調査・試験法 便覧 [4]-256 砂置換法 (JIS A 1214) 砂置換法は、最大 粒径が53mm以下の 場合のみ適用でき る	最大乾燥密度の93%以上 X10 95%以上 X6 95.5%以上 X3 96.5%以上	<ul> <li>・締固め度は、個々の測定値が 最大乾燥密度の93%以上を満足 するものとし、かつ平均値について以下を満足するものとする。</li> <li>・締固め度は、10孔の測定値の 平均値X10が規格値を満足する ものとする。また、10孔の測定 値が得がたい場合は3孔の測定 値が得がたい場合は3孔の測定 値が得がたい場合は3孔の測定 値が得がたい場合は3孔の測定 値が得がたい場合は3孔の測定 値が得がたい場合は、256に3孔の データを加えた平均値X6が規格 値を満足していればよい。</li> <li>・1工事あたり3,000m2を超える 場合は、10,000m2以下を1ロッ トとし、1ロットあたり10孔で 測定する。</li> <li>(例) 3,001~10,000m2:10孔 10,001m2以上の場合、</li> <li>10,001m2以上の場合、</li> <li>10,000m2公長の場合、</li> <li>0,000m2年になるように設定すること。</li> <li>例えば12,000m2の場合:</li> <li>6,000m2/1ロット毎に10孔、合 計20孔 なお、1工事あたり3,000m2以下の場合(維持工事を除く) は、11工事あたり3孔以上で測定</li> </ul>		2 HE 06
8	上層路盤	施工.	必須	粒度 (2.36mmフル イ)	舗装調査・試験法 便覧 [2]−16	2.36mmふるい:±15%以内	<ul> <li>・ 甲規模以上の工事: 定期的または随時(1回~2回/日)</li> </ul>	・甲規模以上の工事とは、管理 図を描いた上での管理が可能な 工事をいい、舗装施工面積が 10,000m2あるいは使用する基層 及び表層用混合物の総使用量が 3,000t以上の場合が該当する。	
8	上層路盤	施工	必須	粒度(75µmフル イ)	舗装調査・試験法 便覧 [2]-16	75μmふるい:±6%以内	・中規模以上の工事:定期的ま たは随時(1回〜2回/日)	<ul> <li>・中規模以上の工事とは、管理</li> <li>図を描いた上での管理が可能な</li> <li>工事をいい、舗装施工面積が</li> <li>10,000m2あるいは使用する基層</li> <li>及び表層用混合物の総使用量が</li> <li>3,000t以上の場合が該当する。</li> </ul>	
8	上層路盤	施工	その他	平板載荷試験	JIS A 1215	Martiel Hawky	1,000m2につき2回の割合で行 う。	セメントコンクリートの路盤に 適用する。	
8	上層路盤	施工	その他	土の液性限界・塑 性限界試験	JIS A 1205	塑性指数PI:4以下	観察により異常が認められたとき。		
8	上層路盤	施工.	その他	含水比試験	JIS A 1203	設計図書による。	観察により異常が認められたと き。		

#### 

#### 品質管理基準及び規格値

	I	種	種別	試験 区分	試験項目	試験方法	規格値	試験基準	摘  要	Ð,	試験成績 表等によ る確認
24	: 道	路土工	施工	必須	現場密度の測定 ※右記試験方法(3 種類)のいずれか を実施する。	最大粒径≦53mm: 砂置換法 (JIS A 1214) 最大粒径>53mm: 舗装調査・試験法 便覧 [4]-256 突砂法	【砂質土】 ・路体:次の密度への締固めが 可能な範囲の含水比において、 最大乾燥密度の90%以上(締固 め試験(JIS A 1210) A・B 法)。 ・路床及び構造物取付け部:次 の密度への締固めが可能な範囲 の含水比において、最大乾燥密 度の95%以上(締固め試験(JIS A 1210) A・B法)もしく は90%以上(締固め試験(JIS A 1210) C・D・E法)。 ただし、JIS A 1210 C・D・E法 での管理は、標準の施工仕様よ りも締固めエネルギーの大きな 転圧力の大きな機械を使用する。 【粘性土】 ・路体:自然含水比またはトラ フィカビリティーが確保できる 含水比において、空気間隙率Va が2%≦Va≦10%または飽和度 Srが85%≦Sr≦95%。 ・路床及び構造物取付け部:ト ラフィカビリティーが確保でき る含水比において、空気間隙率 Vaが2%≦Va≦8%。 ただし、締固め管理が可能な場	路体の場合、1,000m3につき1 回の割合で行う。ただし、 5,000m3未満の工事は、1工事当 たり3回以上。 路床及び構造物取付け部の場 合、500m3につき1回の割合で行 う。ただし、1,500m3未満の工 事は1工事当たり3回以上。 1回の試験につき3孔で測定し、 3孔の最低値で判定を行う。			
-	224	and in the second	1.4	No. And	and the state of the set	<ol> <li>b. 5. 6</li> </ol>	Fact (DC ) 1	and a state of the second		- 111 A 3 Sale	

24 道路土工	施工	必須	現場密度の測定 ※右記試験方法(3 種類)のいずれか を実施する。	または、 「RI計器を用いた 盛土の締固め管理 要領(案)」	【砂質土】 ・路体:次の密度への締固めが 可能な範囲の含水比において、 1管理単位の現場乾燥密度の平均値が最大乾燥密度の92%以 上(締固め試験(JISA1210) A・B法)。 ・路床及び構造物取付け部:次 の密度への締固めが可能な範囲 の含水比において、1管理単位 の現場乾燥密度の97%以上(締固め 試験(JISA1210)A・B法)も しくは92%以上(締固め試験 (JISA1210)C・D・E法)。 ただし、JISA1210)C・D・E法)。 ただし、JISA1210C・D・E法 の管理は、標準の施工仕様よりも 転圧方法(例えば、標準よりも 転圧方法(例えば、標準よりも 転圧力の大きな機械を使用する。 【粘性土】 ・路体、路床及び構造物取付け 部ごりティーが確保できる含水 比において、1管理単位の現場 空気間隙率の平均値が8%以下。 ただし、締固め管理が可能な場 合は、砂質土の基準を適用する	盛土を管理する単位(以下「管理 単位」)に分割して管理単位ごと に管理を行うものとする。 路体・路床とも、1日の1層あた りの施工面積を基準とする。管 理単位の面積は1,500m2を標準 とし、1日の施工面積が2,000m2 以上の場合、その施工面積を2 管理単位以上に分割するものと する。1管理単位あたりの測定 点数の目安を以下に示す。 ・500m2未満:5点 ・500m2以上1000m2未満:10点 ・1000m2以上2000m2未満:15点	・最大粒径<100mmの場合に適 用する。 ・左記の規格値を満たしていて も、規格値を著しく下回ってい る点が存在した場合は、監督職 員と協議の上で、(再)転圧を 行うものとする。	
24 道路土工	施工	必須	現場密度の測定 ※右記試験方法(3 種類)のいずれか を実施する。	または、 「TS・GNSSを用い た盛土の締固め管 理要領」による	施工範囲を小分割した管理ブ ロックの全てが規定回数だけ締 め固められたことを確認する。	1. 盛土を管理する単位(以下 「管理単位」)に分割して管理 単位毎に管理を行う。 2.1日の施工が複数層に及ぶ 場合でも1管理単位を複数層に またがらせることはしないもの とする。 3.土取り場の状況や土質状況 が変わる場合には、新規の管理 単位として取り扱うものとす る。		

24	道路土工	施工	必須	現場密度の測定 ※右記試験方法(3 種類)のいずれか を実施する。	または、 「TS・GNSSを用い た盛土の締固め管 理要領」による	施工範囲を小分割した管理ブ ロックの全てが規定回数だけ締 め固められたことを確認する。	1. 盛土を管理する単位(以下 「管理単位」)に分割して管理 単位毎に管理を行う。 2.1日の施工が複数層に及ぶ 場合でも1管理単位を複数層に またがらせることはしないもの とする。 3.土取り場の状況や土質状況 が変わる場合には、新規の管理 単位として取り扱うものとす る。		
24	道路土工	施工	必須	プルーフローリン グ	舗装調査・試験法 便覧 [4]-288		路床仕上げ後全幅、全区間につ いて実施する。 ただし、現道 打換工事、仮設用道路維持工事 は除く。	・荷重車については、施工時に 用いた転圧機械と同等以上の締 固め効果を持つローラやトラッ ク等を用いるものとする。	
24	道路土工	施工	その他	平板載荷試験	JIS A 1215		各車線ごとに延長40mについて 1ヶ所の割で行う。	・セメントコンクリートの路盤 に適用する。	
24	道路土工	施工	その他	現場CBR試験	JIS A 1222	設計図書による。	各車線ごとに延長40mについて1 回の割で行う。		
24	道路土工	施工	その他	含水比試験	JIS A 1203	設計図書による。	路体の場合、1,000m3につき1 回の割合で行う。ただし、 5,000m3未満の工事は、1工事当 たり3回以上。 路床の場合、500m3につき1回の 割合で行う。ただし、1,500m3 未満の工事は1工事当たり3回以 上。		
24	道路土工	施工	その他	コーン指数の測定	舗装調査・試験法 便覧 [1]-273	設計図書による。	必要に応じて実施。 (例) トラフィカビリティが悪 い時		
24	道路土工	施工	その他	たわみ量	舗装調査・試験法 便覧 [1]-284 (ベンゲルマンビーム)	設計図書による。	プルーフローリングでの不良箇 所について実施		

# 振動ローラの振動計測による締固め施工管理手法の確立に向けた研究WG

## 第3章 振動ローラ加速度法を取りまく現状と技術的課題 3.3 NEXCOにおける締固め品質管理基準

## 成果報告会

## NEXCO中日本 中村 洋丈

#### 令和3年12月24日(金)

公益社団法人 土木学会 建設用ロボット委員会 一般社団法人 日本建設機械施工協会 共催

## 第3章 振動ローラ加速度法を取りまく現状と技術的課題 3.3 NEXCOにおける締固め品質管理基準

#### 【NEXCOにおける締固め管理の現状】



【NEXCOにおける締固め管理の現状】

施工規定方式

高速道路盛土の締固め品質管理の特徴
 ▶建設発生土は現場内利用することが原則である
 ▶施工部位によって材料基準が定められており、適材適所で材料を配置する
 ▶含水比の調整はせずにそのままの状態で利用する
 ▶大型振動ローラの使用が原則である
 ▶<u>モデル施工</u>によって施工機械、施工厚、転圧回数などの施工方法を決定することにより、実質、高品質な施工ができる締固めエネルギーを担保している
 ▶施工状態はRI計器によって密度測定し多点管理する



— GNSSを利用した盛土品質管理

## <u>【締固め管理の課題と加速度応答法】</u>①盛土の性能と施工条件の決定プロセス



#### (高速道路の盛土品質管理の決定プロセス)

#### ①盛土の性能と施工条件の決定プロセス

高速道路盛土で扱う材料は様々 礫質土、含水比が低い材料も多い



2020地盤工学研究発表会 突固め試験の統計分析による土質材料ごとの締固め特性

①盛土の性能と施工条件の決定プロセス





(モデル施工の結果)



▶ 発注者から受注者に指示することにより施工方法を規定
 ⇒基準値の管理は日常管理における施工状態を確認
 <u>大型転圧機が最大のパフォーマンスを発揮</u>する施工方法を規定
 ⇒締固めエネルギーを高いエネルギーで規定し、
 高い密度で施工できる条件を与えている
 ⇒粗粒材のような最適含水比よりも<u>乾燥側の含水比の施工</u>でも
 高い密度を得ることによって、残留沈下や安定性、支持力などが担保できるような仕組み

②締固め管理の課題と加速度応答法

盛土が大規模に展開されると品質管理手法は

- ▶ より多点で測定できること、リアルタイムで把握できること
- ▶ 性能設計の指標に結び付く密度ではない、強度や安定性を評価可能なことが求められる
- ▶ <u>GNSSの位置情報やセンサー</u>,測量技術などが発展した現在においては、ICT技術を活用して より高度な品質管理を行うことが試行
- ▶ その手法の一つとして<u>加速度応答法は研究</u>され、一部で実用化

③加速度応答法の適用

▶ NEXCOで行う加速度応答法は. 路床や盛りこぼし橋台盛土地盤に適用

※支持力や強度が求められる部位に適用



▶ モデル施工では転圧回数ごとの加速度応答値、密度、表面沈下量などを計測 加速度応答値と設計の指標との整合性をとるために、平板載荷試験など実施 ⇒変形係数との相関。転圧回数の決定は、密度や沈下の収斂に加えて、 加速度応答値の値が相関をとった変形係数の基準値を上回る回数

## <u>【加速度応答法導入の歴史】</u>

年	試験施工箇所	試験の対象
平成10年(1998)	第二東名高速道路	基本データの取得
平成13年(2001)	第二東名高速道路	路床
平成15-17年	共同研究 4現場の試験施工	
(2003-2005)	<ul> <li>近畿自動車道紀勢線 舗装工事</li> </ul>	路床
	<ul> <li>第二東名高速道路</li> </ul>	11
	<ul> <li>北関東自動車道</li> </ul>	11
	<ul> <li>北関東自動車道</li> </ul>	路体,路床
平成19年(2007)	<ul> <li>第二東名高速道路</li> </ul>	路床
平成19年(2007)	試験法制定(ローラ加速度応答法の	)路床検査)
平成21年(2009)	<ul> <li>舞鶴若狭自動車道</li> </ul>	盛りこぼし盛土地盤
平成23年(2011)	共同研究 6現場の試験施工	
	・圏央道 真名工事	上部路床安定処理
	<ul> <li>第二東名高速道路</li> </ul>	盛りこぼし盛土地盤
	<ul> <li>第二東名高速道路</li> </ul>	下部路体
	• 四国横断道 東九州道	11
平成24年(2012)	土工施工管理要領に盛りこぼし盛ま	ニ地盤への適用案
平成24年(2012)	共同研究 転圧試験	含水比の影響、下層の影響
	(ピット内)	深度方向の測定範囲
平成30年(2018)	共同研究 転圧試験	下部路体を想定し
	(屋外ヤード)	材料含水比を変化
令和元年(2019)	共同研究 転圧試験(現場)	材料含水比を変化







## 【加速度応答法による盛土品質管理】

## ①相関試験

施工部位	<u>変形係数の</u> 基準値(MN/m²)	備考
下部路床	20以上	道路の平板載荷試験6点
上部路床	40以上	(繰返し載荷)
盛りこぼし橋台 盛土地盤	42以上※1	道路の平板載荷試験4点 (繰返し載荷) 地盤の平板載荷試験2点



## ②加速度応答値の整理



- (これまでの高速道路での適用)
  - 加速度応答法は、品質管理手法として現場で多く活用されるには至らず
    - ※工事入札が総合評価で行われた際に,受注者が高品質の盛土を構築する方法として提案 (課題)
    - ▶ 従来のRI測定の補完として使用されるために従来法との二重管理
    - ▶ 盛土の一部の粗粒材のみに適用するなど限定した利用
    - ▶ 管理要領に則らないので測定の評価や記録の保管や分析が十分でない ⇒適用は多かったものの技術的な活用はあまり図られていない。

(今後の期待)

- ▶ i-Constructionの取り組みの一つである<u>ICT±エの推進によって、加速度応答法は注目大</u>
   ※ただ現在のICT±エは、形状を計測する出来形管理や、ICT建機によるMGやMC施工、
   締固め管理ではGNSS転圧回数管理。
   ⇒盛土の品質そのものを向上させる取り組みではない
- ▶ 加速度応答法はGNSSによる位置情報の取得,加速度応答値のリアルタイム自動計測,自動帳票の出力など,品質を評価する機能としては既にシステム化 ⇒ICTにより品質評価する手法として基準化されるのに最も近い技術である.
- ▶ 加速度応答法が残る課題を改善し、<u>汎用的に品質管理手法として確立することの期待は大きい</u>

## 【本日の報告予定】

	報告内容	報告者	予定時間	
	開会にあたって(研究WG設立の経緯と目的)	委員長:建山和由(立命館大学)	13:00~13:20	
	WG活動及び本日の報告概要	幹事:石黒 健(前田建設工業)	13:20~13:30	
<u> </u>	振動ローラ加速度応答法とは-計測原理と理論的背景-	藤山 哲雄(原子力発電環境整備機構)	13:30~14:00	
	振動ローラ加速度法を取りまく現状と技術的課題	橋本 毅(土木研究所) 中村 洋丈(中日本高速道路(株))	14:00~14:30	
	振動ローラ加速度応答法の技術的課題と検討事例	永井 裕之((株)安藤ハザマ)	14:30~15:00	
L	休憩		15:00~15:10	
	振動ローラ加速度応答法の現場適用事例	石黒 健(前田建設工業)	15:10~15:50	
	海外における振動ローラ加速度応答法適用の現状	内山恵一(酒井重工)	15:50~16:10	
/	まとめと今後の展望	建山和由(立命館大学)	16:10~16:30	
	質疑応答(会場およびWEB)		16:30~17:00	•

活動成果の報告

## 振動ローラ加速度応答法の技術的課題と検討事項

振動ローラ加速度応答法 の技術的課題と検討事項	① 振動ローラ加速度応答法の評価深さ
	② 振動ローラ加速度応答の前後進時の違い
	③ 土質・含水比・飽和度の影響

安藤ハザマ 永井裕之

# 【本講演の概要】

# ①振動ローラ加速度応答法の評価深さ

- ・加速度応答法はどの程度の地盤深さ(領域)まで評価してるか?
- ・ 道路のような多層構造の土構造物への適用性は?
- ・得られた加速度応答値はどのように活用するのか?
- ②加速度応答法の評価深さ,前後進時の加速度応答の違い
  - 振動ローラ加速度応答値は前後進時で異なる?
     土質、機械との相関はあるのか?

③土質・含水比・飽和度の組合せが加速度応答値に及ぼす影響

- ・加速度応答値は土質、含水比、飽和度の影響の影響を受けるのか?
- 実験的なアプローチで含水比の変化を特定できるか?

① 振動ローラ加速度応答法の評価深さ

【疑問】

- ・振動ローラ加速度応答法はどの程度の地盤深さ(領域)まで評価しているのか?
- ・道路のような多層構造の土構造物でも表層から実施する加速度応答法でいいのか?
- ・得られた加速度応答値はどのように活用するのか?



【解決法】

締固め厚さを変化させた現場転圧試験を実施し、締固め評価深さを定量化

異なる地盤剛性を持つ2層地盤の表面に振動ローラの荷重が加わった際の沈下量や等 価剛性を評価するモデルの提示

実工事で実測した加速度応答値からモデルの妥当性を検証

① 振動ローラ加速度応答法の評価深さ

振動ローラ加速度応答法はどの程度の地盤深さ(領域)まで評価しているのか?



加速度応答法	αシステム	基礎地盤	硬いコンクリート
各層の転圧回数N	16回	lphaシステム計測時の転圧回数	17-18回
1層当りの撒き出し厚	10cm	撒き出し厚	80cm(8層)
① 振動ローラ加速度応答法の評価深さ

振動ローラ加速度応答法はどの程度の地盤深さ(領域)まで評価しているのか?

## 【検証試験の概要】

		転圧試験および数値計算で使用				数値計算のみ使用	
転圧機種		4t振動ローラ		フt振動ローラ		19t振動ローラ	
		SAKAI TW502-1		SAKAI SW750		SAKAI SV900DV	
機械質量	М	3,230	(kg)	8,550	(kg)	19,400	(kg)
フレーム質量	$m_1$	1,186	(kg)	2,260	(kg)	4,680	(kg)
ロール質量	<i>m</i> <sub>2</sub>	804	(kg)	1,840	(kg)	6,920	(kg)
最大起振力	F	34.3	(kN)	78.4	(kN)	343.0	(kN)
公称振動数	$f_0$	55	(Hz)	50	(Hz)	23	(Hz)
締固め幅	В	1.30	(m)	1.68	(m)	2.15	(m)



4t振動ローラ



7t振動ローラ



振動ローラ加速度応答法の評価深さ

振動ローラ加速度応答法はどの程度の地盤深さ(領域)まで評価しているのか?

### 【検証試験の結果】



・層厚が大きくなるほど変形係数( $E_{roller}$ 、 $E_{FWD}$ )は小さくなる 4t振動ローラは55cm 7t振動ローラは60cm 小型FWDは40cm  $\Rightarrow \alpha \diamond x > \Delta c \phi \delta h d c \phi \delta h$  ① 振動ローラ加速度応答法の評価深さ

振動ローラ加速度応答法はどの程度の地盤深さ(領域)まで評価しているのか?

【数値計算による評価深さの検討】



計算式 波頭の伝番距離 (評価深さ)= 伝播速度  $c \times E 縮時間 / t$ 

松活			評価深さ(cm)		
1成1里		江 和时间 (Sec)	計算値	実測値	
4t振動ローラ	119	0.004	47.6	55	
7t振動ローラ	119	0.006	71.4	60	
19t振動ローラ	119	0.02	238	未実施	

- ・4t振動ローラ、7t振動ローラは実測値と計算値は概ね一致している
- ・19t振動ローラは計算値が大きすぎる可能性がある

⇒評価深さの概略的な傍証 ただし、大深度では減衰も考慮すべき

① 振動ローラ加速度応答法の評価深さ

・道路のような多層構造の土構造物でも表層から実施する加速度応答法でいいのか?

【2層系地盤への振動ローラ載荷のモデル化による評価深さ】



2層からなる地盤への載荷モデル ローラによる載荷モデル

- ・2層からなるモデルの上にローラで載荷を行う
- ・応力減衰を考慮して、2層からなる地盤全体の変形係数を計算する

① 振動ローラ加速度応答法の評価深さ

・道路のような多層構造の土構造物でも表層から実施する加速度応答法でいいのか?

【2層系地盤への振動ローラ載荷のモデル化による評価深さ】



深層ローラによる載荷の地盤内減衰の簡易モデル化

$$E = \frac{4ap_0E_1E_2(1-v^2)A}{4a'P_1E_2(1-v^2)A' + \pi E_1(p_0+p_1)h_2}$$

振動ローラ加速度応答法の評価深さ (1)

道路のような多層構造の土構造物でも表層から実施する加速度応答法でいいのか?

【2層系地盤への振動ローラ載荷のモデル化による評価深さ】



→概ね0.4~0.8m程度の深さの剛性を評価(振動ローラの大きさに依存)

① 振動ローラ加速度応答法の評価深さ

・得られた加速度応答値はどのように活用するのか?

【ある道路路盤現場におけるモデル化の検証例】





ある道路路盤工現場における路盤材転圧試験の実施概要

① 振動ローラ加速度応答法の評価深さ

・得られた加速度応答値はどのように活用するのか?

【ある道路路盤現場におけるモデル化の検証例】



転圧回数とRI乾燥密度の関係

転圧回数と乱れ率( $\alpha$ システム)の関係

- ・転圧回数と共に乾燥密度と乱れ率は増加傾向を示す
- ・レーン1~3のレーン間で締固め密度や乱れ率に若干違いがある



### 路盤材転圧時の乱れ率

## 基盤(路床)転圧時の乱れ率

- ・加速度応答値の大小関係や発生箇所などに一定の相関性がみられる
- ・その傾向は転圧回数が増加し路盤材の剛性が高まると共に顕著となる

⇒αシステムの評価深さは60cmなので基盤(路床)の剛性を反映している (他レーンも同様の傾向)

① 振動ローラ加速度応答法の評価深さ

・得られた加速度応答値はどのように活用するのか?



・2層モデルの解析で路床の影響を排除した路盤材の剛性E<sub>2</sub>を算出

⇒路床層が持つ剛性の不均一性を排除した転圧剛性を評価することができる

## <u>② 振動ローラの加速度応答の前後進時の違いについて</u>

# 【疑問】 ・振動ローラ加速度応答値は前後進時で異なる(土質、機械との相関は)?



【解決法】

- ・土質、含水比、転圧機械を変化させた転圧試験を実施し、前後進の違いを評価
- ・転圧試験結果から得られた知見の整理して仮説を立案
- ・仮説を踏まえて実工事での留意点を整理

<u>② 振動ローラの加速度応答の前後進時の違いについて</u>

・振動ローラ加速度応答値は前後進時で異なる?

### 撒き出し厚 : 15cm

表−4.2.1 前後進時の加速度応答値の違いを検討した計測事例の一覧。

No.	試験ヤード	転圧機械	撒き出し厚	使用材料	含水比	加速度応答値	土構造物/部位
1	室内土槽での	0+クンデル		購入砕石(M30)		a . CCV . Evib	
2	転圧試験(前	01×774	15cm	再生砕石(RC40)	最適		道路路盤を想定
3	後進分離)	4tコンバインド		購→砂石 (C40)		$\alpha \cdot CCV$	
4				ж <del>р</del> /\нт'ц (040)		001	

- 仕様重機: 8tタンデムローラ 、 4tコンバインドローラ
- 盛土材料: 購入砕石 (M30) 、 砕石砕石 (RC40)
- 含水比 : 最適含水比 撒き出し厚 : 15cm
- 加速度応答: αシステム 、 CCV 、 Evib
- 転圧方法: 転圧レーンを2つに分け、それぞれ前進、後進のみで転圧

⇒全く同一の転圧回数同士で前後進時の加速度応答の違いを評価



•ただし、その傾向に明確な法則性は見られなかった(ケース3も同様)

<u>② 振動ローラの加速度応答の前後進時の違いについて</u>

・振動ローラ加速度応答値は前後進時で異なる?

撒き出し厚 : 30cm

				購λ砕石 (C40)			
4					自然・湿潤	$\alpha \cdot CCV$	
5		10tコンバインド	30cm	砂(スクリーニングス)	自然・湿潤	$\alpha \cdot CCV$	
6				粘土	自然(石灰処理)	$\alpha \cdot CCV$	
7	屋外大規模試			購入砕石(C40)	自然・湿潤	$\alpha \cdot CCV$	道路路体・路床・ 路盤を想定
8	-X	4tコンバインド	30cm	砂 (スクリニング ス)	自然・湿潤	$\alpha \cdot CCV$	
9				粘土	自然(石灰処理)	$\alpha \cdot CCV$	

仕様重機: 10tコンバインドローラ 、 4tコンバインドローラ
 盛土材料: 購入砕石(C30) 、 砂(スクリーニング) 、 粘土
 含水比 : 自然含水比 、 湿潤状態 、 石灰処理(粘土のみ)
 加速度応答: αシステム 、 CCV
 転圧方法: 前進時、後進時で転圧レーンを分類していない

⇒転圧回数の奇数を前進、偶数を後進にして評価



ケース4.5.6:10tコンバインド

・前進と後進で加速度応答値に差はあるが、土質・含水比との相互関係は不明

振動ローラの加速度応答の前後進時の違いについて

振動ローラ加速度応答値は前後進時で異なる?

لا



後進(粘土W:4t)

前進(粘土W:4t

14

16

18





・前進と後進で加速度応答値に差はあるが、土質・含水比との相互関係は不明

0.05

<u>② 振動ローラの加速度応答の前後進時の違いについて</u>

### ・振動ローラ加速度応答値は前後進時で異なる?

## 撒き出し厚 : 15,20,30,50,60,100cm

10		7tタンデム	1 E om		白谷	α	
11		4tコンバインド	TOCIII	·明八仰台(040)	日然		道路路盤現場A
12			20cm	現場路床材	自然	u 000	道路路床現場B
13	実現場材料を		50cm	フィルタ材	自然		ロックフィルダム
14	用いた現場転		100cm	ロック材	湿潤(降雨)		С
15	圧試験	101 2771 26	30cm	コア材	湿潤	α	
16			60cm	フィルタ材	自然		ロックフィルダム D
17			100cm	ロック材	自然		

仕様重機: 7tタンデムローラ 、 10tコンバインドローラ 盛土材料: 購入砕石(C30)、現場路床材、フィルタ材、ロック材、コア材 含水比 : 自然含水比 、 湿潤状態(降雨後) 加速度応答: αシステム 、 CCV 転圧方法: 前進時、後進時で転圧レーンを分類していない →転圧回数の奇数を前進、偶数を後進にして評価 ② 振動ローラの加速度応答の前後進時の違いについて

・振動ローラ加速度応答値は前後進時で異なる?







・前進と後進で加速度応答値に差はあるが、土質・含水比との相互関係は不明

振動ローラの加速度応答の前後進時の違いについて  $(\mathbf{2})$ 

・振動ローラ加速度応答値は前後進時で異なる?



一:前進、一:後進

ケース15.16.17:10tコンバインド(ロックフィルダム)

・前進と後進で加速度応答値に差はあるが、土質・含水比との相互関係は不明

・振動ローラ前後進での加速度応答値に違いが生じる場合があるのは確か
 ・しかし、明確な傾向は見いだせず、その原因は特定できない
 ⇒幸いにも前後進での加速度応答値の差は小さく施工に支障はない

<u>② 振動ローラの加速度応答の前後進時の違いについて</u>

・振動ローラ加速度応答値は前後進時で異なる?

【仮説①】偏心重りの回転による水平成分の影響

【仮説②】エンジンの挙動の違いによる影響

【仮説③】前後進での振動輪への力の加わり方の違いによる影響

⇒確証をついた根拠を断定することはできない。 ただし、<u>前後進で加速度応答値に違いがあることは事実</u>

これらを踏まえ、我々が施工管理する際に留意すべきことは、、、

・加速度応答法による締固め管理に用いる転圧回数を固定する(偶数なら偶数)

・オペレータの前進・後進時の「癖」による影響を排除するため、試験施工及び
 本施工時のオペレータの前後進の走行速度を一定にする

・試験施工から実施工の段階まで振動ローラの整備状況をなるべく一定に保つ

### 【疑問】

・加速度応答値は土質、含水比、飽和度の影響によって変化の仕方が違うのか?



# 【解決法】

- ・室内大型土槽と実機の振動ローラを用いた転圧試験
   ⇒土質・含水比をパラメトリックに変化して乱れ率と各品質指標との関係を評価
- ・室内大型土槽と実機のタイヤローラ、振動ローラ、ブルドーザを用いた転圧試験
   ⇒土質の種類、含水比を変化して、CCV、乱れ率、Evibと各品質指標との関係を評価
- ローラ型重錘による室内試験により含水比の変化を検証

締固め土の密度と剛性の関係に及ぼす土の種類と含水比の影響.



- ・密度と強度がピークを示す時の含水比は異なる
- ・土の強度は密度とともに含水比にも依存する(含水比が高いほど強度は小さい)
- ●⇒土の剛性を評価する加速度応答値においても同様の傾向を示す

多種土質材料を用いた振動ローラ加速度応答法による転圧試験の事例

【目的】

土質の材料特性が頻繁に変化する実施工における加速度応答法の適用性の拡大

## 【課題】

土の種類が含水比が変化した場合に、振動ローラ加速度応答と締固め指標との関係 性が不明

⇒ 現場導入に向けた高いハードルの一つ

【解決策(本実験の概要)】

・同一の転圧機種、巻き出し厚の条件下で、土の種類および含水比をパラメタリックに変えた転圧試験を実施

・土質条件の違いが振動ローラ加速度応答と締固め指標の関係に及ぼす影響を評価

<u>3</u> 土質・含水比・飽和度の影響

多種土質材料を用いた振動ローラ加速度応答法による転圧試験の事例





試験材料の物理特性

試験項目	砂質ローム	スクリーニングス	粒調砕石(M-40)			
土粒子密度 $\rho_s$ (Mg/m <sup>3</sup> )	2.790	2.641	2.664			
最大粒径 D <sub>max</sub> (mm)	2	2.5	53			
細粒分含有率 Fc(%)	38.4	18.6	6.4			
均等係数 Uc	59.5	66.0	46.1			
最大乾燥密度 $\rho_{dmax}$ (Mg/m <sup>3</sup> )	2.087	2.182	2.284			
最適含水比 w opt (%)	9.8%	6.3%	5.6%			
地般な約の工学的公務	細粒分質砂	細粒分質礫質砂	細粒分まじり砂質礫			
	SF	SFG	GS-F			

多種土質材料を用いた振動ローラ加速度応答法による転圧試験の事例



各試験ケースの含水比						
十四	困回	含水比				
上具	眉序	乾燥側	W opt	湿潤側		
₩☞□_/	30cm	8.1%	10.6%	13.6%		
	60cm	7.1%	8.7%	10.8%		
<u>フクリ―ー゙ゕ゚゙フ</u>	30cm	3.0%	4.7%	7.3%		
	60cm	3.1%	5.0%	7.2%		
<b>粉</b> 润办石	30cm	3.7%	4.5%	7.0%		
个业 动可 扣十 1山	60cm	3.8%	6.4%	8.4%		

機械諸元	
------	--

機械諸元	SV160DV			
車体総質量 M	17,600 (kg)			
<sup>※</sup> フレーム質量 m <sub>1</sub>	4,310 (kg)			
振動輪質量 $m_2$	6,000 (kg)			
起振力 <i>F</i>	294 (kN)			
振動数 $f_0$	28.3 (Hz)			
振動輪直径 D	1.71 (m)			
振動輪幅 B	2.15 (m)			

※振動輪側フレーム	ム. 図	-12参照

計測項目一覧						
計測項目	計測方法	測点数	備考			
振動ローラ加速度	加速度計	全面	転圧中連続計測			
密度·含水比	表面型RI	6	転圧0,2,4,8,12,16回後			
深さ方向密度	2孔式RI	1	11			
変形係数	動的平板載荷試験	6	11			
貫入抵抗	動的コーン貫入試験	3	11			
CBR	現場CBR試験	2	11			

1
3
1
5
6
7
7
8
7
8
7
8
7
8
8
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9

多種土質材料を用いた振動ローラ加速度応答法による転圧試験の事例



表面型RIによる乾燥密度 $\rho_d$ と乱れ率の関係(層厚30cmのケース) ⇒乾燥密度と乱れ率は比例し、増加量は含水比毎に異なる 1
3
1
5
6
7
7
8
7
8
7
8
7
8
8
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9

多種土質材料を用いた振動ローラ加速度応答法による転圧試験の事例



表面型RIによる乾燥密度 $\rho_d$ と乱れ率の関係(層厚60cmのケース) ⇒層厚に依らず同様の傾向を示す 1
3
1
5
6
7
6
7
7
8
7
8
7
8
8
8
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9
9

多種土質材料を用いた振動ローラ加速度応答法による転圧試験の事例



⇒CBRと乾燥密度の傾向と類似

⇒ 乱れ率とCBRは相関が高い、その傾向は含水比により異なる

多種土質材料を用いた振動ローラ加速度応答法による転圧試験の事例



乱れ率による推定変形係数と動的変形係数の比較

*E*<sub>acce</sub>と*E*<sub>vd</sub>は概ね対応しているが、Eacceの方が若干高めに評価している ⇒ 加速度応答法は動的平板載荷より高深度の地盤状態を評価している ⇒ 強度・変形特性の原位置判定手法として最適 <u>3</u> 土質・含水比・飽和度の影響

多種の大型締固め機械を用いた振動ローラ加速度応答法による転圧試験の事例

## 【目的】

要求性能を満足するための施工方法と最適な締固め機械の選定手法および品質管理手 法を提案する

## 【課題】

大型締固め機械と土質の種類に応じた締固め効果を体系的に評価した事例が少ない

### 【解決策(本実験の概要)】

 ・大型締固め機械(タイヤローラ、振動ローラ、ブルドーザ)、土質(細粒分含有 率、含水比を変化)を用いた転圧試験を実施 ※加速度応答法は振動ローラのみ

### ・締固めの効果を定量的に評価

ここでは加速度応答法を適用した振動ローラ2機種分の成果を示します。 その他の機種の成果については、以下の研究委員会の報告書をご参照下さい。 地盤工学会関東支部:土構造物の要求性能の実現を目指した盛土締固め管理の合理化に関する研究委員会

多種の大型締固め機械を用いた振動ローラ加速度応答法による転圧試験の事例







多種の大型締固め機械を用いた振動ローラ加速度応答法による転圧試験の事例



初性特性								
呼称	土質(1)	土質(2)	土質(3)	土質(4)	土質(5)			
土粒子密度ps(g/cm <sup>3</sup> )	2.647	2.666	2.675	2.681	2.665			
最大粒径Dmax(mm)	9.5	9.5	9.5	19	4.75			
細粒分含有率Fc(%)	4.3	14.8	15.3	33.4	57.1			
最大乾燥密度pdmax(g/cm <sup>3</sup> )※	1.571	1.625	1.674	1.666	1.531			
最適含水比wopt(%)	18.2	17.8	16	18.8	24.9			
最適飽和度Sropt(%)	70.3	74.1	71.6	82.7	89.6			

المار كالم المار المار



※:JIS A 1210 A-c 法による

多種の大型締固め機械を用いた振動ローラ加速度応答法による転圧試験の事例

### 実験ケース一覧表

土質 (最適含水比%)		土質(1) (18.2)	土質(2) (17.8)		土質(3) (16.0)			土質(4) (18.8)	土質(5) (24.9)
目標含水比(%)		16.0	16.0	17.0	10.5	15.0	16.0	18.0	—
呼称		含水比 領域(1-1)	含水比 領域(2-2)	含水比 領域(2-1)	含水比 領域(3-3)	含水比 領域(3-1)	含水比 領域(3-2)	含水比 領域(4-1)	含水比 領域(5-1)
機械名	SV512 振動有	_	16.2 (opt-1.6)	17.0 (opt-0.8)	10.1 (opt-5.9)	14.7 (opt-1.3)	15.9 (opt-0.1)	18.3 (opt-0.5)	28.2 (opt+3.3)
	BW141	16.3 (opt-1.9)	16.3 (opt-1.5)	17.3 (opt-0.5)			15.8 (opt-0.2)	18.2 (opt-0.6)	_
	タイヤ ローラ	—	16.7 (opt-1.1)	17.3 (opt-0.5)	10.5 (opt-5.5)	14.8 (opt-1.2)	16.1 (opt+0.1)	17.6 (opt-1.2)	28.3 (opt+3.4)
	SV512 振動無	—	16.0 (opt-1.8)	17.2 (opt-0.6)	10.0 (opt-6.0)	14.9 (opt-1.1)	16.4 (opt+0.4)	18.0 (opt-0.8)	_
	ブルドーザ 10t	_	_	_	10.0 (opt-6.0)	14.9 (opt-1.1)	17.1 (opt+1.1)	_	35.5 (opt+10.6)
	ブルドーザ 8t		16.3 (opt-1.5)		_			_	_

### 品質試験項目

RI、SDG、平板載荷試験、小型FWD試験、動的平板載荷試験、αシステム、CCV、Evibシステム

多種の大型締固め機械を用いた振動ローラ加速度応答法による転圧試験の事例

【SV512振動ローラ】



加速度応答値は乾燥密度の増加とともに増加傾向を示す 増加量は最適含水比から乾燥側の範囲で高い ⇒ 相関係数は大きい

と 最適含水比より湿潤側では増加量が小さい ⇒ 相関係数は小さい

多種の大型締固め機械を用いた振動ローラ加速度応答法による転圧試験の事例

【BM141振動ローラ】



<u>3</u> 土質・含水比・飽和度の影響

多種の大型締固め機械を用いた振動ローラ加速度応答法による転圧試験の事例



→最適飽和度付近までは加速度応答値による締固め度や地盤剛性の推定が可能
重水落下試験による振動締固めにおける含水比の影響の検討

# 【目的】

含水比が加速度応答値に与える影響を室内実験により明らかにする

# 【課題】

ローラのメカニズムを室内実験で解明した研究はほとんど見られないため、その詳 細は不明な点が多い

【解決策(本実験の概要)】

- 含水比を変化させて突固めた土試料を対象に、ランマおよびローラ型重錘による 衝撃試験を実施し、メカニズムを検証
- 衝撃加速度継続時間、最大加速度、減衰比、位相差から含水比と加速度応答法の関係を確認

重水落下試験による振動締固めにおける含水比の影響の検討

#### 試験①円柱ランマによる加速度計測

指標		U10(mm)	U60(mm)	Uc	Uc'
試料	使用前	0.128	0.957	7.48	1.88
	使用後	0.111	0.907	8.17	1.43
良い粒度の条件				Uc≧10	1 <uc'<3< td=""></uc'<3<>

【供試体作成方法】

- 土 試 料 : 含水比を6種類に変化(概ねw=4,6,7,8,10,11%) 供試体寸法 : 15cmモールド
- 層数:3層
- **ランマ**重量 : 2.5kg、4.5kg
- 突固め回数 : 25、55、92回
- 落下高さ : 15cm

【計測方法】

上記で作成した供試体に円柱ランマを落下し、加速度波形を 計測(加速度はランマに接着)



重水落下試験による振動締固めにおける含水比の影響の検討



突固め25回の供試体

時間(s)

0.01

0.015

0.02

0.025

0

0.005

突固め55回の供試体

0.01

時間(s)

0

0.005

0.015

0.02

0.025

0

突固め92回の供試体

時間(s)

0.02

0.005

土質・含水比・飽和度の影響 3

重水落下試験による振動締固めにおける含水比の影響の検討



突固め25回の供試体

突固め25回の供試体

最大加速度の大きさは、

①重錘の落下高の平方根に比例し、衝撃計測時間は落下高さと無関係
 ②重錘の質量に比例し、衝撃持続時間は重錘の質量に比例する
 ③重錘面積に比例し、衝撃持続時間は重錘面積に反比例する.

1
 3
 土質・含水比・飽和度の影響

# 重水落下試験による振動締固めにおける含水比の影響の検討

#### 試験②ローラ型重錘による加速度計測







ローラ型重錘

重錘に張り付けた加速度計

落下試験の様子

【供試体作成	方法】	【計測方法】
土 試 料	: 含水比を6種類に変化(概ねw=4,6,7,8,10,11%)	左に示す方法で作製した供試体にローラ型重錘を
供試体寸法	: 15cmモールド	自由落下し、加速度波形を計測
層 数	:3層	(ローラ型重錘に加速度計を設置)
重量	: 2.5kg, 4.5kg	
突固め回数	: 25、55、92回	【ローラ型重錘の諸元】
落下高さ	: 15cm	直径6cm×長さ7cm、質量2.5kg(ロッド含む)

重水落下試験による振動締固めにおける含水比の影響の検討



突固め92回の供試体

重水落下試験による振動締固めにおける含水比の影響の検討



含水比の増加により接地面積は増加する ⇒剛性の低下によりランマがより深く地盤に沈み込むため

重水落下試験による振動締固めにおける含水比の影響の検討



含水比が低い場合:1/2波長t=0.0025秒 ⇒ 振動数=200H z 高周波が卓越 含水比が高い場合:1/2波長t=0.0160秒 ⇒ 振動数=62.5H z 低周波が卓越



重水落下試験による振動締固めにおける含水比の影響の検討

シミュレーション解析結果



0.08

0.1

重水落下試験による振動締固めにおける含水比の影響の検討



土質・含水比・飽和度の影響 3

重水落下試験による振動締固めにおける含水比の影響の検討

<u>変位の実測値と計算値のフィッティング(パラメータは減衰比)</u>



突固め25回の供試体のローラ型重錘落下結果

実測値を計算値をフィッティングした減衰比 <

⇒減衰比は0.1~0.6の間で変化している

⇒最適含水比以降は減衰比は増加する傾向がある。ただし、明確な傾向は不明 減衰比を抽出しても、含水比の特定までは難しい

重水落下試験による振動締固めにおける含水比の影響の検討

減衰比を変化させた場合の位相差の比較





波形の比較(減衰比0.3、ばね係数71.85)

波形の比較(減衰比0.5、ばね係数48.23)

衝撃加速度継続時間、最大加速度および位相差

減衰比ζ	0.3	0.4	0.5
地盤のばね定数k(MN/m)	71.85	60	48.23
衝擊加速度継続時間(s)	0.02147	0.02152	0.02164
衝擊最加速度(m/s²)	13.30	13.26	13.13
加速度 – 起振力の位相差(周期)	-0.06172	-0.0703	-0.0745

含水比が加速度波形の変化に影響を与えるのは事実。ただ、体系的整理は今後の課題

# 【本講演のまとめ】

- ①振動ローラ加速度応答法の評価深さ
- ・加速度応答法はどの程度の地盤深さ(領域)まで評価してるか?
   ⇒概ね60cm相当である
- ・道路のような多層構造の土構造物への適用性は?
- ・得られた加速度応答値はどのように活用するのか?
- ⇒2層モデルの解析シミュレーションで盛土の剛性評価が可能

②加速度応答法の評価深さ,前後進時の加速度応答の違い

・振動ローラ加速度応答値は前後進時で異なる?

土質、機械との相関はあるのか?

⇒前後進の差は明確に存在する。ただし、明確な傾向や原因は不明

③土質・含水比・飽和度の組合せが加速度応答値に及ぼす影響

- ・加速度応答値は土質、含水比、飽和度の影響の影響を受けるのか?
- 実験的なアプローチで含水比の変化を特定できるか?

⇒飽和度80%程度までは加速度応答値による評価は可能

⇒含水比が加速度応答法に与える影響は明らかに存在する

# 【本日の報告予定】

	報告内容	報告者	予定時間
	開会にあたって(研究WG設立の経緯と目的)	委員長:建山和由(立命館大学)	13:00~13:20
	WG活動及び本日の報告概要	幹事:石黒 健(前田建設工業)	13:20~13:30
<u>\</u>	振動ローラ加速度応答法とは – 計測原理と理論的背景 –	藤山 哲雄(原子力発電環境整備機構)	13:30~14:00
	振動ローラ加速度法を取りまく現状と技術的課題	橋本 毅(土木研究所) 中村 洋丈(中日本高速道路(株))	14:00~14:30
	振動ローラ加速度応答法の技術的課題と検討事例	永井 裕之((株)安藤ハザマ)	14:30~15:00
	休憩		15:00~15:10
	振動ローラ加速度応答法の現場適用事例	石黒(前田建設工業)	15:10~15:50
L	海外における振動ローラ加速度応答法適用の現状	内山恵一(酒井重工)	15:50~16:10
<u>,                                     </u>	まとめと今後の展望	建山和由(立命館大学)	16:10~16:30
	質疑応答(会場およびWEB)		16:30~17:00

活動成果の報告

# 振動ローラ加速度応答法の現場管理及び設計への適用事例

振動ローラ加速度応答法の 現場及び設計への適用事例	① ロックフィルダムにおける適用事例	①振動ローラ加速度応答法
	② 飽和度管理およびダム遮水材への適用事例	<ul> <li>の様々な現場適用状況</li> <li>②性能設計や維持管理など</li> </ul>
	③ 道路路床への適用事例	現場管理以外の応用事例 ③複眼的ICT+T品質管理
	④ 道路路盤・空港への適用事例 く	と現場管理業務のDX化
	⑤ 道路路床の性能設計への展開事例	
	⑥ 転圧基盤剛性検出手法としての現場適用事例(廃棄物処分場)	
	⑦ 振動ローラ加速度応答と他手法を連携した複眼的ICT土工品質 管理手法の試行事例	

#### 前田建設工業 石黒 健

# 【振動ローラ加速度応答法の様々な現場適用事例】









③ ロックゾーン実転圧面の物性値(内部摩擦角)の実態を把握し 性能確認や堤体の設計余裕度確認にも利用







その2:高速道路の路床







- ① 実道路路盤の加速度応答(地盤剛性E<sub>roller</sub>)を上部・下部路盤全面で 面的に計測
- ② ドイツM3法(加速度応答法で最弱部を抽出して従来管理法で密度確認)を試行
- ③ 路盤の要求品質であるたわみ量との比較検討や剛性管理基準策定を実施
- ④ 適用性を確認したが、現場含水比や飽和度のばらつきによる加速度応答 値の変動の影響を課題として指摘



上層路盤の加速度応答分布(地盤剛性E<sub>roller</sub>)



その3:道路路盤









#### 滑走路及びエプロン部の8回転圧後の加速度応答分布(地盤剛性E<sub>roller</sub>)





その4:空港滑走路路床

全エ区データを統合した滑走路全面の加速度応答分布(地盤剛性E<sub>roller</sub>)<sup>●</sup>







# 【振動ローラ加速度応答法の様々な利用法】 その1:粗粒材の現場密度管理の高度化・効率化



- ② 加速度応答値と締固め密度の相関性確認
- ③ 相関関係を試験盛土で確認し現場加速度応答値を密度に即時変換
- ④ 低含水比の粗粒材では適用可能であったが、適用土質の拡大に伴い、 含水比と飽和度の影響が明瞭になってきた













現場密度のヒストグラム

## その1:粗粒材の現場密度管理の高度化・効率化



#### その2:現場剛性管理の高度化・効率化



地盤剛性E<sub>roller</sub>のヒストグラム(道路路床)

平板剛性と加速度応答剛性の比較(ダム及び道路路床)

地盤変形係数分布図 2回転圧

地盤変形係数分布図 4回転圧





#### その5: 飽和度管理との連携: ロックフィルダム



- ① 遮水ゾーン(コア)の透水係数の現場管理に利用
- ② 加速度応答値と透水係数の関係から主要飽和度に対応する加速応答の上限値を面的・リアルタイムに管理管理
- ③ 離散的管理となる現場透水試験に代替し転圧面の遮水性 を統計的に把握
- ④ 振動ローラの運転条件や異なるゾーンとの境界の影響なども勘案して管理値を策定
   ⇒飽和度管理に基くダム現場品質管理の高度化と精緻化







## その6:土構造物の性能確認(道路舗装の多層弾性理論設計への応用)





振動ローラ加速度応答を用いた路床の日常管理フロー(案)



高速道路の路床厚の選定図



## その8:過転圧および基盤剛性検査手法としての利用



ピーク乱れ率分布図

転圧試験で確認された過転圧現象(締固め密度と加速度応答)

# 【振動ローラ加速度応答法の様々な利用法と今後目指すべき姿】

加速度応答法の利用目的	現時点での試行事例	紹介した実例	加速度応答法が今後目指すべき姿
A. 現場土工品質管理の高 度化と効率化	<ol> <li>現場品質管理業務の労力・コストの低減と要する</li> <li>時間の大幅な短縮</li> <li>計測点数の大幅な増加と面的・リアルタイム管理</li> <li>転圧に伴う締固めの収斂傾向や弱部の自動抽出</li> </ol>	<ol> <li>1 水置換法の代替(ダム)</li> <li>② 平板載試験の代替(道路)</li> <li>③ 加速度応答リアルタイム管理システム</li> </ol>	<ol> <li>ICTによる現場品質管理業務の更なる生産性向上</li> <li>現場管理業務の改革(DX化:クラウド管理・WEB遠隔立会等)</li> <li>複眼的な現場品質管理への拡大(加速度応答単体からの脱却)</li> </ol>
B-1. 現場品質管理データ の有効活用 (性能設計への貢献)	<ol> <li>完成した土構造物の現地物性の実態把握</li> <li>① ①に基づく土構造物の性能確認</li> </ol>	<ol> <li>ダムロック材の強度(円弧滑り)</li> <li>道路盛土の締固め管理(飽和度管理)</li> <li>ダムコア材の遮水性(飽和度管理)</li> <li>道路路床の剛性(舗装設計)</li> </ol>	<ol> <li>現場品質管理データの有効利用(DX化:他部門・他分野連携)</li> <li>① ①を達成するためのクラウドデータ管理システムの構築</li> <li>③ 施工時品質記録のDB保存と維持管理部門・他分野組織への継承</li> </ol>
<ul><li>B-2. 現場品質管理データ</li><li>の有効活用</li><li>(維持管理への貢献)</li></ul>	<ol> <li>完成した土構造物の現地物性の実態把握</li> <li>① ①に基づく土構造物の耐久性予測と管理部位抽出</li> </ol>	① 道路路床の供用可能年数の予測	④ 施工時品質データと経時的維持管理データの突き合わせ検証
C. 確実な現場転圧の担保	<ol> <li>過転圧による品質低下の回避</li> <li>基盤剛性計測(Inspection-Compaction)による</li> <li>転圧効果の担保</li> </ol>	<ol> <li>廃棄物処分場遮水層の転圧監視</li> </ol>	<ol> <li>         確実な現場転圧を担保する新たなICT土工管理手法の開発     </li> <li>         転圧収れん傾向のリアルタイム監視(転圧時沈下量の監視)     </li> <li>         材料および含水比・飽和度変動の現場監視(材料判定含む)     </li> </ol>





ICT土工品質管理システムの近未来像と狙い

新システムの狙い		従来の品質管理	次世代 α システム	
現場品質管理の高 度化・精緻化 複眼的品質管理		撒出し厚・転圧回数・ 現場密度測定	撤出し厚・転圧回数・現場密度分布(乱れ率換算)・地盤剛性E <sub>roller</sub> 分 布・含水比分布・転圧時沈下(たわみ)分布・施工後出来形データ	
現場管理業務の生	省人化	人力(施工と別途)	ICT機器による自動取得(施工しながら)、安全性向上にも寄与	
産性向上(省力化	効率化	点 (離散管理)	面的管理(多点・統計処理管理)	
2 2014年167	リアルタイム性	事後(施工後)	施工中(リアルタイム取得・品質管理)	
現場管理業務の	業務改革	事後・ローカル管理	Webによる遠隔リアルタイム管理(管理者・施工者一体システム)	
他分野連携)	データ蓄積・活用	ローカル蓄積	サーバー連携・BIM/CIM連携・維持管理部門引継ぎ等の社会活用	



## 加速度応答解析装置 (α**Ⅱ**)

















(2)

現場地盤変形係数の測定結果





ICT土工品質管理システムのアウトプット事例 (国土交通省2020年度PRISM実証工事)

200

180

160

140

120

100

80

60

40

20 0

鬿雨

現場密度:1点/日

(1)

→1091点/日

新αシステムによる乾燥密度 ρ<sub>d</sub>[g/cm<sup>3</sup>]

現場密度の測定結果

2日目 6回転圧

N=1091

## 【本日の報告予定】

	報告内容	報告者	予定時間
	開会にあたって(研究WG設立の経緯と目的)	委員長:建山和由(立命館大学)	13:00~13:20
	WG活動及び本日の報告概要	幹事:石黒 健(前田建設工業)	13:20~13:30
<u>\</u>	振動ローラ加速度応答法とは-計測原理と理論的背景-	藤山 哲雄(原子力発電環境整備機構)	13:30~14:00
	振動ローラ加速度法を取りまく現状と技術的課題	橋本 毅(土木研究所) 中村 洋丈(中日本高速道路(株))	14:00~14:30
	振動ローラ加速度応答法の技術的課題と検討事例	永井 裕之 ((株)安藤ハザマ)	14:30~15:00
	休憩		15:00~15:10
	振動ローラ加速度応答法の現場適用事例	石黒 健(前田建設工業)	15:10~15:50
	海外における振動ローラ加速度応答法適用の現状	内山恵一(酒井重工)	15:50~16:10
	まとめと今後の展望	建山和由(立命館大学)	16:10~16:30
	質疑応答(会場およびWEB)		16:30~17:00

活動成果の報告

# 海外における振動ローラ加速度応答法適用の現状

〇① 米国における適用状況

- 1) 米国政府(FHWA:連邦高速道路庁)予算によるICプロジェクト
- 2) VetaソフトによるIC データマネージメント
- 3) ICMV値の5段階ランク分け
- 4) 今後の課題
- 5) 最近の集中デモ実施例
- ② 欧州における適用状況
- ③中国におけるCCCの適用と普及状況
- ④ 国際会議(ISIC)の創設
- ⑤ 日米ワークショップ実施報告
  - 1) 米国におけるIntelligent Compaction普及の概況
- O 2) 土/路床の締固めへのIC適用

#### 酒井重工業 内山 恵一

# 【海外での加速度応答法適用の経緯】

1978年 スウェーデンのGeodynamik社が振動ローラ加速度応答法による 連続的締固めの品質管理法特許登録

2004年 米国では2004年に連邦高速道路庁が主導して土工および舗装工用に インテリジェント・コンパクション(IC)と称する国家的プロジェクトを開始

2016年 締固め管理・建設工事インテリジェント化(ICT) を目指す 国際会議(IICTG, 2019年にISICに改称)発足



<u>CMV (Compaction Measurement Value)の紹介</u>

Thurner, Heinz and Sandström, Åke: "A new device for instant compaction control.", 締固め国際会議, 1980.04, パリ


#### Ammann/Case



#### **Bomag America**











Sakai America



### 転圧回数の均一性改善



路盤のICMVが低い箇所での アスファルト破損





<u>引用:FHWA/TPF Reserch Project「HMA IC Field Demo.MN DoT Final Report</u> (Nov.2008) 」 http://www.intelligentcompaction.com/

### 【米国における適用状況】VetaソフトによるIC データマネージメント







#### 【米国における適用状況】ICMVの5段階ランク分け



Level-1	周波数応答に基づく経験的な解法	(A1) Vibratory Frequency Reactive Model
Level-2	経験的エネルギーおよび転がり抵抗に よる解法	$f_1=C_1$ $f_2=C_2$ $f_3=C_3$ $f_4=C_4$ (A2) Static Rolling Resistance Reactive Model
Level-3	簡素化された静的な力学的解法	$m_1$ $o$ $k_1 \neq c_1$ $u_1$ $k_1 \neq c_1$ $me\omega^2 \sin \omega t$ $m_1$ $o$ $m_2$ $o$ $u_1$ $u_2$ $k_2 \neq c_2$ $k_2 \neq c_2$ Vibration drumTwo Degree Freedom System

### 【米国における適用状況】ICMVの5段階ランク分け



Level-4	動的力学的な解法	$ \begin{array}{c}                                     $		
		Drum impact movements Force diagram Compute reactive force $ \begin{array}{c} \hline R \\ \hline m \\ \hline m \\ \hline F \\ \hline F \\ \hline \hline F \\ F \\ \hline F \\ \hline F \\ \hline F \\ F \\ \hline F \\ \hline F \\ F \\ F \\ F \\ \hline F \\ F \\ F \\ F \\ \hline F \\ F \\$		
Level-5	動的・力学的な人工知能による解法	Continuous Compaction Control		

### 【欧州における適用状況】





16.5912 16.5913 16.5913 16.5913 geographic length [°]

20

0

16.5911

16.5912

16.5914

16.5914

### 【国際会議 (ISIC)の創設】

# International Society for Intelligent Construction



【日米ワークショップ実施報告】

開催日

会場

#### 主 催 土木学会建設用ロボット委員会 : 担当

- 同委員会新技術小委員会振動締固めに関する研究WG
- 2019年4月22日(月) 13:00~17:00
  - 地盤工学会 地階大会議室, 東京都文京区千石4-38-2



### 【日米ワークショップ実施報告】 講師



George Chang 氏 国際ICT技術グループ(IICTG)の会長



龍岡 文夫 氏 東京大学名誉教授, 東京理科大学名誉教授



Soheil Nazarian 氏 テキサス大学 交通インフラシステム部長及び 土木工学主任教授



古屋 弘 氏 株式会社大林組技術研究所 上級主席技師

#### 【日米ワークショップ実施報告】

- 1. 「米国におけるIntelligent Compaction普及の概況」, George Chang氏
- 2. 「土/路床の締固めへのIC適用」, Soheil Nazarian氏
- 3. 「日本におけるIntelligent Compaction普及の概況」, 古屋弘氏
- 4. 「飽和度およびICによる土の締固め管理について」, 龍岡文夫氏
- 5. 「アスファルト締固めへのIC適用と VETAによるデータ管理と舗装BIMとの将来的な結合」, George Chang氏

【土/路床の締固めへのIC適用】

### 講演内容



### 背景

- ▶ 現場での面的な締固め品質管理の重要性がクローズアップ
- > 密度管理だけでなく地盤剛性による評価が不可欠
- > 力学的舗装設計手法の普及に伴う地盤剛性値(変形係数)の必要性

【土/路床の締固めへのIC適用】

IC技術を使った仕様の枠組み6つのステップ

Step 1:設計値に基づく全層の性状予測

Step 2:目標ICMV及び目標変形係数の取得

【数値シミュレーションを使用】

Step 3:基盤層の均一性と状態を評価するためのプレマッピング (ICMVの計測深さを考慮)

Step 4:締固め施工

Step 5: 締固め層のマッピング (施工面全面のICMV 計測)

Step 6: 力学特性を抽出するための後処理(締固め層の変形係数)

#### 【土/路床の締固めへのIC適用】 目標ICMV及び目標変形係数の取得





目標ICMV及び目標変形係数の取得 シミュレーションモデルのキャリブレーション



#### 目標ICMV及び目標変形係数の取得 人工ニューラルネットワーク(ANN)の開発



### <u>【土/路床の締固めへのIC適用】</u>マッピング方法



(2乗バッファ)

CMV (Souare Buffer) (2乗バッファ) COV

### 【土/路床の締固めへのIC適用】 CMVによる地盤剛性の判定



#### 【土/路床の締固めへのIC適用】締固め品質管理の実施要綱 (最終案)



【土/路床の締固めへのIC適用】 結言

• IC技術で品質管理を行うことは、非常に以下の事から理に

かなっていると考える

- 最終品質の均一性(既に実現可能)
- ・設計変形係数の達成(近い将来実現可能)
- 概念的には成熟していても、制度的・技術的な細部を
   詰める必要がある
- これらの詳細は共同作業によって容易に達成可能

## ご清聴ありがとうございました。

#### 【本日の報告予定】

	報告内容	報告者	予定時間
	開会にあたって(研究WG設立の経緯と目的)	委員長:建山和由(立命館大学)	13:00~13:20
	WG活動及び本日の報告概要	幹事:石黒 健(前田建設工業)	13:20~13:30
	振動ローラ加速度応答法とは-計測原理と理論的背景-	藤山 哲雄(原子力発電環境整備機構)	13:30~14:00
	振動ローラ加速度法を取りまく現状と技術的課題	橋本 毅(土木研究所) 中村 洋丈(中日本高速道路(株))	14:00~14:30
	振動ローラ加速度応答法の技術的課題と検討事例	永井 裕之((株)安藤ハザマ)	14:30~15:00
	休憩		15:00~15:10
	振動ローラ加速度応答法の現場適用事例	石黒 健(前田建設工業)	15:10~15:50
	海外における振動ローラ加速度応答法適用の現状	内山 恵一(酒井重工)	15:50~16:10
	まとめと今後の展望	建山和由(立命館大学)	16:10~16:30
	質疑応答(会場およびWEB)		16:30~17:00

活動成果の報告

### 振動ローラの振動計測による締固め施工管理手法

### まとめと今後の展望

## 加速度応答法の課題



### 加速度応答の定量化手法

- ・周波数分析結果
- ・地盤反力~変位関係

各々の手法の特徴 を活かした活用を

含水比の影響?

粗粒土+飽和度の低い場合は〇 細粒土+飽和度の高い場合には、 • 含水比の把握が必要

大型の振動ローラ:60cm~80cm程度 小型の振動ローラ:30cm~40cm程度

計測深さ?

# AIを活用した加速度応答の分析



加速度波形から地盤剛性を推定

数値シミュレーションでの検討結果

寺本 昌太・小林泰三:畳み込みニューラルネットワークを用いた盛土の締固め品質評価手法に関する 基礎的研究、土木学会構造工学委員会、第2回「AI・データサイエンスシンポジウム」2021年11月

### Alを活用した加速度応答の分析 現場実験結果



寺本 昌太・小林泰三:畳み込みニューラルネットワークを用いた盛土の締固め品質評価手法に関する 基礎的研究、土木学会構造工学委員会、第2回「AI・データサイエンスシンポジウム」2021年11月

# 土の締固め施工管理における 加速度応答法の活用方法

## 土の締固め施工における施工管理 現状



 $\mathbf{D}(\%) = rac{\mathbf{現場} \tilde{\mathbf{r}} \tilde{\mathbf{l}} \tilde{\mathbf{l}} \tilde{\mathbf{r}} \tilde{\mathbf{l}} \tilde{\mathbf{l}} \tilde{\mathbf{c}} \tilde{\mathbf{c$ 

## 密度による施工管理 D値管理法



### D値90%の意味?

本来は、構造物の安定性を保証するための強度、変形性、遮水性等の力学特性を保証するのに十分な密度を構造物毎に求め、D値の基準値を決めるべき.

実際には、一律で基準値を設定している場合が多い. 含水比の管理も曖昧な場合が多い.

現在の締固め施工で,最も合理的でない点.

# 土の締固め施工における施工管理 本来の形



# 締固め土の含水比変化



低下しない

・強度. 剛性. 遮水性が

・沈下や変形を起こさない

最大粒径300mmの粗粒材でも含水比により安定性が異なる

## 複雑な関係を解かなければならない土の締固め



### 所定の強度, 剛性, 遮水性を有し, 水浸しても, それらの低下を来さない施工管理の方法

# 土の締固め施工管理における加速度応答法の活用



地盤剛性は,加速度 応答法で計測可 But 含水比による影響の 評価は? 水浸に対する安定性 の担保は?

### 飽和度管理と加速度応答法の活用



地盤剛性の保証:下限値飽和度の保証:上限値

公益社団法人地盤工学会関東支部 土構造物の要求性能の実現を目指した盛土 締固め管理の合理化に関する研究委員会

土の締固め管理 -現状・新たな展開・展望-

総合土木研究所より 令和4年度初頭に発行予定

### i-Construction・インフラDXへの対応




#### 長期挙動の予測:建設時の施工管理データの活用



横田聖哉他:道路路床の性能規定化へ対応するための現場管理手法の提案

#### ー律管理により効率化を追求してきた日本のインフラ整備



社会資本整備の推移(国土交通白書他より作成)

- ・短期間に一定品質のインフラを整備
- ・工事方法の固定化・一律管理による無駄の誘発

#### 精緻なマネジメントによる生産性の向上 不良 🕈 不確定要因を見込まざるを得ない施工計画 施工条件 計画時に想定した施工条件 環境 実際の施工条件 現場の状況の把握とそれに基づく施工法等の調整 良好 時 間 現場の状況に応じた柔軟な対応 過剰なエネルギー、資材、労働力の削減



### 20世紀型:規準の整備による効率化 <一律管理>



## 21世紀型:技術者判断による精緻化 <個別評価>

## 無駄の削減・資源の有効利用

# ご聴講ありがとうございました.

#### 【本日の報告予定】

	報告内容	報告者	予定時間
	開会にあたって(研究WG設立の経緯と目的)	委員長:建山和由(立命館大学)	13:00~13:20
	WG活動及び本日の報告概要	幹事:石黒 健(前田建設工業)	13:20~13:30
_	振動ローラ加速度応答法とは-計測原理と理論的背景-	藤山 哲雄(原子力発電環境整備機構)	13:30~14:00
	振動ローラ加速度法を取りまく現状と技術的課題	橋本 毅(土木研究所) 中村 洋丈(中日本高速道路(株))	14:00~14:30
	振動ローラ加速度応答法の技術的課題と検討事例	永井 裕之 ((株)安藤ハザマ)	14:30~15:00
	休憩		15:00~15:10
	振動ローラ加速度応答法の現場適用事例	石黒 健(前田建設工業)	15:10~15:50
	海外における振動ローラ加速度応答法適用の現状	内山 恵一(酒井重工)	15:50~16:10
_	まとめと今後の展望	建山和由(立命館大学)	16:10~16:30
	質疑応答(会場およびWEB)		16:30~17:00

活動成果の報告