

立命館大学審査博士論文

小型締固め機械の締固め能力と
締固め土品質測定手法の高度化に関する研究
(A STUDY OF COMPACTION PERFORMANCE
AND QUALITY MEASUREMENT SYSTEM
OF LIGHT COMPACTION MACHINES)

2014年12月

December, 2014

橋本 毅

HASHIMOTO Takeshi

主査：建山 和由 教授

Principal referee : Professor TATEYAMA Kazuyoshi

要旨

盛土施工において土の締固め施工は、構造物の品質を決める重要な工程であり、その施工は慎重に行う必要がある。特に搭乗型の大型締固め機械が進出できず、ハンドガイド式の小型締固め機械が用いられるような狭隘部や構造物近傍などの施工現場は、既存構造物や既存地盤との接合部であることが多く、地表面の沈下による段差等の不具合を生じることが多い。従ってそのような場所での締固め施工は、より一層慎重に行うことが求められる。

しかしながら、小型締固め機械は大型締固め機械に比べ研究が遅れており、施工現場における機種選択や施工厚さの決定も、入手の容易さや経験など、あまり合理的でない手法で行われている場合が多い。さらに小規模な工事であるが故に、施工後の品質管理が適切に行われていない施工現場もあり、その場合は盛土構造物の品質低下が発生している可能性が高い。

そこで本研究では、狭隘部などにおける小型締固め機械を用いた締固め施工の合理化を図ることを目標として、小型締固め機械の構造による分類、機種毎の締固め能力の明確化、締固め能力を機械仕様より表すことができる指標の提案、および狭隘部の締固め品質測定を効率的に行う新しい手法の提案をそれぞれ試みた。

まず、本研究の準備段階として、小型締固め機械をその構造で分類して特徴を示し、各機種において国内で一般的に普及している仕様を調査し、代表的な仕様を明らかにした。

次に、土木研究所実験ピット内に実際の狭隘部を模した実験フィールドを作成し、実際の締固め機械にて実験を行うことで、各機種の締固め能力を明確にした。

さらに、小型振動平板式締固め機械を対象に、機械仕様から算出可能な締固め能力指標の提案を行い、その指標の適用性を実際の締固め機械を用いた土槽実験結果により検証した。

最後に、狭隘部の締固め品質測定を効率的に行う手法として、既に市販されている加速度計を利用したシステムの検証を土槽実験にて行うとともに、新しい手法として小型振動平板式締固め機械の走行速度から締固め品質を推定する手法を、数値計算と土槽実験により提案した。

本研究の成果を展開することにより、小型締固め機械を用いた締固め施工における、機種・施工厚さの選定手法および品質測定手法の合理化が図られることを期待するものである。

Abstract

In earth works, the quality of compaction work on soils is a critical determining factor of structural quality, and careful execution is thus crucial, especially at narrow sites where light compaction machines must be employed. In such cases, ground settlement may cause unfavorable conditions such as unevenness of ground at junctions with adjacent structures or foundations. However, studies on works using light compaction machines have fallen behind those involving heavy compaction machines, and consequently, decisions at actual sites such as machine model selection and layer thickness determination are often based on unscientific criteria such as worker experience and availability of machines. The present study attempts to present a rationalized scheme for light-compaction machine works at narrow sites.

First, light-compaction machines were categorized by structure, and the representative specifications and features for each category were identified by examining the models available domestically. Next, to define the compaction performance, actual machines were operated in an experimental narrow site created within the test pit of the Public Works Research Institute. Then, a performance index of compaction work that can be calculated from machine specifications was formulated, focusing on the stress in soil generated by light vibrating-plate compaction machine. The applicability of the index was validated in the test pit, and some actual work situations are examined. A validation experiment was also carried out in the test pit on a newly-available system that employs an accelerometer for efficient compaction quality measurement at narrow-sites. Finally, a new method for compaction quality estimation based on the running speed of a light vibrating plate compaction machine was developed through numerical calculations and test-pit experiments.

It is hoped that the results of the present study will contribute to rationalized model selection and layer thickness determination, as well as efficient compaction quality measurement, in works using light compaction machines.

小型締固め機械の締固め能力と 締固め土品質測定手法の高度化に関する研究

目 次

1. はじめに	1
1. 1 研究の背景	1
1. 2 研究の目的	2
1. 3 論文の構成	3
2. 小型締固め機械の種類と特徴	5
2. 1 はじめに	5
2. 2 小型締固め機械の分類	5
2. 3 各小型締固め機械の特徴	7
2. 3. 1 プレートコンパクタ	7
2. 3. 2 ランマ	8
2. 3. 3 前後進コンパクタ	9
2. 3. 4 ハンドガイドローラ	10
2. 3. 5 まとめ	10
2. 4 各機種における代表的な仕様	12
2. 4. 1 プレートコンパクタ	12
2. 4. 2 ランマ	15
2. 4. 3 前後進コンパクタ	17
2. 4. 4 ハンドガイドローラ	19
3. 小型締固め機械の締固め特性	23
3. 1 はじめに	23

3. 2	実験方法	23
3. 2. 1	実験フィールド	23
3. 2. 2	実験材料	25
3. 2. 3	使用小型締固め機械	27
3. 2. 4	実験パターン	27
3. 2. 5	データ測定方法	28
3. 3	密度測定結果による締固め性能の検討	29
3. 3. 1	密度測定結果	29
3. 3. 2	初期状態の影響についての検討	36
3. 3. 3	到達密度による締固め能力の検討	37
3. 4	走行速度測定結果による施工効率の検討	45
3. 4. 1	走行速度測定結果	45
3. 4. 2	施工効率の検討	48
3. 5	まとめ	52
4.	小型締固め機械の締固め能力指標の提案とその利用	55
4. 1	はじめに	55
4. 2	締固め能力指標の提案	55
4. 2. 1	3次元理論式による検討	55
4. 2. 2	2次元理論式による検討	60
4. 3	土槽実験による土中応力計算式の検証	64
4. 3. 1	実験方法	64
4. 3. 2	実験結果による土中応力計算式の検証	65
4. 4	土槽実験による締固め能力指標 <i>AS</i> の検証	66
4. 4. 1	実験フィールド	66
4. 4. 2	実験材料	66
4. 4. 3	使用小型締固め機械	66

4. 4. 4	実験パターン	67
4. 4. 5	データ測定方法	67
4. 4. 6	実験結果による締固め能力指標 AS の検証	67
4. 5	AS 値による締固め能力（到着密度）の推定	74
4. 6	機械仕様による機種及び施工可能厚さの選定	82
4. 7	まとめ	84
5.	加速度計を利用した締固め品質計測システムの検証	87
5. 1	はじめに	87
5. 2	加速度応答システムの種類と計測原理	87
5. 2. 1	BOMAG 式の概略	88
5. 2. 2	周波数解析式の概要	90
5. 3	実験方法	91
5. 3. 1	実験フィールド	91
5. 3. 2	実験材料	91
5. 3. 3	前後進コンパクタ+加速度応答システム	91
5. 3. 4	データ測定方法	92
5. 4	実験結果による加速度応答システム適用性の検証	93
5. 5	礫質土による実験結果	96
5. 5. 1	実験フィールド（礫質材料）	96
5. 5. 2	実験材料（礫質材料）	97
5. 5. 3	前後進コンパクタ+加速度応答システム	97
5. 5. 4	データ測定方法	97
5. 5. 5	実験結果	99
5. 6	まとめ	
	（砂質土と礫質土の実験結果による加速度応答システム適用性の検証）	100

6. 走行速度を利用した締固め品質推定手法	105
6. 1 はじめに	105
6. 2 数値計算による前後進コンパクタ走行速度の検討	105
6. 2. 1 数値計算方法	105
6. 2. 2 数値計算による前後進コンパクタ走行速度の検討	110
6. 3 前後進コンパクタ走行速度によるウィークポイントの検出	113
6. 4 前後進コンパクタの改造による地盤剛性合否判定手法の提案	117
6. 5 土槽実験による適用性の検証	126
6. 5. 1 実験フィールド	126
6. 5. 2 実験材料	126
6. 5. 3 データ測定方法	126
6. 5. 4 土槽実験結果による走行速度から 地盤剛性の合否を判定する手法の検証	128
6. 6 まとめ	129
7. まとめ	131
7. 1 小型締固め機械の種類と特徴	131
7. 2 小型締固め機械の締固め特性	131
7. 3 小型締固め機械の締固め能力指標の提案とその利用	131
7. 4 加速度計を利用した締固め品質計測システムの検証	132
7. 5 走行速度を利用した締固め品質推定手法	133
7. 6 今後の展望	133
謝辞	135

第1章 はじめに

1.1. 研究の背景

土の締固めは、最も一般的な地盤改良工法として古くから堤防などの数多くの地盤構造物の造成で採用されてきた。この時に使用される材料の土は、土粒子と粒子間に存在する水と空気の3種類の物質の混合体であり、その工学的な性質は、土粒子のつまり具合、すなわち土の密度に大きく依存している。一般的に、土粒子を密につめることにより、その構造物の強度や剛性は増加し、また空隙が小さくなるため水の通り道が少なくなり、遮水性能も向上する。したがって、土に外力を加えて締固めを行い、強制的に土粒子を密に詰めることにより、土構造物の強度、剛性、遮水性などの工学的性質を改善することが可能である。これは、道路や空港、ダム、堤防などで安定した土構造物を得るために非常に重要である。

締固め施工の中でも特に、構造物近傍の裏込め部や地中埋設物の埋め戻し工、あるいは非常に狭隘な施工場所などは、構造物や既存地盤との接合部であることが多く、締固め不足により段差が生じやすい特徴がある。そのためこれら狭隘部での締固め施工は、より一層慎重にかつ十分に行う必要がある。

土に外力を加える方法としては、古くは木だこや石だこを用い人力にて行っていたが、現代では、タイヤローラや振動ローラなどの締固め機械が用いられる。これら締固め機械は現在多種多様なものが存在しており、欧州の締固め機械専門メーカーの例では、重量で50kg程度から30,000kg程度まで約80種類以上の機械を販売している。当然それぞれの機械で、締固め能力などの特徴は異なっており、各機械が適した材料や施工環境、および十分な締固め効果が発揮できる施工厚さも異なっている。したがって締固め施工を効率的にかつ効果的に行うためには、施工材料や施工環境などによって適切な締固め機械を選定し、事前に試験施工を行うことなどで、その能力に応じた施工厚さを決定することが重要である。また前述の狭隘部における締固め施工では、大型の搭乗型締固め機械が進入できないためハンドガイド式の小型締固め機械が用いられる場合が多いが、この小型締固め機械に限った場合でも、国内で一般的に流通しているものだけで重量50kg程度から700kg程度と多数の種類が存在している。したがって適切な締固め機械を選定し、その能力に応じた施工厚さを決定することが重要であることは、小型締固め機械を用いた狭隘部などでの施工においても変わりがないと言える。

大型締固め機械の締固め能力に関しては、これまで様々な研究^{1)~3)}を基に、機械選択のガイド⁴⁾や、機械仕様から締固め能力を表す指標の「線圧」などが提案されており⁵⁾、機種や施工厚さを決定する一助となっている。しかしながら、小型締固め機械に関する研究は

これまでほとんどなされておらず、機種選択のガイドや締固め能力を表す指標などは存在していないのが現状である。

通常締固め機械の締固め能力は試験施工により確認され、施工厚さなどはその結果により決定されることが原則である。機種や施工厚さ選択のガイド等が無い場合でも、この手法を用いていけば、締固め施工を確実に実施することが可能である。しかし、狭隘部における土の締固め施工は一般に小規模な工事であることが多いため、その施工に際しては試験施工を行わず、曖昧さを残しつつも経験や入手の容易さ、運転の容易さなどから機種や施工厚さなどの施工条件を決めていることが多い。小型締固め機械は運転者の腕力で操作するため、一般的に運転の容易さと締固め能力はトレードオフの関係になっている。したがって、十分な締固め能力を有していない機械が、試験施工を経ずに使用されている場合が多いと考えられ、さらに小規模な工事であるが故に、施工後の品質管理が適切に行われていない施工現場もあり、その場合は構造物の品質の低下が発生している可能性が高い。狭隘部の盛土が供用後に沈下を起し、構造物や既存地盤との間で段差を生じることが多いが、その原因はこのことに起因する場合も多いのではないかと考えられる。

そこで、小型締固め機械の締固め能力や特徴を機種毎にまとめ、機種選択の参考資料を作成することや、施工厚さを決定する際の参考とするために機械仕様から締固め能力を推定する指標を提案すること、および狭隘部の締固め品質管理を効率的に行う新しい手法を提案することは、狭隘部などでの締固め施工の合理化を図るために必要とされているといえる。

1.2. 研究の目的

本研究の目的は、テラメカニクスと呼ばれている建設機械と地盤との間の相互作用という地盤工学と機械工学との境界領域の研究により、狭隘部などにおける小型締固め機械を用いた締固め施工の合理化を図ることである。

具体的には、まず小型締固め機械を構造によって定義・分類することを試みた。小型締固め機械に対する一般の認識は高くなく、種類やその特徴などはあまり知られていないのが現状である。そこで本研究の準備段階として、小型締固め機械をその構造で分類し、特徴を明確にすることを試みた。さらに各機種において国内および海外で一般的に普及している仕様を調査し、その中から代表的な仕様を明らかにした。

次にその機種毎の締固め能力を明確にすることを試みた。小型締固め機械の締固め能力に関しての既存の研究はほとんどないが、横田らが高速道路裏込め施工現場で行った実験により、ランマ、前後進コンパクトの締固め能力が比較的高く、ハンドガイドローラの締固め能力はそれらより劣るということを報告している⁶⁾。しかしながら、施工材料や含水比

などの施工条件，小型締固め機械の機種，深さ方向の締固め能力分布，などの点で十分な実験数とは言えない．そこで本研究では，土木研究所実験ピット内に，実際の狭隘部を模した実験フィールドを作成し，細粒分含有率の異なる複数の材料を用い，複数の含水比，各機種の代表的な小型締固め機械にて締固め施工を行い，表面から 30cm 深さまでの密度を 10cm 毎に測定することで小型締固め機械の締固め能力を明確にすることを試みた．

さらに，締固め能力を機械仕様より表すことができる指標の提案を試みた．小型締固め機械の締固め能力を表す指標に関する研究は，調査した所これまでなされたことは無い様である．本研究では，振動ローラなどと同様な小型振動平板式締固め機械を対象に，機械下部に発生させる土中応力に着目して，理論式と上記試験ピットにおける実証実験を通して能力指標の提案を試みた．

最後に，狭隘部の締固め品質管理を効率的に行う新しい手法の提案を試みた．近年，加速度計を利用したシステムがメーカより販売されているが，この新しいシステムの検証実験がこれまでなされていない．そこで本研究では，これらシステムの有効性と適用限界の検証を，上記で示した試験ピットにおける実証実験を通して試みた．また，まったく新しい手法として，前後進コンパクタの走行速度に着目し走行速度から締固め品質を推定する手法の提案を，数値計算と実証実験を通して試みた．この手法は，加速度計を利用したシステムに比べ低コストで，かつ既に使用されている既販機への展開が容易な手法であり，品質管理手法を容易に合理化する一助になると考えられる．

1.3. 論文の構成

本論文には7つの章がある．各章の構成は以下の通りである．

論文の最初の章「**第 1 章 はじめに**」においては，本研究を行うに至った背景と目指すべきところを述べている．

「**第 2 章 小型締固め機械の種類と特徴**」では，本研究の準備段階として，国内で一般的に使用されている小型締固め機械を構造によって分類し，その機械的特徴について述べているとともに，各機種において国内および海外で一般的に普及している仕様を調査し，その中から代表的な仕様を明らかにしている．

論文の中央の4つの章では，今回行った研究の内容を詳細に記している．「**第 3 章 小型締固め機械の締固め特性**」では，異なる土質，含水比，機種における小型締固め機械の締固め能力について述べている．「**第 4 章 小型締固め機械の締固め能力指標の提案**」では，小型締固め機械が下部に発生させる土中応力に着目し，機械仕様から締固め能力を推定する手法について述べている．「**第 5 章 加速度計を利用した締固め品質測定システムの検証**」では，小型締固め機械に登載した加速度計を利用し，リアルタイムに地盤剛性を測定する

システムの表示値と、実際の地盤密度、剛性との相関について述べている。「第6章 走行速度を利用した締固め品質推定手法」では、前後進コンパクタの走行速度から締固め品質を推定する手法について述べている。

論文の最後の章「第7章 まとめ」では、以上の研究結果のまとめと今後の展開について述べている。本論文が他の研究者による新たな研究成果が生まれるきっかけとなるように、本研究で得られた成果をできるだけ簡潔に述べるとともに、今後の研究の方向についても述べている。

参考文献

- 1) 関根道裕：各種ローラの締固めについて，土木技術，Vol.18，No.9，pp.15-20，1963.
- 2) 高野漠：道路工事における大型振動ローラ，建設機械，Vol.10，No.12，pp.41-46，1974.
- 3) 高野漠，桃井徹：各種振動ローラの締固め効果，道路建設，No.392，pp.44-48，1980.
- 4) 地盤工学会：土の締固め，p.78，2012.
- 5) 根本忠，日向正，井上利次：締固め機械の性能，創立20周年論文集，pp.26-47，建設機械化研究所，1984.
- 6) 横田聖哉，中村洋丈：高速道路における小型施工機械を用いた締固め特性，建設の施工企画，No.717，pp.14-19，2009.

第2章 小型締固め機械の種類と特徴

2.1. はじめに

小型締固め機械による締固め施工が、現状あまり合理的に行われていない理由の一つに、小型締固め機械の知識が現場に不足していることが考えられる。筆者の経験でも、小型締固め機械の種類やその機械的特徴などは、施工現場ではあまり知られておらず、したがって適切な機械選定を行う必要性も理解されていない場合が多い。

そこで本章では、現状日本国内で一般的に入手することができる小型締固め機械を、その機械的特徴から4種類に分類し、特徴などを整理することとした。さらに各機種において国内および海外で一般的に普及している仕様を調査し、その中から代表的な仕様を明らかにした。また各機械は、現状様々な呼称にて呼ばれているが、ここでは一般的な呼称で表し、次章以降はこの呼称を使用することとした。

2.2. 小型締固め機械の分類

本研究では、小型締固め機械を「非搭乗型の締固め機械でハンドガイド式のもの」と定義することにする。ハンドガイド式とは、機械の後方に設置された「操作ハンドル」を人が操作しながら機械の後方を追従して歩いていく機械のことである。(写真-2.1)。



写真-2.1 ハンドガイド式締固め機械（ハンドガイドローラ）

この小型締固め機械は、日本建設機械要覧¹⁾などによると構造などから図-2.1に示す4種類に分類される。

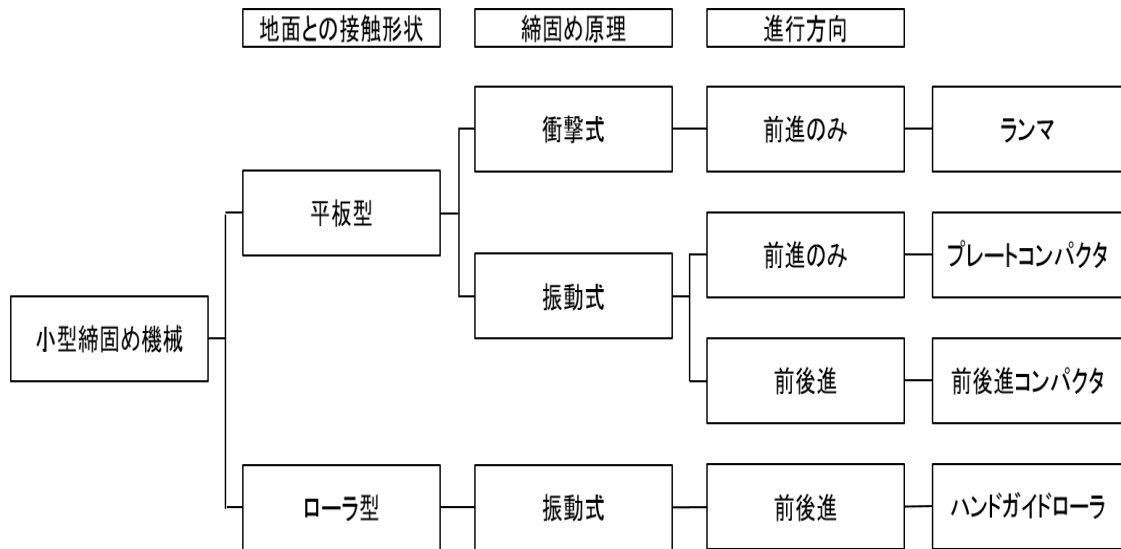


図-2.1 小型締固め機械の分類

次に小型締固め機械が実際の施工現場でどの程度使用されているか調査を行った。日本建設機械工業会の統計データ²⁾によると、2012年の国内メーカーによる締固め機械の生産台数は、ローラが4,277台、平板型締固め機械が61,379台となっておりおおよそ1:14の比率となっている。このローラの生産台数は、大型締固め機械（振動ローラやタイヤローラなど）と小型締固め機械の一つであるハンドガイドローラ（図-2.1参照）を合わせた数字であり、大型締固め機械の生産台数は4,277台より少ない数字であることが言える。また大型締固め機械に平板型締固め機械は存在しないため、61,379台はすべて小型締固め機械であるランマ、プレートコンパクタ、前後進コンパクタ（図-2.1参照）の生産台数を表している。したがって、大型締固め機械と小型締固め機械の生産台数は1:14以上の差があると推定され、施工現場では小型締固め機械が大型締固め機械より多数使用されていると考えられる。このことから小型締固め機械の研究を行うことは必要性が高いといえる。

2.3.に各小型締固め機械の構造的特徴を、2.4.に一般的な仕様（質量など）について述べる。

また、図-2.1にて締固め原理が振動式である締固め機械は、機械内部に「起振体」と呼ばれる偏心重りを装備している。この「起振体」をエンジン動力にて高速で回転させることにより、機体に振動力が発生する仕組みとなっている。

2.3. 各小型締固め機械の特徴

2.3.1 プレートコンパクタ



図-2.2 プレートコンパクタ³⁾

平板の上にエンジンと1軸の起振体を装備した機械で、自重と起振体の振動力により締固めを行う。

また起振体からの遠心力により前進方向にのみ走行する。(起振体が前進方向に回転しているため、遠心力によって機体が浮いた時に前進方向の遠心力を受ける(図-2.3)).

オペレータが走行速度の調整を行うことはできない。

小さく細かくジャンプしながら締固めを行っているため、ハンドリングは容易である。

平板型締固め機械であり、ジャンプをしているため硬い地盤上で運転すると機械本体や地盤に損傷を与える可能性があるため、コンクリートや固化したアスファルト上などを自走することはできない。そのため自走にて現場間や運搬車からの移動をすることはできないが、写真-2.2のような移動用オプションがあるため、移動は容易である。

起振力が小さく、また散水機能を装備することができ、メーカーとしては基本的に敷き均し直後のアスファルト転圧用として販売している。

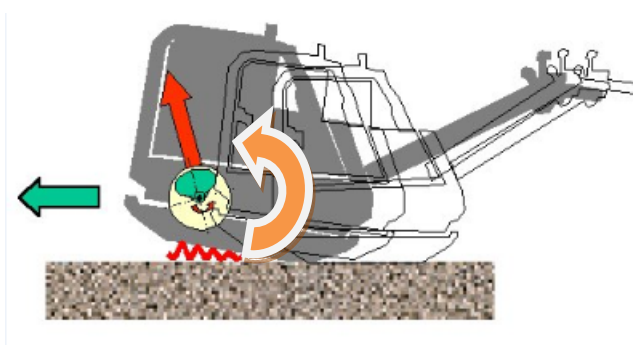


図-2.3 プレートコンパクタ走行原理³⁾



写真-2.2 プレートコンパクタ
移動オプション⁴⁾

2.3.2 ランマ

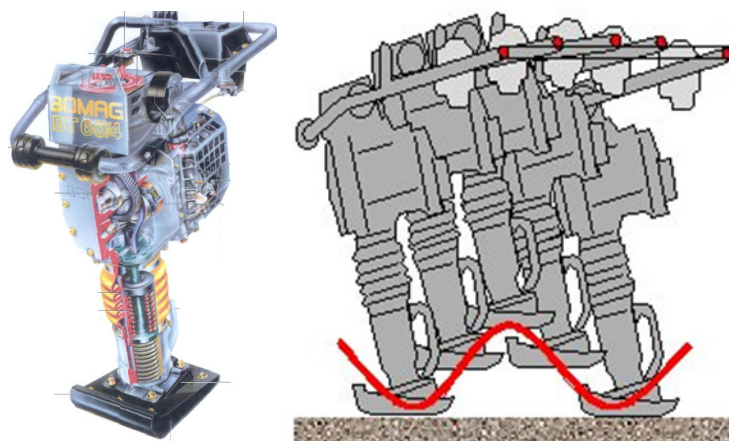


図-2.4 ランマ³⁾

エンジンの回転力をクランクで上下運動に変換し、スプリングを介してプレートに伝達し、その上下運動の衝撃力にて締固めを行う。

軸が前方に傾いているため、斜め前方にジャンプを行うことになり、前進方向にのみ走行することができる。

オペレータが走行速度の調整を行うことは基本的にできない。

ジャンプしながら締固めを行っているため、ハンドリングは容易であるが、跳ね上がり高さが他機種と比べると高いため、操作に慣れが必要である。

プレートコンパクタと同様な理由でコンクリートやアスファルト上などを自走することはできないため自走にて現場間や運搬車からの移動をすることはできない。しかし写真-2.3 の様な移動用オプションがあるため現場間や運搬車からの移動は容易である。



写真-2.3 ランマ移動オプション⁴⁾

2.3.3 前後進コンパクタ

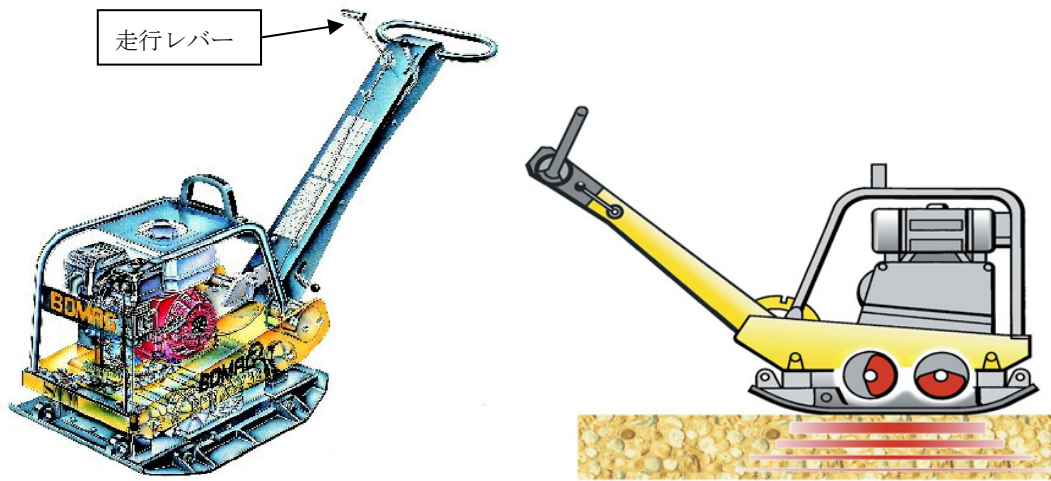


図-2.5 前後進コンパクタ³⁾

平板の上にエンジンと2軸の起振体を装備した機械で、自重と起振体の振動力により締固めを行う。

また操作ハンドル装備された「走行レバー」を操作することによって2軸起振体のタイミングを変化させ、前後進することが可能である(図-2.6)。また走行速度も「走行レバー」の操作によりある程度コントロールすることが可能である。

小さく細かくジャンプしながら締固めを行っているため、ハンドリングは容易であるが、重量が重くサイズが大きいため、操作には注意が必要である。

プレートコンパクタと同様な理由でコンクリートやアスファルト上などを自走することはできないため自走にて現場間や運搬車からの移動をすることはできない。重量も重いため、現場間や運搬車からの移動には移動式クレーンなどが必要である。

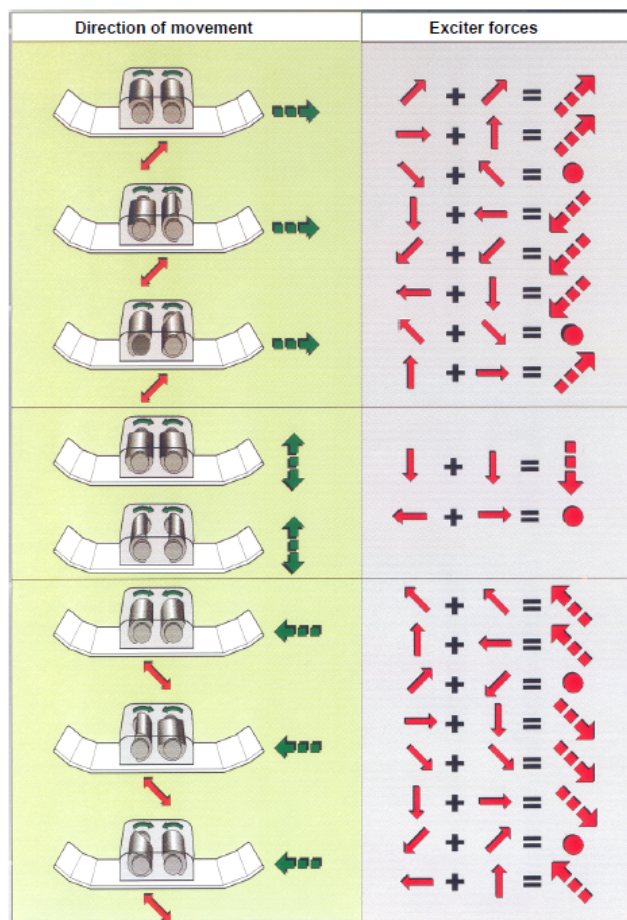


図-2.6 前後進コンパクタ走行原理³⁾

2.3.4 ハンドガイドローラ

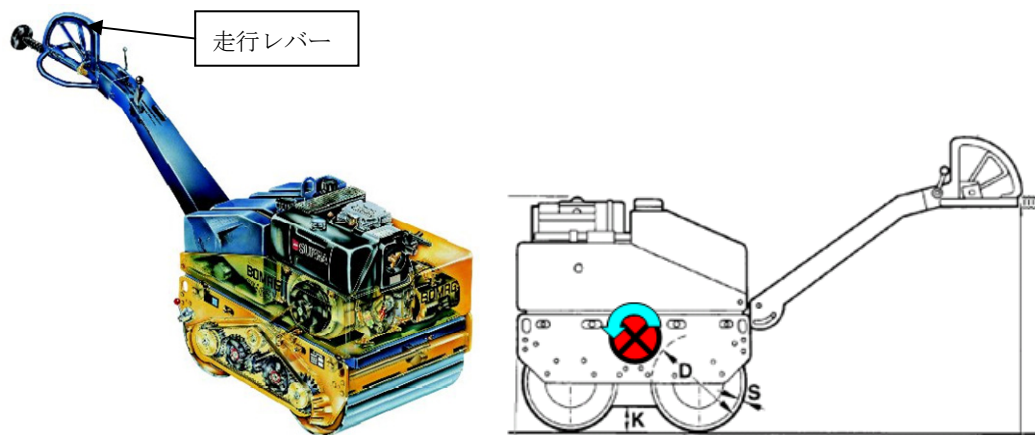


図-2.7 ハンドガイドローラ³⁾

鉄輪と駆動機構，および振動起振体を装備した非搭乗型の小型振動ローラである。

操作ハンドル装備された「走行レバー」を操作することによって前後進することが可能である。また走行速度も「走行レバー」の操作によりコントロールすることが可能である。

重量が重く，操舵するためにはハンドルを押し引きしてローラを引きずる必要があるため，ハンドリングは容易ではない。

ローラ式であるため振動を切ればコンクリートやアスファルト上も自走することができ，現場間や運搬車からの移動は容易である。

起振力が小さく，散水機能を標準装備しており，メーカーとしては基本的にアスファルト転圧用として販売している。

2.3.5 まとめ

以上の分類をまとめると，表-2.1 のようになる。

表-2.1 小型締固め機械分類表

呼称	プレートコンパクタ	ランマ
		
締固め原理	振動力	衝撃力
走行方向	前進のみ	前進のみ
ハンドリングの容易さ	非常に容易	容易
現場間等移動の容易さ	容易	容易
メーカー推奨使用工種	アスファルト舗装	土工
別の呼称		タンパ
呼称	前後進コンパクタ	ハンドガイドローラ
		
締固め原理	振動力	振動力
走行方向	前後進	前後進
ハンドリングの容易さ	容易	困難
現場間等移動の容易さ	困難	容易
メーカー推奨使用工種	土工	アスファルト舗装
別の呼称	バイブロコンパクタ	1tonローラ

2.4. 各機種における代表的な仕様

2.3.にて各機種の特徴について述べたが、各機種においても様々な仕様の機械が存在している。そこで各機種においてどのような仕様が存在するのか調査を行った。さらにその中で最も一般的に普及している仕様を調査し、その結果を基に第3章における対象仕様を決定することとした。

調査はまず、小型締固め機械メーカー国内大手4社（酒井重工業（株）、日立建機（株）、三笠産業（株）、（株）明和製作所）、および海外大手4社（AMMANN（スイス）、BOMAG（ドイツ）、WACKER-NEUSON（ドイツ）、Weber-mt（ドイツ））のカタログ^{4)~11)}（2014年3月現在）を調査し、国内および海外で販売している機械の仕様を調査した。これにより全世界で販売されている仕様の範囲や特徴などをほぼ明らかにすることができる。さらに販売されている仕様の範囲から、最も一般的に施工現場で使用されている機械の仕様を絞り込むために、建設機械レンタル業大手6社（（株）アクティオ、（株）カナモト、太陽建機レンタル（株）、西尾レントオール（株）、（株）レンタルのニッケン、（株）ヨシカワ）のカタログ^{12)~17)}（2014年3月現在）を基に、レンタル業者が保有している小型締固め機械の仕様を調査した。国土交通省統計資料¹⁸⁾によると、23年度におけるローラ販売台数の内、建設機械リース・レンタル業者向けが約80%と非常に高い割合となっており、小型締固め機械でも同様な高い割合であることが推察される。したがって、建設機械レンタル業者が保有する機械の仕様を調査することにより、建設現場で一般に使用されている機械の仕様を推定することが可能であると考えられる。

以下調査結果を示す。

2.4.1 プレートコンパクタ

プレートコンパクタの性能を表す仕様としては、機械質量、振動起振力、振動数、締固め幅が挙げられる。図-2.8、2.9、2.10に小型締固め機械メーカー国内大手4社および海外大手4社のカタログ^{4)~11)}から調査した、機械質量に対する振動起振力、振動数、締固め幅の関係を示す。

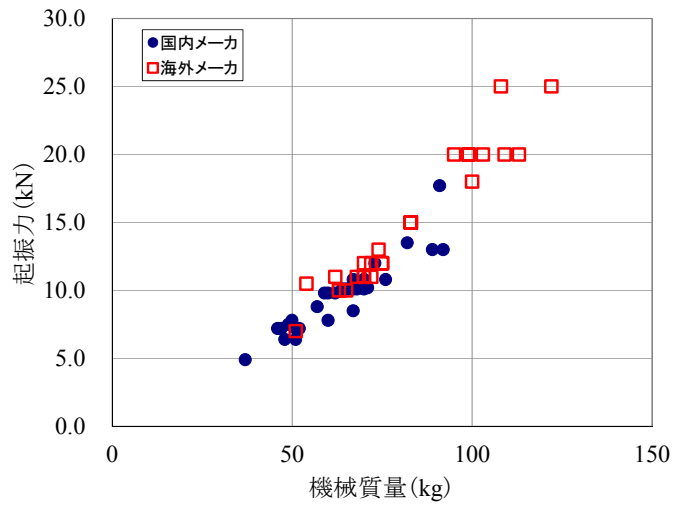


図-2.8 機械質量－起振力（プレートコンパクタ）

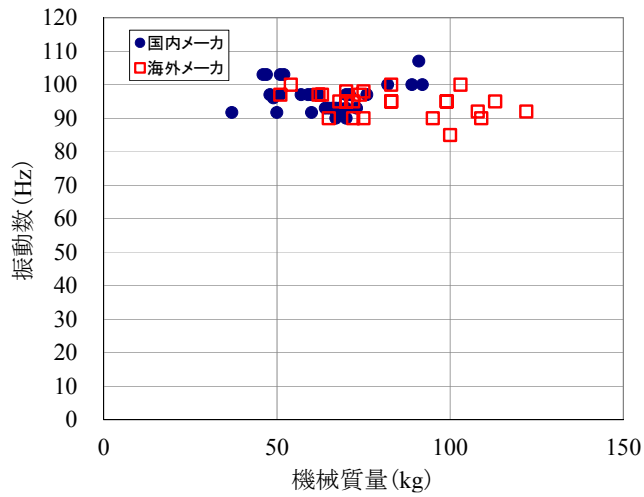


図-2.9 機械質量－振動数（プレートコンパクタ）

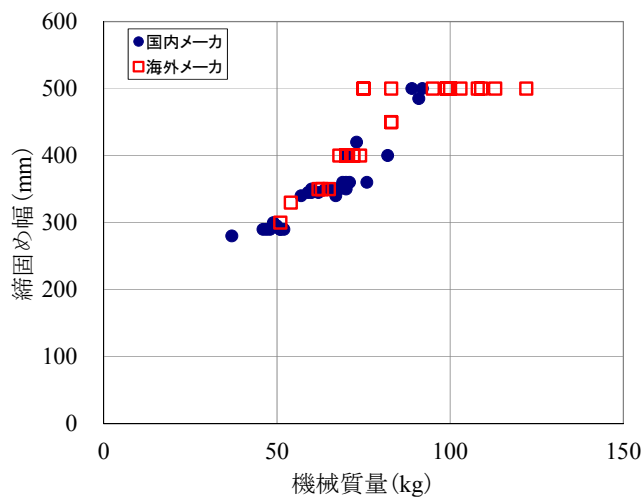


図-2.10 機械質量－締固め幅（プレートコンパクタ）

図-2.8, 2.9, 2.10 より, 販売されている重量クラスは, 国内メーカーでは約 30 kg~90 kg, 海外メーカーでは約 50 kg~120 kg であることがわかる.

次に機械質量に対する各仕様の相関を見ると, まず図-2.8 より, 機械質量が増加すると起振力も増加しており, 両者には一定の相関関係があることがわかる. また図-2.9 より, 機械質量にかかわらず振動数はおおむね 90 Hz~100 Hz 程度であることがわかる. さらに図-2.10 より, 機械質量が約 80 kg 以下の範囲では, 機械質量が増加すると締固め幅も増加しており, 両者には一定の相関関係があるが, 機械質量が約 80 kg を超えると, 締固め幅は 500 mm に固定されることわかる.

図-2.8, 2.9, 2.10 を用いることにより, 現在市販されているプレートコンパクタにおいて機械質量が決定されれば, 他の仕様も概ね推定することが可能といえる. そこで, 建設機械レンタル業大手 6 社が保有するプレートコンパクタ機械質量の分布をカタログ^{12)~17)}から調査すると, 図-2.11 のようになる.

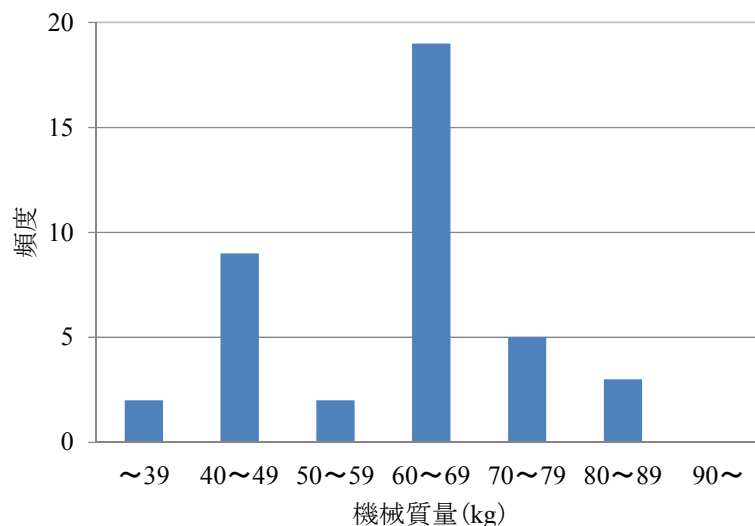


図-2.11 レンタル業社が保有するプレートコンパクタ機械質量の分布

図-2.11 より, 機械質量 60 kg~69 kg が, レンタル業者が最も多く保有しているプレートコンパクタの仕様であり, 建設現場で最も一般的に使用されているプレートコンパクタの仕様と推定することができる.

以上より次の表-2.2 に示す機械を, 国内で最も一般的に使用されているプレートコンパクタの代表として, 第 3 章における対象とすることとした.

表-2.2 プレートコンパクタ代表仕様

型式 (メーカー)	MVC-F60 (三笠産業)
質量(kg)	66
起振力(kN)	10.1
振動数(Hz)	93
締固め幅(mm)	350

2.4.2 ランマ

ランマの性能を表す仕様としては、機械質量、衝撃数、締固め幅が挙げられる。図-2.12、2.13 に小型締固め機械メーカー国内大手 4 社および海外大手 4 社のカタログ^{4)~11)}から調査した、機械質量に対する衝撃数、締固め幅の関係を示す。

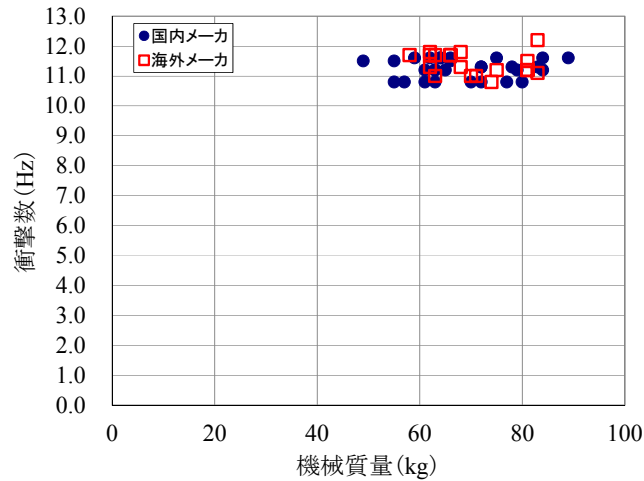


図-2.12 機械質量－衝撃数 (ランマ)

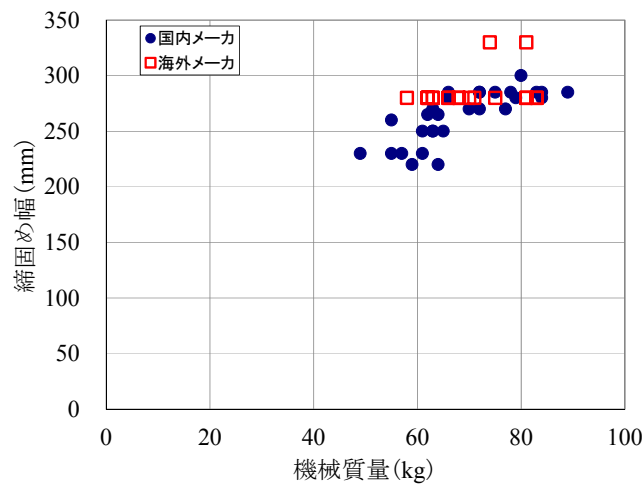


図-2.13 機械質量－締固め幅 (ランマ)

図-2.12, 2.13 より, 販売されている重量クラスは, 国内メーカーでは約 50 kg~90 kg, 海外メーカーでは約 55 kg~85 kg であることがわかる.

次に機械質量に対する各仕様の相関を見ると, まず図-2.12 より機械質量にかかわらず衝撃数はおおむね 10.8 Hz~12 Hz の範囲であることがわかる. また図-2.13 より, 機械質量が約 65 kg 以下の範囲では締固め幅は概ね 220 mm~270 mm の範囲であり, 機械質量が約 65 kg を超えると数機種を除いて締固め幅は概ね 270 mm~290 mm に固定されることわかる.

図-2.12, 2.13 を用いることにより, 現在市販されているランマにおいて機械質量が決定されれば, 他の仕様も概ね推定することが可能といえる. そこで, 建設機械レンタル業大手 6 社が保有するランマ機械質量の分布をカタログ^{12)~17)}から調査すると, 図-2.14 のようになる.

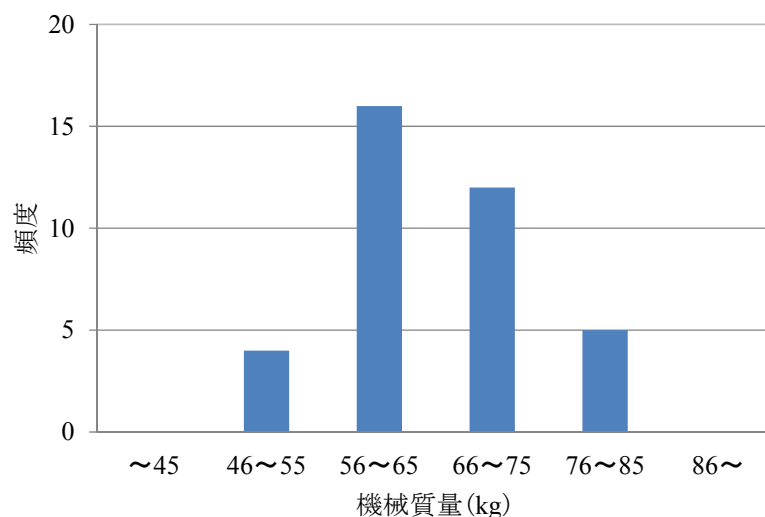


図-2.14 レンタル業社が保有するランマ機械質量の分布

図-2.14 より, 機械質量 56 kg~65 kg がレンタル業者が最も多く保有しているランマの仕様であり, 建設現場で最も一般的に使用されているランマの仕様と推定することができる.

以上より次の表-2.3 に示す機械を, 国内で最も一般的に使用されているランマの代表として, 第 3 章における対象とすることとした.

表-2.3 ランマ代表仕様

型式 (メーカー)	MT-55L (三笠産業)
質量(kg)	62
振動数(Hz)	11.2
締固め幅(mm)	265

2.4.3 前後進コンパクト

前後進コンパクトの性能を表す仕様としては、機械質量、振動起振力、振動数、締固め幅が挙げられる。図-2.15、2.16、2.17 に小型締固め機械メーカー国内大手4社および海外大手4社のカタログ^{4)~11)}から調査した、機械質量に対する振動起振力、振動数、締固め幅の関係を示す。なお、前後進コンパクトはオプションの拡張プレートの脱着によって締固め幅を変更できるものが多いが、本調査は拡張プレートを装備しない状態とした。

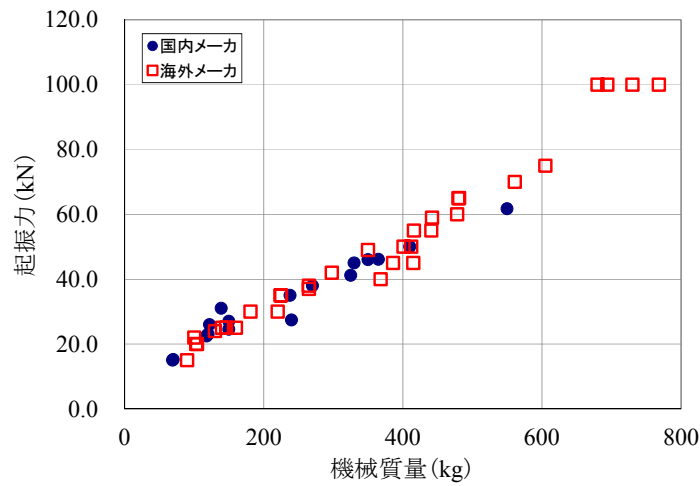


図-2.15 機械質量－起振力（前後進コンパクト）

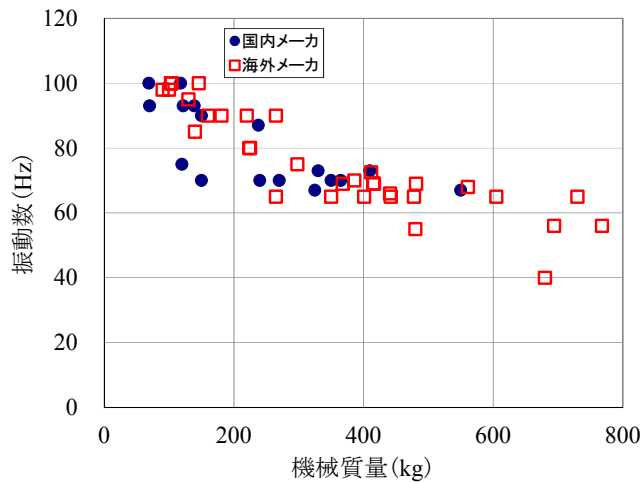


図-2.16 機械質量－振動数（前後進コンパクト）

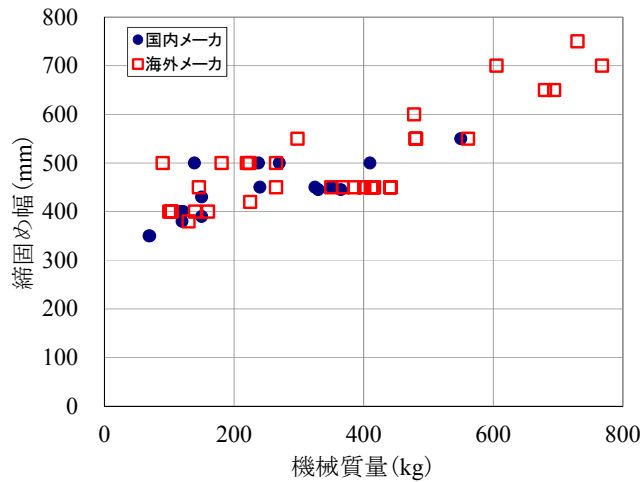


図-2.17 機械質量－締固め幅（前後進コンパクト）

図-2.15, 2.16, 2.17 より，販売されている重量クラスは，国内メーカでは約 70 kg～550 kg，海外メーカでは約 90 kg～770 kg であることがわかる．

次に機械質量に対する各仕様の相関を見ると，まず図-2.15 より，機械質量が増加すると起振力も増加しており，両者には一定の相関関係があることがわかる．また図-2.16 より，機械質量が増加すると振動数は減少しており，こちらも両者には一定の相関関係があることがわかる．さらに図-2.17 より，機械質量が増加すると，ばらつきは少し大きい締固め幅も増加しており，こちらも両者には一定の相関関係があることがわかる．

図-2.15, 2.16, 2.17 を用いることにより，現在市販されている前後進コンパクトにおいて機械質量が決定されれば，他の仕様も概ね推定することが可能といえる．そこで，建設機械レンタル業大手 6 社が保有する前後進コンパクト機械質量の分布をカタログ^{12)~17)}から調査すると，図-2.18 のようになる．

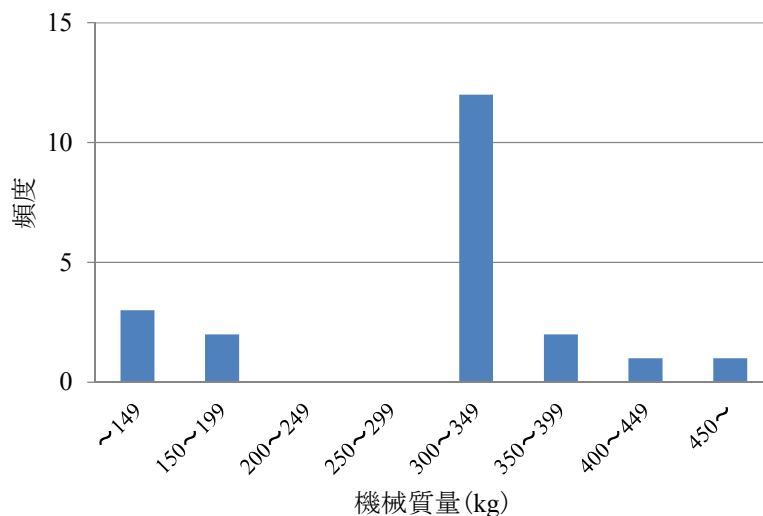


図-2.18 レンタル業社が保有する前後進コンパクト機械質量の分布

図-2.18 より、機械質量 300 kg～349 kg が、レンタル業者が最も多く保有している前後進コンパクトの仕様であり、建設現場で最も一般的に使用されている前後進コンパクトの仕様と推定することができる。

以上より次の表-2.4 に示す機械を、国内で最も一般的に使用されている前後進コンパクトの代表として、第 3 章における対象とすることとした。

表-2.4 前後進コンパクト代表仕様

型式 (メーカー)	MVH-306DS (三笠産業)
質量 (kg)	330
起振力 (kN)	45
振動数 (Hz)	73
締固め幅 (mm)	445

2.4.4 ハンドガイドローラ

ハンドガイドローラの性能を表す仕様としては、機械質量、振動起振力、振動数、締固め幅が挙げられる。図-2.19, 2.20, 2.21 に小型締固め機械メーカー国内大手 4 社および海外大手 4 社のカタログ^{4)~11)}から調査した、機械質量に対する振動起振力、振動数、締固め幅の関係を示す。

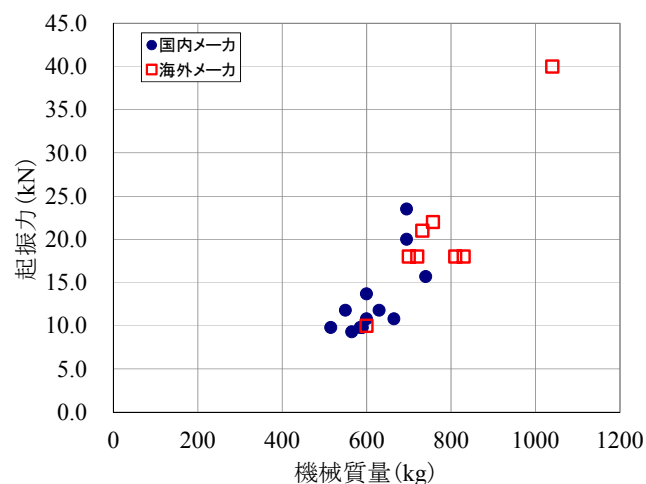


図-2.19 機械質量－起振力 (ハンドガイドローラ)

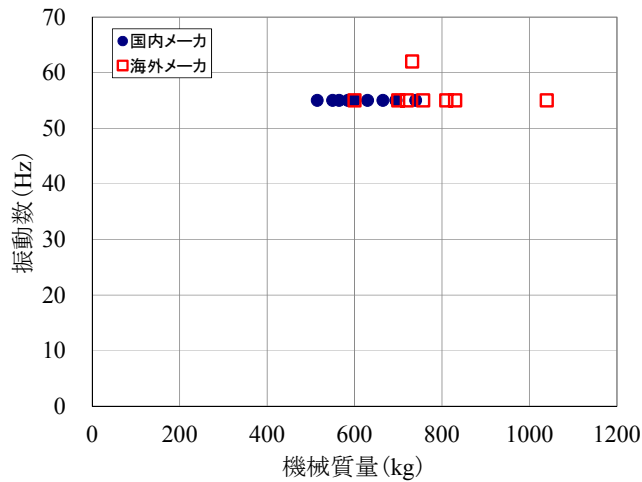


図-2.20 機械質量－振動数（ハンドガイドローラ）

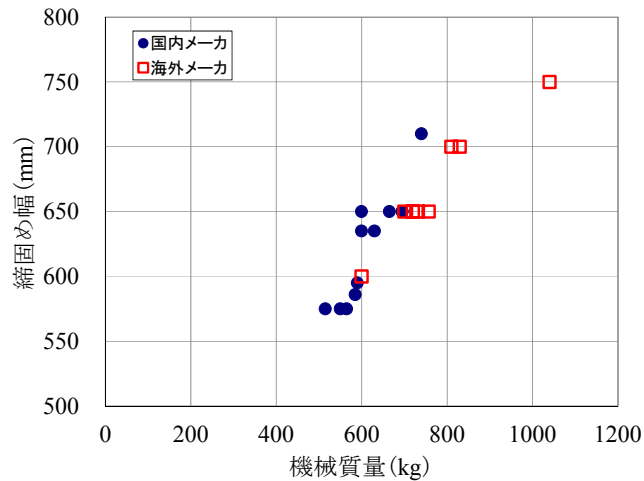


図-2.21 機械質量－締固め幅（ハンドガイドローラ）

図-2.19, 2.20, 2.21 より、販売されている重量クラスは、国内メーカーでは約 510 kg～750 kg, 海外メーカーでは約 600 kg～1,050 kg であることがわかる。

次に機械質量に対する各仕様の相関を見ると、まず図-2.19 より、機械質量が増加すると起振力も増加しており、両者には一定の相関関係があることがわかる。また図-2.20 より、機械質量にかかわらず、海外メーカーの 1 機種を除いて、すべての機械において振動数は 55 Hz であることがわかる。さらに図-2.21 より、機械質量が増加すると締固め幅も増加しており、両者には一定の相関関係があることがわかる。

図-2.19, 2.20, 2.21 を用いることにより、現在市販されているハンドガイドローラにおいて機械質量が決定されれば、他の仕様も概ね推定することが可能といえる。そこで、建設機械レンタル業大手 6 社が保有するハンドガイドローラ機械質量の分布をカタログ^{12)~17)}から調査すると、図-2.22 のようになる。

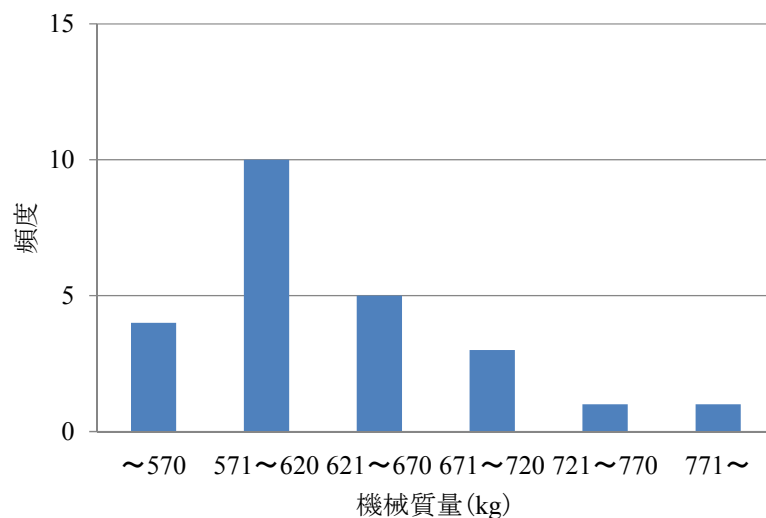


図-2.22 レンタル業社が保有するハンドガイドローラ機械質量の分布

図-2.22 より、機械質量 571 kg～620 kg が、レンタル業者が最も多く保有しているハンドガイドローラの仕様であり、建設現場で最も一般的に使用されているハンドガイドローラの仕様と推定することができる。

以上より次の表-2.5 に示す機械を、国内で最も一般的に使用されているハンドガイドローラの代表として、第 3 章における対象とすることとした。

表-2.4 ハンドガイドローラ代表仕様

型式 (メーカー)	MRH-600DS (三笠産業)
質量(kg)	600
起振力(kN)	10.8
振動数(Hz)	55
締固め幅(mm)	650

参考文献

- 1) 日本建設機械化協会：日本建設機械要覧 2010.
- 2) 日本建設機械工業会：建設機械生産台数統計 2012.
- 3) E.h.Rudolf Floss：Compaction Technology in Earthwork and Highway and Transportation Engineering, BOMAG, 2001.
- 4) 三笠産業株式会社：製品カタログ
- 5) 酒井重工業株式会社：製品カタログ
- 6) 日立建機株式会社：製品カタログ
- 7) 株式会社明和製作所：製品カタログ
- 8) AMMAN AG：製品カタログ
- 9) BOMAG GmbH：製品カタログ
- 10) Wacker-Neuson SE：製品カタログ
- 11) Weber MT, Inc.：製品カタログ
- 12) 株式会社アクティオ：製品カタログ
- 13) 株式会社カナモト：製品カタログ
- 14) 太陽建機レンタル株式会社：製品カタログ
- 15) 西尾レントオール株式会社：製品カタログ
- 16) 株式会社レンタルのニッケン：製品カタログ
- 17) 株式会社ヨシカワ：製品カタログ
- 18) 国土交通省：平成 23 年度建設機械動向調査, 2012.

第3章 小型締固め機械の締固め特性

3.1. はじめに

締固め機械の締固め能力は、締固め後の土の密度で確認することができる。そこで本章では、土木研究所実験ピット内に実際の狭隘部を模した実験フィールドを作成し、小型締固め機械にて実際に締固め施工を行い、締固め後の密度を測定することで小型締固め機械の締固め特性の明確化を行った。

本研究に類似した先行研究として、横田らが高速道路裏込め施工現場で行った調査結果がある¹⁾。これによると、ランマ、前後進コンパクタ、ハンドガイドローラを用い実際の高速道路施工現場での密度データを調査した結果、ランマ、前後進コンパクタの締固め能力が比較的高く、ハンドガイドローラの締固め能力はそれらより劣るということが報告されている。しかしながらこの研究では、対象機種にプレートコンパクタは含まれておらず、含水比も1種類のみで実験が行われ、深さ方向の密度変化の測定も行われていない。従って横田らの研究のみでは小型締固め機械の締固め特性を評価するには不十分であるといえる。

そこで本章での実験は、細粒分含有率の異なる複数の材料、複数の含水比、第2章で述べた代表的な仕様をもつ4種類の小型締固め機械にて行い、表面から30cm深さまでの密度を10cm毎に測定することを行った。また併せて、各機械の施工効率を把握するために、走行速度の測定も同時に行った。

3.2. 実験方法

3.2.1. 実験フィールド

本実験は幅5m×長さ44.8m×高さ4mの土木研究所土工実験棟実験ピットにて行った。実験ピットは側壁および底面を鉄筋コンクリートにて構成されている。図-3.1 および写真-3.1に実験ピットを示す。



図-3.1 実験ピット



写真-3.1 実験ピット

まず、ピット底面が実験に影響を与えないよう、実験ピット内に後述の表-3.1に示す土質(1)を用い、十分に締め固められた高さ3 mの基礎地盤を作成した。作成においては、材料の含水比を最適含水比(表-3.1参照)である16%になるよう調整し、層厚(仕上がり厚さ)0.3 m毎に盛り立て、10 tonタイヤローラにて8回締固めを行った。本条件にて締固めを行うことにより、締固め度95%以上の十分に締め固められた基礎地盤が得られた。次に、基礎地盤を利用して実際に小型締固め機械を用いて施工を行うような構造物近傍の現場を模した実験フィールドを作成した。実験フィールドは作成した基礎地盤の壁際に、後述の表-3.2に示す各締固め機械の接地幅に応じて設定された溝幅0.5 m~0.7 m×長さ25 m×深さ0.3 mの溝を掘削し、そこへ仕上がり厚さ0.3 mになるよう実験材料を盛り立てて作成した。図-3.2および写真-3.2に実験フィールドを示す。

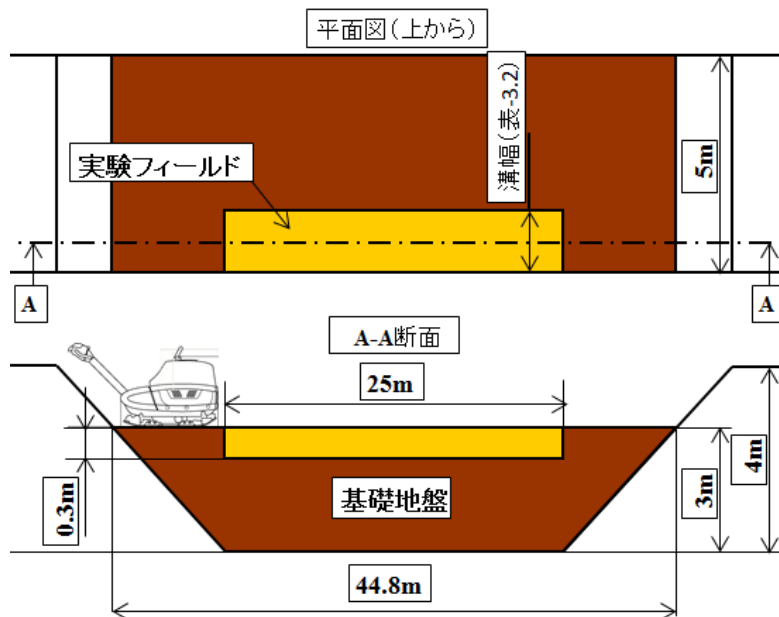


図-3.2 実験フィールド



写真-3.2 実験フィールド

実験材料盛り立て後の初期状態（小型締固め機械による締固め施工を始める前の状態）については、実際の施工現場ではランマ・プレートコンパクタを使用するような狭い場所では人による足踏み，前後進コンパクタ・ハンドガイドローラを使用するような比較的広い場所ではミニショベルなどによるクローラ転圧が行われていることから，これらの状況にあわせ，ランマ・プレートコンパクタを使用する場合は足踏み，前後進コンパクタ・ハンドガイドローラを使用する場合は0.1 m³クラス油圧ショベル（自重2.7 ton）にてクローラ締固めを2回（往復）行った状態を初期状態とした．写真-3.3に初期状態を示す．



写真-3.3 初期状態

3.2.2. 実験材料

本実験では，一般的に盛土施工に使用される材料として，細粒分含有率が低い2種類の砂質系材料（土質(1)，(2)）と，細粒分含有率が高くあまり盛土施工に適していない1種類の粘性系材料（土質(3)）の計3種類の材料で行った．表-3.1に材料の物理特性を，図-3.3

に粒径加積曲線を，図-3.4～3.6に締固め曲線（JIS A 1210 A-c 法による）を示す。

表-3.1 土の物理特性

	土質(1)	土質(2)	土質(3)
土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	2.675	2.647	2.665
最大粒径 D_{max} (mm)	9.5	9.5	4.75
細粒分含有率 F_c (%)	15.3	4.3	57.1
最大乾燥密度 ρ_{dmax} (g/cm ³)※	1.674	1.571	1.531
最適含水比 w_{opt} (%)※	16.0	18.2	24.9

※：JIS A 1210 A-c 法による

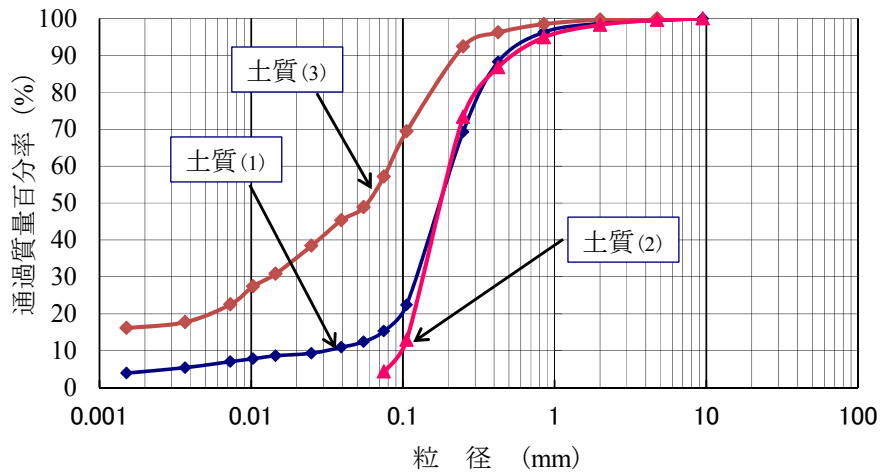


図-3.3 粒径加積曲線

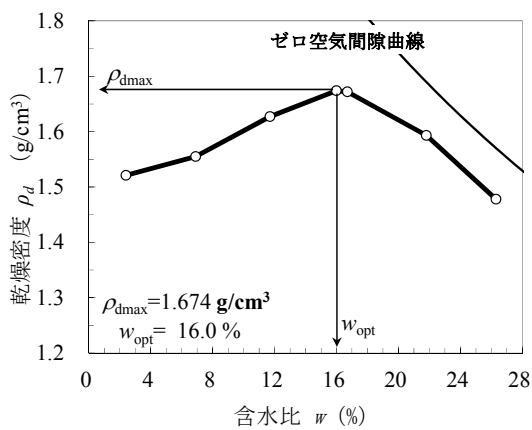


図-3.4 締固め曲線（土質(1)）

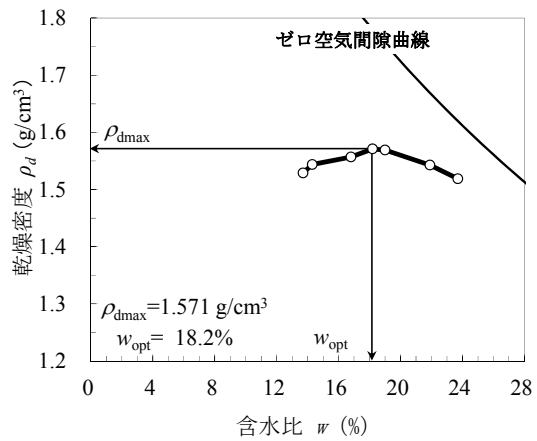


図-3.5 締固め曲線（土質(2)）

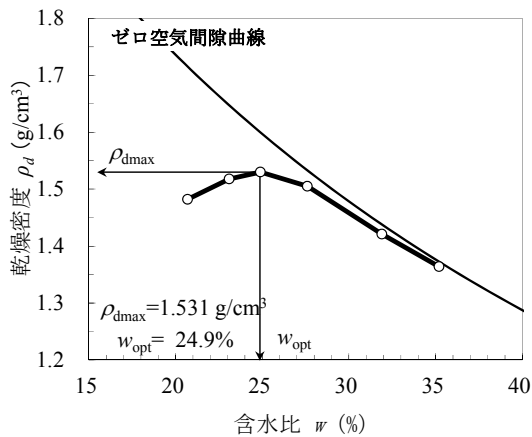


図-3.6 締固め曲線（土質(3)）

3.2.3. 使用小型締固め機械

本実験では、第2章の結果を基に、小型締固め機械4種類においてそれぞれ国内で最も一般的に普及しているクラスの機械を代表として用い、実験を行った。表-3.2に実験に用いた機械の仕様を示す。

表-3.2 締固め機械仕様

	プレート コンパクタ	ランマ	前後進 コンパクタ	ハンドガイド ローラ
質量(kg)	66	62	330	600
起振力(kN)	10.1	—	45	10.8
振動数（ランマは衝撃数）(Hz)	93	10.7~11.6	73	55
エンジン	ガソリン	ガソリン	ディーゼル	ディーゼル
エンジン出力(kW)	3.2	2.1	4.8	4.6
締固め幅(m)	0.35	0.265	0.445	0.65
実験フィールド溝幅(m)	0.7	0.55	0.5	0.7

3.2.4. 実験パターン

本実験では、3.2.2.に示した3種類の土質を使用した。また施工含水比の影響を調査するため、土質(1)において4種類の含水比にて実験を行い、他の土質では自然含水比（購入時含水比）に近い値で行った。表-3.3に実験パターンを示す。

表-3.2 実験パターン

	実験 ケース1	実験 ケース2	実験 ケース3	実験 ケース4	実験 ケース5	実験 ケース6
使用材料	土質(1)	土質(1)	土質(1)	土質(1)	土質(2)	土質(3)
実験時含水比	11%	15%	16%	18%	16%	29%
使用締固め機械	ランマ プレートコンパクタ 前後進コンパクタ ハンドガイドローラ					

3.2.5. データ測定方法

3.2.1.に示した実験フィールド上を各小型締固め機械にて16回(8往復)走行を行い、締固め施工を行った。機械はすべて定格状態にて運転するものとし、速度調整が可能な機械である前後進コンパクタ・ハンドガイドローラは最高速度に設定した(走行レバーFull状態)。走行はすべての機械において両端でUターンをして前進にて走行し、また側壁との間が開かないよう側壁に沿って走行した(写真-3.4)。これにより、側壁と締固め機械の位置関係がすべて同一であるといえる。また実験フィールド作成に使用したミニショベルの最小掘削幅が0.5mであるので、ランマとプレートコンパクタでは、それぞれの締固め幅の約2倍の幅を持つ実験フィールドを作成し、側壁側と地盤側の2レーンの締固めをラップ幅が極力0になるよう行った。その際、地盤側を先に走行することにより、側壁側を走行するときの条件を他機種と極力同様にした。



写真-3.4 走行状況

実験データとしては、各走行時の走行速度と、0、2、4、6、8、12、16回走行後の密度を測定した。

走行速度は実験フィールド内10mの所要時間をストップウォッチで測定した。

また密度測定は、写真-3.5に示す内径0.1m、高さ0.1mのコアサンプラーを用い、地表面～0.1m、0.1m～0.2m、0.2m～0.3m、のそれぞれの深さにおける密度を測定した。この際、密度は側壁に近い側と遠い側では厳密には異なっていると考えられるが、本研究は機械毎の締固め能力の比較を目的としていることから、機械が側壁に沿って走行している際の締固め幅中央部を代表値として密度測定を行った。また測定点は実験フィールド長さ25m区間内から上記走行速度を測定した10mを除いた区間の3点で行い平均値を採用することとし、密度測定は、「コアカッターによる土の密度試験方法」²⁾に従った。この際、一度測定するため掘削した場所では、その後の密度測定を行わないこととした。



写真-3.5 コアサンプラー

3.3. 密度測定結果による締固め性能の検討

3.3.1. 密度測定結果

実験にて取得した密度測定結果を、図-3.7～3.24に示す。各図において、各土質における締固め度95%を破線で、90%を2点鎖線で示す。

なお、実験ケース4におけるランマ、前後進コンパクタ、ハンドガイドローラ、および実験ケース6における前後進コンパクタは、トラフィカビリティ不足により走行不可となり、データの取得はできなかった。

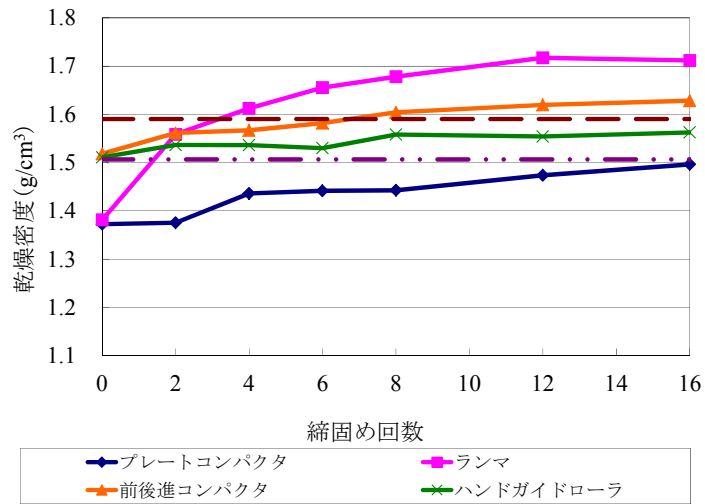


図-3.7 締固め回数-乾燥密度 (地表面～0.1 m : 実験ケース 1)

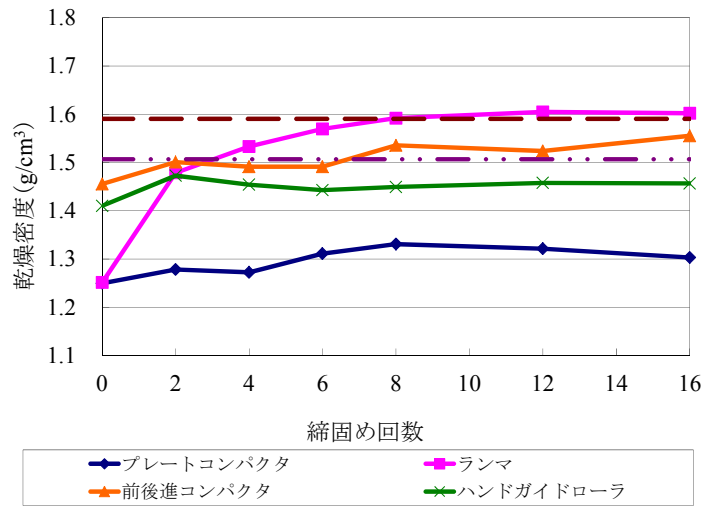


図-3.8 締固め回数-乾燥密度 (0.1 m～0.2 m : 実験ケース 1)

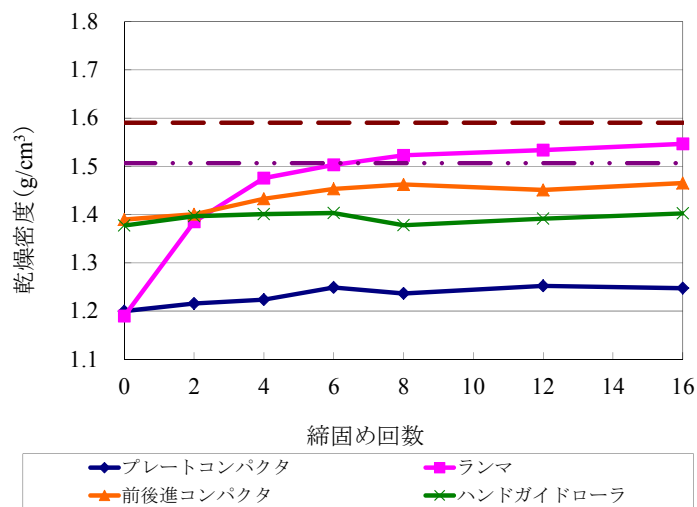


図-3.9 締固め回数-乾燥密度 (0.2 m～0.3 m : 実験ケース 1)

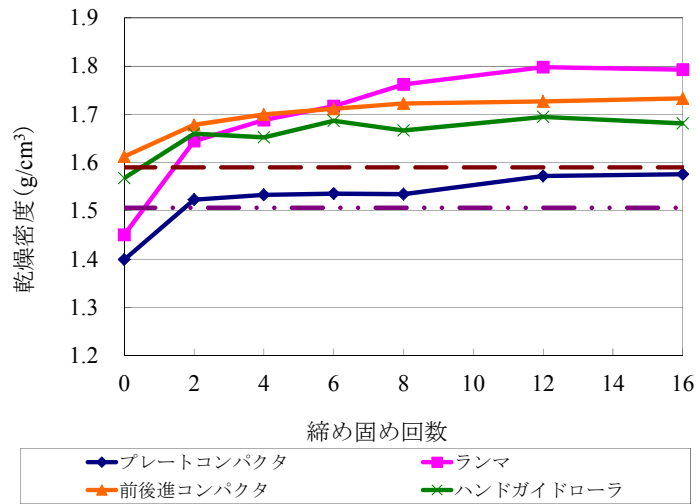


図-3.10 締め固め回数-乾燥密度 (地表面～0.1 m : 実験ケース 2)

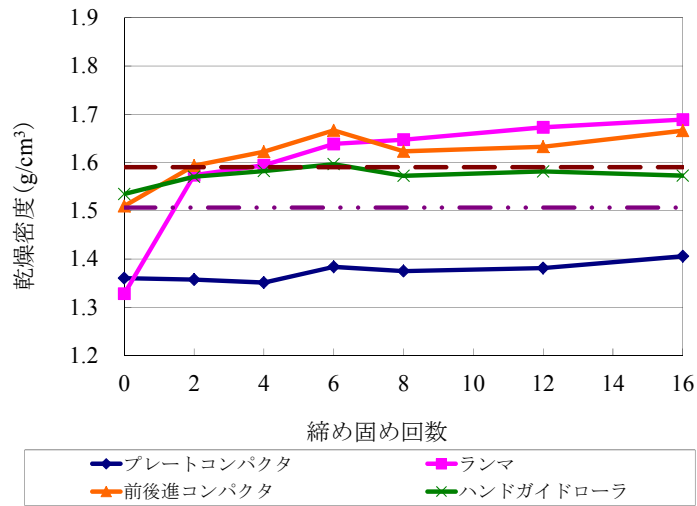


図-3.11 締め固め回数-乾燥密度 (0.1 m～0.2 m : 実験ケース 2)

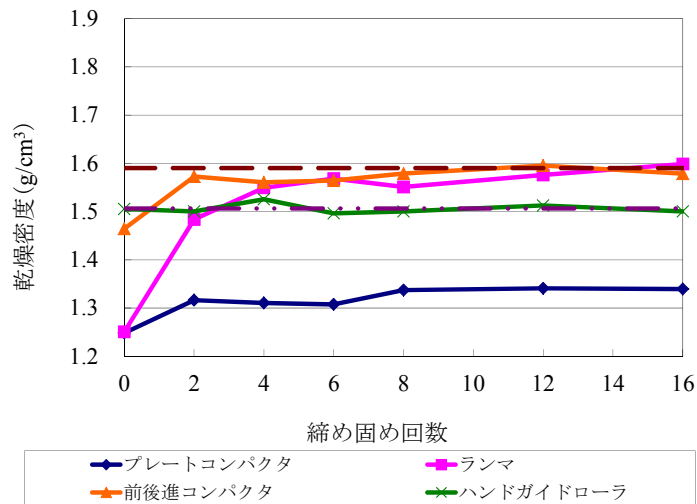


図-3.12 締め固め回数-乾燥密度 (0.2 m～0.3 m : 実験ケース 2)

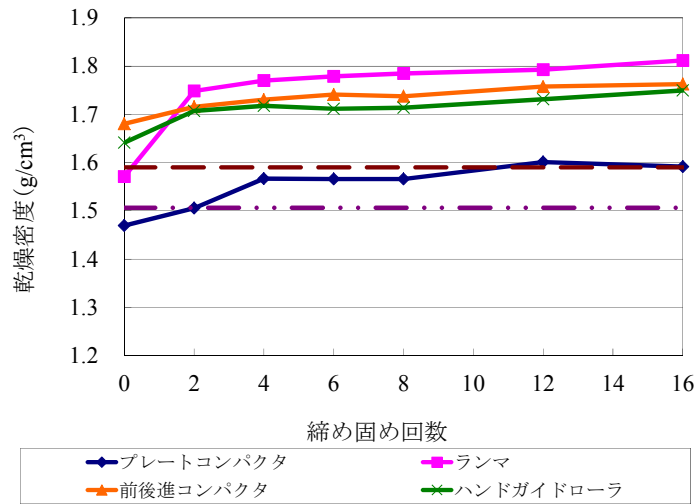


図-3.13 締め固め回数-乾燥密度 (地表面～0.1 m : 実験ケース 3)

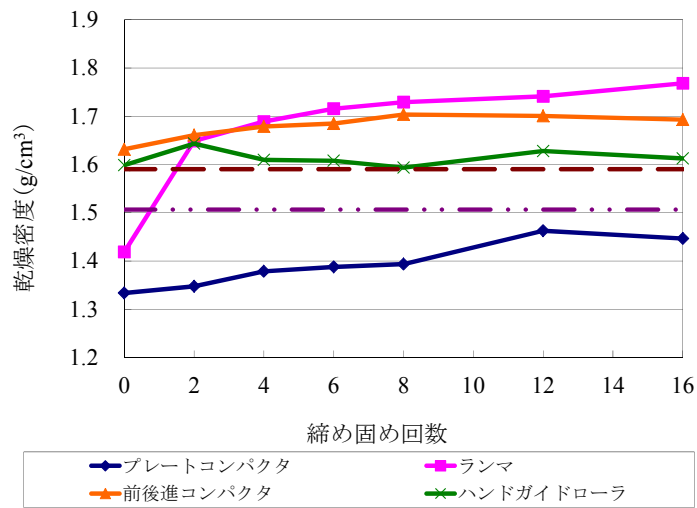


図-3.14 締め固め回数-乾燥密度 (0.1 m～0.2 m : 実験ケース 3)

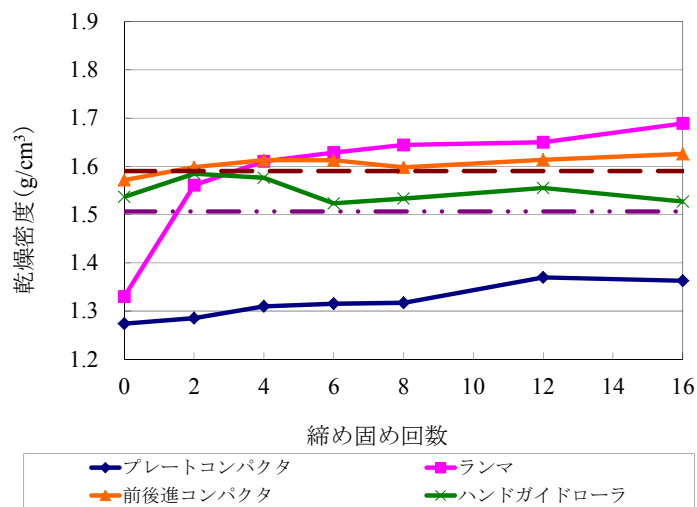


図-3.15 締め固め回数-乾燥密度 (0.2 m～0.3 m : 実験ケース 3)

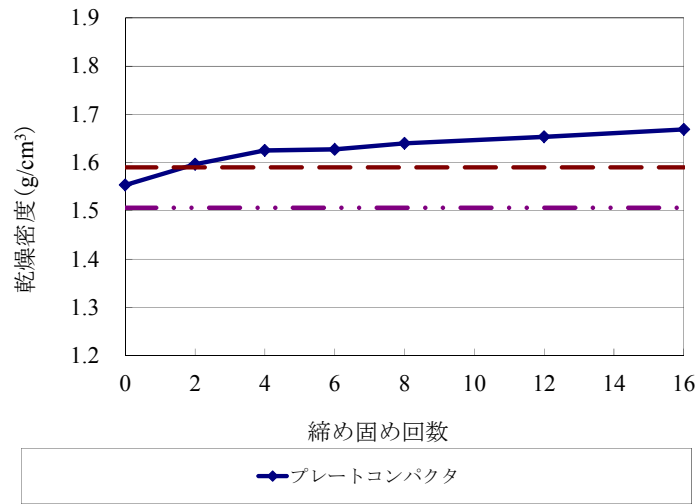


図-3.16 締め固め回数-乾燥密度 (地表面～0.1 m : 実験ケース 4)

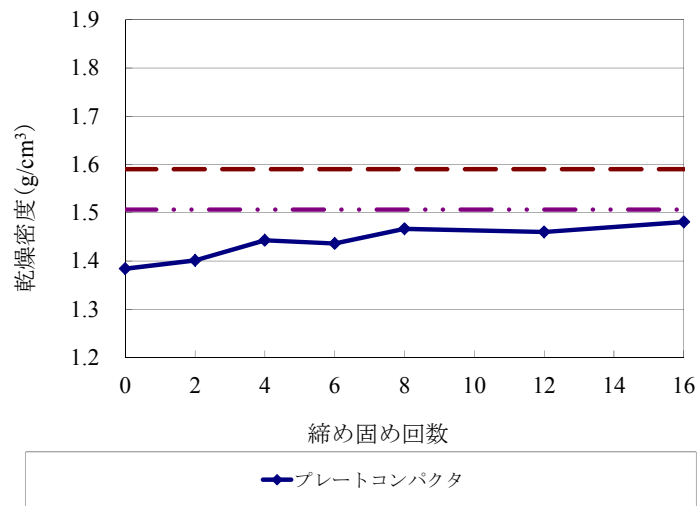


図-3.17 締め固め回数-乾燥密度 (0.1 m～0.2 m : 実験ケース 4)

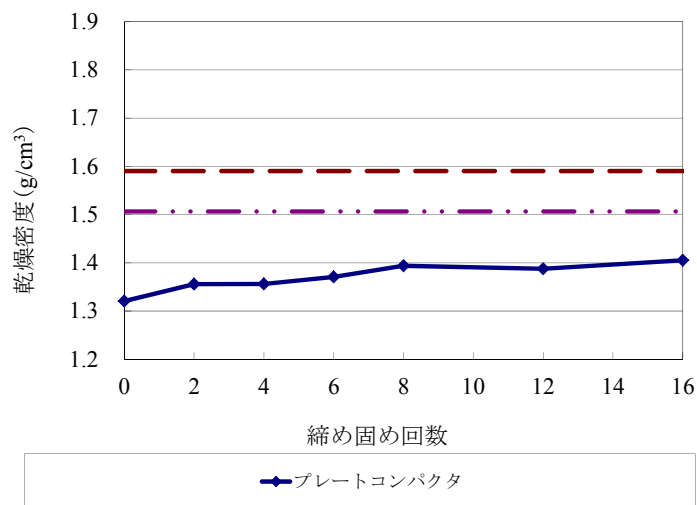


図-3.18 締め固め回数-乾燥密度 (0.2 m～0.3 m : 実験ケース 4)

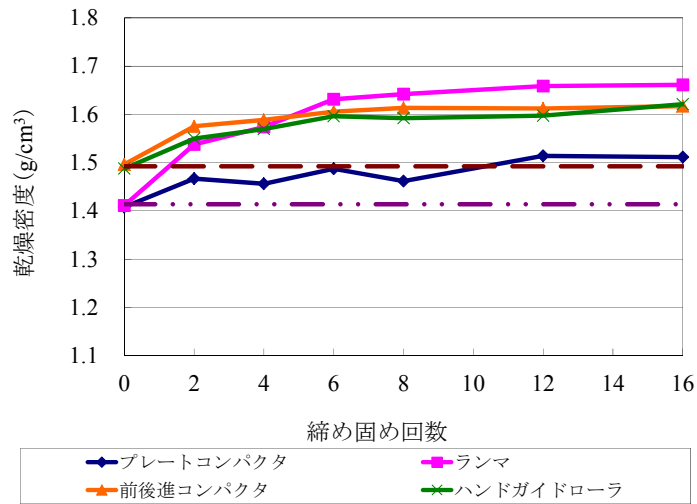


図-3.19 締め固め回数-乾燥密度 (地表面～0.1 m : 実験ケース 5)

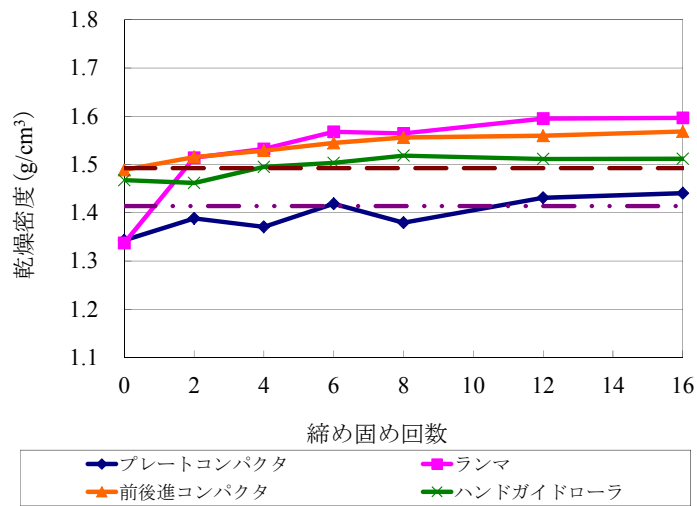


図-3.20 締め固め回数-乾燥密度 (0.1 m～0.2 m : 実験ケース 5)

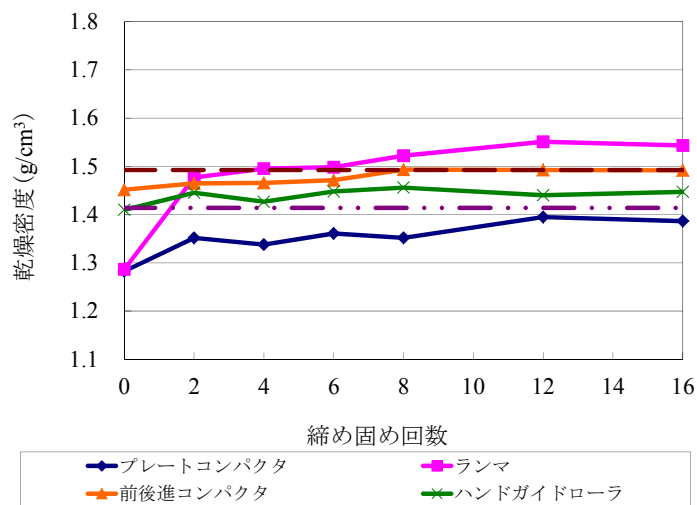


図-3.21 締め固め回数-乾燥密度 (0.2 m～0.3 m : 実験ケース 5)

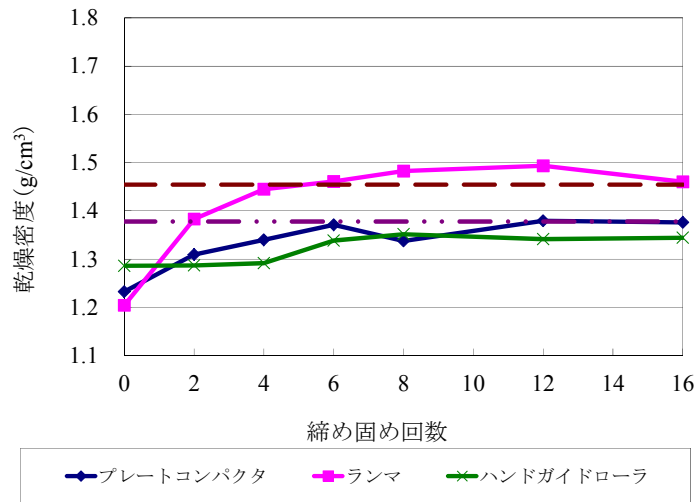


図-3.22 締め固め回数-乾燥密度 (地表面～0.1 m : 実験ケース 6)

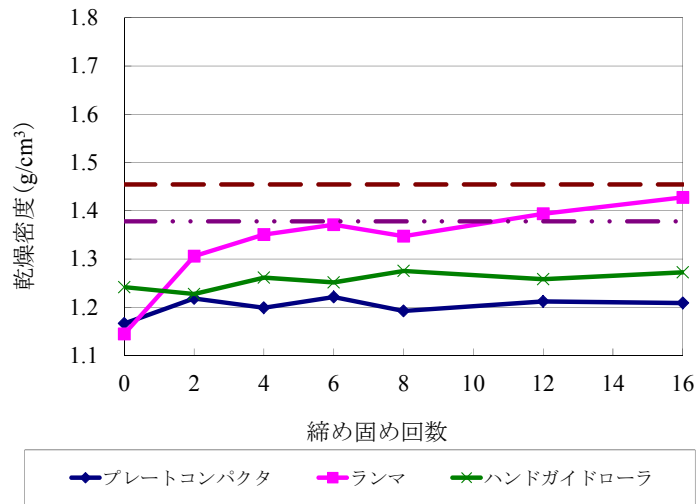


図-3.23 締め固め回数-乾燥密度 (0.1 m～0.2 m : 実験ケース 6)

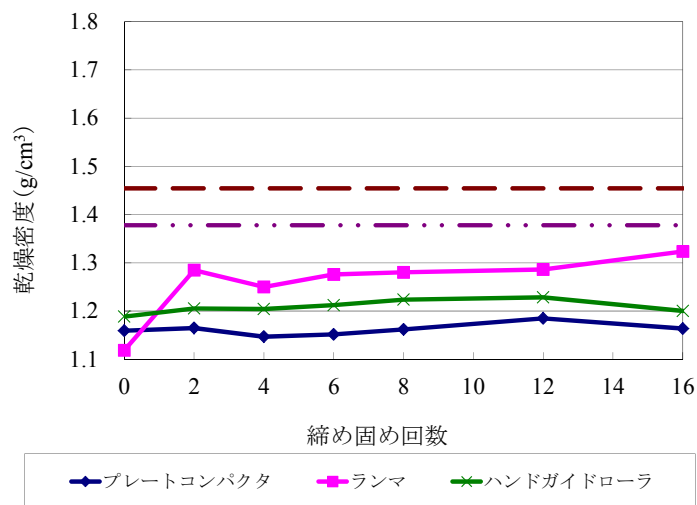


図-3.24 締め固め回数-乾燥密度 (0.2 m～0.3 m : 実験ケース 6)

図-3.7～図-3.24によると、ほぼすべての密度測定結果において乾燥密度は締固め初期に急激に上昇し、概ね締固め回数6～8で上昇が収まり、その後締固め回数が増加しても密度はほぼ一定となっていることがわかる。同様の傾向は大型機械による過去の研究においても得られている^{3)~6)}。これは、密度が上昇することにより土粒子の移動を阻害している土粒子間せん断抵抗が大きくなることを表していると考えられる。すなわち、締固め機械によって発生する土中応力が密度上昇とともに大きくなった土粒子間せん断抵抗に打ち勝つことができなくなると、締固めを繰り返してもそれ以上密度が上昇しないことを表していると考えられる。

以下本章では、各小型締固め機械の締固め能力を比較・検討するために、外力による土粒子の再配置が完全に終了した状態での密度値として、実際の施工現場も鑑み、8回締固め後の乾燥密度値を用いて検討を行うこととする（以下「到達密度」と呼ぶ）。

3.3.2. 初期状態の影響についての検討

3.2.1.に示したとおり、本実験を行う際、その初期状態は実際の施工現場を鑑みて、ランマ・プレートコンパクタを使用する場合は足踏み、前後進コンパクタ・ハンドガイドローラを使用する場合はミニショベルにてクローラ締固めを行った状態としている。前節で説明した到達密度にて各締固め機械の締固め性能を比較・検討するためには、その初期状態の相違が到達密度に及ぼす影響について調査する必要がある。

既存の研究⁷⁾を参考にすると、到達密度はその機械で無限回転圧したときに得られる極限の密度と等しく、初期密度の影響はほとんどないと考えられる。そこで初期密度の違いによる到達密度への影響を予備実験にて調査した。3.2.2.に示した土質(2)、含水比16%の材料を用い、3.2.1.の手順と同様に長さ10mの実験フィールドを作成し、初期状態として5mずつ足踏みとミニショベルによるクローラ転圧をそれぞれ行い、そこを3.2.3.に示した前後進コンパクタにて8回締固めた後の表面から10cmまでの密度をコアサンプラーで3点ずつ測定した。測定結果を図-3.25に示す。本図によると、初期密度の違いによる到達密度への影響は少ないと考えられる。よって本章では、ランマ、プレートコンパクタと前後進コンパクタ、ハンドガイドローラにて初期状態は異なっているが、到達密度を使用してすべての実験結果の比較・検討を行うものとした。

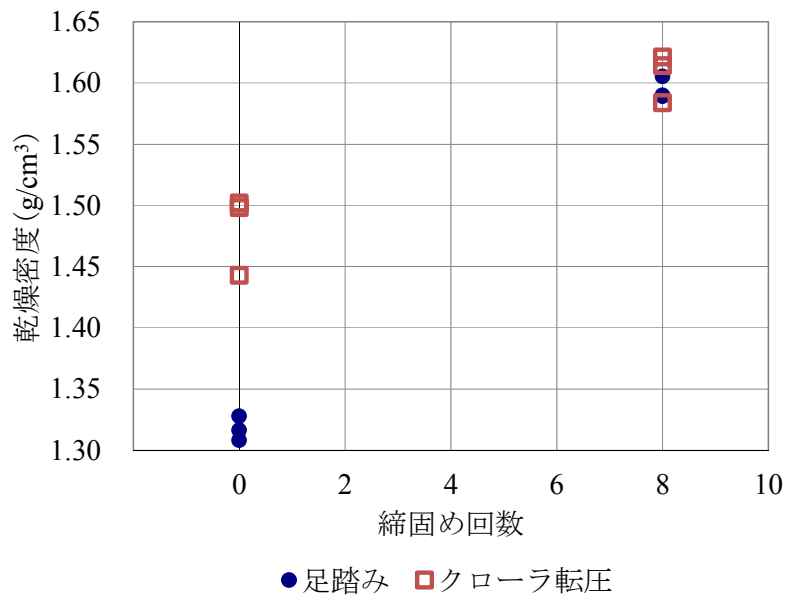


図-3.25 初期条件による到達密度の違い
(土質(2), 含水比16%, 前後進コンパクタ)

3.3.3. 到達密度による締固め能力の検討

8回締固め後の乾燥密度(到達密度)を各材料の締固め度に変換した値を横軸に,そして地表面からの深さを縦軸に表したグラフを,図-3.26~図-3.31に示す.このとき,到達密度値は,正確には0m~0.1m,0.1m~0.2m,0.2m~0.3mのそれぞれ平均であるが,便宜的にそれぞれ0.05m,0.15m,0.25mの位置にプロットした.また,0回走行時の密度は,すなわち足踏みおよびクローラ転圧を行った場合の密度であるため,ランマとプレートコンパクタの0回走行時の密度を平均したものを「足踏みの密度」,前後進コンパクタとハンドガイドローラの0回走行時の密度を平均したものを「クローラ転圧の密度」として,同様にグラフに示している.

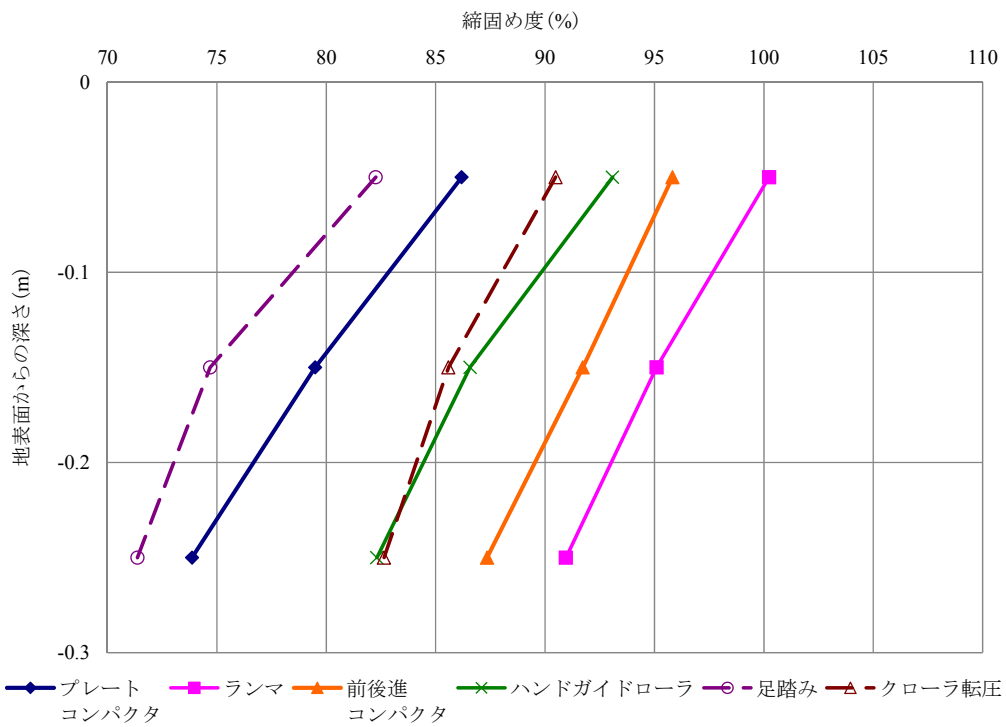


図-3.26 到達密度（締固め度）－深さ（実験ケース1）

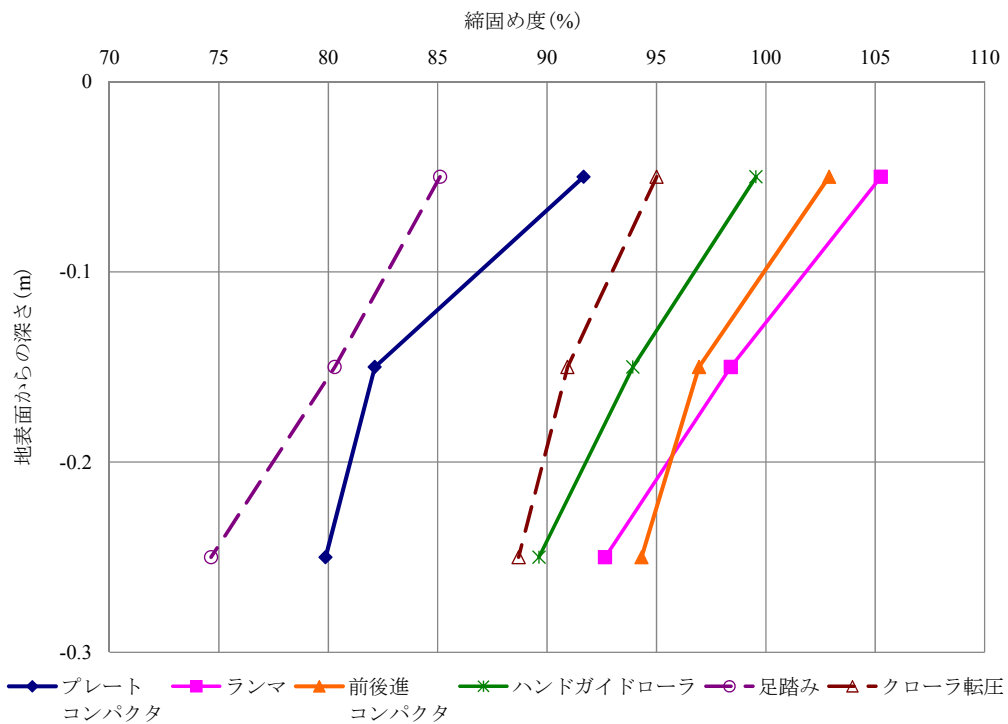


図-3.27 到達密度（締固め度）－深さ（実験ケース2）

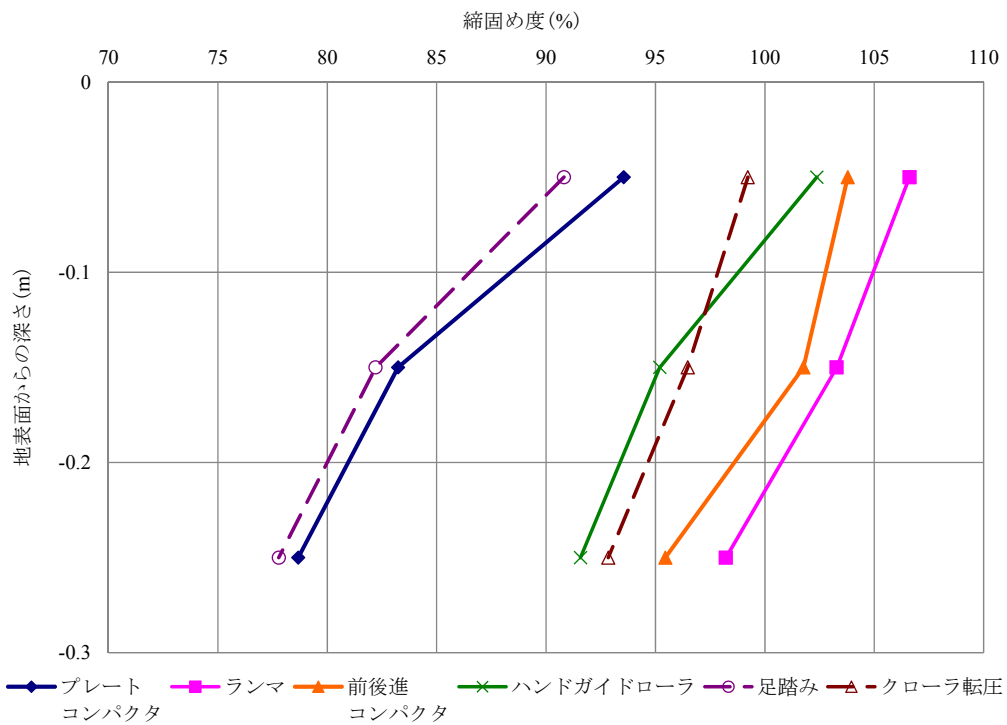


図-3.28 到達密度（締固め度）－深さ（実験ケース3）

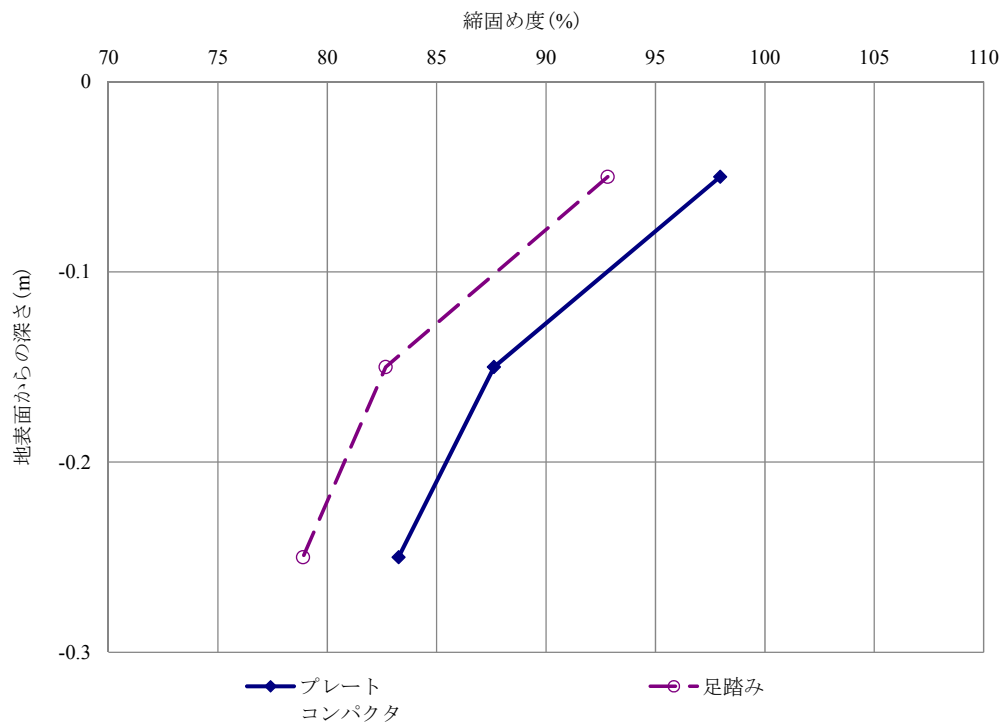


図-3.29 到達密度（締固め度）－深さ（実験ケース4）

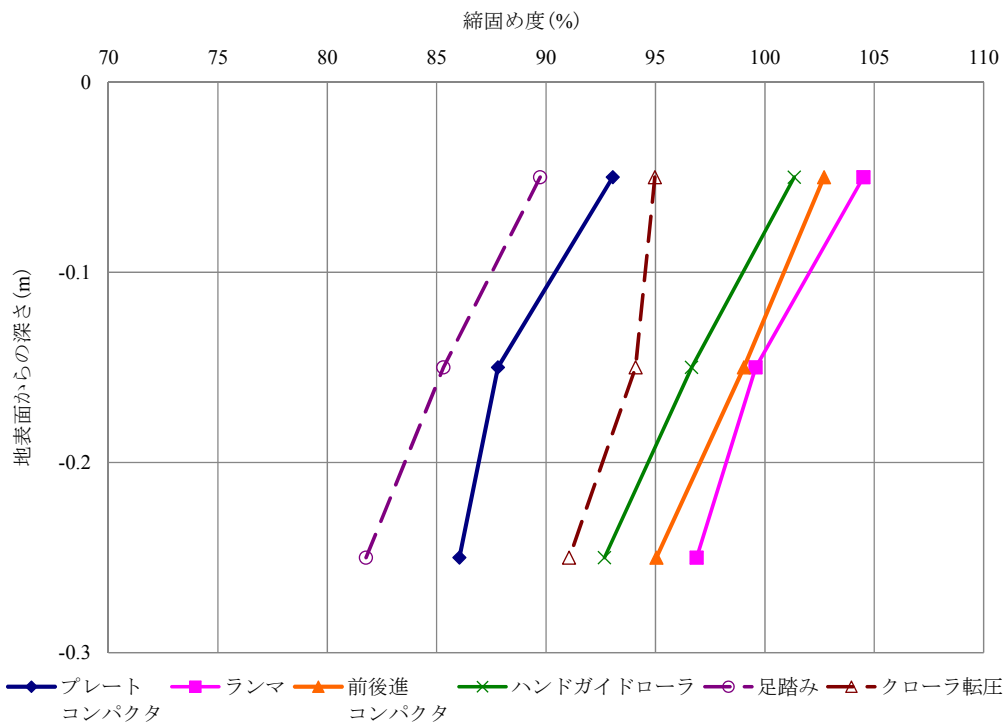


図-3.30 到達密度（締固め度）－深さ（実験ケース5）

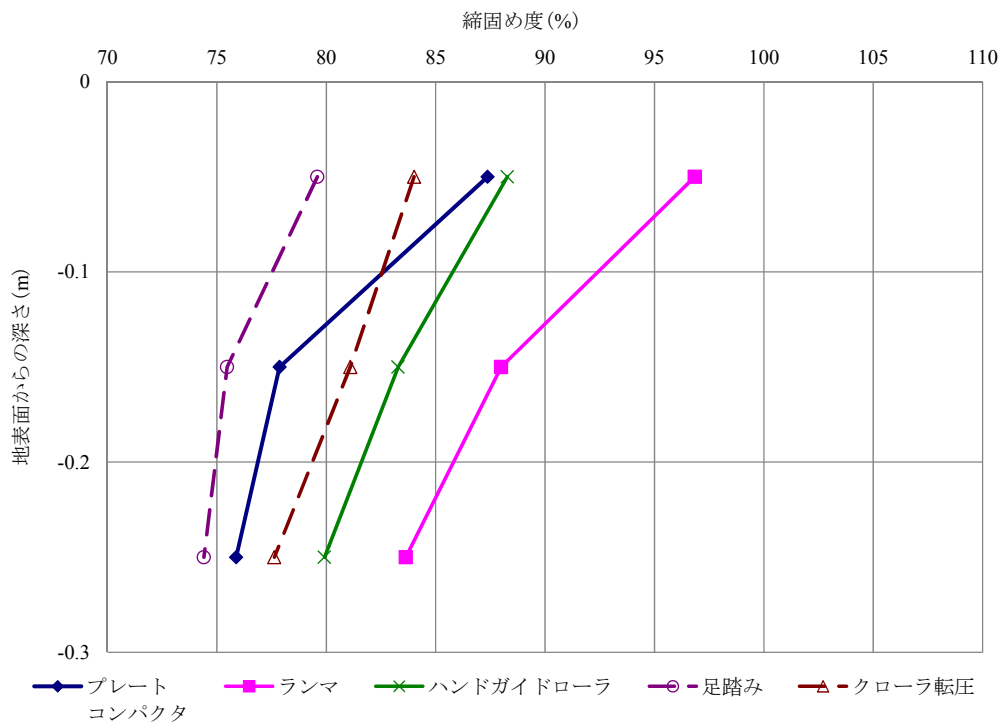


図-3.31 到達密度（締固め度）－深さ（実験ケース6）

図-3.26～図-3.31 より各機械の到達密度を比較すると、その順位はほぼすべての実験ケースおよび深さにおいて、ランマ>前後進コンパクタ>ハンドガイドローラ>プレートコンパクタの順になっている。これはそのまま各機械の締固め能力順位といえる。すべての実験ケースにおいて、プレートコンパクタの到達密度は、足踏みの密度よりは高いが、本来締固め機械ではないミニショベルのクローラ 2 回転圧時の密度より低く、本実験で用いたような砂質土系材料の締固めに対して、能力的には適していない機械であると言える。また、ハンドガイドローラの深さ 0.1 m～0.2 m および 0.2 m～0.3 m の到達密度は、クローラによる 2 回転圧時の密度とほぼ同等となっており、ハンドガイドローラは深い部分への締固め効果を十分期待できる能力を持っている機械とは言えない。これに対し、ランマ、前後進コンパクタは、すべての実験ケースおよび深さにおいて、クローラ転圧に比較して十分高い到達密度を達成しており、本実験のような砂質土系の締固めに適している機械であると言える。

本実験を、実施工現場での試験施工と仮定すると、図-3.26～図-3.31 より機種選択と施工厚さ（仕上がり厚さ）を決定することができる。例えば、実験ケース 1 で、品質管理基準を締固め度 95%以上（「道路土工—盛土工指針」⁸⁾による、構造物取付部での日常管理値の目安）と仮定すると、図-3.26 より、プレートコンパクタ、ハンドガイドローラは使用不可、前後進コンパクタを使用するならば、仕上がり厚さ 0.1 m、ランマを使用するならば、仕上がり厚さ 0.2 m、となる。

次に、各機械の到達密度の深さ方向の減少割合、すなわち深さ方向の密度勾配について検討する。図-3.26～図-3.31 において、地表面～0.1 m 部の密度を基準として 100%となるようオフセットし、それぞれの機械毎にまとめると、図-3.32～図-3.37 のようになる。

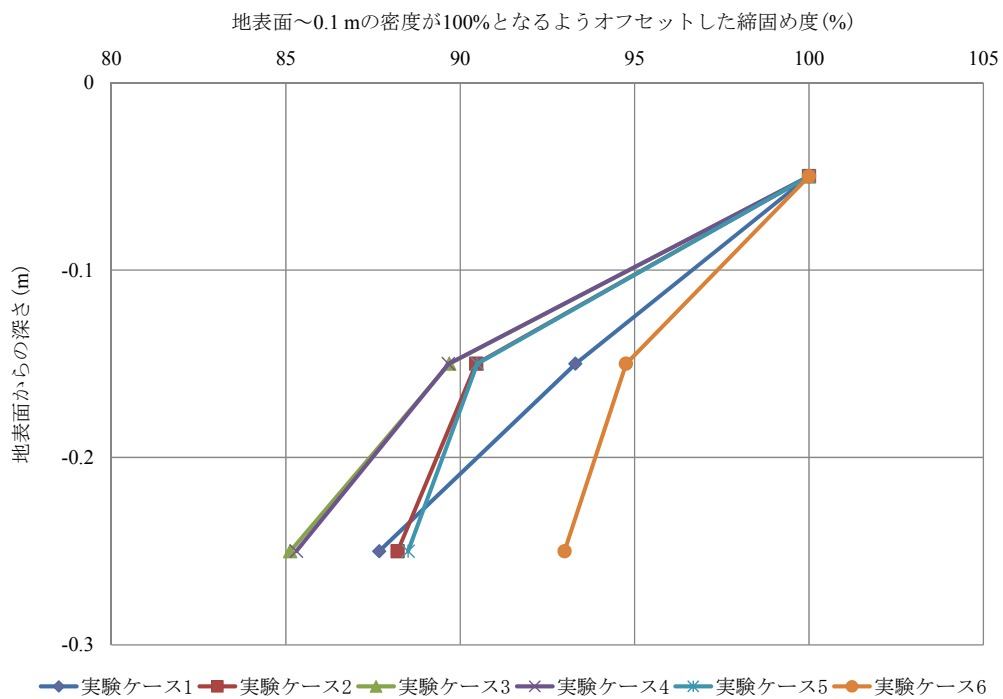


図-3.32 地表面～0.1 mの密度が100%となるようオフセットした締固め度
(プレートコンパクタ)

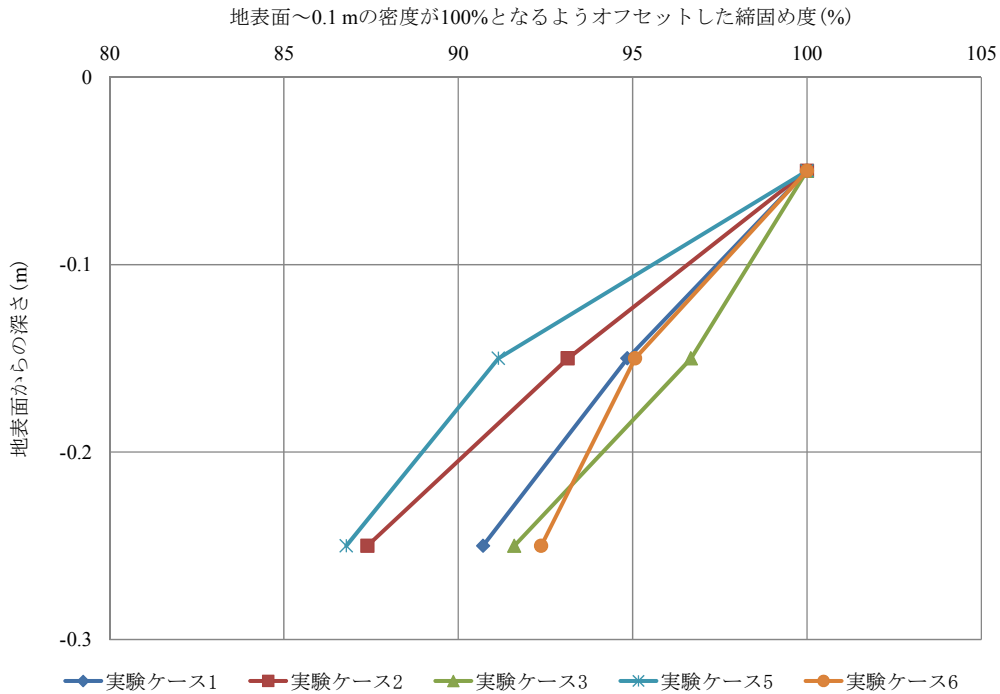


図-3.33 地表面～0.1 mの密度が100%となるようオフセットした締固め度
(ランマ)

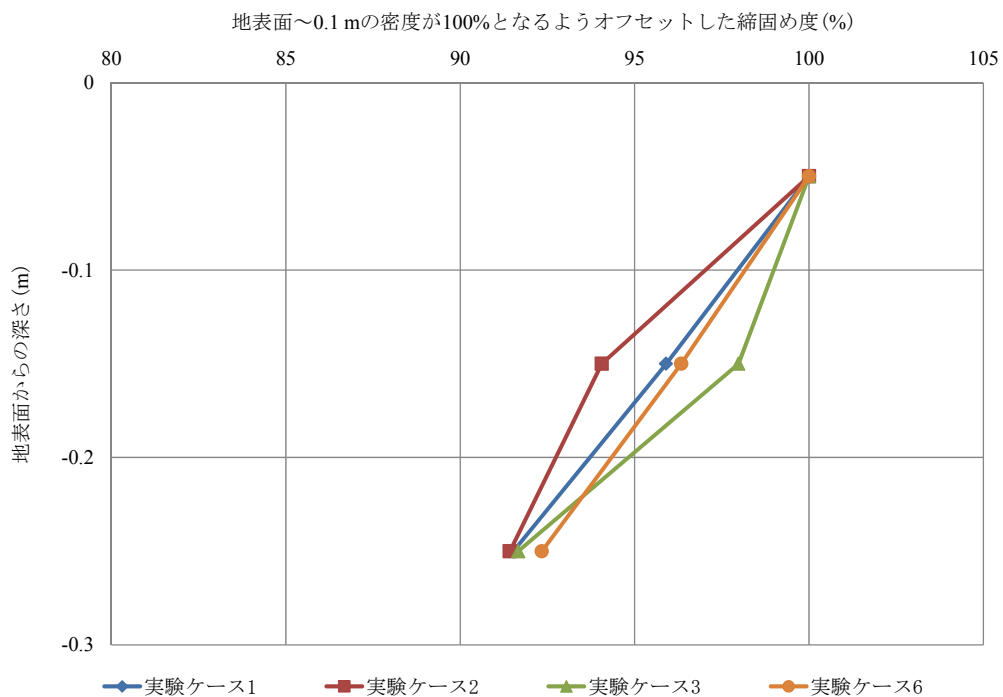


図-3.34 地表面～0.1 mの密度が100%となるようオフセットした締固め度
(前後進コンパクタ)

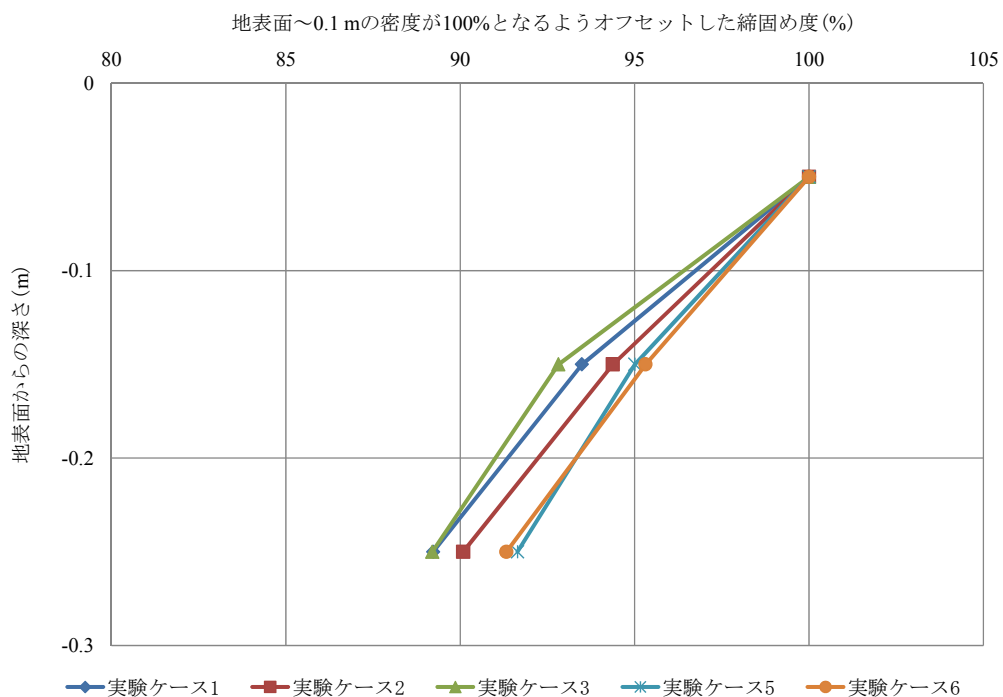


図-3.35 地表面～0.1 mの密度が100%となるようオフセットした締固め度
(ハンドガイドローラ)

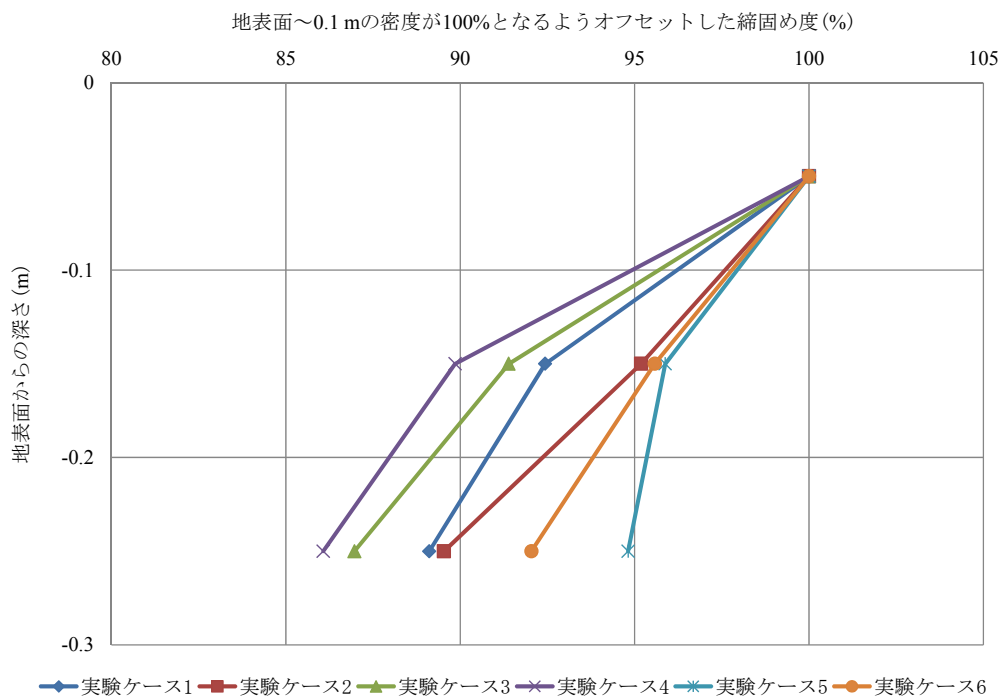


図-3.36 地表面～0.1 mの密度が100%となるようオフセットした締固め度
(足踏み)

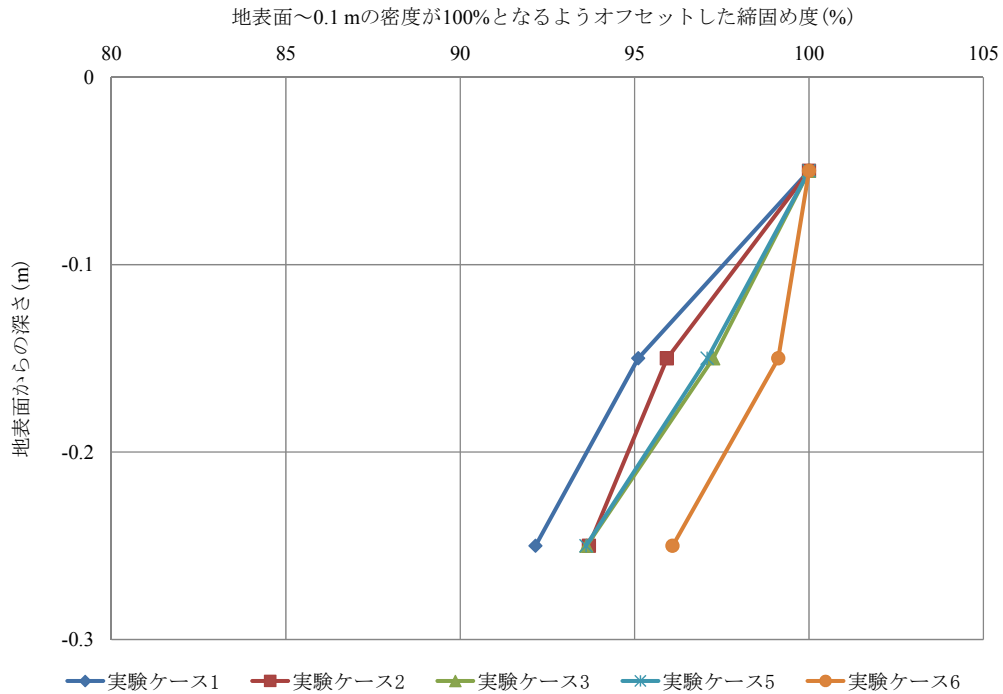


図-3.37 地表面～0.1 mの密度が100%となるようオフセットした締固め度
(クローラ転圧)

また、各グラフの平均を算出し、ひとつのグラフにまとめると、図-3.38 のようになる。

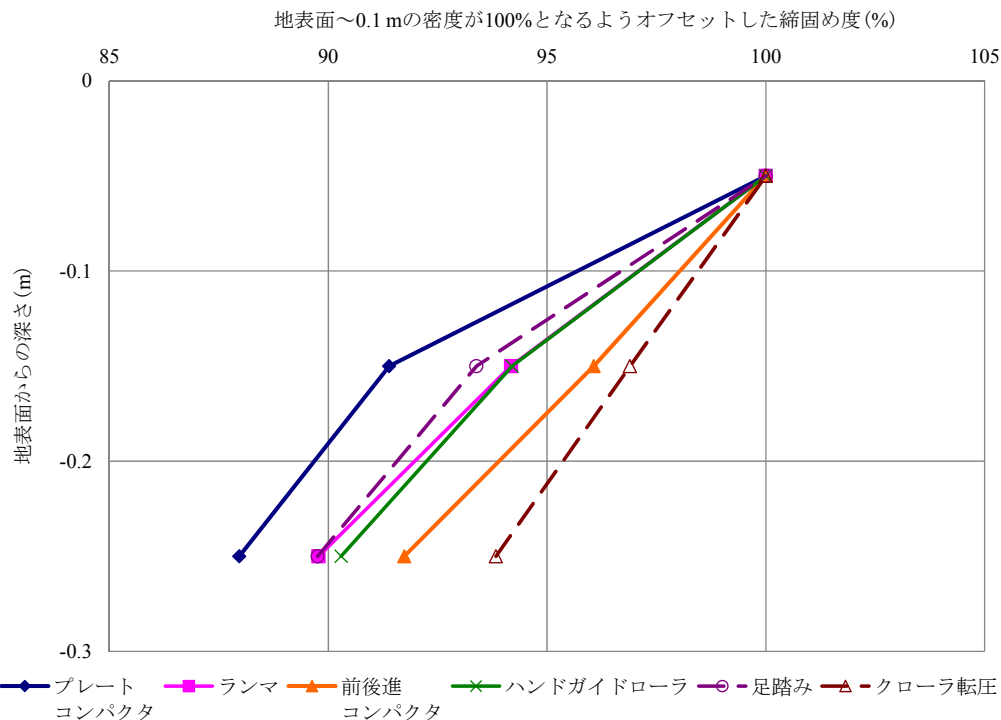


図-3.38 地表面～0.1 mの密度が100%となるようオフセットした締固め度
(各機械平均)

図-3.32～図-3.37 および図-3.38 によると、各機械の深さ方向の密度減少割合は実験ケースによってバラツキがあるが、平均すると、前後進コンパクタがもっとも減少割合が小さく、ランマとハンドガイドローラがほぼ同等で続き、プレートコンパクタがもっとも減少割合が大きいことがわかる。また、ミニショベルによるクローラ2回転圧時の密度減少割合は、前後進コンパクタよりも小さく、足踏みの密度減少割合はランマ、ハンドガイドローラとほぼ同等であることもわかる。

3.4. 走行速度測定結果による施工効率の検討

3.4.1. 走行速度測定結果

図-3.39～図-3.42 に各締固め機械の走行速度結果を示す。

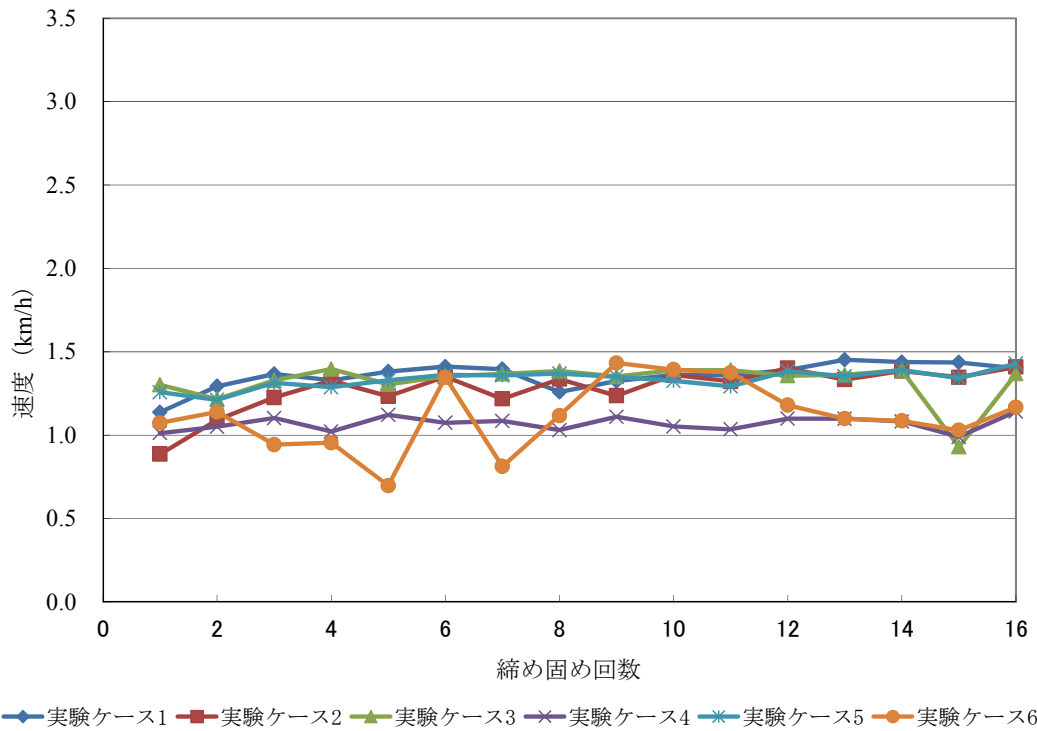


図-3.39 走行速度 (プレートコンパクタ)

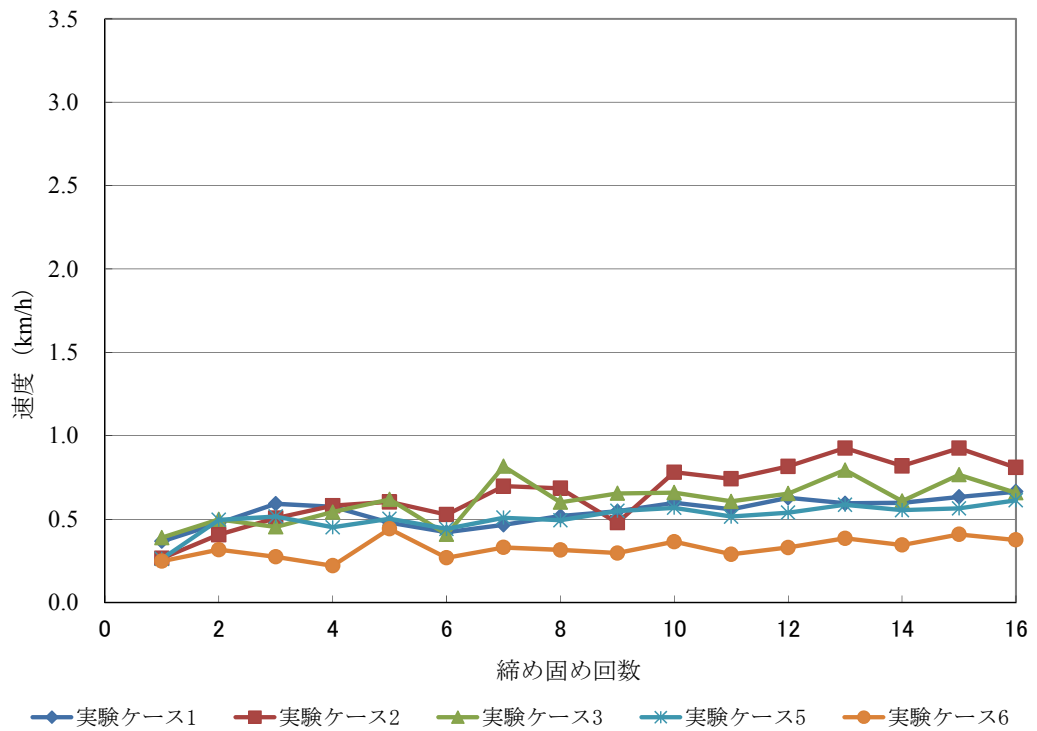


図-3.40 走行速度 (ランマ)

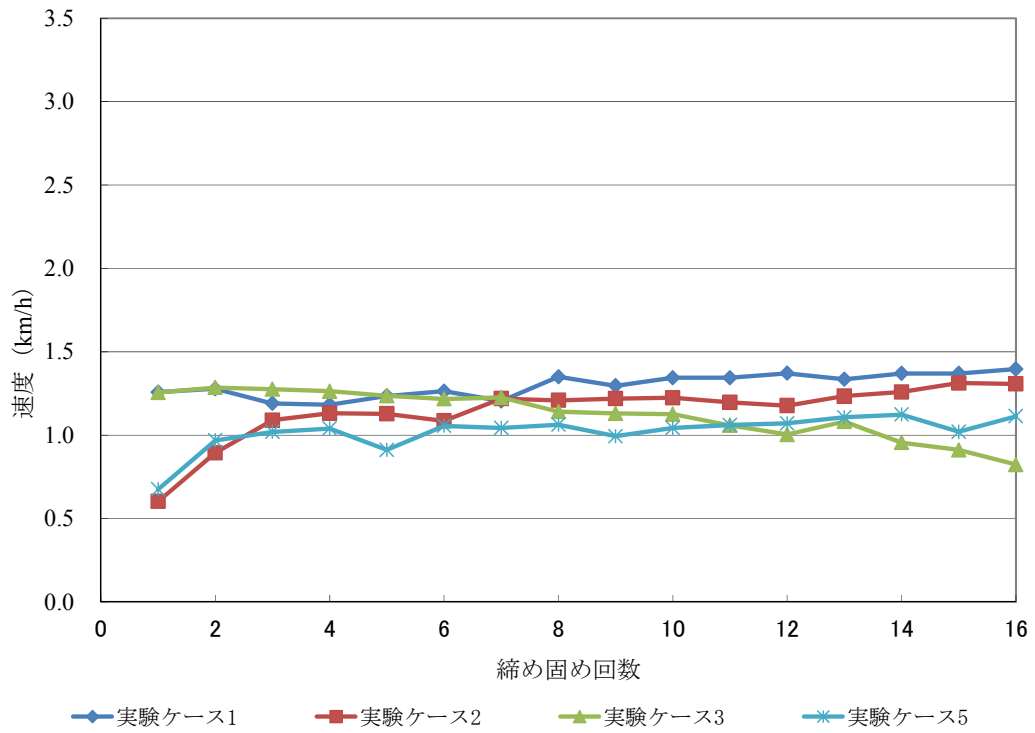


図-3.41 走行速度（前後進コンパクト）

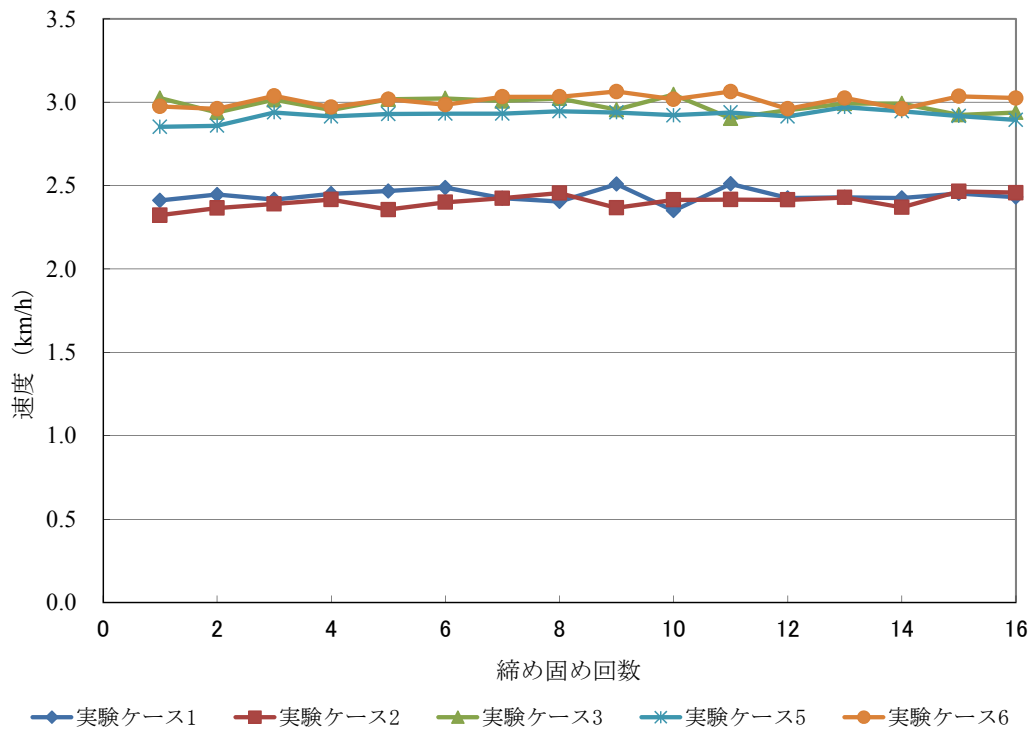


図-3.42 走行速度（ハンドガイドローラ）

図-3.39～図-3.42によると、平板式締固め機械であるプレートコンパクタ、ランマ、前後進コンパクタの走行速度は実験ケース毎で若干異なっており、特に実験ケース4、6の走行速度が他の実験ケースと比較して低い傾向がある。またいくつかのケースでは、締固め回数の初期で走行速度が低く回数が増加するにつれて速度が上昇している傾向がある。これら2つの傾向は、平板式締固め機械の走行メカニズムから考えて、走行速度が地盤の剛性に影響を受けていると考えられる。これについては第6章にて詳細に述べる。

また、ハンドガイドローラの走行速度は、実験ケース1、2と3、5、6との間に乖離が存在するが、これはその実験の間にメカ点検があり、走行速度の調整（3.0 km/h がカタログ定格）を行ったためである。点検前（実験ケース1、2）、点検後（実験ケース3、5、6）の結果がそれぞれほぼ等しく、締固め回数による速度のバラツキもそれぞれほぼないことから、ハンドガイドの走行速度は材料・含水比・締固め回数による影響はほとんど無く、一定であるといえる。これはハンドガイドローラがローラ式の機械であるためと考えられる。

また、各機械の走行速度を比較すると、ハンドガイドローラ>前後進コンパクタ≒プレートコンパクタ>ランマの順になっている。

3.4.2. 施工効率の検討

走行速度は単位時間当たりの施工能力すなわち施工効率にかかわる数値であり、それから各機械が広い施工現場に向いている機械かどうかがわかる。そこで次に走行速度からそれぞれの機械の施工効率を検討する。「道路土工—盛土工指針」⁷⁾によると、構造物取付部での日常管理値の目安が締固め度95%以上となっている。そこで、まず図-3.26～図-3.31を試験施工結果と仮定し、締固め度を95%以上とした場合の各機械の施工可能厚さ（仕上がり厚さ）を読み取る。その仕上がり厚さと機械の締固め幅、締固め回数8回までの走行速度（実験ケース1、2のハンドガイドローラは3.0 km/hとした）から1時間当たりの施工可能土量を計算した。計算結果を図-3.43～図-3.48に示す。

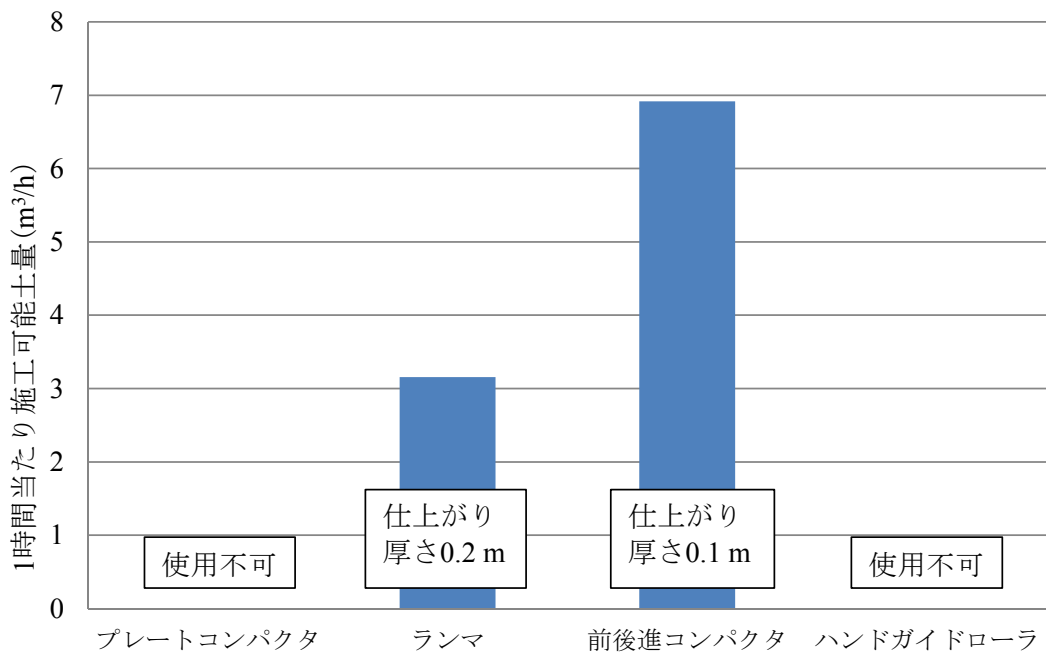


図-3.43 1時間当たりの施工可能土量 (締固め度95%以上：実験ケース1)

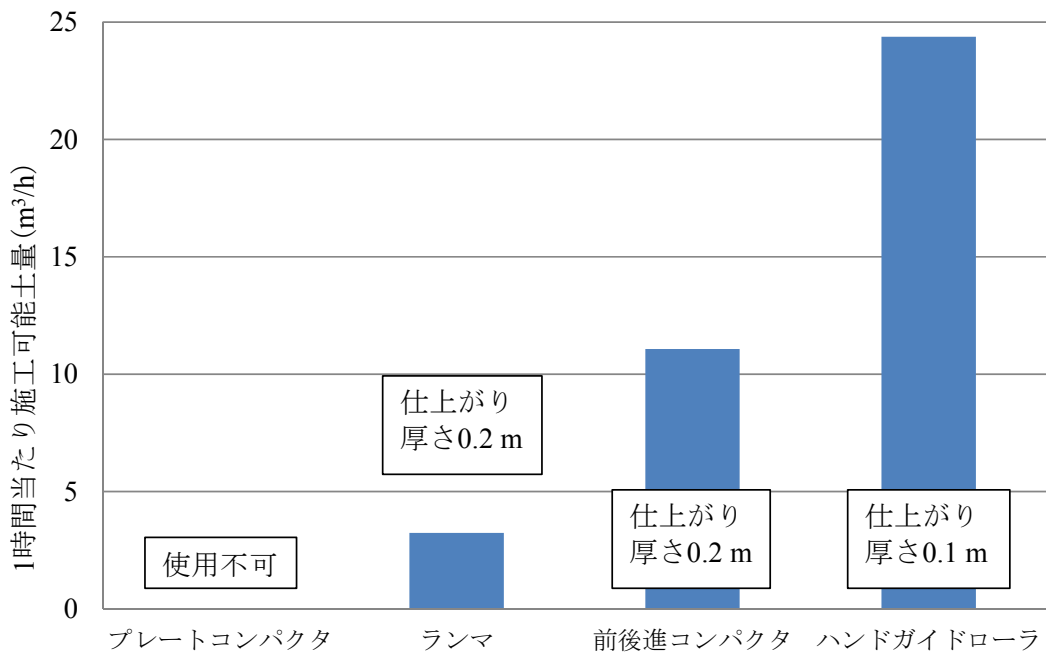


図-3.44 1時間当たりの施工可能土量 (締固め度95%以上：実験ケース2)

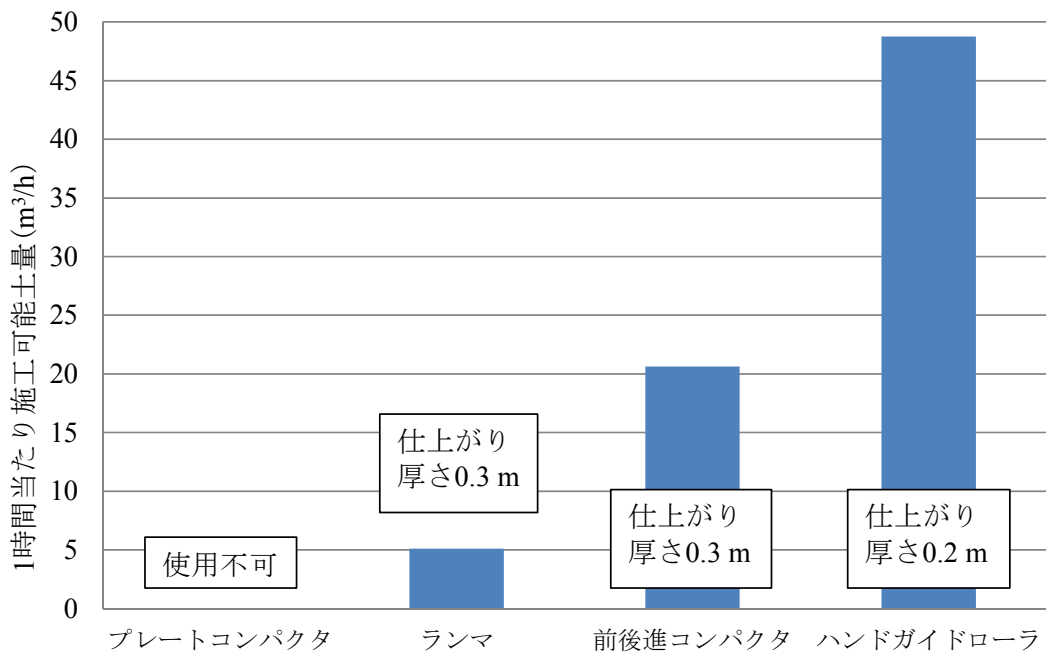


図-3.45 1時間当たりの施工可能土量（締固め度95%以上：実験ケース3）

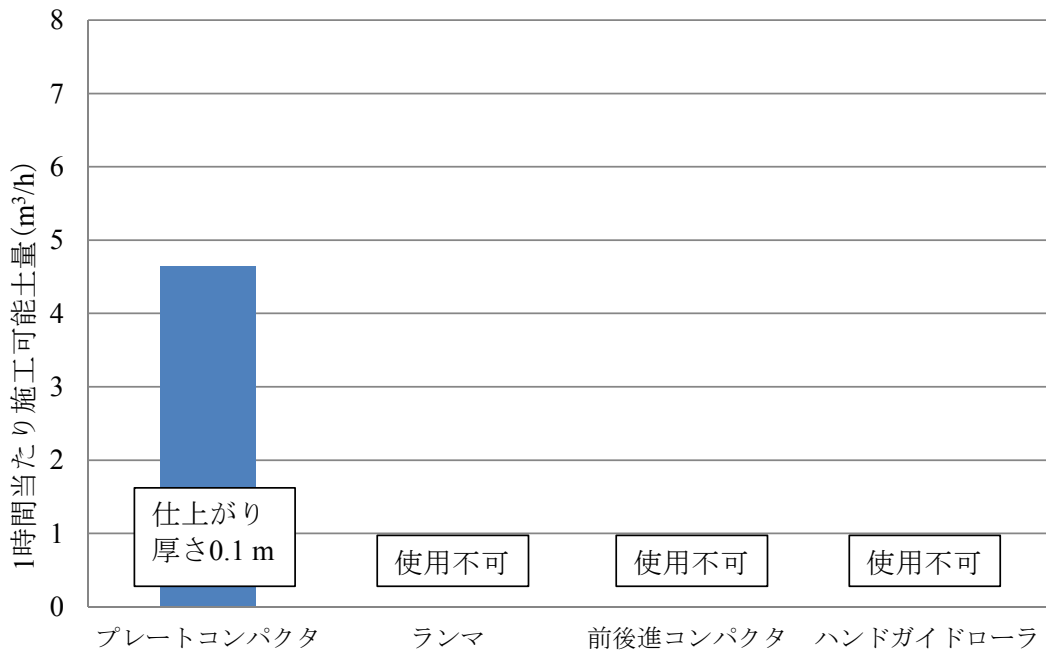


図-3.46 1時間当たりの施工可能土量（締固め度95%以上：実験ケース4）

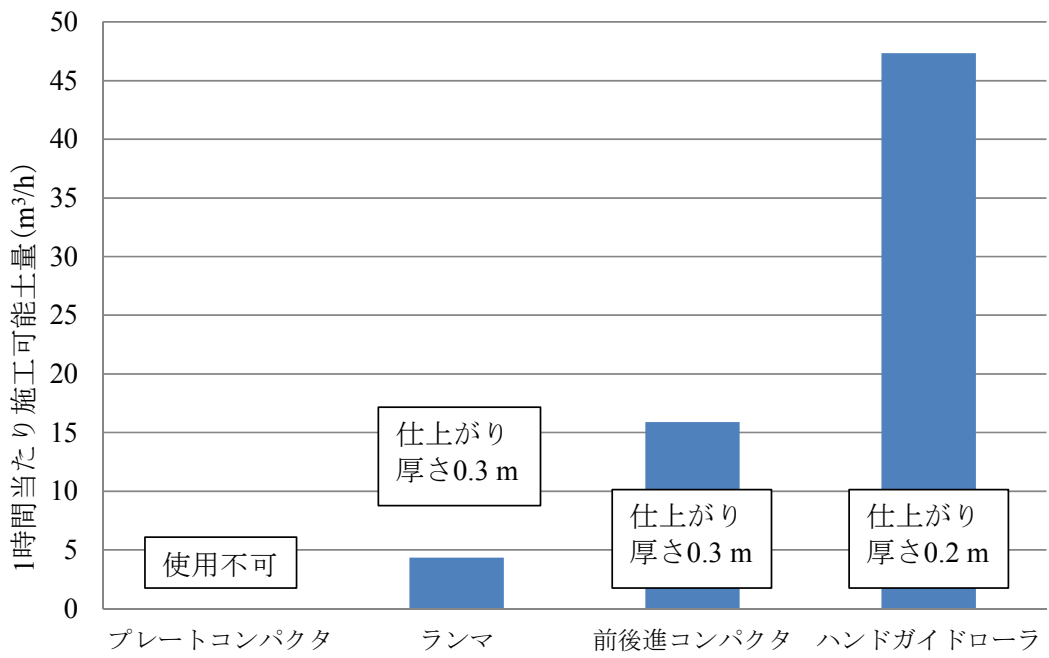


図-3.47 1時間当たりの施工可能土量 (締固め度95%以上：実験ケース5)

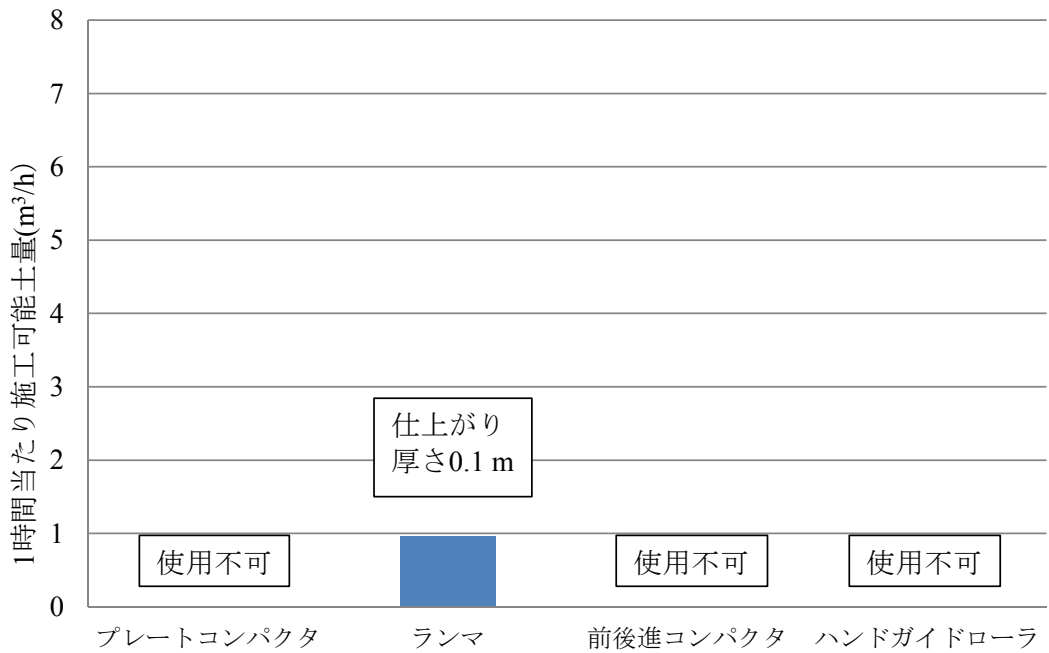


図-3.48 1時間当たりの施工可能土量 (締固め度95%以上：実験ケース6)




図-3.43～図-3.48 より，ランマは施工可能土量が最も少なく，広い施工現場には適していない機械であるといえる．またハンドガイドローラは施工可能土量が最も多く，広い施工場所に適しているといえるが，締固め能力はランマ・前後進コンパクタのより劣るため，仕上がり厚さに注意が必要であり，さらにハンドリングが困難であるため，複雑な形状の狭隘部や構造物周りの施工には適していない機械であるといえる．前後進コンパクタは，施工可能土量，締固め能力がバランスの取れた機械であり，汎用性が高い機械であるといえる．

3.5. まとめ

前節までの内容を踏まえ，小型締固め機械の締固め特性をまとめると，材料・含水比の違いによらず表-3.3 のようになる．一般的に右側の機械が優れていると言える．

また本結果は，横田らによる研究結果¹⁾と同様の傾向を示している．

表-3.3 小型締固め機械の特性

締固め能力（到達密度）			
プレートコンパクタ	ハンドガイドローラ	前後進コンパクタ	ランマ
低			高
深さ方向の密度減少割合			
プレートコンパクタ	ハンドガイドローラ	ランマ	前後進コンパクタ
高			低
施工効率（単位時間当たりの施工可能土量）			
ランマ	プレートコンパクタ	前後進コンパクタ	ハンドガイドローラ
低			高

また，第2章の内容も踏まえ，各機械の特徴を述べると表-3.4 のようになる．

表-3.4 小型締固め機械の特徴

小型締固め機械	特徴
プレートコンパクタ	<p>締固め能力がミニショベルのクローラ転圧より低く、本実験のような砂質土の締固めに適していない。</p> <p>使用には注意が必要である。</p>
ランマ	<p>締固め能力が最高。深部まで締固め効果を期待できる。</p> <p>単位時間当たりの施工可能土量は最も少ないため、広い施工現場には適していない。</p> <p>軽量でハンドリングが容易。</p> <p>複雑な形状の狭隘部（マンホール周りなど）や構造物近傍などに適している。</p>
前後進コンパクタ	<p>締固め能力は高く、深さ方向による密度減少も少ない。</p> <p>単位時間当たりの施工可能土量もランマより多い。</p> <p>ハンドリングも比較的容易。</p> <p>バランスの取れた汎用的な機械である。ランマと同様に狭隘部、構造物近傍の施工に適している。</p> <p>ランマとの使い分けは、作業現場の広さや移動手段の有無に従って行うとよい。</p>
ハンドガイドローラ	<p>締固め能力は中程度。深部（0.1 m 以下）への締固め効果はミニショベルのクローラ転圧と同程度である。</p> <p>単位時間当たりの施工可能土量は最大で、広い施工現場に適している。</p> <p>ハンドリングが困難。</p> <p>面積が広く、直線形状が多い形状で、構造物が無い施工現場に適している。（すなわち狭隘部の締固めには適していない。）</p>

表-3.3 および 3.4 は、小型締固め機械の機種を選定する際の参考とすることができる。実施工現場の状況に合わせて、最適な機種を選定することが可能となる。

表-3.3 および 3.4 から、狭隘部などの施工に適している機械として、前後進コンパクタが選択される場合も多いと考えられる。そこで、複数の重量クラスがある前後進コンパクタから、どの機械を選択すればよいかを示すため、前後進コンパクタの機械仕様から、具体的な施工厚さ（仕上がり厚さ）を推定する手法を第 4 章に述べる。また、前後進コンパク

タを用いた品質管理を効率的に行うことができる新しい手法について、第5、第6章に述べる。

参考文献

- 1) 横田聖哉, 中村洋丈: 高速道路における小型施工機械を用いた締固め特性, 建設の施工企画, No.717, pp.14-19, 2009.
- 2) 地盤工学会: JGS1613-2003 コアカッターによる土の密度試験方法, 地盤工学会基準, 2003.
- 3) 関根道裕: 各種ローラの締固めについて, 土木技術, Vol.18, No.9, pp.15-20, 1963.
- 4) 高野漠: 道路工事における大型振動ローラ, 建設機械, Vol.10, No.12, pp.41-46, 1974.
- 5) 高野漠, 桃井徹: 各種振動ローラの締固め効果, 道路建設, No.392, pp.44-48, 1980.
- 6) 根本忠, 日向正, 井上利次: 締固め機械の性能, 創立20周年論文集, pp.26-47, 建設機械化研究所, 1984.
- 7) 建山和由: 土の締固め施工の合理化に関する研究, 京都大学博士論文, pp.109-112, 1988.
- 8) 日本道路協会: 道路土工 盛土工指針, p.220, 2010.

第4章 小型締固め機械の締固め能力指標の提案とその利用

4.1. はじめに

小型締固め機械の機械仕様から施工可能厚さなどの締固め能力の推定や、機械間における締固め能力の比較を行うことができれば、試験施工を行うことなく、締固め機械の機種や撒きだし厚さなどの施工条件を適切に決定することができ、小型締固め機械による締固め施工の合理化を図ることができる。

そこで本章では、小型締固め機械の機械仕様から、締固め能力を推定する手法の提案を行った。

対象とした機種は、前章の検証結果から狭隘部などの施工に適している機械として前後進コンパクタが選択される場合も多いと考えられるため、前後進コンパクタを含む平板式振動型締固め機械（前後進コンパクタとプレートコンパクタが対象）とした。

4.2. 締固め能力指標の提案

土の締固めは、土粒子、空気、水の混合体に外力を加え、土粒子間のせん断抵抗に打ち勝って土粒子を強制的に密に詰める行為である。そこで機械の締固め能力を、その機械が発生する土中応力にて表すことが可能であると仮定し、以下検討を行うこととした。

4.2.1. 3次元理論式による検討

図-4.1に示す平板式締固め機械が地盤上を走行する時、全荷重 W / (接地幅 A × 接地長 B)の等分布荷重が、 $A \times B$ の長方形荷重として地盤に作用すると仮定した場合、締固め機械中央深さ z における土中鉛直応力 σ_z は、式(4.1)にて表される¹⁾。

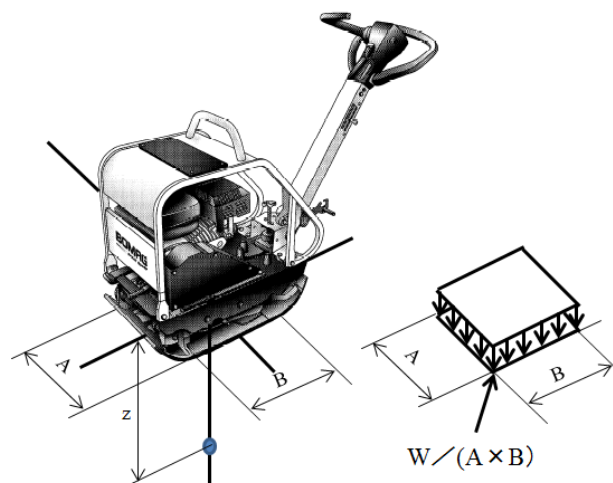


図-4.1 小型平板式締固め機械（3次元理論式）

$$\sigma_z = \frac{8W}{\pi} \cdot f(A, B, z) \quad (4.1)$$

$$f(A, B, z) = \frac{1}{AB} \left(\frac{2ABz(A^2 + B^2 + 8z^2)}{(A^2 + 4z^2)(B^2 + 4z^2)\sqrt{A^2 + B^2 + 4z^2}} + \sin^{-1} \frac{AB}{\sqrt{A^2 + 4z^2}\sqrt{B^2 + 4z^2}} \right)$$

σ_z : 土中鉛直応力 (kPa)

A : 接地幅 (m)

B : 接地長 (m)

W : 全荷重=機械重量+起振力 (kN)

z : 地表面からの深さ (m)

ここで全荷重 W は締固め機械が地盤に及ぼす接地荷重であるが、振動締固め機械は地盤からジャンプし地盤に接触するときには衝撃荷重が加わることになる。この衝撃荷重はジャンプの高さに依存するが、その高さは地盤状況などに影響を受けるため、接地荷重を正確に把握することは困難である¹⁾。そこで本研究では、過去の振動ローラの研究^{1,2)}および高速道路における土工施工管理要領³⁾を参考に、便宜的に自重に振動力を加えた値を用いて計算を行うものとする。

つぎに、表-4.1に示す小型平板式締固め機械の仕様を式(4.1)に代入して土中の垂直応力と深さとの関係を計算した結果を図-4.2に示す。表-4.1は第2章の調査結果を参考に現在日本国内で一般的に使用されている平板式振動型締固め機械の仕様を基にしている。

表-4.1 小型平板式締固め機械仕様

	質量 (kg)	起振力 (kN)	全荷重 W (kN)	接地幅 A (m)	接地長 B (m)	A/B
プレートコンパクト	66	10.1	10.75	0.35	0.2	1.75
前後進コンパクトA	238	35	37.33	0.5	0.28	1.79
前後進コンパクトB	330	45	48.23	0.445	0.33	1.35
前後進コンパクトC	410	50	54.02	0.5	0.38	1.32
前後進コンパクトD	401	45	48.93	0.55	0.3	1.83

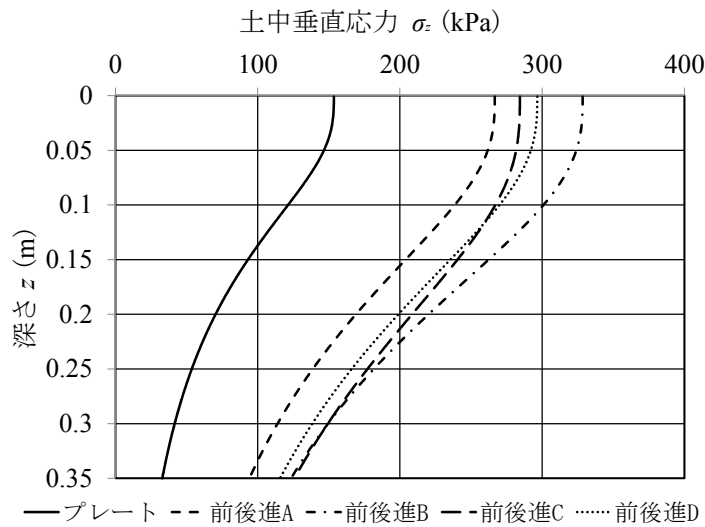


図-4.2 土中垂直応力計算結果 (3次元理論式)

図-4.2によると、土中応力はいずれの機械も地表面近傍が最も大きく、深くなるに従って減衰するが、その曲線の形（減衰具合）は各機械によって異なっていることがわかる。したがって、締固め機械の締固め能力を表すためには、地表面近傍の圧力や任意の深さ1点における土中応力を用いて表すのでは不十分であり、深さによる土中垂直応力の減衰を考慮した締固め能力を表す指標が必要になる。本研究では、任意の深さ区間 $z_1 \sim z_2$ の土中垂直応力を用いて「深さ区間 $z_1 \sim z_2$ における締固め能力値」として表すことにする。

そこで、まず式(4.1)を区間 z_1 から z_2 で積分して式(4.2)を得る。

$$\int_{z_1}^{z_2} \sigma_z = \frac{8W}{\pi} \cdot \int_{z_1}^{z_2} f(A, B, z) \quad (4.2)$$

土中応力の任意の深さ区間における平均値 $AS(z_1, z_2)$ は、式(4.2)で計算される土中応力積分値を用いて式(4.3)で表される。

$$AS_3(z_1, z_2) = \frac{1}{(z_2 - z_1)} \cdot \int_{z_1}^{z_2} \sigma_z = \frac{8W}{\pi} \cdot g(A, B, z_1, z_2) \quad (4.3)$$

$$g(A, B, z_1, z_2) = \frac{1}{(z_2 - z_1)} \cdot \int_{z_1}^{z_2} f(A, B, z)$$

式(4.3)で計算される土中応力平均値 AS_3 を用いることにより、 A 、 B 、 W の仕様を持つ締固め機械が、深さ区間 z_1 から z_2 に及ぼす締固め能力を表すことが可能となる。この値は、機械間の締固め能力の差異を表すのみでなく、任意の深さ区間における締固め能力差を表すことも可能である（例：締固め機械Aの地表面～0.1 m深さにおける締固め能力と、締固め機械Bの0.1 m～0.2 m深さにおける締固め能力の比較を行うことなどができる）。

式(4.3)を用い、表-4.1に示す仕様を持つ小型平板式締固め機械の地表面～0.1 m、0.1 m～0.2 m、0.2 m～0.3 mそれぞれの深さにおける土中応力平均値 AS_3 を計算した結果を図-4.3に示す。計算において $g(A,B,z_1,z_2)$ は区分求積法(台形近似)にて数値積分を行い求めた。この際、区間幅が小さいほど計算精度は向上するが、区間幅を0.001 mから小さくしながら繰り返し計算を行い、計算結果の有効数字7桁までが収束する時点で計算を終了し、その結果を採用した。図-4.3より、締固め能力は前後進コンパクタBが各深さにおいて最も高いこと、またプレートコンパクタの地表面～0.1 m深さの締固め能力はすべての前後進コンパクタの0.2 m～0.3 m深さの締固め能力より低いことが推測される。

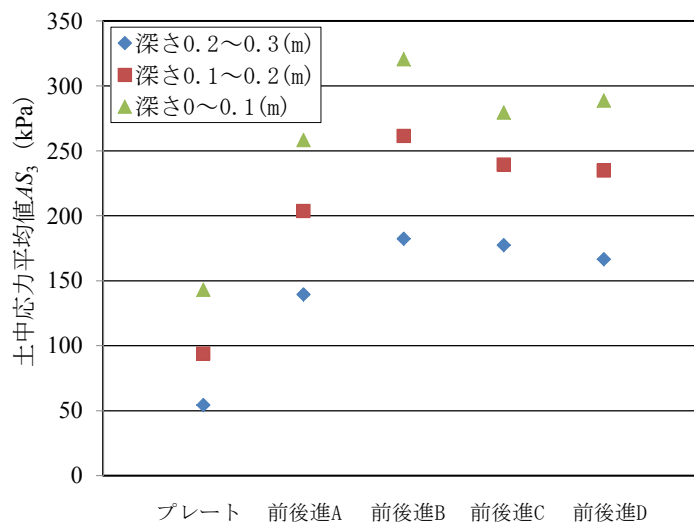


図-4.3 土中応力平均値 AS_3 (3次元理論式)

上記のように式(4.3)で計算される土中応力平均値 AS_3 を用いることにより、任意の深さ区間における締固め機械の締固め能力を表すことが可能となる。しかし、式(4.3)の $g(A,B,z_1,z_2)$ は厳密解を求めることが困難であり値を求めるには上記のように数値積分を行う必要がある。しかし機械仕様および深さ区間毎に数値積分を行うのは、実用上現実的ではない。そこで想定される機械仕様および深さ区間における $g(A,B,z_1,z_2)$ の値を予めグラフ化しておき、グラフより値を読み取ることで実用性の向上を図ることとした。想定される機械仕様は市販されている機械の仕様を参考に、接地長 B : 0.15 m～0.5 m、接地幅 A と接地長 B の比: 1.2～2.0、深さ区間は実際の施工現場を鑑みて、地表面～0.1 m、0.1 m～0.2 m、0.2 m～0.3 mの3区間とした。計算結果を図-4.4～4.6に示す。実際に AS 値を用いて締固め能力を推定する場合は、機械仕様および深さ区間を基に図-4.4～4.6から $g(A,B,z_1,z_2)$ を読み取り、式(4.3)にて AS_3 値を算出すればよいことになる。

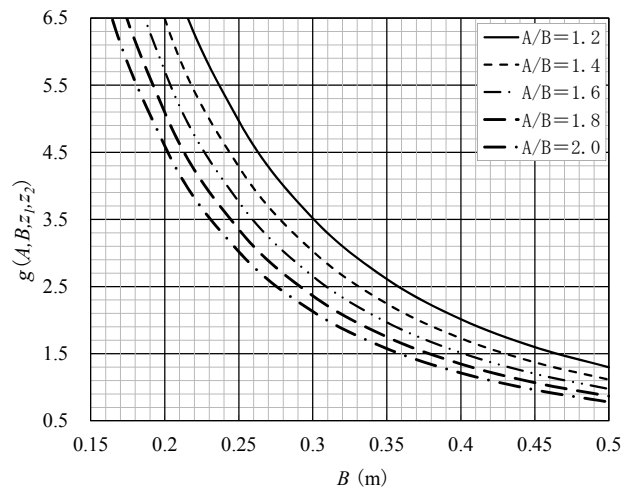


図-4.4 $g(A, B, z_1, z_2)$ の値 (深さ : 地表面 ~ 0.1 m)

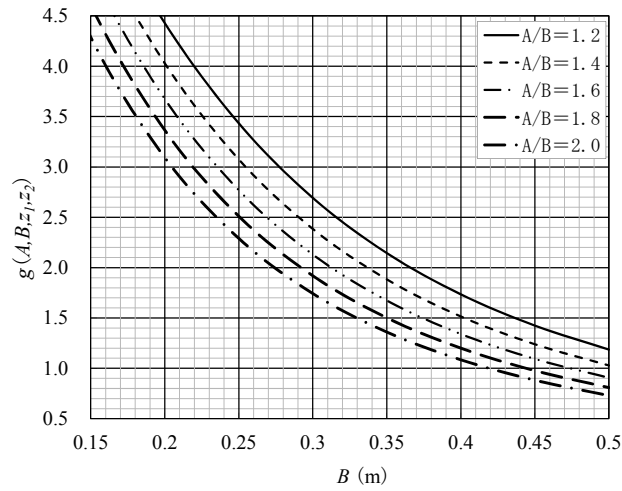


図-4.5 $g(A, B, z_1, z_2)$ の値 (深さ : 0.1 m ~ 0.2 m)

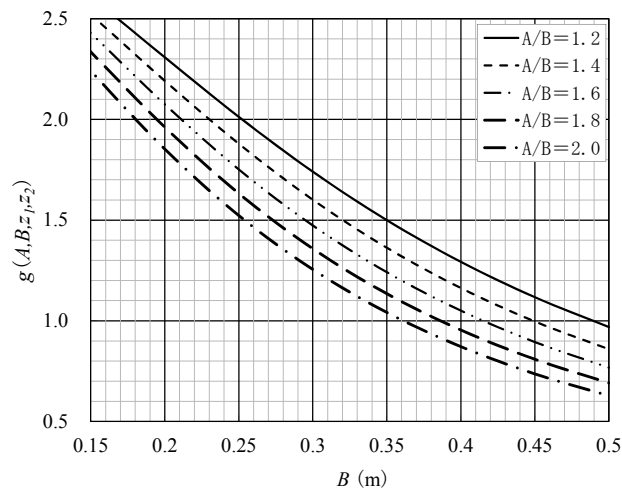


図-4.6 $g(A, B, z_1, z_2)$ の値 (深さ : 0.2 m ~ 0.3 m)

4.2.2. 2次元理論式による検討

前後進コンパクタはコンクリート壁などの構造物近傍や、トレンチなどの溝の中で、壁面に沿って使用されることも多い。壁面上において壁面に垂直方向への土粒子の移動が無いと仮定すると、壁面上は平面歪み状態と見なすことが出来る。したがって、前後進コンパクタの両側面が壁面などによって拘束されている場合など、施工状況によっては2次元理論式によってコンパクタ下部の地中応力を検討した方が、より現実に対応している可能性もあるといえる。

よって本節では、前節と同様の検討を2次元理論式によって行った。

図-4.7に示す平板式締固め機械が地盤上を走行する時、全線圧 LP /接地長 B の等分布荷重が、幅 B で締固め機械の横方向に無限長の帯状荷重として地盤に作用すると仮定した場合、締固め機械中央深さ z における土中鉛直応力 σ_z は、式(4.4)にて表される⁴⁾。

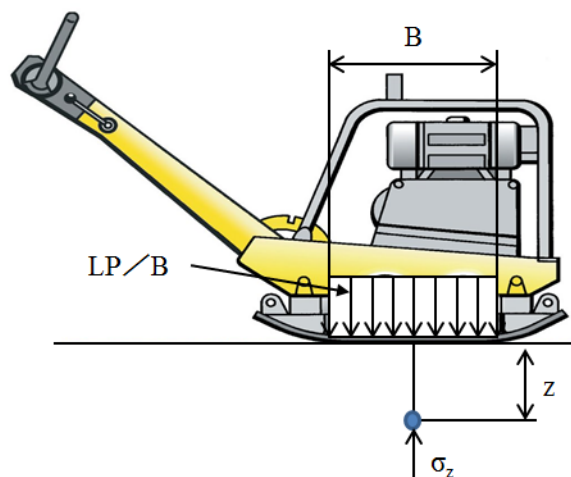


図-4.7 小型平板式締固め機械（2次元理論式）

$$\sigma_z = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{LP}{B} \left(\tan^{-1} \frac{B}{2z} + \frac{2zB}{4z^2 + B^2} \right) \quad (4.4)$$

σ_z : 土中鉛直応力 (kPa)

B : 接地長 (m)

LP : 全線圧 = W/A (kN/m)

W : 全荷重 = 機械重量 + 起振力 (kN)

A : 接地幅 (m)

z : 地表面からの深さ (m)

つぎに, 前節と同様に表-4.1に示す小型平板式締固め機械の仕様を式(4.4)に代入して土中の垂直応力と深さとの関係を計算した結果を図-4.8に示す.

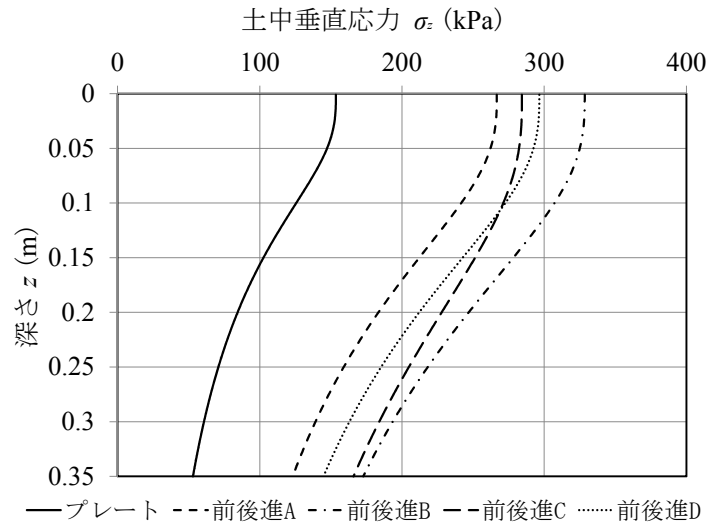


図-4.8 土中垂直応力計算結果 (2次元理論式)

図-4.8は図-4.2と同様に, 土中応力はいずれの機械も地表面近傍が最も大きく, 深くなるに従って減衰するが, その曲線の形 (減衰具合) は各機械によって異なっている. そこで前節と同様に任意の深さ区間における土中応力平均値 $AS_2(z_1, z_2)$ を求めて「深さ区間 $z_1 \sim z_2$ における締固め能力値」として表すことにする.

そこで, まず式(4.4)を区間 z_1 から z_2 で積分して式(4.5)を得る.

$$\int_{z_1}^{z_2} \sigma_z = \frac{LP}{\pi} \cdot f(B, z_1, z_2) \quad (4.5)$$

$$f(B, z_1, z_2) = \frac{2}{B} \left(z_2 \tan^{-1} \frac{B}{2z_2} - z_1 \tan^{-1} \frac{B}{2z_1} \right) + \ln \left(\frac{4z_2^2 + B^2}{4z_1^2 + B^2} \right)$$

土中応力の任意の深さ区間における平均値 $AS_2(z_1, z_2)$ は, 式(4.5)で計算される土中応力積分値を用いて式(4.6)で表される.

$$AS_2(z_1, z_2) = \frac{1}{(z_2 - z_1)} \cdot \int_{z_1}^{z_2} \sigma_z$$

$$= \frac{1}{(z_2 - z_1)} \cdot \frac{LP}{\pi} \cdot f(B, z_1, z_2) \quad (4.6)$$

前節と同様に、式(4.6)で計算される土中応力平均値 AS_2 を用いることにより、 A 、 B 、 W の仕様を持つ締固め機械が、深さ区間 z_1 から z_2 に及ぼす締固め能力を表すことが可能となる。

式(4.6)を用い、表-4.1に示す仕様を持つ小型平板式締固め機械の地表面～0.1 m、0.1 m～0.2 m、0.2 m～0.3 mそれぞれの深さにおける土中応力平均値 AS_2 を計算した結果を図-4.9に示す。

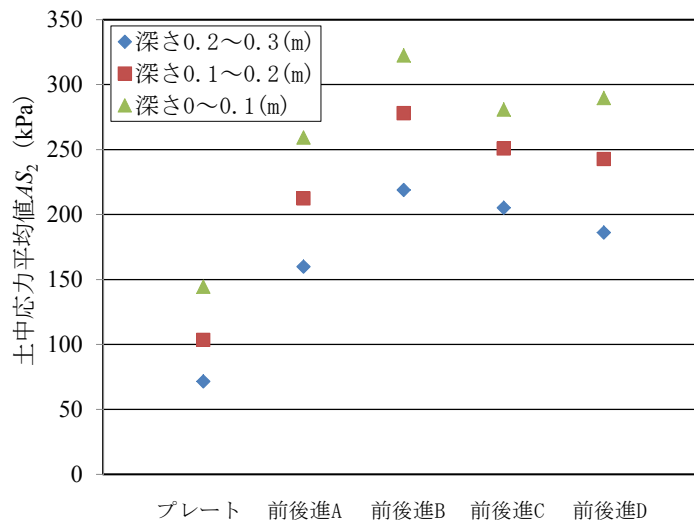


図-4.9 土中応力平均値 AS_2 (2次元理論式)

図-4.9は図-4.3とほぼ同様な結果を示している。そして前節と同様に土中応力平均値 AS を締固め能力指標として用いることにより、各機種および任意の深さ区間の締固め能力を推定することが可能である。

本節で述べた2次元の理論式では、前節の3次元の理論式と異なり、数値積分をすることなく式(4.6)から AS_2 値を求めることができる。しかし図-4.10、4.11に示すように、同じ前後進コンパクタBであっても、それぞれの理論式から計算した土中応力および AS_2 、 AS_3 値は(特に深い部分で)異なっている。したがって、3次元、2次元の理論式を施工状況などによって使い分けることが、より精緻な締固め能力指標を得るために重要であると考えられる。

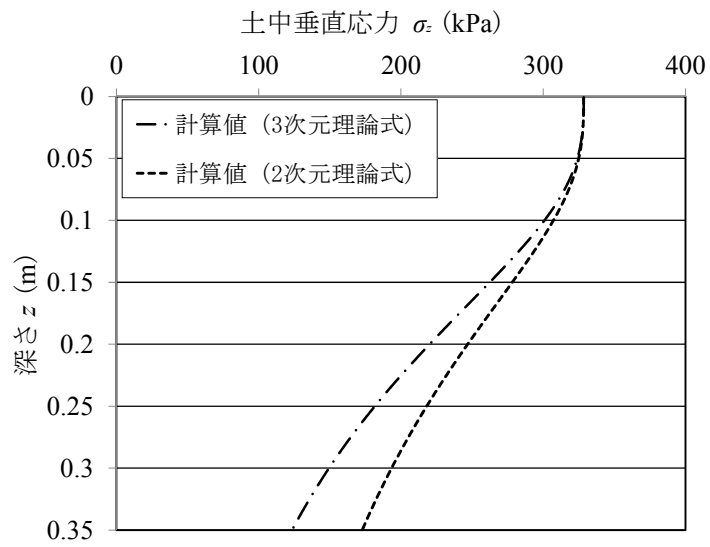


図-4.10 土中垂直応力計算結果 (前後進コンパクタ B)

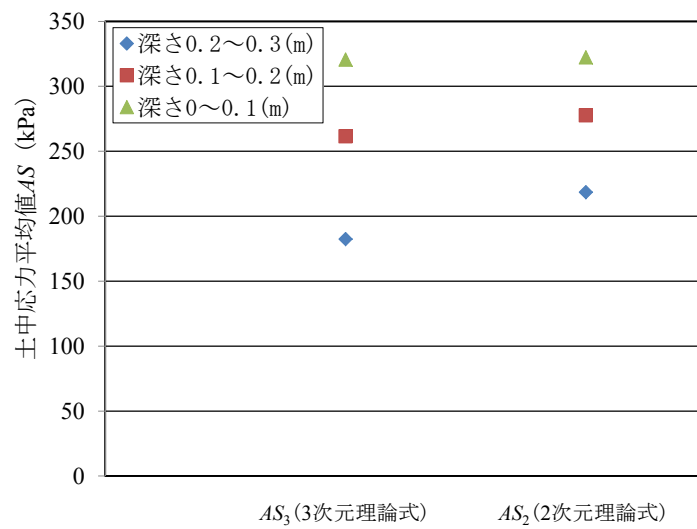


図-4.11 土中応力平均値 AS (前後進コンパクタ B)

4.3. 土槽実験による土中応力計算式の検証

前節で示した3次元、2次元の理論式が、前後進コンパクタのような平板式振動型締固め機械に適用可能かを検証するため、実験ピットにて実際の前後進コンパクタ下部に発生している土中応力を測定し、理論式による計算結果と比較・検討を行った。

4.3.1. 実験方法

実験は3.2.1.に示した、土木研究所実験ピット内に作成した基礎地盤を利用して行った。基礎地盤の実験ピット中央線上の深さ0.1 m, 0.2 m, 0.3 mに土圧計(共和電業製:BEE-A-1MP)を測定面が上面になるよう埋め込み、その上を再度10 tonタイヤローラにて締固めを行った(図-4.12)。

その中央線上を表-4.1に示す前後進コンパクタBにて図-4.12の左から右へ走行し、その際の最大値を、前後進コンパクタが土圧計直上を通過した時の鉛直方向土中土圧(土中鉛直応力)として測定・記録した。なお、サンプリングタイムは、前後進コンパクタBの振動周波数が73 Hz、走行速度が約0.36 m/secであるため、1 msecとした。

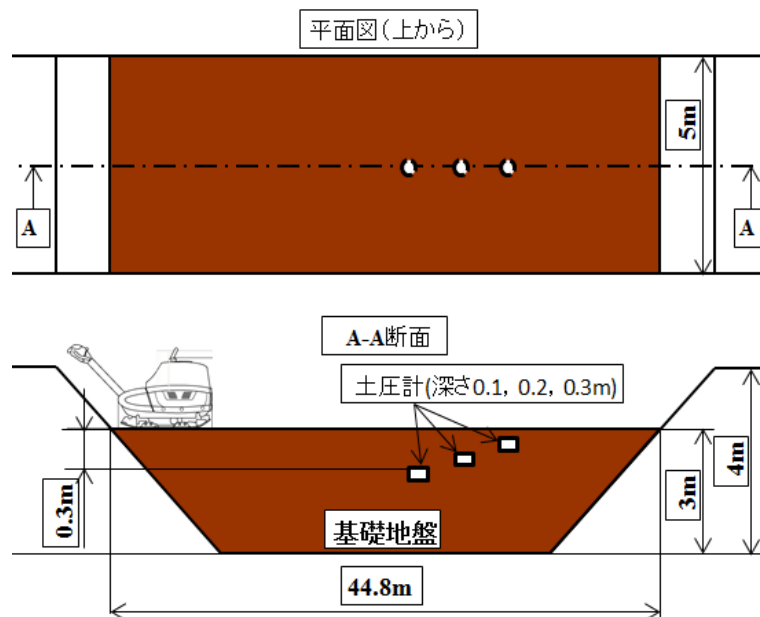


図-4.12 土中応力計測実験

4.3.2. 実験結果による土中応力計算式の検証

上記の測定を3回行い，その結果と3次元理論式(4.1)，2次元理論式(4.4)にて計算した値を図-4.13に示す．

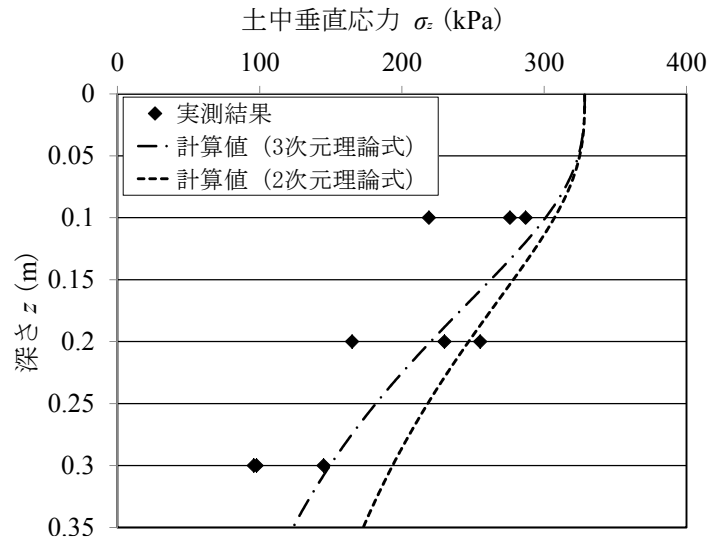


図-4.13 前後進コンパクタB 土中応力
(実測結果と計算値)

図-4.13によると，実測結果は両計算値よりやや低い値を示す傾向があるが，深さによる減衰具合は似た傾向を示している．したがって，地表面～30 cmの範囲であれば，前章で示したAS値を用いることによって，各締固め機械が任意の深さ区間へ及ぼす締固め能力を表すことは可能であるといえる．

また実測結果は，2次元の理論式より3次元の理論式による計算結果により近い値を示している．このことから本実験状況は側壁から十分離れているため，3次元の理論式のほうがより即していると考えられる．

4.4. 土槽実験による締固め能力指標 AS の検証

締固め機械の締固め能力は、締固め後の土の密度で確認することができる。そこで土の密度を実験によって測定し AS 値との関係を検討することにより、 AS 値を締固め能力指標として使用した場合の適用性を検証した。

4.4.1. 実験フィールド

本実験では 3.2.1. に示した実験フィールドと同様のものを作成して行った。また初期状態についても、3.2.1. と同様とした。実験フィールドの掘削溝幅は表-4.2 に示すものとした。

表-4.2 実験フィールド溝幅

	接地幅A (m)	溝幅 (m)	走行レーン数
プレートコンパクタ	0.35	0.7	2 : ラップ幅0m
前後進コンパクタA	0.5	0.55	1
前後進コンパクタB	0.445	0.5	1
前後進コンパクタC	0.5	0.55	1
前後進コンパクタD	0.55	0.6	1

4.4.2. 実験材料

本実験では 3.2.2. に示したものと同じ 3 種類の材料を用いて行った。

4.4.3. 使用小型締固め機械

本実験では、表-4.1 に示す小型平板式締固め機械を用いて行った。表-4.1 は現在日本国内で一般的に販売されている平板式振動型締固め機械の仕様を基にしている。

4.4.4. 実験パターン

本実験では、施工含水比の影響を調査するため、土質(1)において3種類の含水比にて実験を行い、他の土質では自然含水比（購入時含水比）に近い値で行った。表-4.3に実験パターンを示す。

表-4.3 実験パターン

	実験 ケース1	実験 ケース2	実験 ケース3	実験 ケース4	実験 ケース5
使用材料	土質(1)	土質(1)	土質(1)	土質(2)	土質(3)
実験時含水比	11%	15%	16%	16%	29%
使用締固め機械	プレート 前後進B 前後進D	プレート 前後進B 前後進D	プレート 前後進B 前後進D	プレート 前後進A 前後進B 前後進C	プレート 前後進A 前後進C

4.4.5. データ測定方法

4.4.1.に示した実験フィールド上を各小型締固め機械にて16回（8往復）走行を行い、0、2、4、6、8、12、16回走行後の密度を測定した。締固め機械の運転方法および密度の測定方法は、3.2.5.に示した方法と同様に行った。

4.4.6. 実験結果による締固め能力指標 *AS* の検証

本章では、3章と同様に、3.3.1、3.3.2に示した「到達密度」（8回締固め後の乾燥密度値）を用いて検討を行うこととする。

各実験ケースにおける、各締固め機械の地表面～0.1 m、0.1 m～0.2 m、0.2 m～0.3 mそれぞれの深さにおける到達密度の測定結果を図-4.14～4.18に示す。

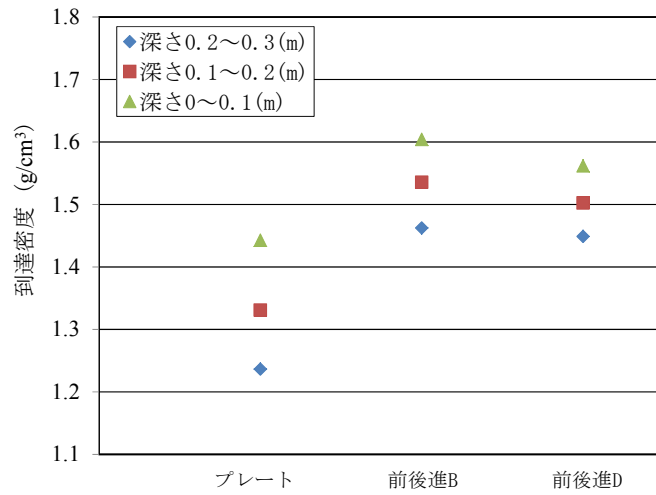


図-4.14 到達密度 (実験ケース1)

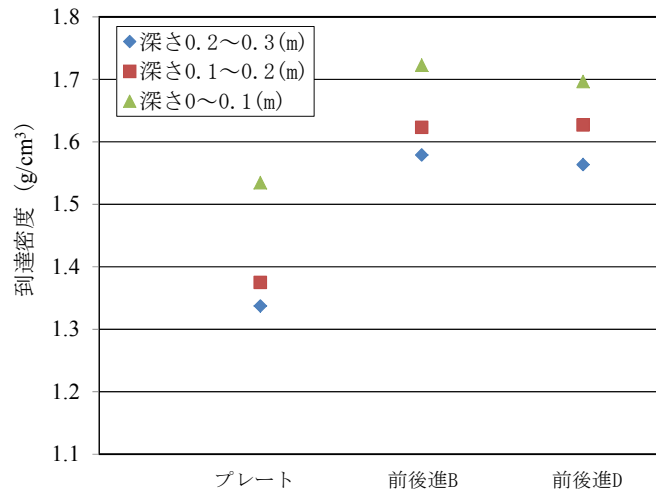


図-4.15 到達密度 (実験ケース2)

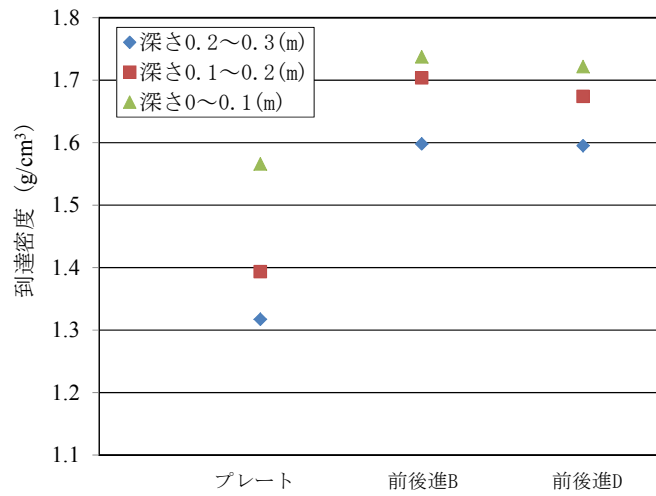


図-4.16 到達密度 (実験ケース3)

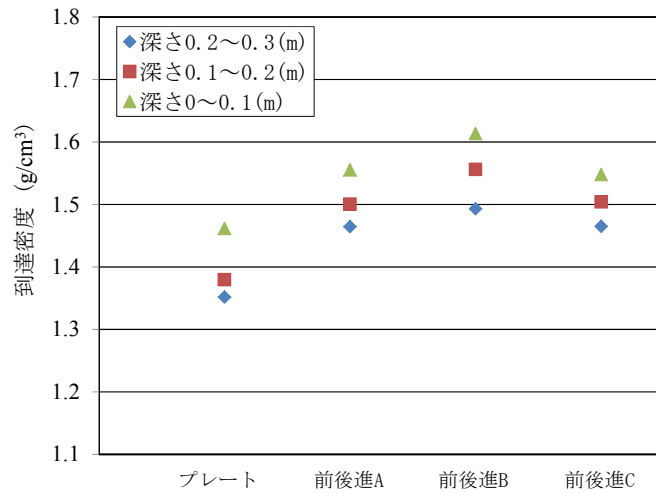


図-4.17 到達密度 (実験ケース4)

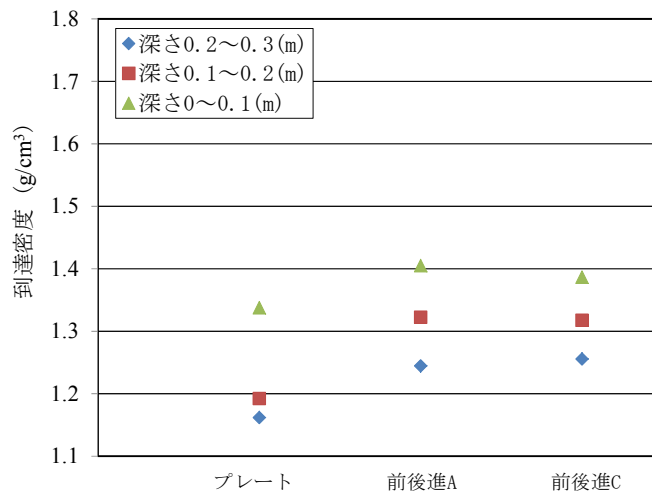


図-4.18 到達密度 (実験ケース5)

図-4.14~4.18を見ると図-4.3および図-4.9と同様に、前後進コンパクタBの締固め能力が高いこと、またプレートコンパクタの締固め能力が低いことなどが推測される。したがって実験による到達密度と理論式から計算される AS 値には相関があると考えられる。そこで到達密度の測定結果と3次元理論式および2次元理論式による土中応力平均値 AS_3 、 AS_2 との関係をそれぞれ表すと図-4.19~4.23(3次元理論式)、図-4.24~4.28(2次元理論式)のようになる。関係は自然対数関数にて近似し、決定係数も図中に示している。

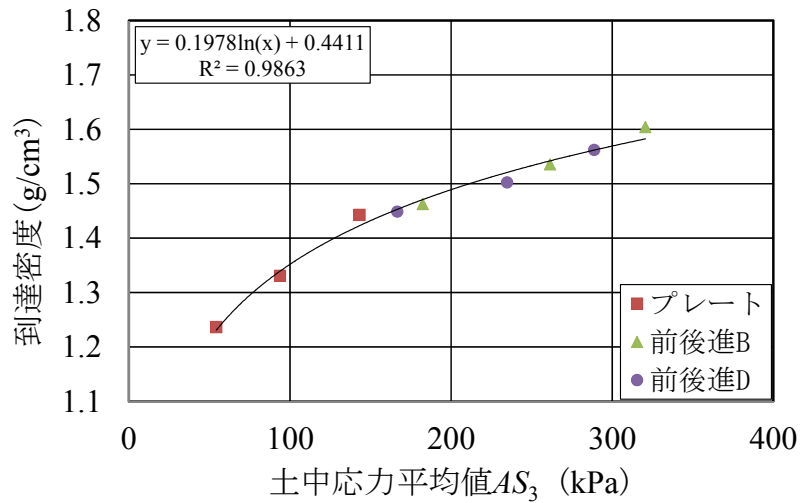


図-4.19 土中応力平均値 AS_3 (3次元理論式) -到達密度 (実験ケース1)

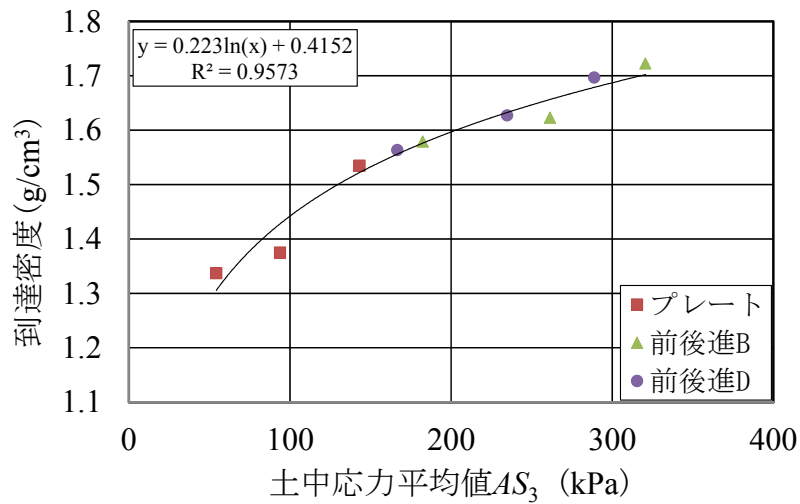


図-4.20 土中応力平均値 AS_3 (3次元理論式) -到達密度 (実験ケース2)

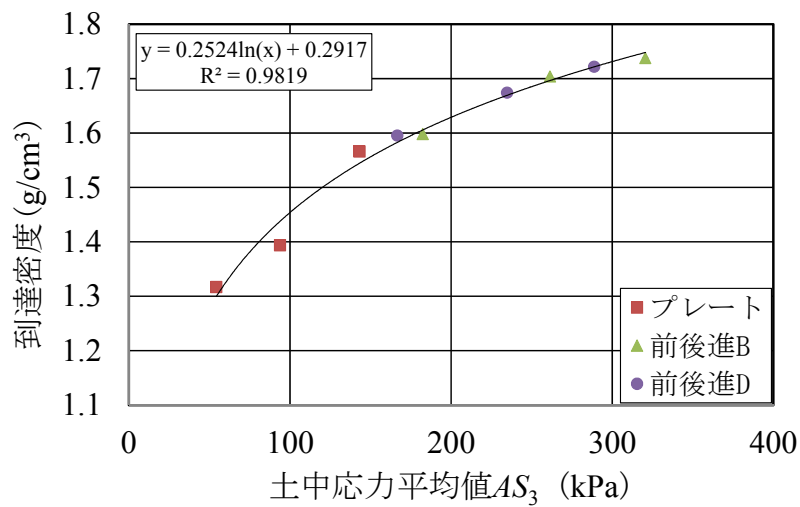


図-4.21 土中応力平均値 AS_3 (3次元理論式) -到達密度 (実験ケース3)

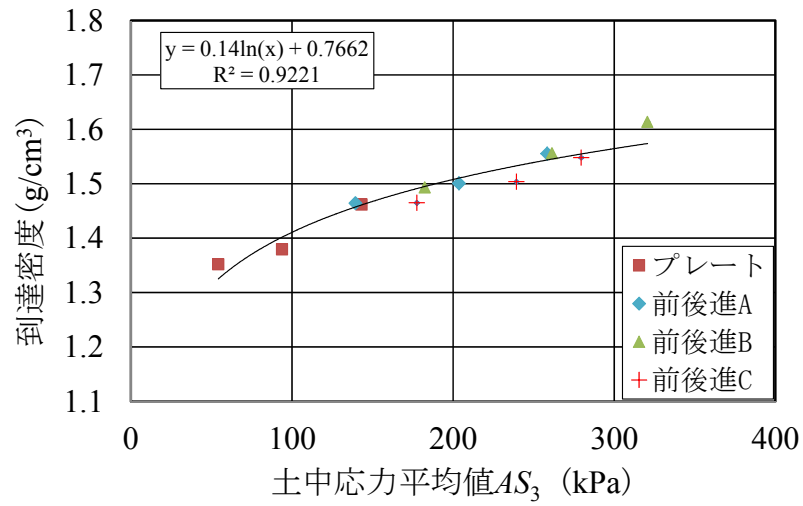


図-4.22 土中応力平均値 AS_3 (3次元理論式) - 到達密度 (実験ケース4)

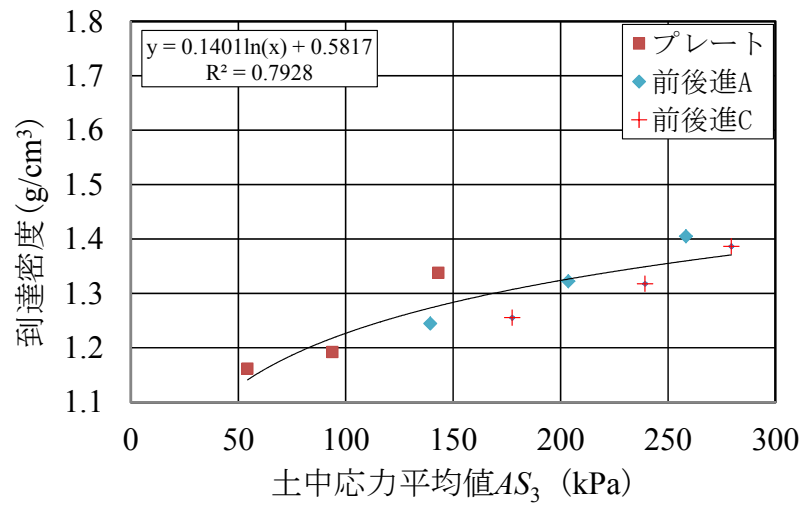


図-4.23 土中応力平均値 AS_3 (3次元理論式) - 到達密度 (実験ケース5)

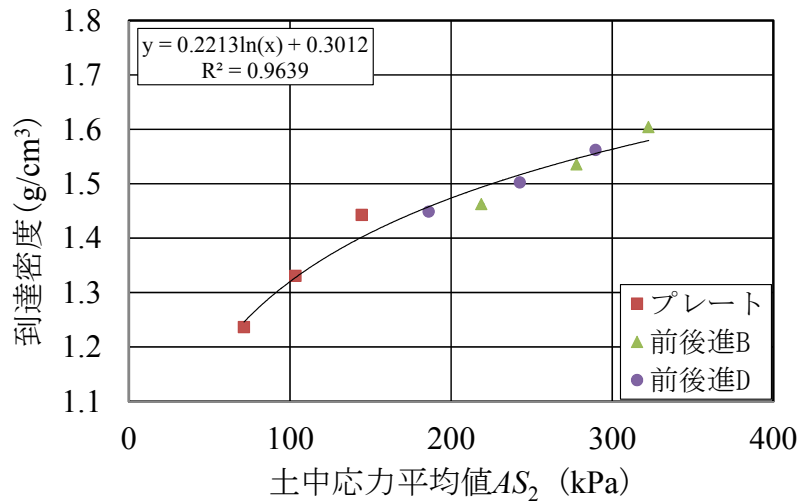


図-4.24 土中応力平均値 AS_2 (2次元理論式) -到達密度 (実験ケース1)

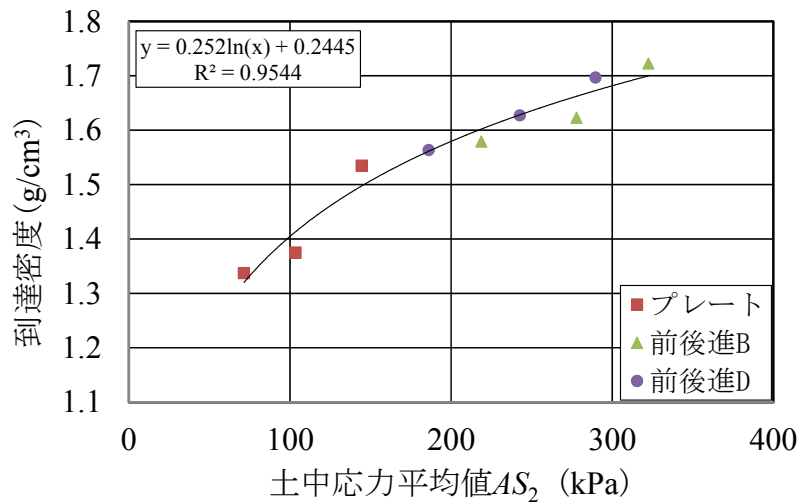


図-4.25 土中応力平均値 AS_2 (2次元理論式) -到達密度 (実験ケース2)

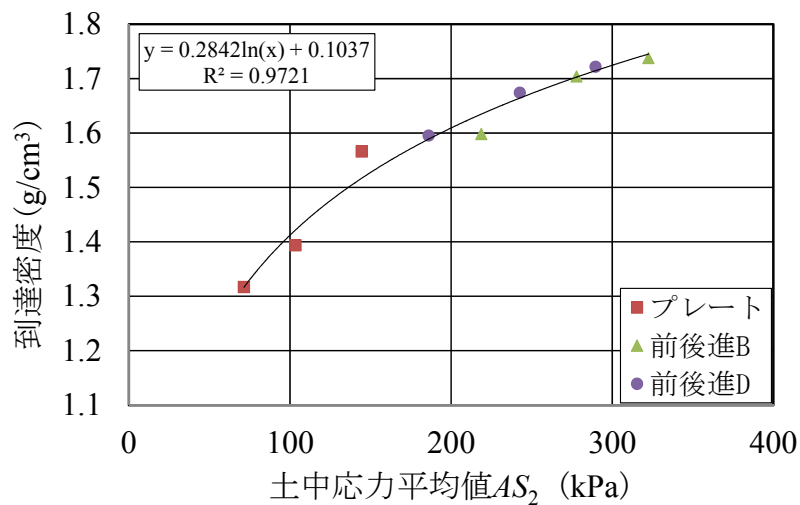


図-4.26 土中応力平均値 AS_2 (2次元理論式) -到達密度 (実験ケース3)

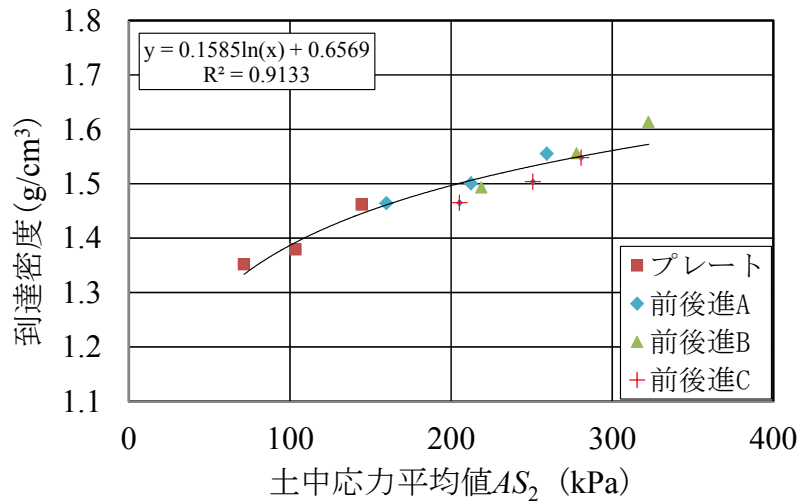


図-4.27 土中応力平均値 AS_2 (2次元理論式) - 到達密度 (実験ケース4)

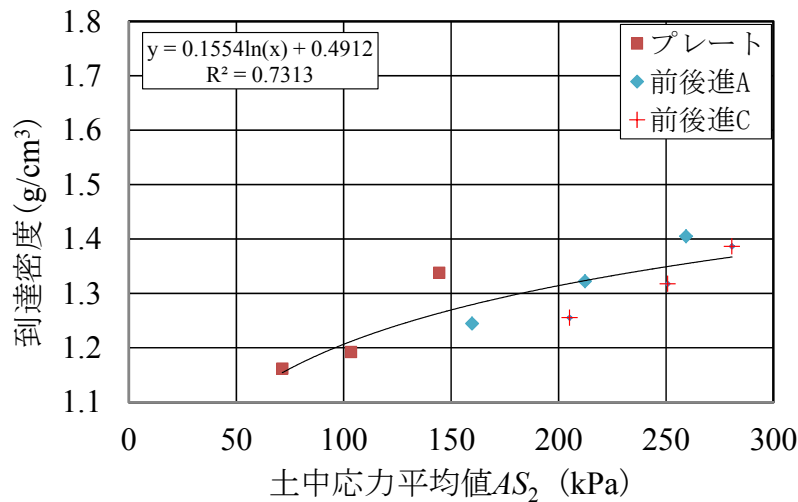


図-4.28 土中応力平均値 AS_2 (2次元理論式) - 到達密度 (実験ケース5)

図-4.19～4.23 および図-4.24～4.28 によると、到達密度と土中応力平均値 AS_3 , AS_2 は、実験ケース 1～4 において非常に強い相関が、実験ケース 5 においても強い相関があることがわかる。したがって、式(4.3)および式(4.6)にて計算される土中応力平均値 AS_3 , AS_2 は、到達密度すなわち締固め能力と強い相関があり、締固め能力の大きさを表す指標として適用可能といえる (AS 値が大きい方が締固め能力が高い)。

また、図-4.19～4.23 (3次元理論式) と図-4.24～4.28 (2次元理論式) を比較すると、3次元理論式における AS_3 値との相関関係の方が若干強いことがわかる。このことは、本実験では前後進コンパクタの片側をコンクリート壁に沿って運転しているが、3次元の理論式のほうがより本実験状況に即していることを示していると考えられる。

4.5. AS 値による締固め能力（到達密度）の推定

前章より、 AS 値は締固め能力（到達密度）の大きさを表す指標として適用可能であることがわかった。次に、 AS 値から締固め能力（到達密度）を一意的に推定できることができれば AS 値の実用性をさらに向上できると考えられる。本章ではその可能性について検討を行った。なお、検討は前節を参照に、3次元理論式の結果図-4.19～4.23 (AS_3) を用いて行うこととした。

図-4.29 は図-4.19～4.23 をそのまま一つの図にまとめたものである。図-4.29 によると到達密度は土質・含水条件毎に異なっているため、本図を用いて AS_3 値から一意的に到達密度を推定することは困難である。そこで図-4.29 にプロットした各実験データの到達密度を、土質・含水条件の影響を受けず AS_3 値のみに依存する無次元量で表すことを検討した。ここで AS_3 値は、締固め機械がその深さ区間に発生させた土圧を表しており、締固め機械がその深さ区間に及ぼした締固めエネルギーの大きさを表しているとも言える。したがって、前述の「 AS_3 値のみに依存する」は「締固めエネルギーにのみ依存する」と言い換えることができる。

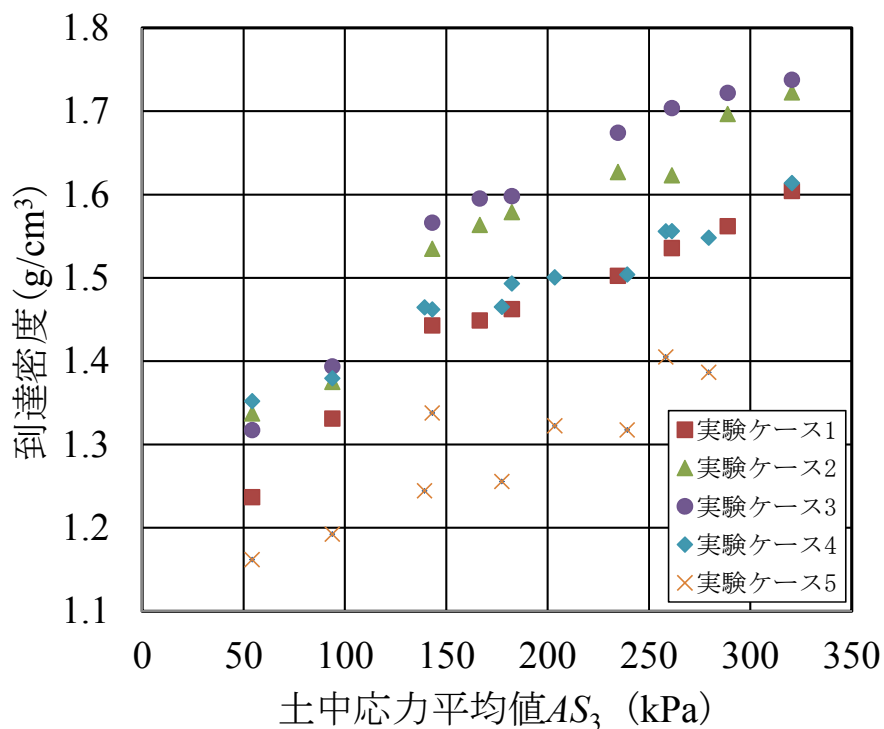


図-4.29 土中応力平均値 AS_3 - 到達密度

到達密度を土質・含水条件の影響を受けず締固めエネルギーのみに依存する無次元量に変換するためには、図-3.4～3.6 に示す標準締固め曲線上の密度を基準にして整理する方法が有効と考えられる。なぜならば標準締固め曲線は、各土質および含水比において同一の締固めエネルギーによって得られた密度を表しているためである。

図-4.29 にプロットされた各実験データは、「コアカッターによる土の密度試験方法」により到達密度と含水比をそれぞれ持っている。従って、各実験で使用した土質の標準締固め曲線を表わしたグラフ内（図-3.4～3.6）に例えば図-4.30 の A 点のようにプロットすることができる。

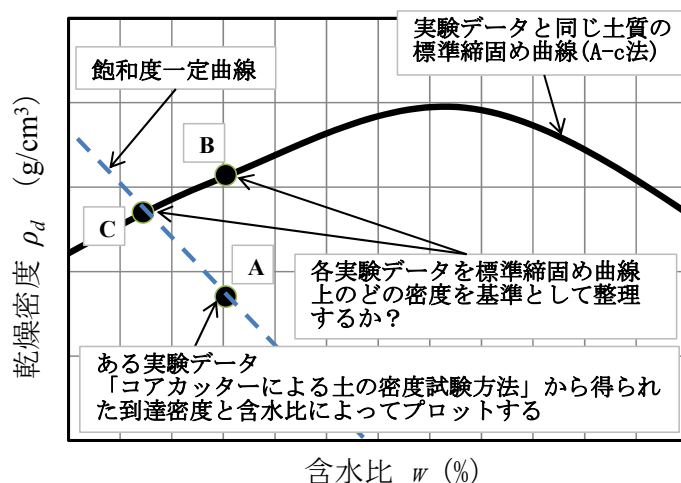


図-4.30 「基準密度」の検討（ある実験データの場合）

しかしここで、例として示した図-4.30 の A 点の到達密度を、標準締固め曲線上の B 点（同一含水比における密度）、C 点（同一飽和度における密度）のどちらを基準にして整理するかが問題となる。整理の目的は締固めエネルギーのみに依存した無次元量を提案することであるから、まず異なる締固めエネルギーによって締固め曲線がどのように変化するかを考える。すると、一般的に締固め曲線は締固めエネルギーが大きいほど左上に向かって、形状をほぼ維持しながら、飽和度一定曲線に沿うように移動することが知られており⁴⁾、またこの傾向は土質が異なっても同様に現れている⁵⁾。そこで過去の研究⁶⁾も参考にし、異なる締固めエネルギーによる締固め曲線の変化を次の様に仮定する。

仮定 1：異なる締固めエネルギーによる締固め曲線は、飽和度一定曲線に沿って移動し（図-4.31）、その移動量すなわち飽和度一定曲線上の密度の比（図-4.31 の密度 a, b の比）は、締固めエネルギーの比（図-4.31 の A, B の比）に依存する。また、本仮定はすべての飽和度一定曲線において（すべての含水比条件において）成り立つものとする。（図-4.31 において、 $a : b = d : c$ ）

仮定 2 : 締固めエネルギーの比が等しければ, 飽和度一定曲線上の密度の比は土質が異なっても等しくなる. すなわち, 図-4.31 と異なる土質で, 同様に 2 種類の締固めエネルギーによる締固め曲線を図-4.32 のように描いた場合, 締固めエネルギー $A : B$ (図-4.31) = $A' : B'$ (図-4.32) ならば, 飽和度一定曲線上の密度の比 $a : b$ (図-4.31) = $a' : b'$ (図-4.32) となる.

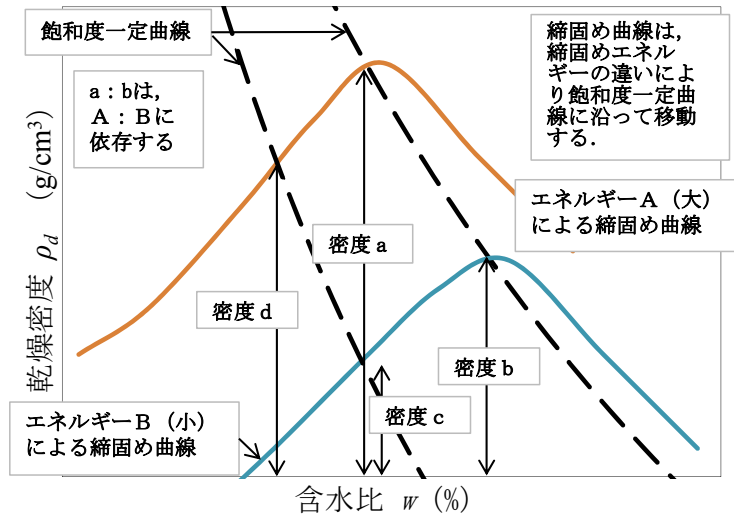


図-4.31 エネルギーによる締固め曲線の移動 (仮定1)

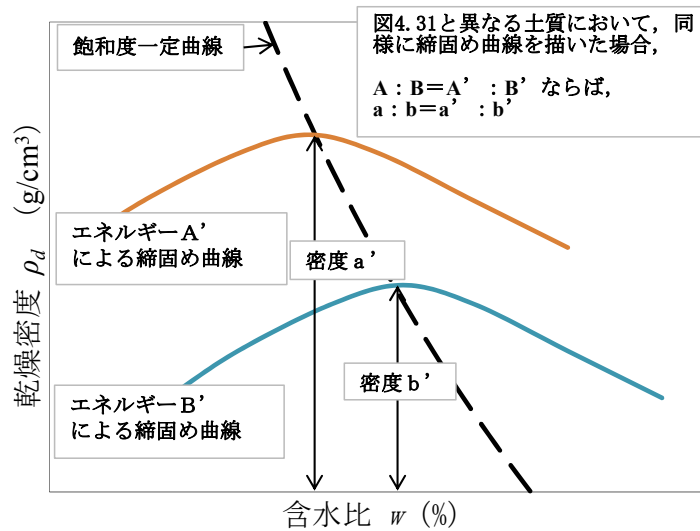


図-4.32 エネルギーによる締固め曲線の移動 (仮定2)

以上の仮定から、締固めエネルギーの変化による密度の変化を比較するには、飽和度一定曲線上の密度（図-4.31の密度 a と b）を比較すればよく（同一含水比における密度 a と c を比較するのではなく）、そして締固めエネルギーのみに依存する無次元量を得る際の「基準密度」として「実験データと同一土質における標準締固め曲線上の、実験データと同一飽和度の密度」（図-4.30の点 C）が提案できる。

具体的には、図-4.29の各実験データが持っている到達密度と含水比から飽和度をそれぞれ算出し、その飽和度における実験データと同じ土質の標準締固め試験の乾燥密度を図-3.4～3.6に飽和度一定曲線を描くことでそれぞれ読み取る（図-4.33点 C：以下基準密度と呼ぶ）。そしてその基準密度にて各実験データの到達密度を除した値を土質・含水条件の影響を受けず締固めエネルギーのみに依存する無次元量として利用することとした。（以下「同一飽和度における密度比」と呼ぶ）。

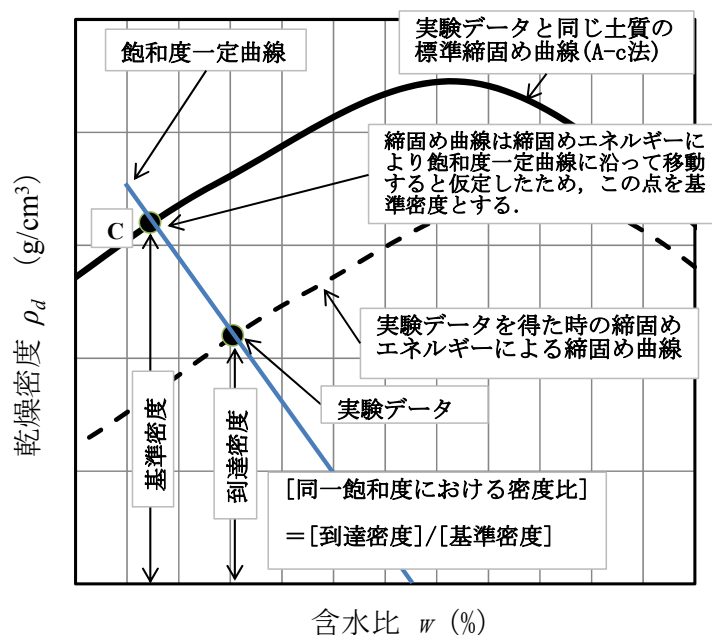


図-4.33 「同一飽和度における密度比」の定義

この「同一飽和度における密度比」は図-4.33に示すように、その実験データを得た時の締固めエネルギーによる締固め曲線と標準締固め曲線との位置関係（飽和度一定曲線に沿った）を表しており、例えば「同一飽和度における密度比」=100%ならば、実験データは標準締固め曲線上にプロットされ、その時の締固めエネルギーによる締固め曲線が標準締固め曲線と同一であることを示している。

図-4.29 のすべての実験データを「同一飽和度における密度比」に変換し、ひとつのグラフにまとめた結果を図-4.34 に示す。

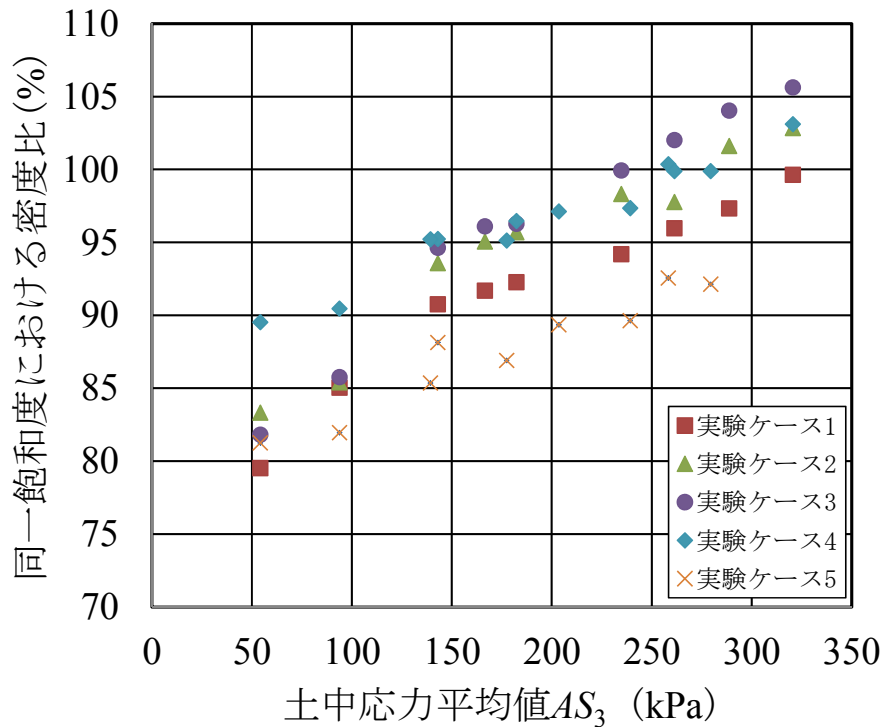


図-4.34 AS_3 値 — 同一飽和度における密度比

本図によると、「同一飽和度における密度比」と AS_3 値には相関関係が見られるが、10%～15%程度のばらつきが未だ存在している。ここで、このばらつきは施工時含水比の影響が未だ含まれているため（施工時含水比の影響を排除しきれていないため）と想定し実験データを施工時含水比にて再整理してみる。各実験時含水比と各土質の最適含水比の差を最適含水比で除した値（（「実験時含水比」－「最適含水比」）／「最適含水比」：「最適含水比からの乖離割合」と呼ぶ）を計算すると図-4.35 のようになる。

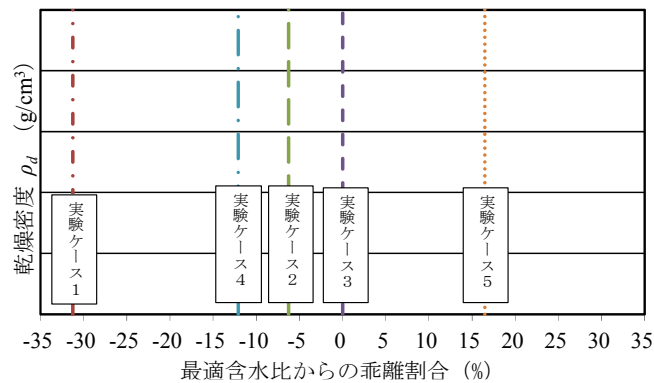


図-4.35 最適含水比からの乖離割合

次に実験データを「最適含水比より著しく乾燥側（実験ケース1）」「最適含水比より著しく湿潤側（実験ケース5）」「最適含水比付近（実験ケース2,3,4）」として場合分けをすると
 図-4.34 は図-4.36, 4.37, 4.38 のようになり, 「乾燥側」と「湿潤側」ではデータ数が少ないため確定はできないが, 少なくとも含水比条件を「最適含水比付近」と限定することにより, 「同一飽和度における密度比」のばらつきを小さい範囲に収めることができる.

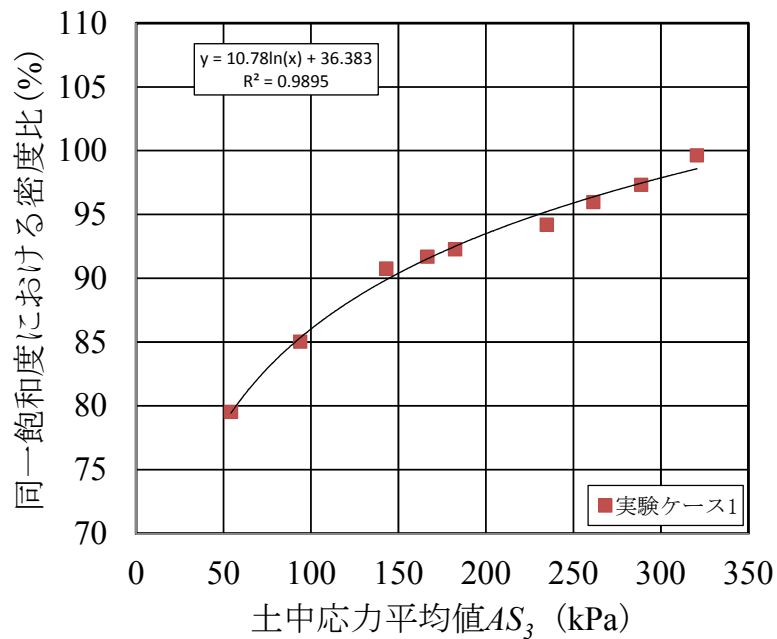


図-4.36 土中応力平均値 AS －同一飽和度における密度比(最適含水比より著しく乾燥側)

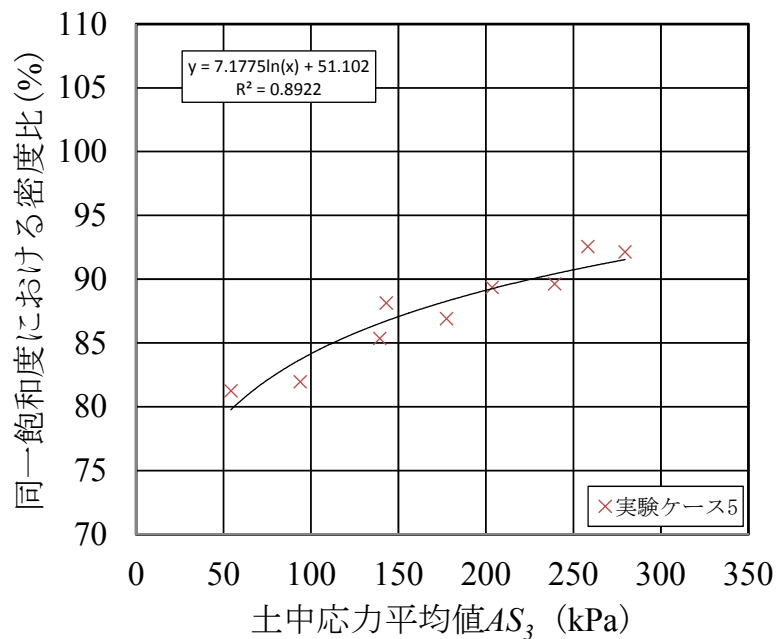


図-4.37 土中応力平均値 AS －同一飽和度における密度比(最適含水比より著しく湿潤側)

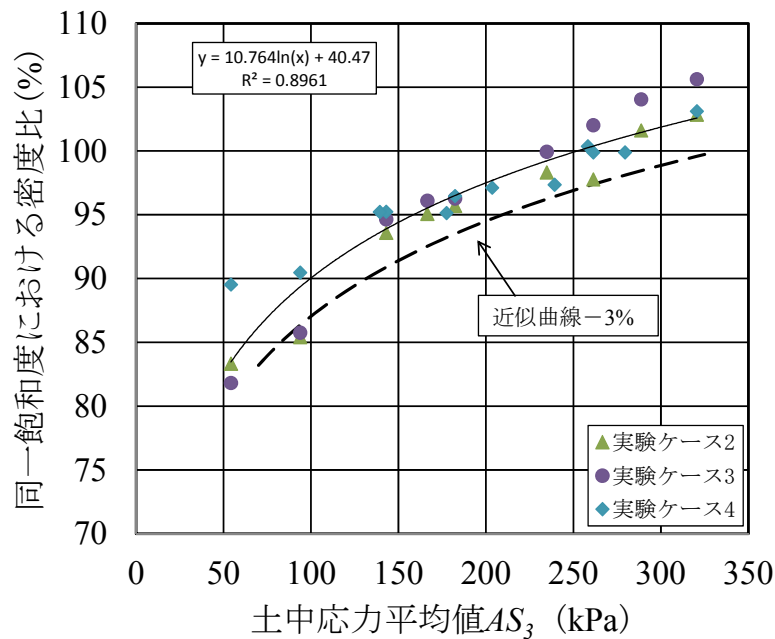


図-4.38 土中応力平均値 AS －同一飽和度における密度比（最適含水比付近）

以上から、含水比条件を「最適含水比付近」と限定し、到達密度を「同一飽和度における密度比」に変換することにより、図-4.29の実験データから図-4.38を得ることができる。図-4.38は土中応力平均値 AS_3 と「同一飽和度における密度比」との間に強い相関があることを示しており、本図を用いれば AS_3 値から「同一飽和度における密度比」を一意的に推定することが可能となる（例： AS_3 値＝150 kPaならば「同一飽和度における密度比」＝約95%）。そして「同一飽和度における密度比」が得られれば、その値に応じて標準締固め曲線を移動させることにより「 AS_3 値に相当する締固めエネルギーによる締固め曲線」を得ることが可能になり（例：「同一飽和度における密度比」＝約95%ならば標準締固め曲線を飽和度一定曲線に沿って下方に5%移動させる）、さらにその締固め曲線から限定範囲内の任意の施工含水比に対して到達密度を推定することが可能となる。

すなわち、含水比条件を「最適含水比付近」と限定すれば、 AS_3 値から到達密度を推定することが可能ということになる。実際の施工が最適含水比を目標に行われる場合がほとんどのため、本研究の結果でも実用性はあると考えられる。また、図-4.38が成り立つ土質条件は、実験ケース2,3,4から土質(1)、(2)に類似した土質ということになる。土質(1)、(2)は一般的に入手でき、盛土施工に使用されている砂質材料を用いており、本研究の結果でも実用性はあると考えられる。

含水比条件グループ分けの境界は、乾燥側は乖離割合が $-12\% \sim -31\%$ の間、湿潤側は $0\% \sim +16\%$ の間にあると予想されるが、本研究のデータのみでは特定はできないため、「最適含水比付近」の適用条件は実験ケース2, 3, 4の結果より、現状では乖離割合が $-12\% \sim 0\%$ とすることとする。

図-4.36, 4.37, 4.38は、前述の仮定が、著しく最適含水比から乖離している施工含水比では成り立たない。すなわち締固めエネルギー比が同等であっても含水状態によって密度の変化量が異なることを示している。これは、既存の研究⁸⁾などを参考にすると、土粒子の移動を妨げる抵抗力の要因が含水比状態によって下記の3つのように異なっているためではないかと考えられるが、本実験結果のみでははっきりとしたことは言えない。

- ・ 含水比が著しく低い場合は、土粒子間に水があまり存在しないため、抵抗力は土粒子同士の摩擦力の影響が大きい。
- ・ 含水比が最適含水比付近の場合は、抵抗力は土粒子間の接点に吸着した水の表面張力の影響が大きい。
- ・ 含水比が著しく高い場合は、水を土粒子間から排出する必要があるため、抵抗力は水の排出抵抗の影響が大きい。

今後様々な条件にて実験データを蓄積し、含水比によって異なる理由やその境界条件、また他の土質でも同様の傾向が得られるか等を検証していきたいと考えている。

4.6. 機械仕様による機種及び施工可能厚さの選定

図-4.38と土質試験結果を用いることにより、機械仕様から任意の深さ区間における締固め後の到達密度を推定することが可能となる。すなわち機械仕様から要求仕様（締固め密度）を満足させることが可能な機種および施工厚さを選定することができ、施工の信頼性と構造物の品質の向上につなげることができる。

その具体的な手法は以下の様になる。

- (1) 使用を想定している機械の仕様 A, B と図-4.4～4.6より、深さ区間、地表面～0.1 m, 0.1 m～0.2 m, 0.2 m～0.3 mにおける $g(A, B, z_1, z_2)$ を求める。
- (2) (1)で求めた $g(A, B, z_1, z_2)$ と機械仕様 W から、式(4.3)よりそれぞれの深さ区間における土中応力平均値 AS_3 を算出する。
- (3) (2)で算出した AS_3 と図-4.38より、それぞれの深さ区間における「同一飽和度における密度比」を求める。このとき、図-4.38には多少ばらつきがあるため、締固め不足が発生しないよう安全を考慮し、図中の近似曲線を3%下方へオフセットした破線から求めた値を採用する。
- (4) 使用する材料の土質試験結果に飽和度一定曲線を記載し、(3)で求めた「同一飽和度における密度比」から、標準締固め曲線を飽和度一定曲線に沿って移動し、各深さ区間における締固め曲線を作成する。
- (5) 施工含水比を仮定し、(4)で求めた各深さ区間における締固め曲線から乾燥密度を求め、その値が要求仕様を満たしているか否かを判定し、適切な機種および施工可能な施工厚さを選定する。

なお、本手法が適用できる条件は、「施工時含水比の乖離割合が-12%～0%であり、かつ土質は土質(1)および(2)に類似したもの」である。

上記の手法を検証するために、実際に土質(1)の材料を前後進コンパクタDにて締め固める場合の、施工可能厚さの選定を行うと、表-4.4および図-4.39の様になる。ここで表-4.4の手順(5)で求めた値は、手順(3)で安全側になるよう考慮しているため、実験結果である図-4.16の値より約5%程度低い値となっている。

表-4.4に示した通り、施工含水比を16%、要求仕様を最大乾燥密度の95% (1.590 g/cm^3 : 図-4.39の2点鎖線)と仮定すると、施工可能厚さは0.2 mとなる。

なお、締固め回数は前述の通り、本実験結果や過去の研究結果などから8回程度が目安であると考えられる。しかしながら、施工中の沈下量などを把握することにより、密度上昇の収束、すなわち土粒子の再配置の終了を判断して設定することも可能である。

表-6 施工可能厚さの選定

(土質(1), 施工含水比16%, 前後進コンパクタD)

手順	深さ 地表面～0.1 m	深さ 0.1 m～0.2 m	深さ 0.2 m～0.3 m
手順(1) $g(A, B, z_1, z_2)$	2.30	1.90	1.35
手順(2) 土中応力平均値 AS_3	286.6 kPa	236.7 kPa	168.2 kPa
手順(3) 同一飽和度における密度比	98.5%	96.0%	92.5%
手順(4)	図-35		
手順(5) 予想到達密度 (施工含水比 16%)	1.645 g/cm ³	1.595 g/cm ³	1.525 g/cm ³
要求仕様 (ρ_{dmax} の 95%)	1.590 g/cm ³		
施工可能判定	○	○	×

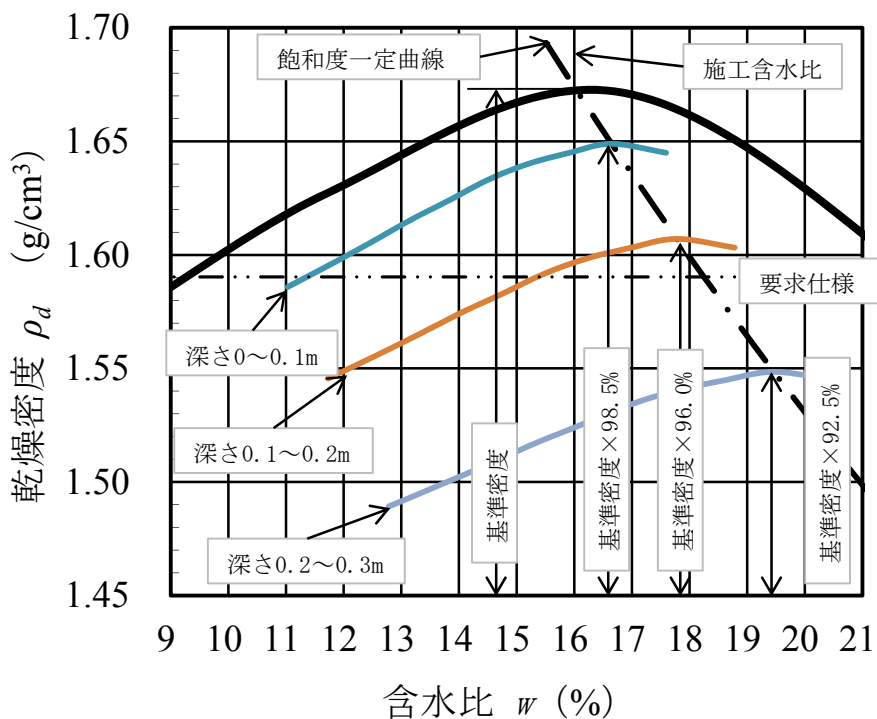


図-4.39 各深さ区間における締固め曲線

4.7. まとめ

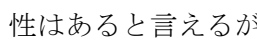
小型平板式締固め機械のうち振動力を締固め原理としているプレートコンパクタと前後進コンパクタを対象とし、機械下部の土中応力に着目して機械の仕様から算出することができる締固め能力を表す指標の提案を行った。その結果、以下の点が判明した。

- (1) 前後進コンパクタ下部の地中応力を表わす理論式から計算される土中応力平均値 AS_3 を用いることにより、機械仕様から任意の深さ区間 ($z_1 \sim z_2$) の締固め機械の締固め能力の指標を提案することができる。
- (2) 地中応力を表わす理論式は3次元、2次元の理論式がそれぞれあるが、施工状況などによって使い分けることが、より精緻な締固め能力指標を得るために重要であると考えられる。

さらにその指標の適用性を、実際の締固め機械を用いた土槽実験結果と比較することにて検証した。その結果、以下の点が判明した。

- (3) 式(4.3)で計算される土中応力平均値 AS_3 と実験による到達密度には、各土質条件において強い相関がある。到達密度は機械の締固め能力を表わしているから、したがって AS_3 値は、締固め能力の大きさを表す指標として適用可能であるといえる。 $(AS_3$ 値が大きい方が締固め能力が高い)。
- (4) 4.4節の実験結果は、2次元理論式より3次元理論式から算出される AS_3 値との相関関係の方が若干強い。したがって、本実験状況は3次元理論式の方により即していると考えられる。
- (5) 「同一飽和度における密度比」を導入すれば、 AS_3 値から、任意の土質・含水比の到達密度を推定することが可能である(その土質の標準締固め曲線が必要)。ただし、本手法が適用できる条件は、「施工時含水比の乖離割合が $-12\% \sim 0\%$ であり、かつ土質は土質(1)および(2)に類似したもの」である。
- (6) 図-4.38と式(4.3)、使用する材料の土質試験結果を用いることにより、機械仕様から要求仕様(締固め密度)を満足させることが可能な機種および施工厚さを選定することが可能である。ただし、本手法が適用できる条件は、「施工時含水比の乖離割合が $-12\% \sim 0\%$ であり、かつ土質は土質(1)および(2)に類似したもの」である。

小型締固め機械は大型締固め機械に比べ研究が遅れており、施工現場における機種選択も、入手の容易さなどで行われていることが多いのが現状である。本研究が小型締固め機械や施工厚さを選定する際の一助となり、狭隘部や構造物近傍といった重要な場所の締固め施工の信頼性とそれにより造成される構造物の品質の向上に寄与することを期待する。また本研究結果は、小型締固め機械の開発現場でも利用できる。従来の仕様にとらわれず、画期的な新製品が開発されることも期待している。

課題として、4.5、4.6で示した手法の適用範囲が、施工時含水比の乖離割合 $-12\% \sim 0\%$ の比較的狭い範囲になっていることが挙げられる。実際の締固め施工は、標準締固め曲線の最適含水比を目標に、かつ最適含水比より湿潤側では地盤の強度が低下する恐れがあるため⁸⁾、「最適含水比付近のやや乾燥側」にて行われることが多く、前述の適用範囲でも実用性はあると言えるが、-4.35を見ると、適用範囲はもう少し外側にあると考えられる。今後様々な土質・含水比での実験を行い、適用範囲および土中応力平均値 AS の適用性をさらに検証していきたい。また、本研究は小型平板式締固め機械のうち振動力を締固め原理としているプレートコンパクタと前後進コンパクタのみを対象として行ったが、今後はハンドガイドローラやランマなどでの検討も進めていきたいと考えている。

参考文献

- 1) テラメカニックス研究会：転圧ローラ工学，pp.52-60，1999.
- 2) 根本忠，日向正，井上利次：締固め機械の性能，創立 20 周年論文集，pp.26-47，建設機械化研究所，1984.
- 3) 東日本高速道路（株），中日本高速道路（株），西日本高速道路（株）：土工施工管理要領，p.参 37，2012.
- 4) 地盤工学会：土の締固め，pp73-76，p.66，pp.73-74，2012.
- 5) 龍岡文夫，藤代健司，須藤雅人，川辺翔平，菊池喜昭：盛土の締固め⑤，基礎工，vol.41，No.11，pp.96-99，2013.
- 6) 龍岡文夫，藤代健司，須藤雅人，川辺翔平，菊池喜昭，澁谷啓，李俊憲，堀田崇由：盛土の締固め⑥，基礎工，vol.41，No.12，pp.92-97，2013.
- 7) 建山和由：盛土の締固めの原理と施工管理，基礎工，vol.37，No.7，pp.10-13，2009.
- 8) 龍岡文夫，藤代健司，川辺翔平，菊池喜昭，建山和由，根本忠：盛土の締固め③，基礎工，vol.41，No.9，pp.103-106，2013.

第5章 加速度計を利用した締固め品質計測システムの検証

5.1. はじめに

前後進コンパクタにて締固め施工を行った場合の品質管理を合理化する手法の一つとして、加速度計を利用した品質計測システムがある。これは、前後進コンパクタに限らず、すべての振動型締固め機械の振動挙動が、地盤の剛性によって変化することに着目し、加速度計を取り付けることによりその挙動の変化を読み取り、地盤剛性を推定するものである（以下「加速度応答システム」と呼ぶ）。このシステムの特長は、振動型締固め機械が走行を行うのと同時に、品質管理指標の一つである地盤剛性を連続的に計測できることにある。これにより品質測定を面的に多点で行うことが可能となり、合理化を図ることができる。

この加速度応答システムは、1980年代頃から大型の振動ローラにおける研究が先行しており^{1~6)}、各メーカーなどにおいて開発、実用化がなされてきている^{7~9)}。前後進コンパクタにおいては、2000年代より欧米のいくつかのメーカーにて開発・実用化されており^{10~12)}、2010年代に国内メーカーからも発売されている¹³⁾。しかし、この前後進コンパクタ用システムは開発からまだ日が浅く、管理指標との相関性などの検証が未だ十分に行われていないため、実現場への適用条件などが明らかになっていない。

そこで本章では、この前後進コンパクタ用加速度応答システムの現場への適用条件を明確にすることを目的として、システムの表示値と密度・地盤剛性に関する基礎データの収集のための実験を行い、それらデータを基に相関性の検討を行った。

5.2. 加速度応答システムの種類と計測原理

加速度応答システムは前述のように大型振動ローラにおける研究・開発が先行しており、前後進コンパクタ用のシステムもこの大型振動ローラ用に開発された測定原理をそのまま利用している。加速度応答システム計測原理には、現在世界で主に表-5.1に示すようなものがある¹⁴⁾。

表-5.1 加速度応答値計測原理 (参考文献 14 に一部加筆)

ローメーカー	締固め測定 (基本式)	振動自動制御
Ammann	$k_s = 4\pi^2 f^2 \left(m_d + \frac{m_e r_e \cos(\phi)}{A} \right)$	振幅と振動数の調整
Bomag	$Z_d = \frac{(1-u^2) \cdot F_s \cdot 2}{E_{VIB} \cdot L \cdot \pi} \cdot \left(1.8864 + \ln \frac{L}{B} \right)$ where, $B = \sqrt{\frac{16 \cdot R \cdot (1-u^2) \cdot F_s}{\pi \cdot E_{VIB} \cdot L}}$	振動力の方向調整
Caterpillar	Geodynamik CMV = $C \left(\frac{A_2 \Omega}{A \Omega} \right)$ Geodynamik RMV = $\frac{A_{0.5} \Omega}{A \Omega}$ MDP = $P_g - WV \left(\sin \alpha + \frac{a}{g} \right) - (mV + b)$	RMVに基づく振幅調整
Dynapac	Geodynamik CMV = $C \left(\frac{A_2 \Omega}{A \Omega} \right)$ Bouncing Value = $\frac{A_{0.5} \Omega}{A \Omega}$	Bouncing Valueに基づく振幅調整
Sakai	$CCV = \left[\frac{A_{0.5\Omega} + A_{1\Omega} + A_{1.5\Omega} + A_{2\Omega} + A_{2.5\Omega} + A_{3\Omega}}{A_{0.5\Omega} + A_{1\Omega}} \right] \times 100$	なし

地盤のバネ係数を直接求める

地盤変形係数を直接求める

周波数解析により間接的に地盤剛性を求める

これらの測定原理は、表-5.1 に示すように主に次の3つに大別される。

- AMMAN 式：地盤のバネ係数を直接求める
- BOMAG 式：地盤変形係数を直接求める
- 周波数解析式：周波数解析により間接的に地盤剛性を求める

現在日本国内で入手できる加速度応答システムの測定原理は、BOMAG 式と周波数解析タイプ (様々な派生のシステムがある) の 2 種類である。以下それぞれの測定原理の概略について述べる。

5.2.1. BOMAG 式の概略 ^{6, 15)}

BOMAG 式は、振動式締固め機の振動部に加速度計を取り付け、その信号から地盤変形係数を推定するものである。具体的には、まず加速度信号より振動部にかかる地盤からの反力を算出し、これと加速度値を 2 回積分して得られる変位とで、地盤反力-鉛直変位図を描く (図-5.1)。

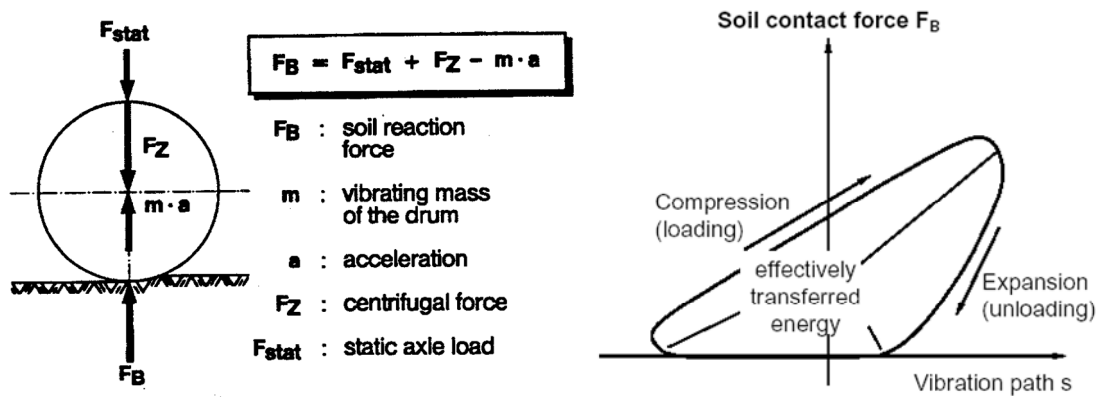


図-5.1 BOMAG 式システム 地盤反力-鉛直変位図

図-5.1 の立ち上がり部分（Compression 部）の傾きはすなわち地盤反力係数を表している
 ので、加速度計の信号を解析することにより、連続的に地盤反力係数を得ることができる
 (図-5.2)。また、必要があれば、接地面形状を考慮することにより地盤変形係数 E_{vib} を得
 ることができる。

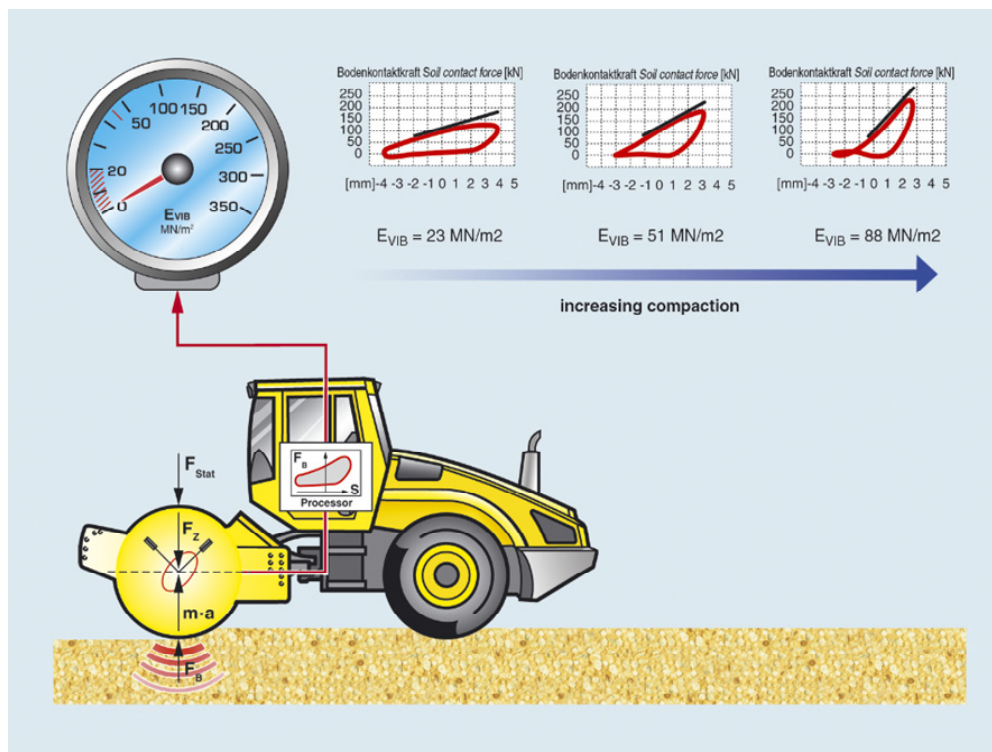


図-5.2 BOMAG 式 概略図

5.2.2. 周波数解析式の概要^{1,2,4,5)}

周波数解析式も BOMAG 式と同様に、振動式締固め機の振動部に加速度計を取り付け、その信号から地盤変形係数を推定するものである。本式の特徴は、振動式締固め機械の振動周波数スペクトルが、地盤合成に応じて特徴的に変化することを利用し、加速度計にて測定した振動周波数をスペクトル分析することにより、地盤の剛性を推定するものである(図-5.3)。本式には、様々な派生タイプが存在する。

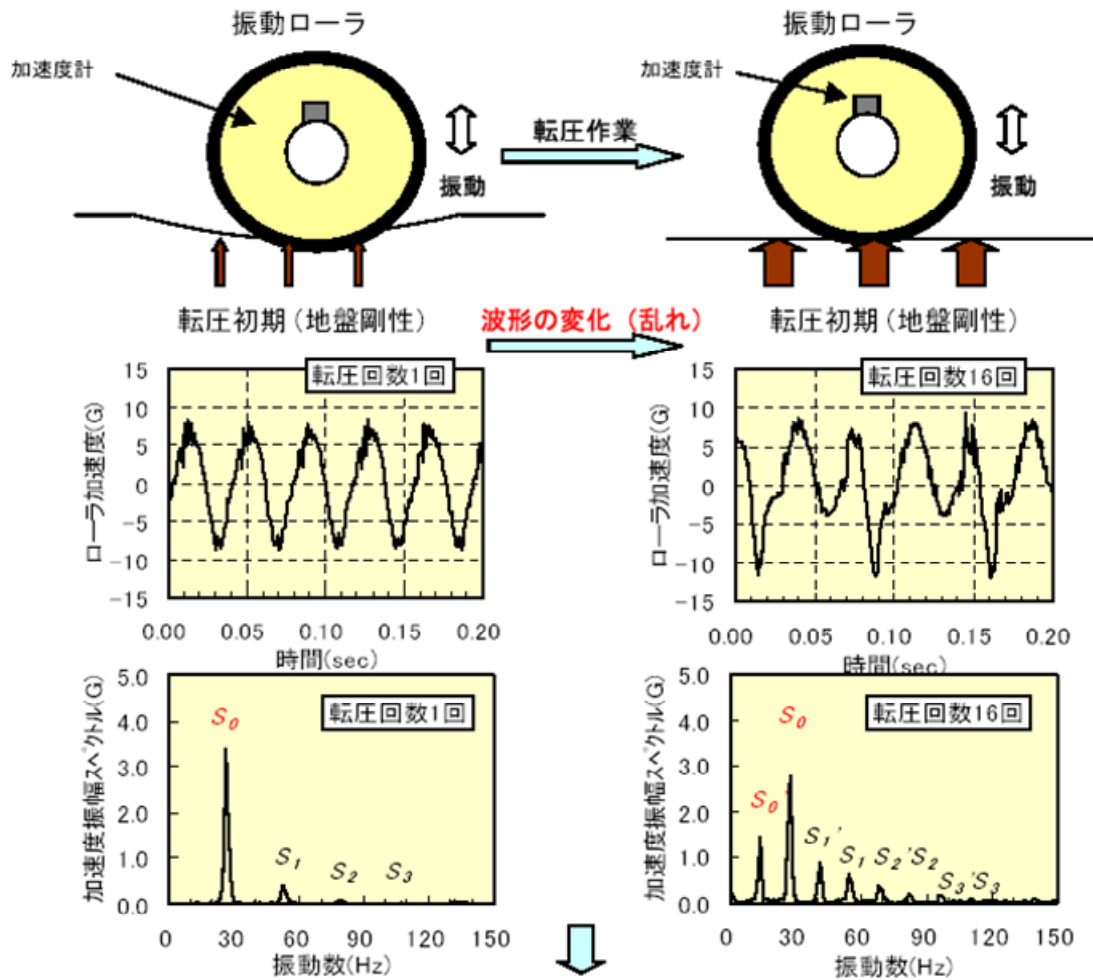


図-5.3 周波数解析式 概略図

5.3. 実験方法

5.3.1. 実験フィールド

本実験は 3.2.1. に示した実験フィールドと同様のものを作成して行った。実験フィールドの掘削溝幅は、使用前後進コンパクタの締固め幅が 0.55 m であるため、0.6 m とした。また、実験材料盛り立て後の初期状態（小型締固め機械による締固め施工を始める前の状態）については、0.1 m³ クラス油圧ショベル（自重 2.7 ton）にてクローラ締固めを 2 回（往復）行った状態を初期状態とした。

5.3.2. 実験材料

本実験は、3.2.2. に示した砂質系の土質(1)を使用して行った。また施工含水比の影響を調査するため、11%、15%、16%、18%の 4 種類の含水比にて実験を行った。

5.3.3. 前後進コンパクタ+加速度応答システム

本実験は、国内で最初に販売された機械として、BOMAG の BPR45/55D+ECONOMIZER を使用した。システムの測定原理は BOMAG 式を利用している。本システムは、前後進コンパクタに加速度計と演算モジュールを内蔵した表示パネルを搭載しており、表示パネルは 10 個の LED にて構成されている。そして加速度計からの信号を演算モジュールにて解析し、LED の点灯個数により演算モジュールにて解析された地盤剛性値を表示している（点灯個数が多いほど剛性が高い）。表-5.2 に機械仕様を、図-5.4 および写真-5.1 にシステムの概略を示す。

表-5.2 締固め機械仕様

	BOMAG BPR45/55 with ECONOMIZER
質量(kg)	401
起振力(kN)	45
振動数（ランマは衝撃数）(Hz)	70
エンジン	ディーゼル
エンジン出力(kW)	6.6
締固め幅(m)	0.55
実験フィールド溝幅(m)	0.6



図-5.4 BOMAG ECONOMIZER 概略



写真-5.1 BOMAG ECONOMIZER

5.3.4. データ測定方法

5.3.1.に示した実験フィールド上を BOMAG BPR45/55 with ECONOMIZER にて 16 回（8 往復）走行を行い、締固め施工を行った。機械はすべて定格状態にて運転するものとし、走行速度は最高速度に設定した（走行レバーFu11 状態）。走行は両端で U ターンをして前進にて走行し、また側壁との間が開かないよう側壁に沿って走行した。

実験データとしては、0, 2, 4, 6, 8, 12, 16 回走行後の密度と地盤剛性、加速度応答システム値（ECONOMIZER の LED 点灯個数）を測定した。

密度測定は 3.2.5.に示した方法と同様に、コアサンプラーを用い、地表面～0.1 m, 0.1 m～0.2 m, 0.2 m～0.3 m, のそれぞれの深さにおける密度を測定した。測定点は実験フィールド区間内の 3 点で行い平均値を採用することとした。

地盤剛性は土木研究所で開発された超小型動的平板载荷試験装置（アプライドリサーチ社製：IST03）^{16, 17)}にて測定した（写真-5.2, 5.3）。この装置は平板載加装置と同様の地盤反力係数 K_{30} 値を測定することができる。測定点は実験フィールド区間内の上記密度測定点と重複しない地点 3 点で行い平均値を採用することとした。



写真-5.2 IST03



写真-5.3 IST03 測定状況

加速度応答システム値は、各締固め回数時の LED 点灯状況をビデオ撮影し（写真-5.4）、点灯個数にその点灯秒数を乗じた点灯個数の総和をレーン走行時間（秒）にて除して、刻々の点灯個数を走行延長にて平均化した「平均 LED 点灯個数」を算出し、用いることとした。



写真-5.4 LED 点灯個数測定状況

5.4. 実験結果による加速度応答システム適用性の検証

各含水比における締固め回数と、「平均 LED 点灯個数」、乾燥密度から算出した締固め度（0～0.3 m の平均）、地盤剛性値（ K_{30} 値）の関係を図-5.5～5.8 に示す。各値の相関を見るため締固め度の値はグラフが重なるよう上下にオフセットして図示している。

また、「平均 LED 点灯個数」と締固め度との関係を図-5.9 に、「平均 LED 点灯個数」と地盤剛性値（ K_{30} 値）との関係を図-5.10 に示す。

なお、含水比 18%において締固め回数 8 回を越えると、前後進コンパクタはトラフィカビリティ不足により走行不能となり、データの取得はできなかった。

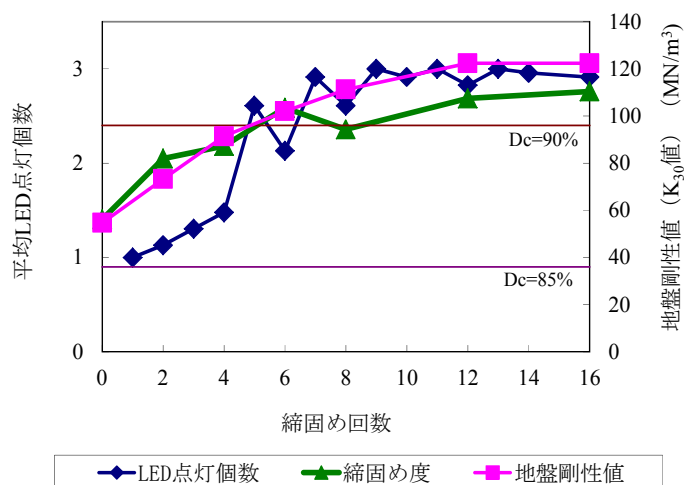


図-5.5 実験結果 (含水比 11%)

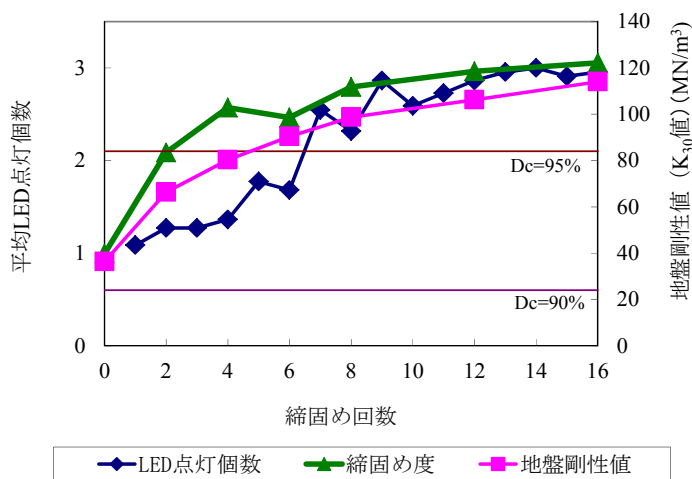


図-5.6 実験結果 (含水比 15%)

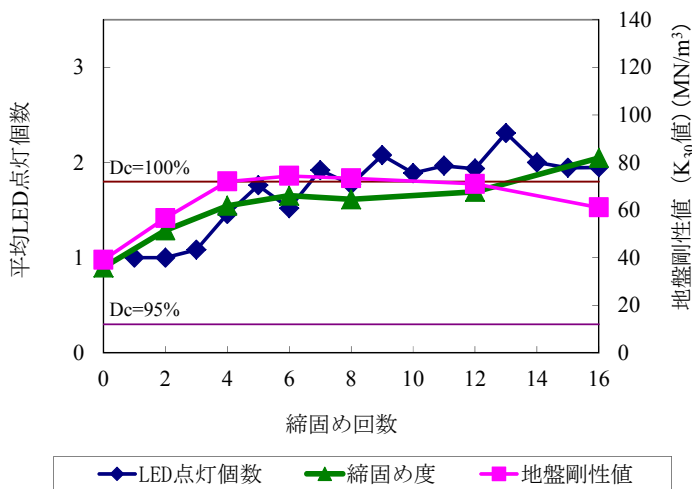


図-5.7 実験結果 (含水比 16%)

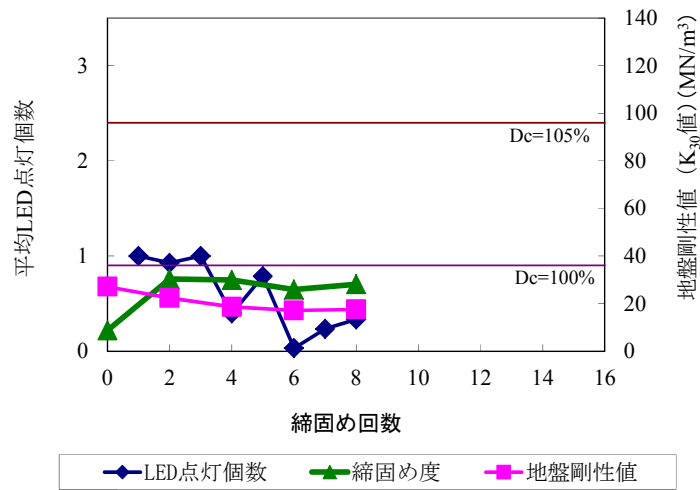


図-5.8 実験結果 (含水比 18%)

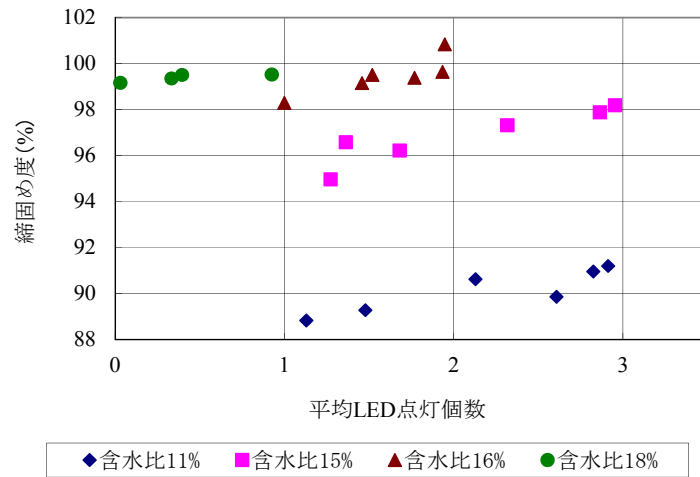


図-5.9 締固め度 - 平均 LED 点灯個数

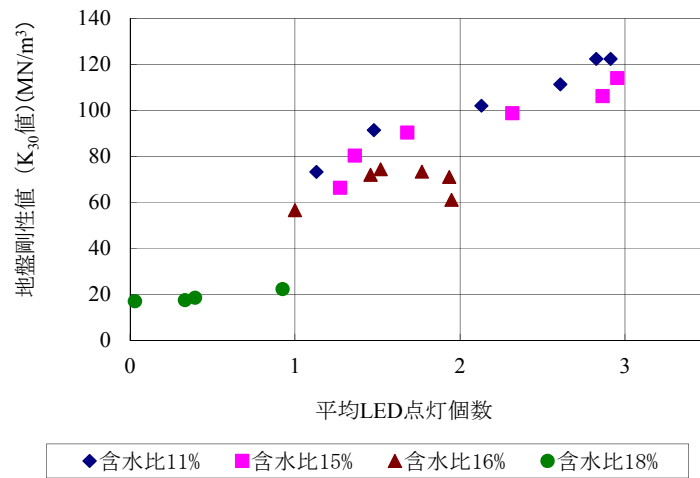


図-5.10 地盤剛性値 - 平均 LED 点灯個数

図-5.5～5.8によると、平均 LED 点灯個数と締固め度、および地盤剛性値との関係は、各含水比においてそれぞれ良好な正の相関があることがわかる。しかしながら図-5.9によると、平均 LED 点灯個数と締固め度の関係は含水比によって大きく異なっており、両者は1対1の関係になっていない。一方、図-5.10によると LED 点灯個数と地盤剛性値は、含水比が変化してもほぼ1直線上に並んでおり、両者はほぼ1対1の関係を示している。したがって、本実験にて検証した加速度応答システムの表示値（LED 点灯個数）を、地盤剛性値の代替指標にすることは含水比によらず可能であるといえるが、密度の代替指標にするには含水比を一定に保持する必要があるといえる。

5.5. 礫質土による実験結果

鹿島道路株式会社機械センターにて、同じ BOMAG BPR45/55 with ECONOMIZER を用いた同様な実験を礫質材料にて実施している¹⁸⁾。本節にその実験概要と結果を述べるとともに、次節にて砂質土の実験結果と比較・検証を行った。

5.5.1. 実験フィールド（礫質材料）

実験は鹿島道路株式会社機械センターにて行った。まず十分に締固めた基礎地盤上に、次節で述べる礫質材料を仕上がり厚さ 0.15 m になるよう敷きならし、その上に幅 1.5 m (0.5 m×3 レーン) 長さ 7 m の実験フィールドを製作した。(写真-5.5)

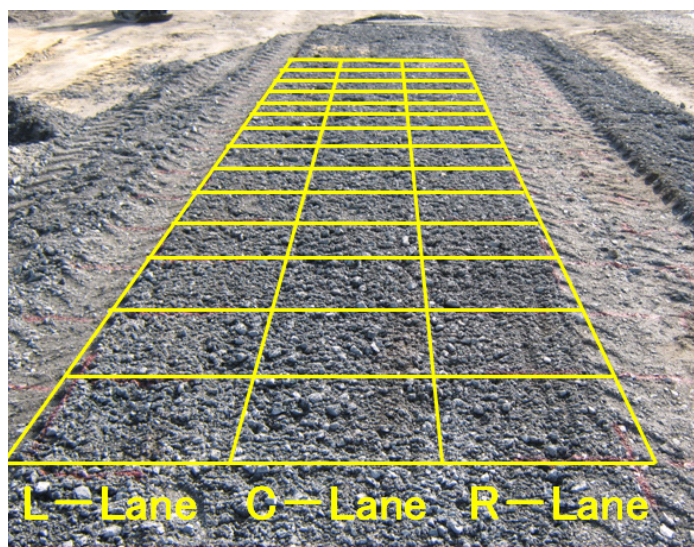


写真-5.5 実験フィールド（礫質材料）

5.5.2. 実験材料（礫質材料）

実験では、道路用砕石の C-40 を使用した。物理特性を表-5.3 に、粒径加積曲線を図-5.11 に示す。実験含水比は、最適含水比である 5.2% 付近として実験を行った。

表-5.3 材料の物理特性（礫質土）

細粒分含有率 F_c (%)	0.8
最大乾燥密度 ρ_{dmax} (g/cm ³)	2.295
最適含水比 w_{opt} (%)	5.2

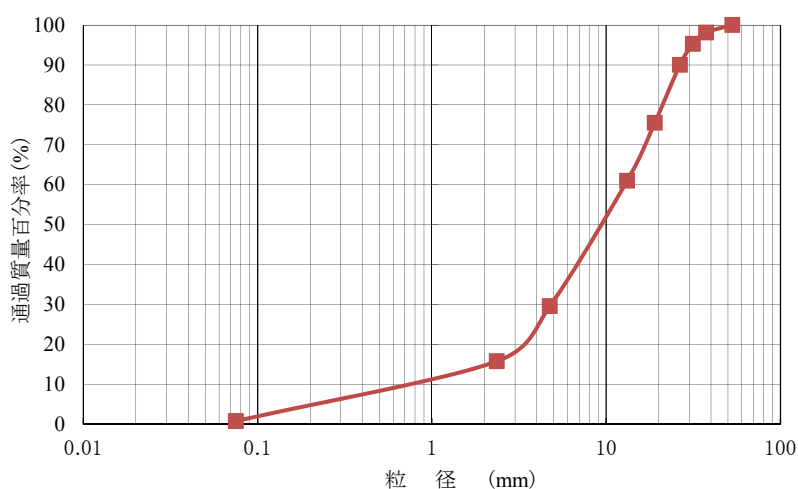


図-5.11 粒径加積曲線

5.5.3. 前後進コンパクタ+加速度応答システム

実験では、土木研究所にて行った実験と同機種の、BOMAG 社の BPR45/55D + ECONOMIZER を使用した。

5.5.4. データ測定方法

5.5.1. に示した実験フィールド上を BOMAG BPR45/55 with ECONOMIZER にて 6 回（3 往復）走行を行い、締固め施工を行った。機械はすべて定格状態にて運転するものとし、走行速度は最高速度に設定した（走行レバー Full 状態）。走行は上記 3 レーンを 21 m の 1 レーン相当に見立て、両端で U ターンをしてすべて前進にて走行した。

実験データとしては、1, 2, 4, 6 回走行後の密度と地盤剛性、加速度応答システム値（ECONOMIZER の LED 点灯回数）を測定した。

密度測定は砂置換法を用い、各締固め回数時に深さ 0.15 m まで測定した（写真-5.6）。測定点は実験フィールド区間内の 3 点で行い平均値を採用することとした。密度測定方法は、「JIS. A 1214：砂置換法による土の密度試験方法」に従った。



写真-5.6 砂置換法計測状況

地盤剛性は小型 FWD 試験器を用いて行った（写真-5.7）。小型 FWD は（株）東京測器研究所製の「FWD-Light」を使用し、計測・データ処理方法は、「土木学会，FWD および小型 FWD 運用の手引き」¹⁹⁾および、「FWD-Light による小型 FWD 試験方法（地盤編）」²⁰⁾に従った。測定点は実験フィールド区間内の上記密度測定点と重複しない地点 6 点で行い平均値を採用することとした。



写真-5.7 小型 FWD 計測状況

加速度応答システム値は、各締固め回数時の実験フィールド上の測定点（0.5 m ピッチ、計45点）を通過する時のLED点灯個数を、機械後方を追跡している読み取り者が読み上げ、その値を記録者が記録し、その平均値を算出して「平均LED点灯個数」とした（写真-5.8）。



写真-5.8 LED点灯個数測定状況

5.5.5. 実験結果

締固め回数と、「平均LED点灯個数」、乾燥密度から算出した締固め度(0~0.15 mの平均)、地盤剛性値 (K_{30} 値) の関係を図-5.12 に示す。

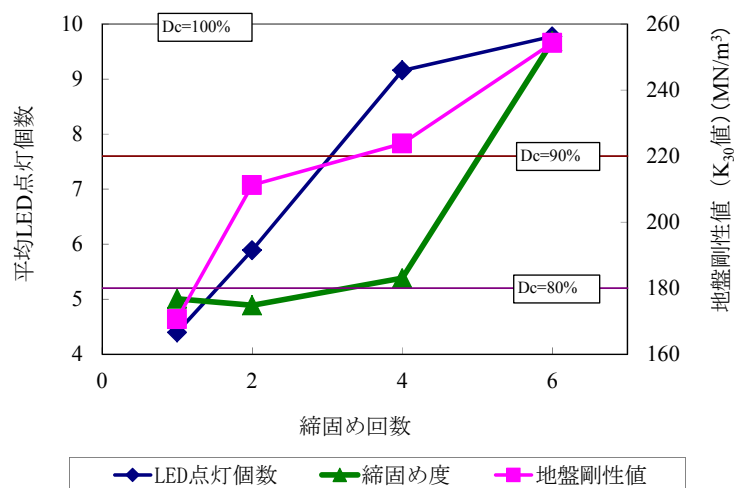


図-5.12 実験結果（礫質材料）

また、「平均 LED 点灯個数」と締固め度との関係を図-5.13 に、「平均 LED 点灯個数」と地盤剛性値 (K_{30} 値) との関係を図-5.14 に示す。

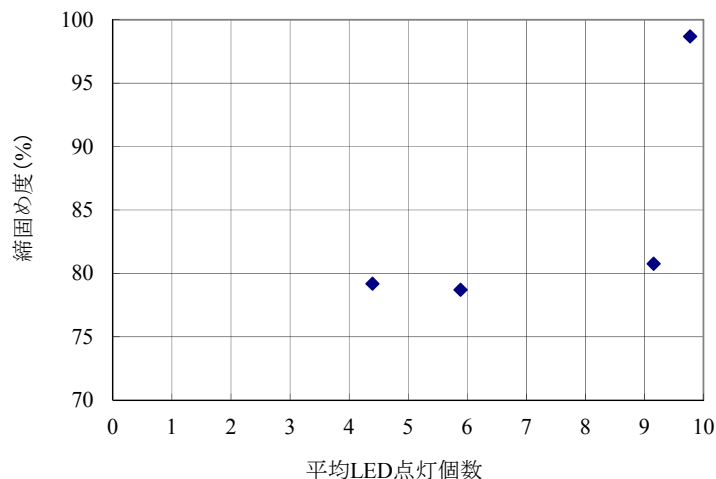


図-5.13 締固め度—平均 LED 点灯個数 (礫質材料)

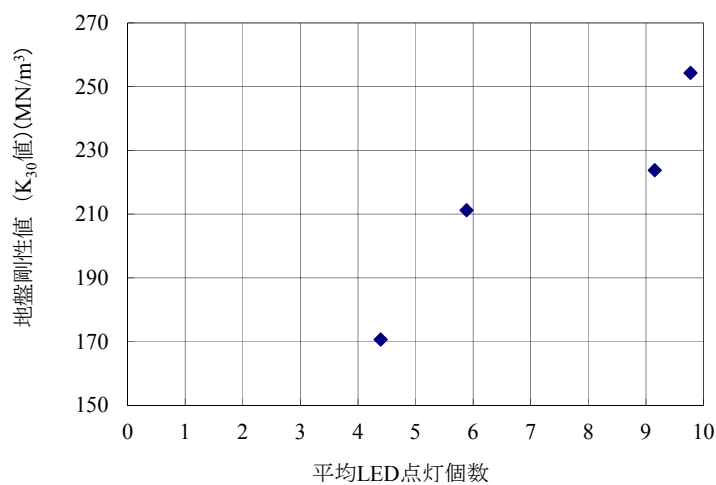


図-5.14 地盤剛性値—平均 LED 点灯個数 (礫質材料)

図-5.12～5.14 によると、平均 LED 点灯個数と締固め度、および地盤剛性値との関係は、礫質材料においても良好な正の相関があることがわかる。

5.6. まとめ (砂質土と礫質土の実験結果による加速度応答システム適用性の検証)

砂質土と礫質土による、「平均 LED 点灯個数」と締固め度との関係図 (図-5.9, 5.13), 「平均 LED 点灯個数」と地盤剛性値 (K_{30} 値) との関係図 (図-5.10, 5.14) をそれぞれ一つに

まとめると，図-5.15， 5.16 のようになる。

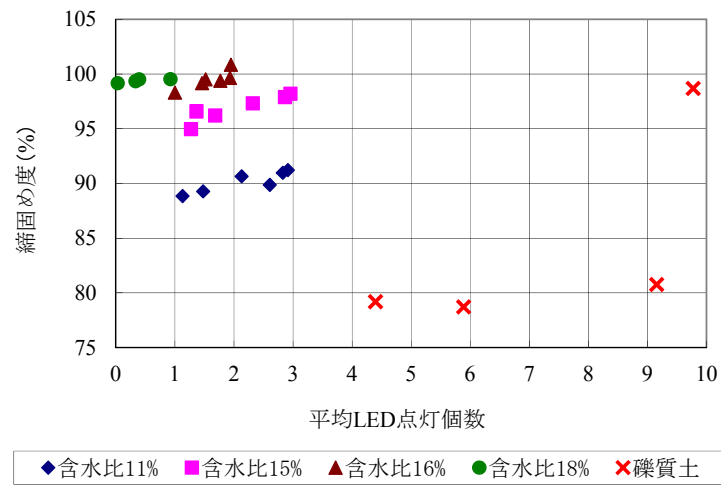


図-5.15 締固め度－平均 LED 点灯個数（全材料）

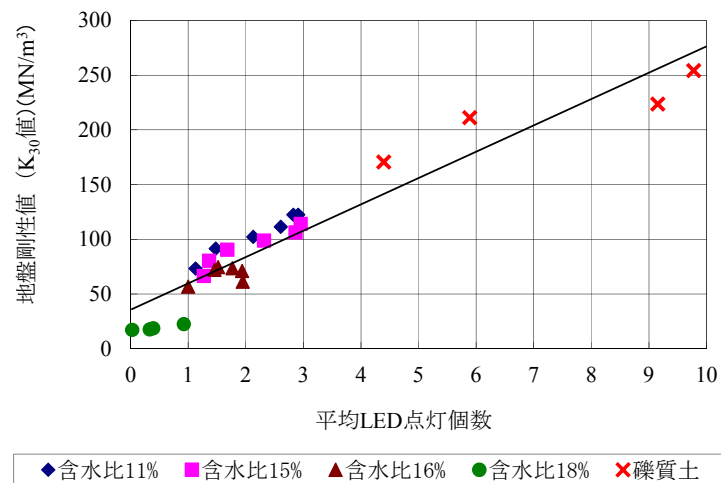


図-5.16 地盤剛性値－平均 LED 点灯個数（全材料）

図-5.15, 5.16 より以下のことがわかる.

- (1) 加速度応答システム表示値 (LED 点灯個数) と締固め度の関係は, 各含水比および土質においてそれぞれ正の相関がある. しかしその関係は, 各含水比, 土質の変化によって大きく異なっており, 加速度応答システム表示値を密度 (締固め度) の代替指標にするには, 施工中の含水比, 土質を一定に保ち, かつその条件における両者の関係を求めておく必要があると考えられる.
- (2) 加速度応答システム表示値 (LED 点灯個数) と地盤剛性値の関係は, 各含水比および土質においてそれぞれ正の相関がある. また実験結果は, 各含水比, 土質の変化によらずある 1 本の直線上に集中しており, 本実験の範囲内であれば, 加速度応答システム表示値を地盤剛性値の代替指標にすることは可能であると考えられる.

前後進コンパクタは, 特に構造物近傍の裏込め部や地中埋設物の埋め戻し工などにおいて使用されるが, それら使用場所は構造物や既存地盤との接合部が多く, 締固め不足により段差が生じやすい傾向がある. そのためそれらの場所での締固め品質管理手法の高度化・合理化は非常に重要だと考えられる. 前後進コンパクタに搭載した加速度応答システムは, その要求に対する一つの方策であり, その適用性に関する条件等の整理は, 実施工において必要不可欠といえる.

今後は, 様々な施工条件および他の加速度システムについてもさらなる実験を行いデータの充実を図り, 施工現場における加速度システムの適用性等について整理を進めたい.

参考文献

- 1) Thumer, H., Sandstrom, A.: A New Device for Instant Compaction Control, *Proceedings International Conference on Compaction*, vol.2, pp.611-614, 1980.
- 2) 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.
- 3) Floss, R., Gruber, N. and 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.
- 4) 建山和由, 中島聡, 藤山哲雄: 振動式締固め機械の振動特性を利用した地盤の締固め度の評価手法について, 土木学会論文集, No.487/III-26, pp.237-245, 1994.
- 5) 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, pp.115-123, 2000.
- 6) Kröber, W., Floss, R. and Wallrath, W.: Dynamic soil stiffness as quality criterion for soil compaction, *Geotechnics for Roads, Rail Tracks and Earth Structures*, A. A. Balkema Publishers, pp.189-199, 2001.
- 7) 橋本毅: 最新の振動ローラについて=高効率・高品質な施工を実現する新技術について=, 建設機械, Vol.43, No.12, pp.47-52, 2007.
- 8) 小葉はるな, 眞壁淳, 上野健司: 情報化施工における転圧管理システム CIS の適用事例について, 建設施工と建設機械シンポジウム論文集, pp.139-142, 2009.
- 9) 古屋弘, 藤山哲雄: 振動ローラ加速度応答法による地盤剛性評価装置「 α システム」, 建設機械, Vol.47, No.7, pp.48-54, 2011.
- 10) 橋本毅: BOMAG エコノマイザー=前後進プレートコンパクタによる転圧品質管理技術=, 建設機械, Vol.44, No.8, pp.66-69, 2008.
- 11) Weber MT, Inc. : COMPATROL システムカタログ
- 12) AMMAN AG : ACE システムカタログ
- 13) 三笠産業株式会社 : COMPASS カタログ
- 14) 月本行則: 米国における盛土の締固め管理, 基礎工, Vol.37, No.7, pp.64-70, 2009.
- 15) BOMAG GmbH : Evib システムカタログ
- 16) 境, 極檀: 重錘落下による地盤反力係数の測定, 第 41 回地盤工学研究発表会論文集, pp.975-976, 2006.
- 17) アプライドリサーチ株式会社: IST03 取扱説明書
- 18) 橋本毅, 藤野健一, 山口達也: 小型締固め機械に搭載された加速度応答システムの適用性 (砂質土・礫質土においての実験結果), 平成 24 年度建設施工と建設機械シンポジウ

- ム, pp.61-64, 2012.
- 19) 土木学会 : FWD および小型 FWD 運用の手引き, pp.65-74, 2003.
 - 20) 株式会社東京測器研究所 : FWD-Light による小型 FWD 試験方法, pp.4-17, 2008.

第6章 走行速度を利用した締固め品質推定手法

6.1. はじめに

前後進コンパクタにて締固め施工を行った場合の品質管理を合理化する手法の一つとして、加速度計を利用したシステムを前章にて述べた。しかしながらこの加速度計を利用した手法は、締固め機械に加え加速度計・演算モジュール・表示計といった機器が追加が必要となり、価格の上昇や、すでに現場にて使用されている概販機への展開が困難であることなどが、普及への問題点の一つとなっている。また一方、前後進コンパクタの走行速度に着目して、地盤剛性を推定する方法も考えられる。

前後進コンパクタとは2章で述べたように、小型平板式振動型締固め機械の一つであり、機械内部に回転する2本の偏心錘（起振体）を有し、その遠心力により発生する振動力と本体の重量との効果により締固め効果を発生する機械である。また、その2本の起振体による合成振動力の振動方向をオペレータ手元の操作レバーにて前後へ傾斜させることにより、前後任意の方向に走行することが可能な機械である。

この前後進コンパクタは、自身の振動と地盤からの反力によって細かくジャンプしており、滞空時に起振体から水平方向の力を受けることにより前方あるいは後方に移動し、それを繰り返すことにより走行している。すなわち、その走行速度は機械の滞空時間に大きく影響を受けていることになる。また滞空時間は、機械の振動挙動の一つであるから接触している地盤の剛性に影響を受けていると考えられる。したがって前後進コンパクタの走行速度を解析することにより、地盤剛性を推定することが可能であると考えられる。

そこで本章では、前後進コンパクタの走行速度が接触している地盤の剛性に影響を受けることを利用し、安価な方法（ストップウォッチなど）で測定することが可能な走行速度を測定することにより、地盤剛性をリアルタイムで推定する手法の確立を試みた。

6.2. 数値計算による前後進コンパクタ走行速度の検討

6.2.1. 数値計算方法

数値計算による前後進コンパクタ走行速度の検討においては、鉛直方向の運動と水平方向の運動とに分けて計算を行った。

まず鉛直方向では、前後進コンパクタ～地盤系を図-6.1(a)のような2自由度振動モデルに置き換える。この本体～振動板～地盤からなる振動系の運動方程式は式(6.1)にて表され、これをRunge-Kutta法を用いて解くことにより、時間変化に伴う鉛直方向変位を計算した。

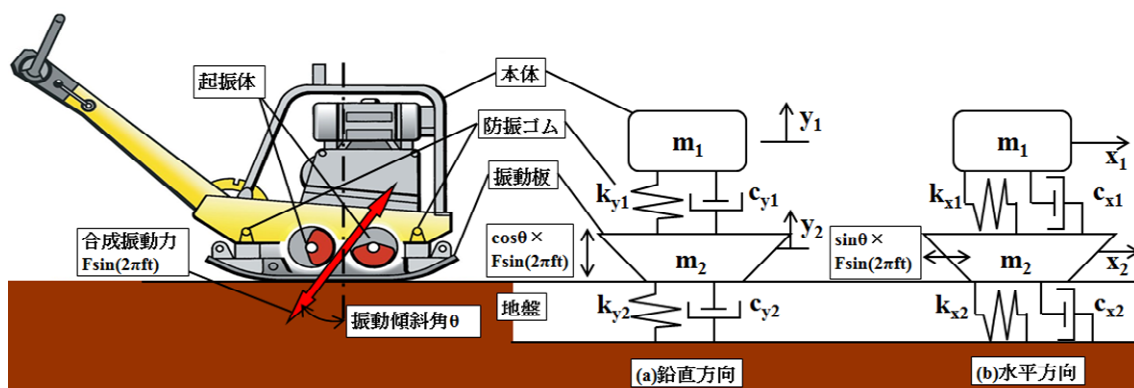


図-6.1 前後進コンパクト～地盤系モデル

$$\begin{aligned}
 m_1 \ddot{y}_1 + c_{y1} (\dot{y}_1 - \dot{y}_2) + k_{y1} (y_1 - y_2) &= -m_1 g \\
 m_2 \ddot{y}_2 + c_{y2} \dot{y}_2 + k_{y2} y_2 - c_{y1} (\dot{y}_1 - \dot{y}_2) - k_{y1} (y_1 - y_2) &= -m_2 g + \cos \theta \times F \sin(2\pi ft)
 \end{aligned} \tag{6.1}$$

- m_1 : 前後進コンパクト本体質量 (kg)
- m_2 : 前後進コンパクト振動板質量 (kg)
- y_1 : 前後進コンパクト本体鉛直方向変位 (m)
- y_2 : 前後進コンパクト振動板鉛直方向変位 (m)
- k_{y1} : 防振ゴムの鉛直方向バネ係数 (N/m)
- k_{y2} : 地盤の鉛直方向バネ係数 (N/m)
- c_{y1} : 防振ゴムの鉛直方向粘性減衰係数 (Nsec/m)
- c_{y2} : 地盤の鉛直方向粘性減衰係数 (Nsec/m)
- F : 最大起振力 (N)
- f : 振動数 (Hz)
- θ : 振動傾斜角 (rad)

ここで、図-6.1のモデル上では地盤と振動板が結合しているため、式(6.2)で表される地盤反力 N (N)が負値となる場合も算出される。しかしながら実際には両者は結合していないため、地盤反力 N が負値となることはありえず、それは振動板が地盤から離れること、すなわちジャンプをしていることを表している。そこで計算では、地盤反力 N が正值から負値に変化した時をジャンプ開始時とし、その後着地時までは式(6.1)に $k_{y2} = c_{y2} = 0$ を与え滞空中の変位を計算した。

$$N = -c_{y2}\dot{y}_2 - k_{y2}y_2 \quad (6.2)$$

また着地の判定については、同時に式(6.2)において $N = 0$ とすると本式は地盤の変位を表すことになるため、これを解くことにより滞空中の地盤変位を計算し、振動板変位と地盤変位が逆転した時を着地時とした。

また水平方向では、接触中は振動板と地盤との間にすべりは発生しないと仮定し、図-6.1(b)のような2自由度振動モデルに置き換える。この振動系の運動方程式は式(6.3)にて表され、式(6.1)と同様にRunge-Kutta法を用いて解くことにより、時間変化に伴う水平方向変位を計算した。

$$\begin{aligned} m_1\ddot{x}_1 + c_{x1}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k_{x1}(x_1 - x_2) &= 0 \\ m_2\ddot{x}_2 + c_{x2}\dot{x}_2 + k_{x2}(x_2 - x_0) - c_{x1}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - k_{x1}(x_1 - x_2) &= \sin\theta \times F \sin(2\pi ft) \end{aligned} \quad (6.3)$$

x_1 : 前後進コンパクト本体水平方向変位 (m)

x_2 : 前後進コンパクト振動板水平方向変位 (m)

x_0 : 着地地点 (m)

k_{x1} : 防振ゴムの水平方向バネ係数 (N/m)

k_{x2} : 地盤の水平方向バネ係数 (N/m)

c_{x1} : 防振ゴムの水平方向粘性減衰係数 (Nsec/m)

c_{x2} : 地盤の水平方向粘性減衰係数 (Nsec/m)

接地・ジャンプの判定は、前述の鉛直方向の計算結果を用い、滞空中は式(6.3)に $k_{x2} = c_{x2} = 0$ を与え滞空中の変位を計算した。

数値計算のフロー図を図-6.2 に示す。

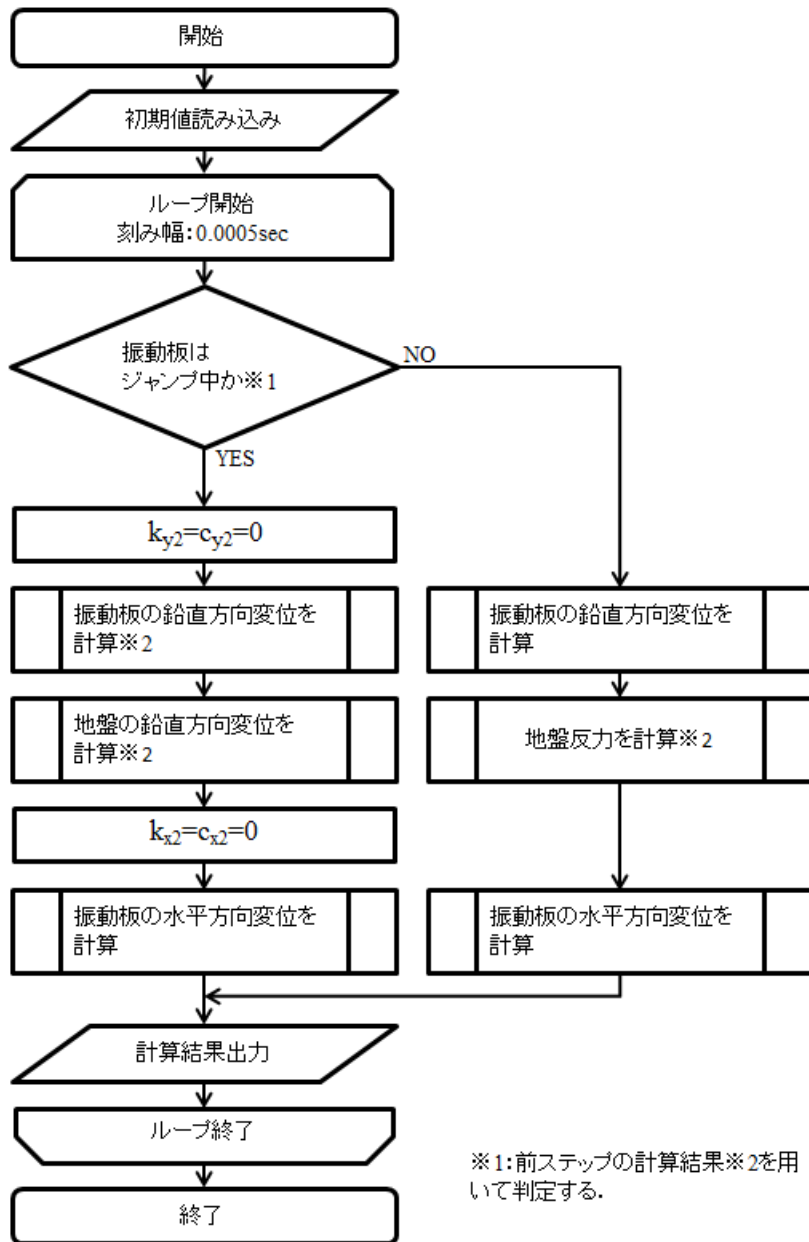


図-6.2 数値計算フロー図

計算に用いた前後進コンパクトの機械諸元を表-6.1, 6.2に, 地盤条件を表-6.3に示す. 機械諸元は, 第2章の調査結果を参考に現在日本国内で一般的に使用されている前後進コンパクトの仕様を基に設定した.

表-6.1 計算条件（機械諸元その1）

機械番号	振動傾斜角	本体質量	振動板質量	鉛直方向防振ゴムバネ係数	最大起振力	振動数
	θ (度)	m_1 (kg)	m_2 (kg)	k_{y1} (MN/m)	F (kN)	f (Hz)
前後進コンパクトA	50	129	109	1.0	35	80
前後進コンパクトB	50	200	130	1.0	45	73
前後進コンパクトC	50	250	160	1.0	50	73
前後進コンパクトD	54	241	160	1.0	45	70

表-6.2 計算条件（機械諸元その2）

鉛直方向防振ゴム粘性減衰係数	c_{y1}	$c_{y1} = 2D_{y1}\sqrt{m_1k_{y1}}$ $D_{y1} = 0.1$
水平方向防振ゴムバネ係数	k_{x1}	$k_{x1} = k_{y1}$
水平方向防振ゴム粘性減衰係数	c_{x1}	$c_{x1} = c_{y1}$

表-6.3 計算条件（地盤条件）

鉛直方向地盤バネ係数	k_{y2}	0.3 ~ 20.0
鉛直方向地盤粘性減衰係数	c_{y2}	$c_{y2} = 2D_{y2}\sqrt{m_2k_{y2}}$ $D_{y2} = 0.4$
水平方向地盤バネ係数	k_{x2}	$k_{x2} = \frac{8(1-\nu)^2}{7-8\nu}k_{y2}$ $\nu = 0.4$
水平方向地盤粘性減衰係数	c_{x2}	$c_{x2} = 2D_{x2}\sqrt{m_2k_{x2}}$ $D_{y2} = 0.3$

鉛直方向地盤バネ係数 k_{y2} については、本研究ではかなり柔らかい地盤から締固めの進行した硬い地盤までの幅広いバネ係数における走行速度の挙動を確認したいため、後述に示す土槽実験にて得られている小型FWD試験の結果を参考に、 $k_{y2} = 0.3 \sim 20.0$ MN/mに設定した。

また鉛直方向地盤粘性減衰係数 c_{y2} は、減衰比 D_{y2} を用いて式(6.4)で示されるが、地盤上で振動する機械基礎の問題等を参考に¹⁾、減衰比 D_{y2} を0.4と設定した。

$$c_{y2} = 2D_{y2} \sqrt{m_2 k_{y2}} \quad (6.4)$$

鉛直方向防振ゴム粘性減衰係数 c_{y1} は、式(6.4)と同様に算出できるが、本体の振動が安定する範囲でなるべく小さくなるよう減衰比 D_{y1} を0.1に設定した。

水平方向地盤バネ係数 k_{x2} は、弾性体上における基礎の鉛直振動の問題¹⁾、および水平振動の問題¹⁾を参考に、鉛直方向地盤バネ係数 k_{y2} との関係式(6.5)を用いて算出した。ここで地盤のポアソン比 ν は締固めによる影響が明確でないため、一般的な値として0.4とした。

$$k_{x2} = \frac{8(1-\nu)^2}{7-8\nu} k_{y2} \quad (6.5)$$

水平方向地盤粘性減衰係数 c_{x2} は、鉛直方向地盤粘性減衰係数同様に、減衰比 D_{x2} を0.3として算出した。

また水平方向防振ゴムバネ係数 k_{x1} および粘性減衰係数 c_{x1} は、防振ゴムの形状、取り付け状態から、鉛直方向バネ係数 k_{y1} および粘性減衰係数 c_{y1} と等しいとした。

地盤の付加質量については不明な点が多いため、ここでは考慮しなかった。ここで付加質量とは、振動板下部地盤の一部が振動板と一緒に振動してしまうと仮定し、計算の際に振動板の質量に付加するべきその一部地盤の質量のことである¹⁾。

6.2.2. 数値計算による前後進コンパクタ走行速度の検討

表-6.1、表-6.2、表-6.3に示す条件にて計算した結果を図-6.3に示す。横軸を鉛直方向地盤バネ係数、縦軸を前後進コンパクタ振動板の水平方向変位量から計算した走行速度で表している。これによると、すべての機械諸元において、鉛直方向地盤バネ係数が0.3 MN/m から上昇するにつれて、走行速度にはおおむね下記のような傾向があることがわかる。

- 1) 鉛直方向地盤バネ係数が0.3 MN/m程度より小さいと、走行速度は0 m/sとなり、前後進コンパクタは走行しない。
- 2) 鉛直方向地盤バネ係数が0.3～2.5 MN/m程度の範囲では、バネ係数が上昇するとともに急速に走行速度が上昇する。
- 3) 鉛直方向地盤バネ係数が2.5～20.0 MN/m程度の範囲では、ばらつきが大きくなるものもあるが、おおむね走行速度はほぼ一定の速度で安定する。

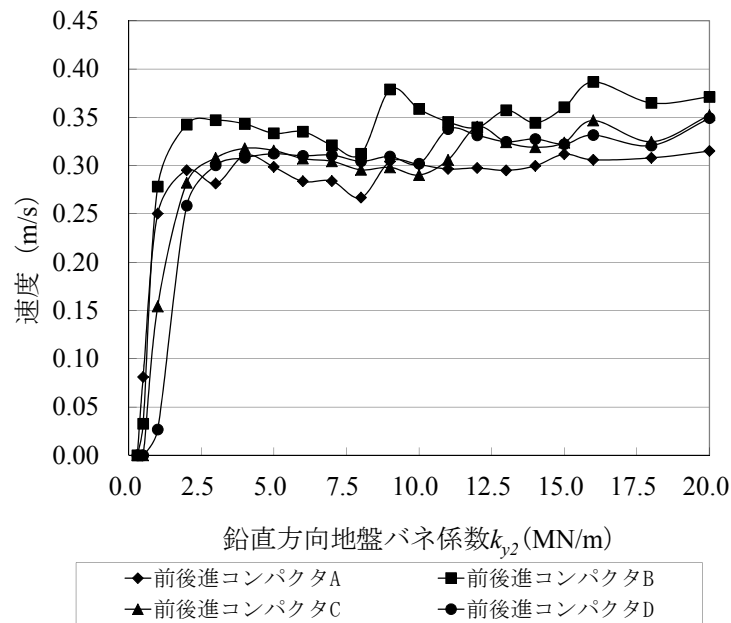
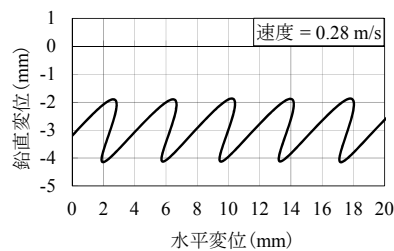
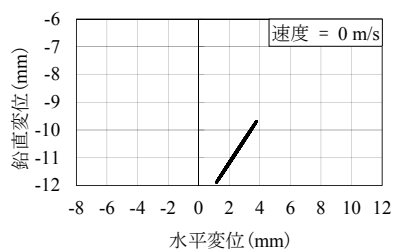
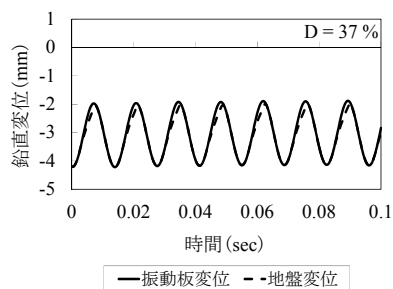
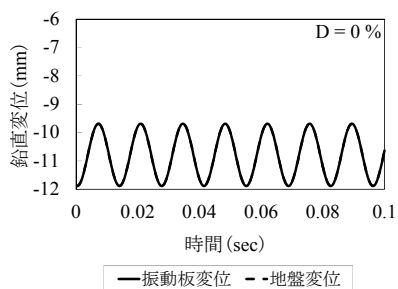
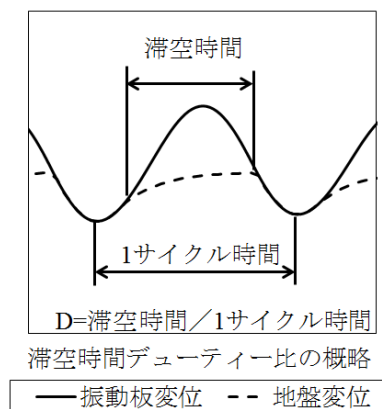
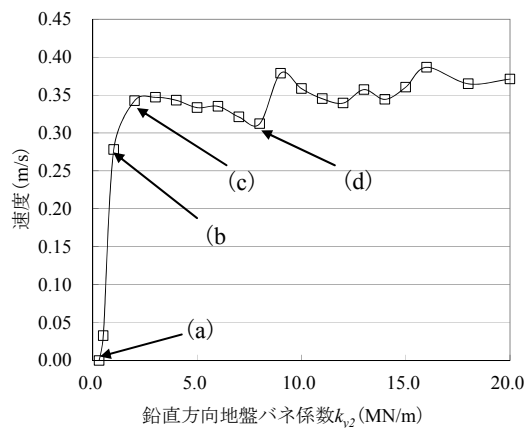


図-6.3 数値計算による地盤バネ係数と走行速度の関係

ここで、地盤バネ係数と走行速度の関係をさらに詳しく見るために、前後進コンパクタBが4種類の異なる鉛直方向地盤バネ係数（0.3、1.0、2.0、8.0 MN/m）の地盤上で振動する際の、前後進コンパクタ振動板の時間—鉛直方向変位、水平方向変位—鉛直方向変位を計算した結果を図-6.4(a) (b) (c) (d)に示す。また、グラフ中には滞空時間の1サイクル当たりデューティー比（1サイクル中の滞空時間の割合）および走行速度も併せて示している。

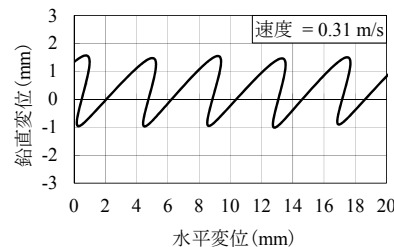
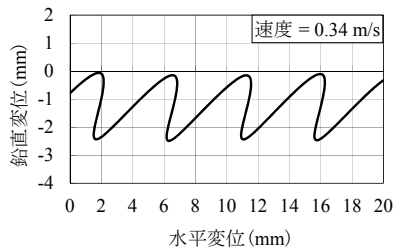
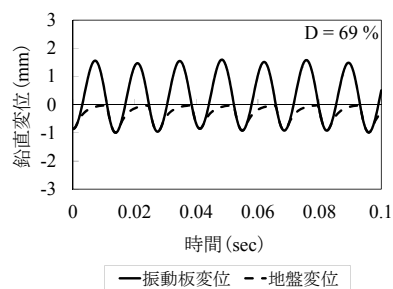
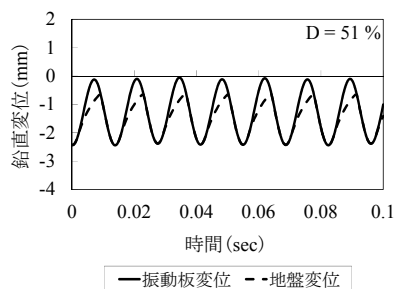
これによると、地盤が軟らかいとき（図-6.4(a), $k_{y2} = 0.3$ MN/m）、前後進コンパクタ振動板は地盤と共に振動を行いジャンプはしていない。そして、振動板と地盤との間にすべりは発生しないと仮定しているため、前後進コンパクタはその場で斜め振動を繰り返すこととなり、走行速度は0となる。

上記より地盤が少し硬い場合は（図-6.4(b), $k_{y2} = 1.0$ MN/m）、前後進コンパクタはジャンプを開始する。滞空中は地盤による水平方向の拘束が働かないため、タイミングよく起振体から水平方向の力を受けることにより振動板には水平方向に地盤に対する相対変位が発生する。従って、前後進コンパクタは水平方向へ走行を開始する。



(a), $k_{y2} = 0.3$ (MN/m)

(b), $k_{y2} = 1.0$ (MN/m)



(c), $k_{y2} = 2.0$ (MN/m)

(d), $k_{y2} = 8.0$ (MN/m)

D : 滞空時間の1サイクル当たりデューティー比

図-6.4 鉛直方向および水平方向変位の計算結果

さらに地盤が硬い場合（図-6.4(c), $k_{y2} = 2.0 \text{ MN/m}$ ），ジャンプによる滞空時間が長く（デューティー比が大きく）なり，1ジャンプ当たりの水平方向変位が増加し，従って走行速度が速くなる．しかしながら，さらに地盤が硬い場合でも（図-6.4(d), $k_{y2} = 8.0 \text{ MN/m}$ ），ジャンプによる滞空時間は長くなるが，走行速度は速くはならない．これは，水平方向への力も起振体による振動力であるため，進行方向正向きへの力が発生している時間は1サイクルの半分の時間（デューティー比50%）しかないためと考えられる．すなわち，滞空時間のデューティー比が50% を越えても，進行方向正向きへの力を受ける時間はそれ以上増加しないため，走行速度はそれ以上増加せず走行速度はおおむねある一定の速度で安定すると考えられる．（以下「安定速度」と呼ぶ）

なお，これまでの計算はポアソン比を0.4として行っているが，トンネル標準示方書（開削工法編）²⁾によると，地盤のポアソン比は砂質土および粘性土において，0.3～0.45と考えられる．そこでポアソン比を0.3および0.45とし図-6.3と同様の計算を行ったところ結果はほぼ同一となった．これは，前後進コンパクタの走行速度は，地盤の横方向バネ係数および減衰係数の影響はほとんど受けず，縦方向バネ係数および減衰係数による滞空時間が支配的であることを表している．よって以降においても，ポアソン比は0.4として計算を行うものとする．

6.3. 前後進コンパクタ走行速度によるウィークポイントの検出

図-6.3より，地盤バネ係数がある程度以上大きくなると，コンパクタの走行速度はほぼ一定になってしまうため，走行速度を計測することにより地盤バネ係数を推定することは困難である．しかし，走行速度が安定速度（図-6.4(c)～(d)間の状態）より低い地点を発見することにより，転圧地盤における鉛直方向地盤バネ係数が著しく低い地点（ウィークポイント）を検出することは可能であると言える．具体的には，機械によるが走行速度が約0.3 m/sを下回った時，鉛直方向地盤バネ係数が約2.5 MN/m 以下であることがわかる．

次に，この検出可能なウィークポイントが実際の締固め品質管理値とどのような関係にあるか検証する．目標とした品質管理基準値は，現在日本国内で唯一地盤剛性を品質管理基準値としている鉄道盛土における締固め品質管理基準値³⁾を用いることとした（表-6.4）．

表-6.4 鉄道盛土における締固め品質管理基準値

（性能ランクII 上部盛土）

品質管理基準値A：($70 \text{ MN/m}^3 \leq K_{30} \text{ 平均値} < 110 \text{ MN/m}^3$)	K_{30} 下限値：50 MN/m ³
品質管理基準値B：($K_{30} \text{ 平均値} 110 \text{ MN/m}^3$ 以上)	K_{30} 下限値：70 MN/m ³

前節で述べた数値計算では、地盤剛性を前後進コンパクタ振動板すなわち長方形荷による鉛直方向地盤バネ係数 k_{y2} にて表している。一方、鉄道盛土における締固め品質管理基準値³⁾は、表-6.4に示すように円形荷による地盤反力係数 K_{30} 値にて与えられる。したがって、両者を比較・検討するためには K_{30} 値を k_{y2} に変換する必要がある。そこで、まず円形荷による地盤の変位⁴⁾より式(6.6)を、長方形荷による地盤の変位⁴⁾より式(6.7)をそれぞれ得る。

$$K_{30} = \frac{1}{2r} \cdot \frac{E}{(1-\nu^2)} \quad (6.6)$$

r : 円形荷板半径 = 0.15 (m)

E : 地盤のヤング率 (MN/m²)

ν : 地盤のポアソン比

$$k_{y2} = \frac{2\pi b}{L} \cdot \frac{E}{(1-\nu^2)} \quad (6.7)$$

$$L = \ln\left(\frac{\sqrt{1+m^2} + m}{\sqrt{1+m^2} - m}\right) + m \cdot \ln\left(\frac{\sqrt{1+m^2} + 1}{\sqrt{1+m^2} - 1}\right)$$

$$m = \frac{b}{a}$$

$2a$: 長方形荷板 (コンパクタ振動板接地部) の幅

$2b$: 長方形荷板 (コンパクタ振動板接地部) の長さ

式(6.6), (6.7)より、地盤のヤング率とポアソン比を消去して式(6.8)を得る。

$$k_{y2} = \frac{4\pi br}{L} \cdot K_{30} \quad (6.8)$$

式(6.8)を用いて、地盤反力係数 K_{30} 値を鉛直方向地盤バネ係数 k_{y2} に変換するものとした。

図-6.3に示した、数値計算による鉛直方向地盤バネ係数・走行速度の関係図を各機械毎に分け、表-6.4による鉄道盛土における締固め品質管理基準値を式(6.8)にて地盤バネ係数に変換した値を破線で追記したものを、図-6.5～6.8に示す。 $2a$, $2b$ については、表-4.1の値を用いている。

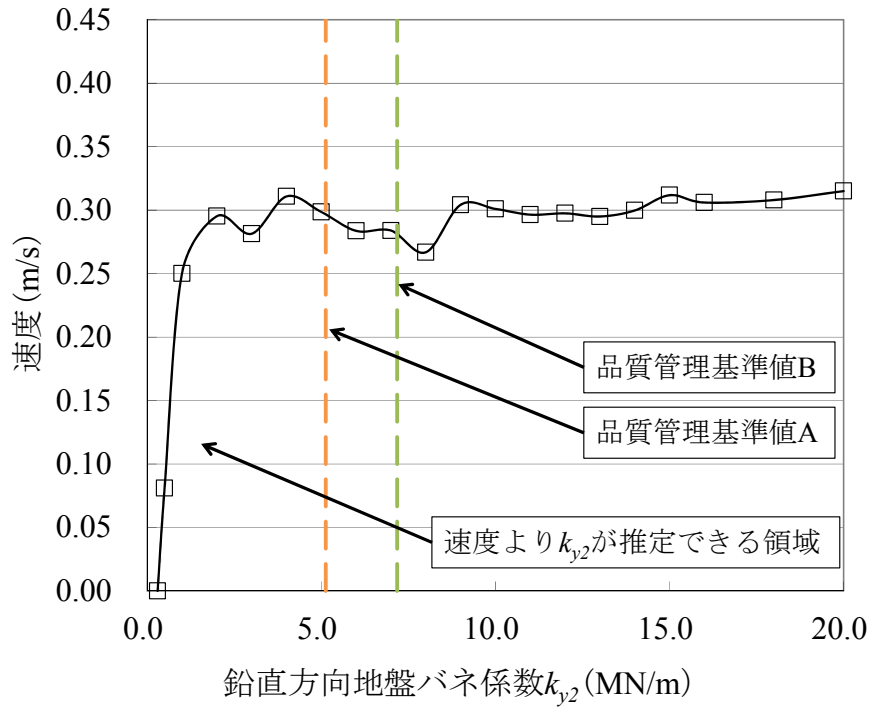


図-6.5 数値計算による地盤バネ係数と走行速度の関係 (前後進コンパクト A)

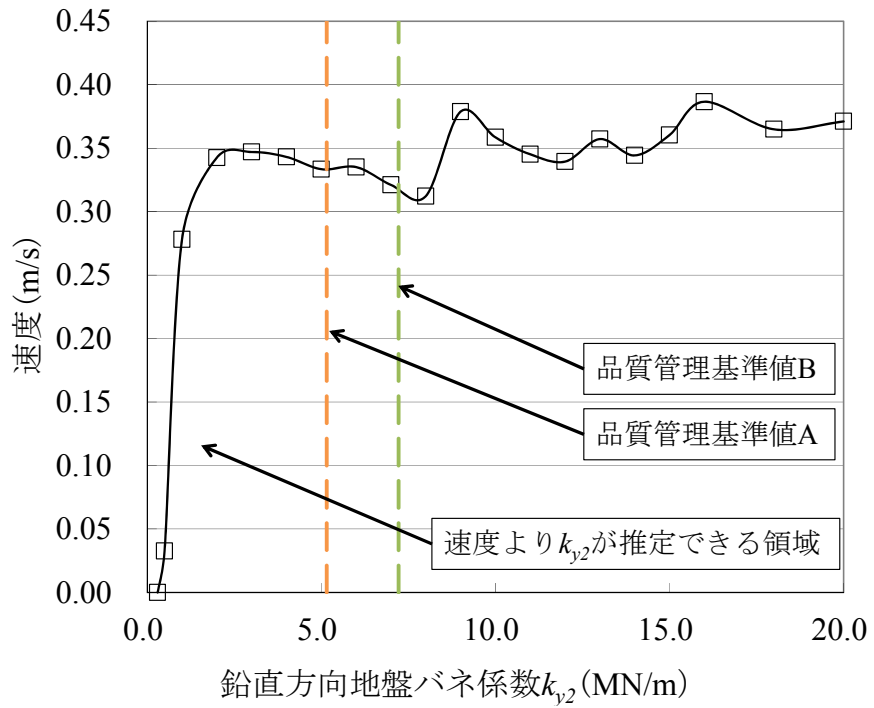


図-6.6 数値計算による地盤バネ係数と走行速度の関係 (前後進コンパクト B)

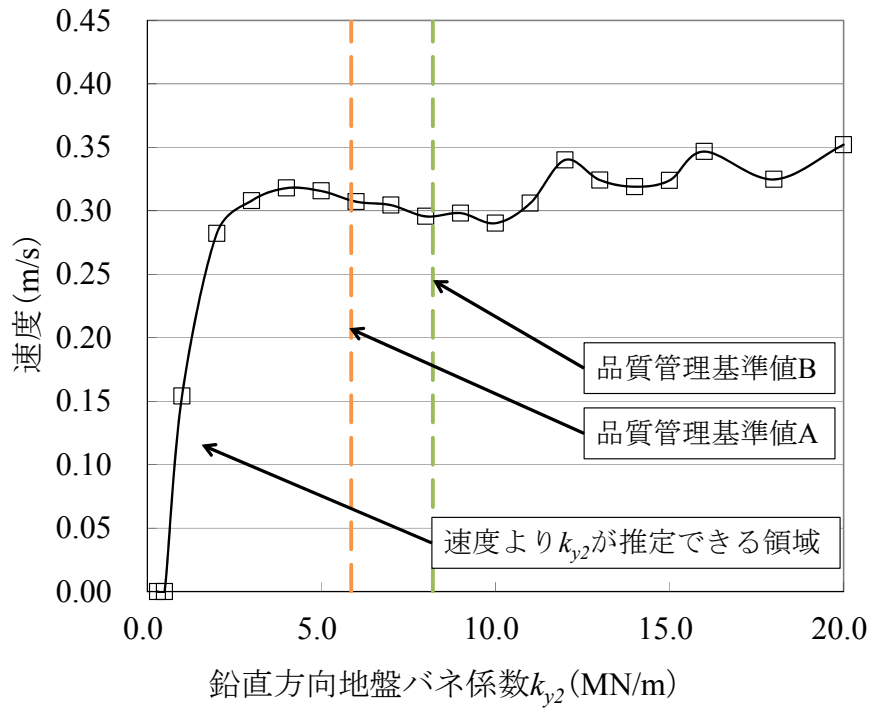


図-6.7 数値計算による地盤バネ係数と走行速度の関係 (前後進コンパクタ C)

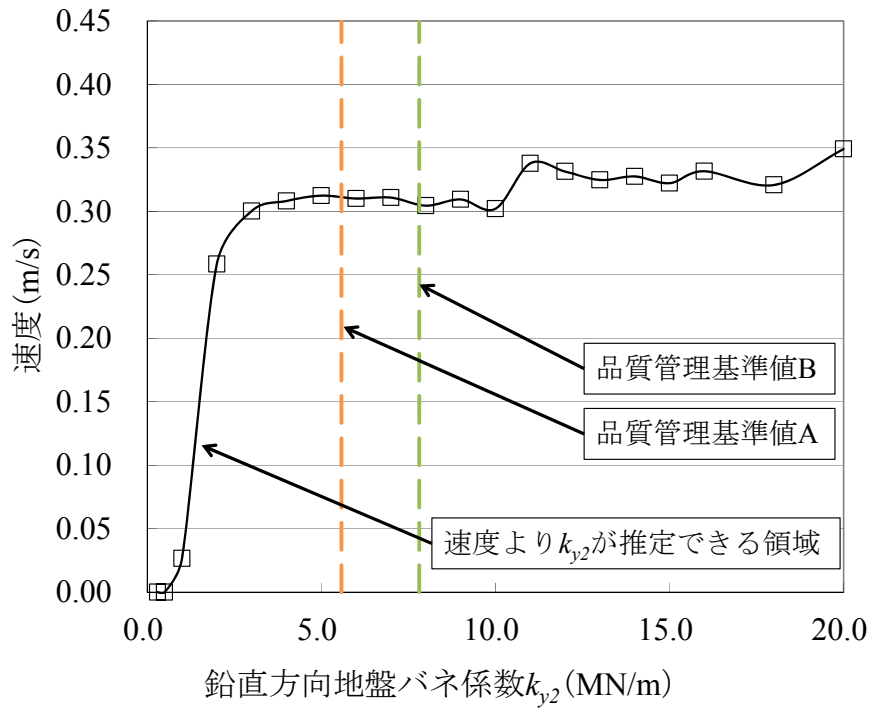


図-6.8 数値計算による地盤バネ係数と走行速度の関係 (前後進コンパクタ D)

図-6.5～6.8によると、走行速度から地盤バネ係数を推定することができるのは図-3の斜線領域であり、品質管理基準値よりかなり低い範囲となっている。したがって、走行速度により地盤剛性が著しく低い地点（ウィークポイント）を検出することは可能ではあるが、その値は品質管理基準値よりかなり低く、走行速度から地盤バネ係数が品質管理基準値を満たしているか推定することは現状のままでは困難であることがわかる。

6.4. 前後進コンパクタの改造による地盤剛性合否判定手法の提案

前節にて、前後進コンパクタの走行速度から地盤剛性が著しく低い地点（ウィークポイント）を検出することは可能であるが、走行速度から地盤バネ係数が締固め品質管理値を満たしているか評価を行うことは困難であることがわかった。

そこで本節では、前後進コンパクタにユーザにて施工可能な軽微な改造を施すことにより機械仕様を変更し、走行速度から地盤剛性が締固め品質管理基準値を満足しているか評価する手法を検討する。

まず、表-6.1に示す前後進コンパクタの仕様を変更するために必要な改造が、ユーザにて行うことができる軽微なものかを検討すると下記のようになる。

- (1) 振動傾斜角：2本ある振動起振体の位相を変更すればよく、軽微な改造である。
- (2) 本体質量・振動板質量：軽くすることは困難であるが、質量を付加することは軽微な改造である。
- (3) 防振ゴムバネ係数・粘性減衰係数：専用品である防振ゴム自体を新たに設計し交換する必要があり、ユーザにて行える改造ではない。
- (4) 振動数：エンジン回転数を変更する必要があるが、エンジンは定格回転数にて運転されるので、これ以上回転数を上げることは困難である。また、前後進コンパクタは振動のON/OFFに遠心クラッチを使用しているため、回転数を下げることが困難である。
- (5) 最大起振力：起振体の偏心量を変更するか、振動数を変更する必要がある。偏心量の変更はユーザには難しく、(4)に示した通り振動数の変更も困難である。

以上より、ユーザにて行える軽微な改造は振動傾斜角の変更と本体および振動板の質量付加である。

改造を施すことにより、走行速度から地盤剛性が締固め品質管理基準値を満足しているか評価するためには、図-6.5～6.8の斜線領域を右側へずらし、品質管理基準値をカバーする、すなわち前後進コンパクタがジャンプを開始する地盤バネ係数（以下 KJ とおく）が大きくなるようにすればよい。そこで、振動傾斜角の変更と本体および振動板の質量付加が

ジャンプを開始する地盤バネ係数 KJ に与える影響を検討するために、**図-6.6**に示す様な防振ゴムを除いた振動体が地盤上に置かれた1自由度振動モデルを考える。

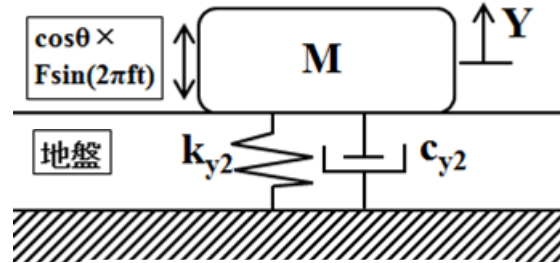


図-6.6 1自由度振動モデル

本モデルにおいて重力の影響がないとした場合、振動体が地盤から受ける反力 N' の最大値は式(6.9)によって求めることができる⁵⁾。

$$N'_{MAX} = \sqrt{\frac{(F \cos \theta)^2 (c_{y2}^2 (2\pi f)^2 + k_{y2}^2)}{(k_{y2} - M(2\pi f)^2)^2 + (c_{y2} \times 2\pi f)^2}} \quad (6.9)$$

この振動体が地盤からジャンプするには、この地盤反力最大値 N'_{MAX} が重量 Mg より大きければよい。したがって、ジャンプをする条件は式(6.10)によって表される。

$$\sqrt{\frac{(F \cos \theta)^2 (c_{y2}^2 (2\pi f)^2 + k_{y2}^2)}{(k_{y2} - M(2\pi f)^2)^2 + (c_{y2} \times 2\pi f)^2}} \geq Mg \quad (6.10)$$

式(6.10)を整理すると、式(6.11)によって表される k_{y2} の2次不等式が得られる。

$$FC \cdot k_{y2}^2 + 2M(2\pi f)^2 (2D^2 FC - 1)k_{y2} + M^2 (2\pi f)^4 \leq 0$$

$$FC = 1 - \left(\frac{F \cos \theta}{Mg} \right)^2 \quad (6.11)$$

ここで、前後進コンパクタの最大起振力鉛直方向成分 $F \cos \theta$ は通常総重量 Mg より大きく設定されるため、式(6.11)における FC は負値になる。よって式(6.11)の左辺を $H(k_{y2})$ とおいた場合のグラフは、**図-6.7**に示す様に上に凸で、 $H(0) = M^2 (2\pi f)^4$ (正値)である放物線となる。

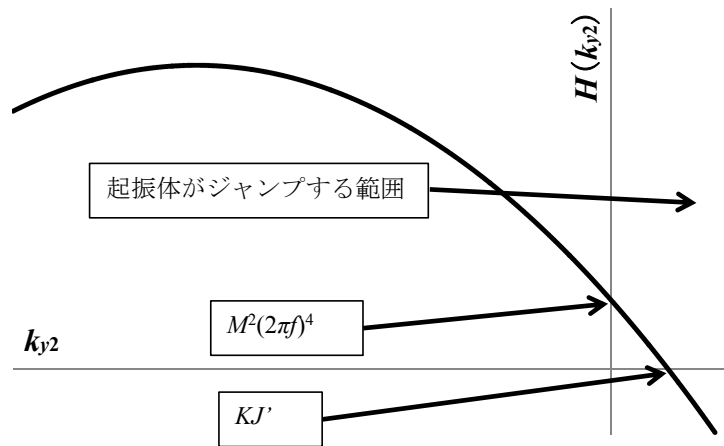


図-6.7 $H(k_{y2})$ グラフ

地盤のバネ係数 k_{y2} は負値となることはないので、振動体がジャンプをする条件式(6.10)を満足する k_{y2} の範囲は、図-6.7の斜線部分となる。したがって振動体がジャンプを開始する地盤バネ係数 KJ' は方程式 $H(k) = 0$ の大きい方の解となり、式(6.12)で表される。

$$KJ' = \frac{M(2\pi f)^2 \cdot \left\{ -(2D^2FC - 1) - \sqrt{(2D^2FC - 1)^2 - FC} \right\}}{FC} \quad (6.12)$$

式(6.12)にて KJ' と θ および KJ' と M との関係を求めると、図-6.8および図-6.9の様になる。

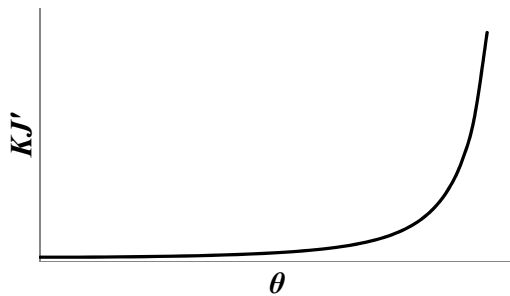


図-6.8 KJ' と θ の関係

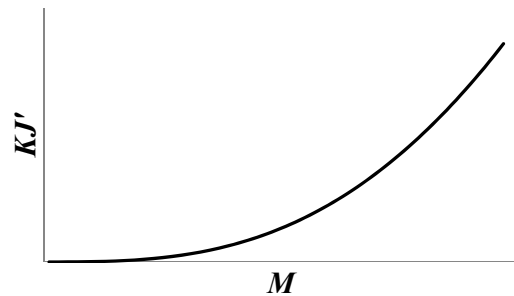


図-6.9 KJ' と M の関係

図-6.8および図-6.9から、振動体がジャンプを開始する地盤バネ係数 KJ' は、振動傾斜角 θ が大きいほど、また起振体の質量 M が大きいほど増加することがわかる。

図-6.1の前後進コンパクトモデルにおいても同様な傾向があると仮定し、6.2節と同様な数値計算を、振動傾斜角 θ 、本体質量 m_1 、振動板質量 m_2 を変化させて行った結果を図-6.10～6.21に示す。

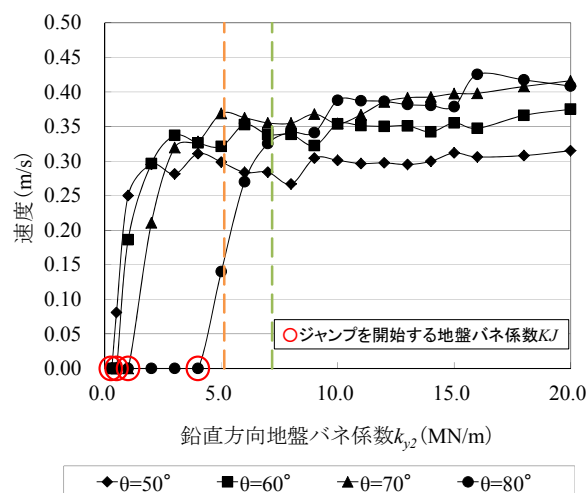


図-6.10 数値計算による地盤バネ係数と走行速度の関係
(前後進コンパクトA：振動傾斜角を変化させた場合)

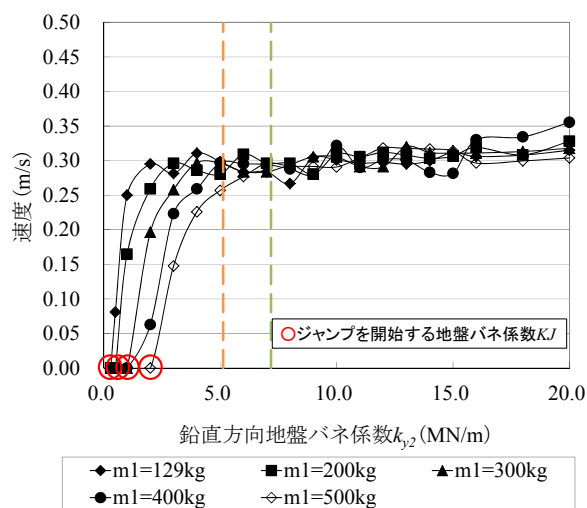


図-6.11 数値計算による地盤バネ係数と走行速度の関係
(前後進コンパクトA：本体質量を変化させた場合)

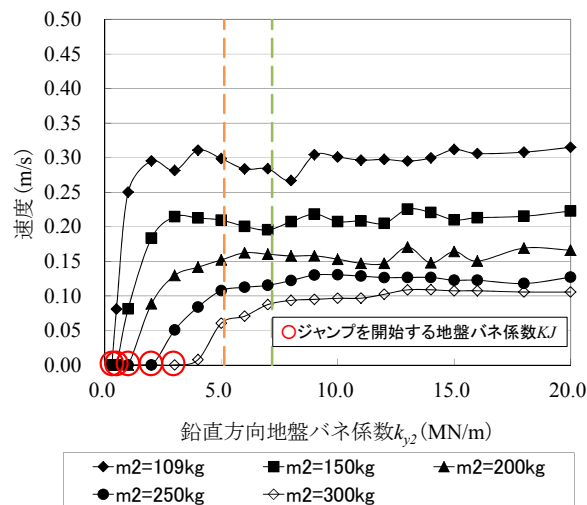


図-6.12 数値計算による地盤バネ係数と走行速度の関係
(前後進コンパクトA：振動板質量を変化させた場合)

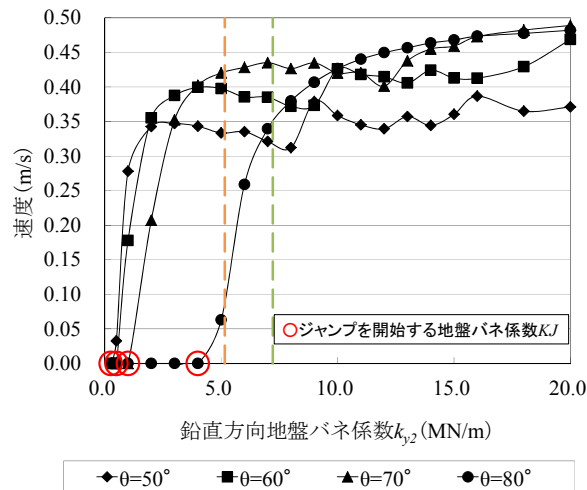


図-6.13 数値計算による地盤バネ係数と走行速度の関係
(前後進コンパクトB：振動傾斜角を変化させた場合)

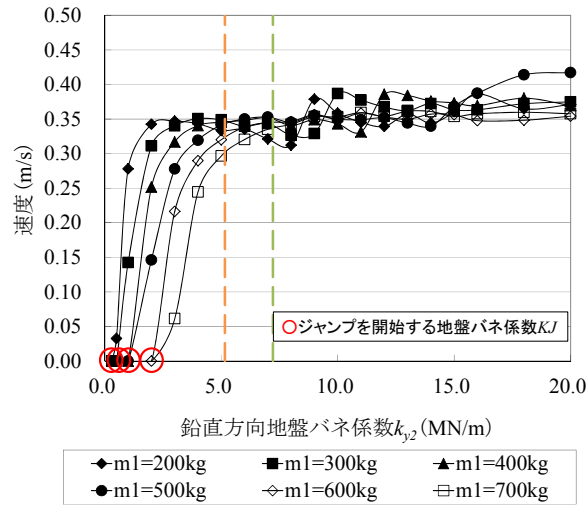


図-6.14 数値計算による地盤バネ係数と走行速度の関係
(前後進コンパクトB：本体質量を変化させた場合)

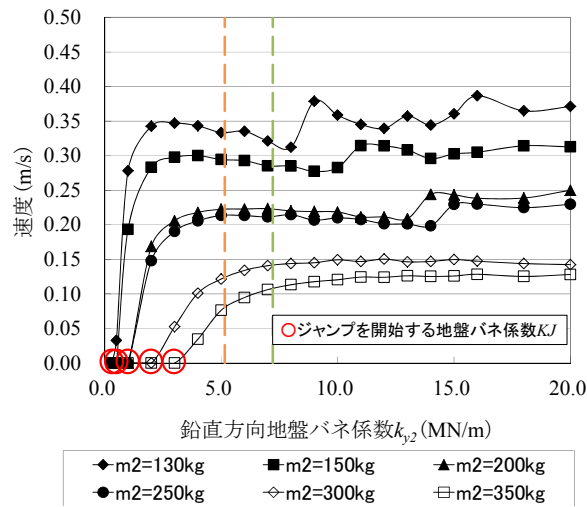


図-6.15 数値計算による地盤バネ係数と走行速度の関係
(前後進コンパクトB：振動板質量を変化させた場合)

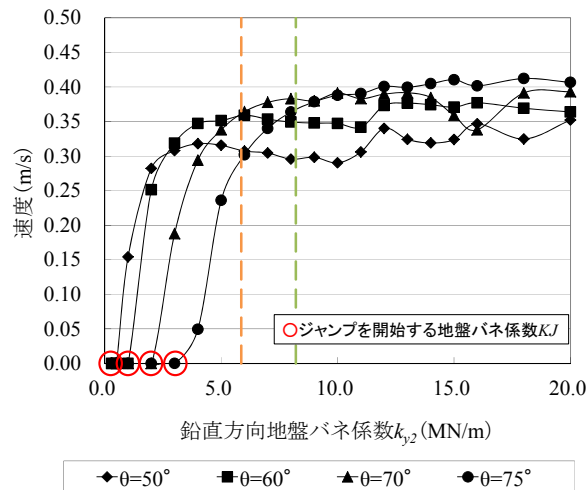


図-6.16 数値計算による地盤バネ係数と走行速度の関係
(前後進コンパクトC：振動傾斜角を変化させた場合)

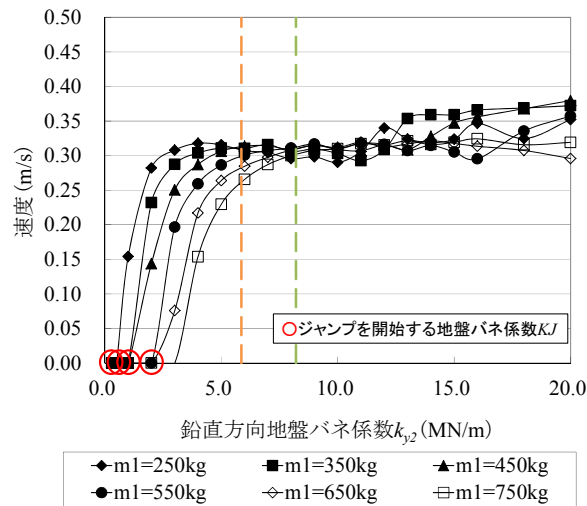


図-6.17 数値計算による地盤バネ係数と走行速度の関係
(前後進コンパクトC：本体質量を変化させた場合)

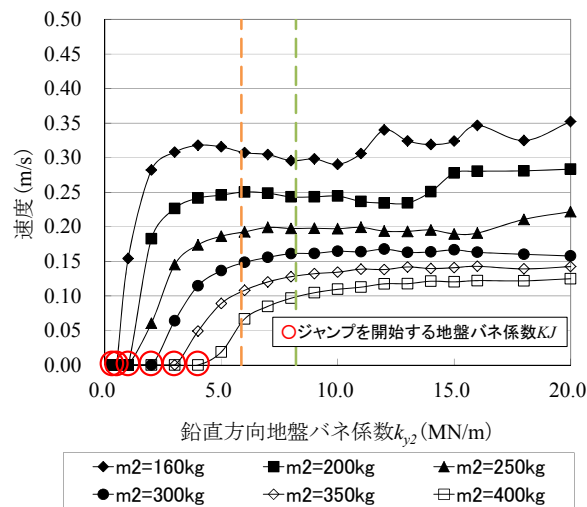


図-6.18 数値計算による地盤バネ係数と走行速度の関係
(前後進コンパクトC：振動板質量を変化させた場合)

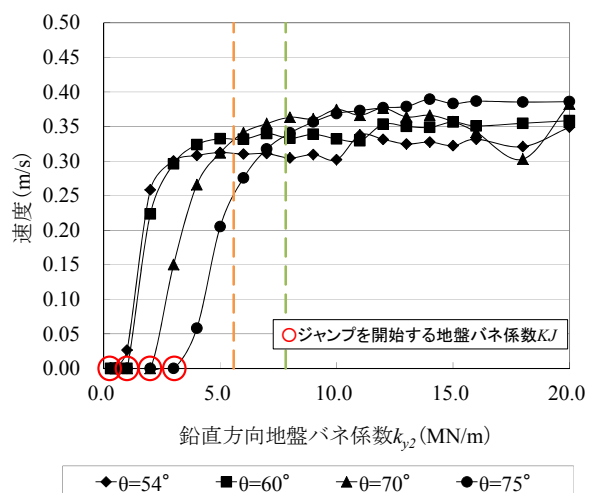


図-6.19 数値計算による地盤バネ係数と走行速度の関係
(前後進コンパクトD: 振動傾斜角を変化させた場合)

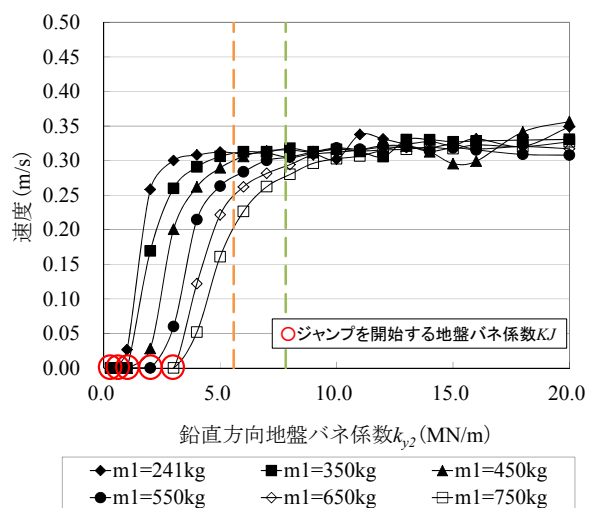


図-6.20 数値計算による地盤バネ係数と走行速度の関係
(前後進コンパクトD: 本体質量を変化させた場合)

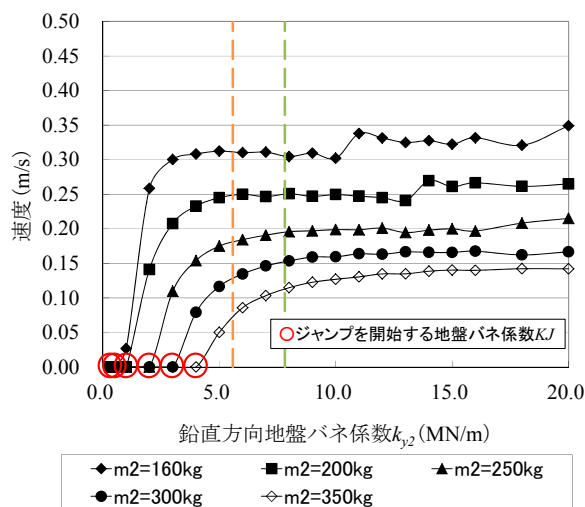


図-6.21 数値計算による地盤バネ係数と走行速度の関係
(前後進コンパクトD: 振動板質量を変化させた場合)

図-6.10～6.21より、前後進コンパクトA, B, C, Dの仕様を持った図-6.1の前後進コンパクトモデルにおいても図-6.6の1自由度振動モデルと同様に、ジャンプを開始する地盤バネ係数 KJ は、振動傾斜角が大きいほど、また本体および振動板質量が大きいほど増加することがわかる。また、振動傾斜角を大きくすると、ジャンプを開始する地盤バネ係数 KJ が増加すると共に、安定速度も増加している。これは、振動傾斜角を大きくすると鉛直方向の振動力が減少するためジャンプを開始できる地盤バネ係数が大きくなるが、十分滞空できる固さの地盤バネ係数であれば、水平方向の振動力が大きいため安定速度は高くなるものと考えられる。さらに、本体質量よりも振動板質量の変化の方が、ジャンプを開始する地盤バネ係数 KJ 及び安定速度に与える影響は大きいこともわかる。これはいわゆるバネ下質量の方がバネ上質量より振動挙動に与える影響が大きいものと考えられる。

走行速度から地盤バネ係数が鉄道盛土における締固め品質管理基準値を満たしているか推測するためには、振動傾斜角、本体質量、振動板質量を表-6.5の値まで増加させればよいことがわかる。

表-6.5 必要改造量

	振動傾斜角	本体質量	振動板質量
前後進コンパクトA	50度→80度	129 kg→500 kg	109 kg→300 kg
前後進コンパクトB	50度→80度	200 kg→700 kg	130 kg→350 kg
前後進コンパクトC	50度→75度	250 kg→750 kg	160 kg→400 kg
前後進コンパクトD	54度→75度	241 kg→750 kg	160 kg→350 kg

しかしながら、本体質量に370 kg～509 kg、また振動板質量に191 kg～290 kg を現状の機械に付加させることは質量、スペース的に現実的ではなく、また管理基準値付近での走行速度の変化量は、振動傾斜角を75度あるいは80度にした場合が最も大きいため、実際に最も有効な改造は振動傾斜角を75度あるいは80度に増加させることである。

具体的には図-6.13より、振動傾斜角を80度に改造した前後進コンパクトBを用いた場合、品質管理基準値Aならば走行速度0.05 m/s 程度、品質管理基準値Bならば走行速度0.35 m/s 程度を基準として地盤バネ係数値の合否判定を行えばよいことがわかる。

6.5. 土槽実験による適用性の検証

前節で述べた，振動傾斜角を改造した前後進コンパクタの走行速度から地盤バネ係数値の合否判定を行う手法の適用性を調べるため，室内実験ピットにて実験を行った。

実験では，国内で最も台数的に普及している前後進コンパクタBを用いて行った。

6.5.1. 実験フィールド

本実験は3.2.1.に示した実験フィールドと同様のものを作成して行った。実験フィールドの掘削溝幅は，使用した前後進コンパクタBの締固め幅が0.445 mであるため，0.5 mとした。また，実験材料盛り立て後の初期状態（小型締固め機械による締固め施工を始める前の状態）については，0.1 m³クラス油圧ショベル（自重2.7 ton）にてクローラ締固めを2回（往復）行った状態を初期状態とした。

6.5.2. 実験材料

実験土は，締固め品質管理基準値を含む幅広い固さの地盤を再現することが1種類の土質では困難であったため，3.2.2.に示した砂質系の土質(1)，(2)，(3)の3種類の土質を使用した。実験時含水比は，土質(1)は，11%，15%，16%の3種類，土質(2)は16%，土質(3)は29%にて実験を行った。

6.5.3. データ測定方法

その実験フィールド上を前後進コンパクタBと，振動傾斜角を80度に改造した前後進コンパクタBの2種類の機械にて走行・転圧を行い，フィールド内10 mを通過する時間をストップウォッチにて計測し走行速度を算出した。また同時に前後進コンパクタが通過後の地盤反力係数を小型FWDにて計測した。なお，小型FWDの計測は上記速度を計測した10 m区間内の3点で行い平均値を採用することとした（図-6.22）。小型FWDの計測・データ処理方法は，「土木学会，FWDおよび小型FWD運用の手引き」⁶⁾および，「FWD-Lightによる小型FWD試験方法（地盤編）」⁷⁾に従って行った。表-6.6に小型FWDの仕様を示す。

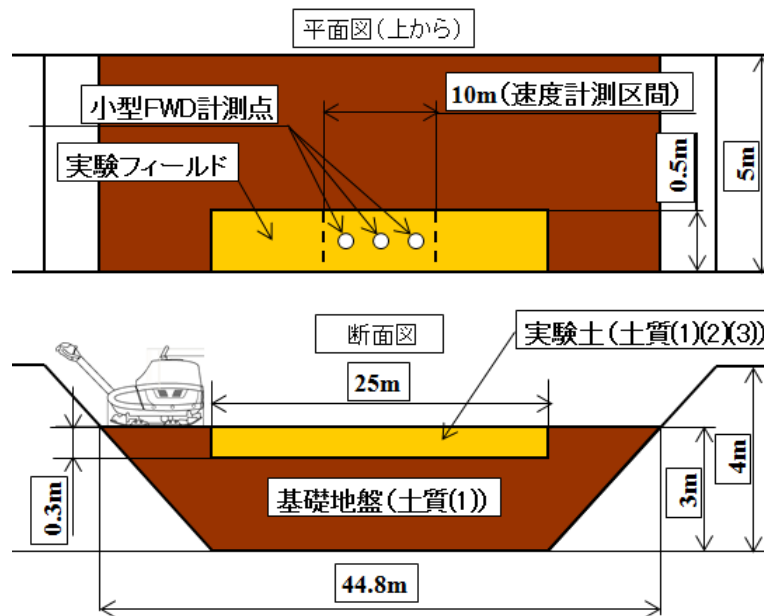


図-6.22 実験フィールド

表-6.6 小型FWD仕様 ((株)東京測器研究所製)

本体型式	KFD-100A
載荷板径	150, 200, 300(mm)
重錘質量	5(kg)
落下高さ	50~530(mm)
表示器型式	TC-351F
データ収集ソフトウェア型式	TC-7351
計測・処理ソフトウェア型式	TC-7100

6.5.4. 土槽実験結果による走行速度から地盤剛性の合否を判定する手法の検証

実験した結果を図-6.23に示す。プロットに際し、小型FWDにて得られる地盤反力係数 (K_{30} 相当値) は式(6.8)にて地盤のバネ係数に変換した。

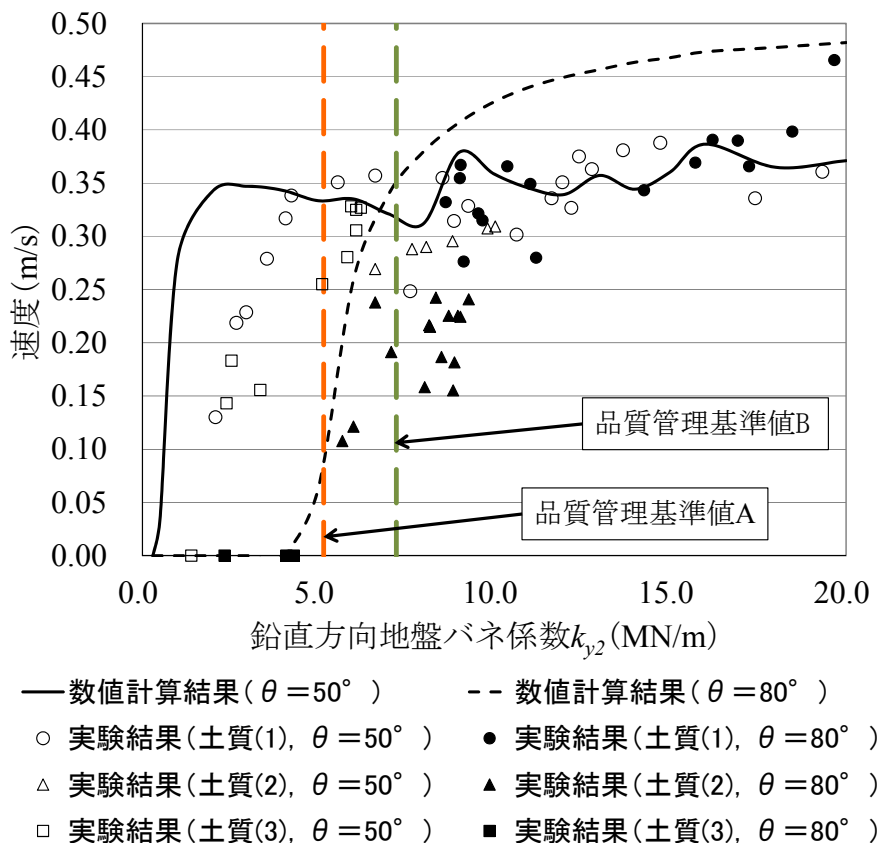


図-6.23 土槽実験による地盤バネ係数と走行速度の関係
(実線および破線は計算による結果)

図-6.23によると、実験結果は計算結果と同様に、振動傾斜角を 50° から 80° に増加するとジャンプを開始する地盤バネ係数が大きくなるのがわかる。そして、振動傾斜角 50° では走行速度から地盤バネ係数が品質管理基準値A, Bをそれぞれ満たしているか推定することは比較的困難であるが、振動傾斜角 80° にすることにより、品質管理基準値A, Bの合否判定を行うことが可能となるのがわかる。しかし、振動傾斜角 50° , 80° 両方共に実験結果が計算結果よりやや右方にプロットされている。これは数値計算を行う際の、モデル化やパラメータ設定の手法、付加質量やすべりの無視という仮定など、多くの要因が考えられる。その結果、走行速度により地盤バネ係数値の合否判定を行う際の基準速度は、品質管理基準値Aの場合は計算結果と実験結果はほぼ等しく 0.05 m/s 程度であるが、品質管理基準値Bの場合は実験結果では計算結果よりやや低く 0.20 m/s 程度となっている。したが

って、実際に走行速度により地盤バネ係数値の合否判定を行う場合は、事前に試験施工を行い品質管理基準値と走行速度の関係を求めておくことが現実的である。

また、本研究では鉄道盛土における締固め品質管理基準値を目標としているが、**図-6.10**、**6.13**、**6.16**、**6.19**から振動傾斜角を調整すれば他の基準値を推定することも可能であるといえる。その場合も同様に数値計算結果と実施工との間に多少のずれが存在すると考えられるため、事前に試験施工等を行うことが現実的である。

さらに、改造後の前後進コンパクタは、材料撒き出し直後などの柔らかい地盤では走行することができないため、通常の締固めに使用することは困難である。したがって、締固めには通常の振動傾斜角度のコンパクタを使用し、締固め完了後に振動傾斜角を改造したコンパクタを用いて走行速度を測定し、施工エリア全体の品質管理を行う手法が考えられる。

なお今回の数値計算では、走行速度に対する土質の影響要因として、地盤バネ係数、すなわち地盤の剛性のみを想定している。実験ではこの点の検証の意味も含めて土質を3種類変えて実験を行った。図-6.23によると、実験結果はすべての土質において数値計算結果と類似した傾向を示しており、今回実験で用いた土質の範囲では、土質による明確な差異はないものと考えられる。今後、礫質土や粘性土など様々な土質での検証を行い本手法の適用範囲を明らかにしたい。

6.6. まとめ

現在国内で最も一般的に使用されている前後進コンパクタを用いて、その走行速度を測定することにより接触している地盤の剛性が鉄道盛土における締固め品質管理基準値を満たしているか推定する手法の提案を目的とし、数値計算により走行速度と地盤バネ係数との関係について考察を行った。その結果、以下の点が判明した。

- (1) 前後進コンパクタをそのまま使用した場合は、走行速度から地盤剛性が著しく低い地点（ウィークポイント）を検出することは可能であるが、その領域は、品質管理基準値よりかなり低い範囲となっており、走行速度から地盤バネ係数が締固め品質管理値を満たしているか評価を行うことは困難である。
- (2) 地盤バネ係数が低い場合（0.3 MN/m以下）、前後進コンパクタはジャンプせず走行しない。地盤バネ係数が上昇すると前後進コンパクタはジャンプを開始し走行する。そのジャンプを開始する地盤バネ係数値は、振動傾斜角が大きいほど、また本体および振動板質量が大きいほど増加する。
- (3) 振動傾斜角を大きくすると、ジャンプを開始する地盤バネ係数 KJ が増加すると共に、安

定速度も増加している。これは、振動傾斜角を大きくすると鉛直方向の振動力が減少するためジャンプを開始できる地盤バネ係数が大きくなるが、十分滞空できる硬さの地盤バネ係数であれば、水平方向の振動力が大きいため安定速度は高くなるものと考えられる。

- (4) 本体質量（バネ上質量）よりも振動板質量（バネ下質量）の変化の方が、ジャンプを開始する地盤バネ係数 KJ 及び安定速度に与える影響は大きい。
- (5) 軽微な改造として、振動傾斜角を変更することにより、走行速度から地盤バネ係数値が鉄道盛土における締固め品質管理基準値を満たしているか推定することが可能である。具体的には前後進コンパクタBの場合、品質管理基準値Aならば走行速度0.05 m/s程度、品質管理基準値Bならば走行速度0.30 m/s程度を基準として地盤バネ係数値の合否判定を行えばよいことがわかる。

また本数値計算結果を実際の前後進コンパクタBを用いた土槽実験にて検証した。その結果以下の点が判明した。

- (6) 計算結果と同様に、振動傾斜角を80度に増加することによりジャンプを開始する地盤バネ係数を大きくすることができ、走行速度から地盤バネ係数が鉄道盛土における締固め品質管理基準値を満たしているか推測することが可能である。
- (7) 数値計算結果と実験結果の間にずれが存在するため、品質管理基準値Bの場合での地盤バネ係数値の合否判定を行う際の基準速度は、実験結果では約0.20 m/s程度となる。したがって実際に合否判定を行う場合は、事前に試験施工を行い、品質管理基準値と走行速度の関係を求めておくことが現実的である。

前後進コンパクタを用いる施工現場は、構造物や既存地盤との接合部であることが多く、その品質管理はより一層慎重に行う必要がある。本研究による手法は、ストップウォッチなどを使用すれば非常に手軽であり、品質管理手法を容易に合理化する一助になると考えている。

課題として、数値計算結果と実験結果において、合否判定を行う際の基準速度に差異がある点が挙げられる。今後この差異を解消するよう検討を続けたい。また、本研究は現在国内で最も一般的に使用されている前後進コンパクタのみを対象として行ったが、今後は異なる仕様を持つ機械や、さまざまな土質条件での検討・実験を行い、本手法の適用性をさらに向上したいと考えている。

参考文献

- 1) 岩崎敏男, 嶋津晃臣訳: 土と振動の基礎, pp.207-263, p.367, 鹿島出版会, 1975.
- 2) 土木学会: トンネル標準示方書(開削工法編)・同解説, p.266, 1996.
- 3) 国土交通省鉄道局監修, 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計基準・同解説, pp.89-93, 丸善, 2007.
- 4) 木村孟: 土の応力伝播, pp.18-31, 鹿島出版会, 1978.
- 5) 小堀与一訳: 機械振動入門, pp.57-62, 丸善, 1962.
- 6) 土木学会: FWD および小型 FWD 運用の手引き, pp.65-74, 2003.
- 7) 株式会社東京測器研究所: FWD-Light による小型 FWD 試験方法, pp.4-17, 2008.

第7章 まとめ

本研究では、狭隘部などにおける小型締固め機械での締固め施工の合理化を図ることを目標として、小型締固め機械の構造による分類、機種毎の締固め能力の明確化、締固め能力を機械仕様より表すことができる指標の提案、および狭隘部の締固め品質測定を効率的に行う新しい手法の提案をそれぞれ試みた。各章ごとに得られた結果と今後の展望を以下に示す。

7.1. 小型締固め機械の種類と特徴

現状日本国内で一般的に入手することができる小型締固め機械を、その機械的特徴から4種類に分類し、特徴などをまとめ表-2.1を得た。

また、全世界の主要小型締固め機械メーカーのカタログを調査することにより、全世界で販売されている仕様の特徴をまとめるとともに、国内レンタル業のカタログを調査することにより一般的に使用されている仕様を推定した。

小型締固め機械による締固め施工が、現状あまり合理的に行われていない理由の一つに、小型締固め機械の知識が現場に不足していることが考えられるが、表-2.1 および本章の結果は、小型締固め機械の種類や特徴の理解を促し、施工の合理化を図る第一歩として有効であるといえる。

7.2. 小型締固め機械の締固め特性

小型締固め機械の締固め特性を明確にするために、土木研究所実験ピット内に実際の狭隘部を模した実験フィールドを作成して実験を行った。

実験の結果を基に、小型締固め機械の締固め特性およびその特徴をまとめ、表-3.3 および表-3.4を得た。

表-3.3 および 3.4 は、小型締固め機械の機種を選定する際の参考とすることができる。これにより実施工現場の状況に合わせて、最適な機種を選定することが可能となる。

7.3. 小型締固め機械の締固め能力指標の提案とその利用

表-3.3 および 3.4 から、狭隘部などにて盛土の締固め施工を行うのに適している機械として、前後進コンパクタが選択される場合も多いと考えられる。そこで、機械下部の土中応力に着目し、前後進コンパクタを含む平板式振動型締固め機械の機械仕様から、締固め能力を推定する手法の提案を数値計算と土槽実験を通して行った。その結果、以下の点が判明した。

- (1) 式(4.3)で計算される土中応力平均値 AS_3 と実験による到達密度には、各土質条件において強い相関がある。到達密度は機械の締固め能力を表わしているから、したがって AS_3 値は、締固め能力の大きさを表す指標として適用可能であるといえる。 $(AS_3$ 値が大きい方が締固め能力が高い)。
- (2) 式(4.3)および式(4.6)は3次元および2次元の理論式からそれぞれ求めたものであるが、この2つの式を施工状況などによって使い分けることが、より精緻な締固め能力指標を得るために重要であると考えられる。
- (3) 「同一飽和度における密度比」を導入すれば、 AS_3 値から、任意の土質・含水比の到達密度を推定することが可能である(その土質の標準締固め曲線が必要)。ただし、本手法が適用できる条件は、「施工時含水比の乖離割合が $-12\% \sim 0\%$ であり、かつ土質は土質(1)および(2)に類似したもの」である。
- (4) 図-4.38と式(4.3)、使用する材料の土質試験結果を用いることにより、機械仕様から要求仕様(締固め密度)を満足させることが可能な機種および施工厚さを選定することが可能である。ただし、本手法が適用できる条件は、「施工時含水比の乖離割合が $-12\% \sim 0\%$ であり、かつ土質は土質(1)および(2)に類似したもの」である。

7.4. 加速度計を利用した締固め品質計測システムの検証

前後進コンパクタにて締固め施工を行った場合の品質測定を合理化する手法の一つとして、加速度計を利用した品質計測システムがある。この前後進コンパクタ用加速度応答システムの現場への適用条件を明確にすることを目的として、システムの表示値と密度・地盤剛性との相関性に関する基礎データの収集のための実験を行った。その結果、以下の点が判明した。

- (1) 加速度応答システム表示値(LED点灯回数)と締固め度の関係は、各含水比および土質においてそれぞれ正の相関がある。しかしその関係は、各含水比、土質の変化によって大きく異なっており、加速度応答システム表示値を密度(締固め度)の代替指標にするには、施工中の含水比、土質を一定に保ち、かつその条件における両者の関係を求めておく必要があると考えられる。
- (2) 加速度応答システム表示値(LED点灯回数)と地盤剛性値の関係は、各含水比および土質においてそれぞれ正の相関がある。また実験結果は、各含水比、土質の変化によらずある1本の直線上に集中しており、本実験の範囲内であれば、加速度応答システム表示値を地盤剛性値の代替指標にすることは可能であると考えられる。

7.5. 走行速度を利用した締固め品質推定手法

前後進コンパクタの走行原理より、その走行速度は接触している地盤の剛性に影響を受けていると考えられる。そこで、品質測定を合理化するもう一つの手法として、安価な方法（ストップウォッチなど）で走行速度を測定することにより、接触している地盤の剛性が鉄道盛土における締固め品質管理基準値を満たしているか推定する手法の提案を、数値計算と土漕実験を通して行った。その結果以下の点が判明した。

- (1) 前後進コンパクタをそのまま使用した場合は、走行速度から地盤剛性が著しく低い地点（ウィークポイント）を検出することは可能であるが、その領域は、品質管理基準値よりかなり低い範囲となっており、走行速度から地盤バネ係数が締固め品質管理値を満たしているか評価を行うことは困難である。
- (2) 数値計算より、軽微な改造として振動傾斜角を増加（例：前後進コンパクタBならば80度）することにより、ジャンプを開始する地盤バネ係数を大きくすることができ、走行速度から地盤バネ係数値が鉄道盛土における締固め品質管理基準値を満たしているか推定することが可能である。
- (3) 前後進コンパクタBを用いた実験結果より、数値計算結果と同様に、振動傾斜角を80度に増加することによりジャンプを開始する地盤バネ係数を大きくすることができ、走行速度から地盤バネ係数が鉄道盛土における締固め品質管理基準値を満たしているか推測することが可能である。
- (4) 数値計算結果と実験結果の間にずれが存在するため、品質管理基準値Bの場合での地盤バネ係数値の合否判定を行う際の基準速度は、数値計算結果と実験結果では異なっている。したがって実際に合否判定を行う場合は、事前に試験施工を行い、品質管理基準値と走行速度の関係を求めておくことが現実的である。

7.6. 今後の展望

締固め施工は一般土工のなかで唯一厳しい品質を求められる工種であり、その品質は、最終出来形が規定通りに仕上がっていることだけでは不十分で、内部までしっかり締め固まっていることが必要である。品質の確認すなわち締め固まっているかの確認は、一般的に地盤の密度や剛性を測定することで行っているが、測定に時間と手間が掛かることから施工途中で行われることはあまり無く、施工終了後に測定点を限定して行っているのが現状である。すなわち、締固め施工は他の土工と異なり、出来形を確認しながら施工途中で品質を調整することは非常に困難であり、有効な施工手順を予め決定し、それを順守することが重要な工種である。したがって、数多ある締固め機械の中から、施工材料や施工環境などによって適切な機械を選定し、その能力に応じた適切な施工厚さを決定することは、

締固め施工において最も重要である。

大型機械の機種選定法や施工能力の研究はこれまで様々になされているが、小型締固め機械は大型締固め機械に比べ研究が遅れており、施工現場における機種選択や施工厚さの決定も、入手の容易さや経験などで行われている場合が多い。

本研究の第2, 3, 4章が小型締固め機械の機種選定や施工厚さを決定する際の一助となり、狹隘部や構造物近傍といった重要な場所の締固め施工の信頼性とそれにより造成される構造物の品質の向上に寄与することを期待している。さらに本研究結果は、小型締固め機械の開発現場でも利用できる。従来の仕様にとらわれず、画期的な新製品が開発されることも期待している。また、締固め施工の品質確認手法を合理化することができれば、小規模な施工現場でも効率的に品質確認を行うことが可能となり、施工の信頼性を向上させることができる。本研究の第5, 6章が、小型締固め機械を用いる際の品質確認手法を容易に合理化する一助になることも期待している。

今後の課題として、本研究の実験が細粒分含有率の低い2種類の砂質系材料と、細粒分含有率が高くあまり盛土施工に適していない1種類の粘性系材料の計3種類の材料でのみ行われたことが挙げられる。今後、礫質土や裏込材、改良土など、実施工現場で想定される様々な材料にて同様の実験を行い、本研究結果の適用範囲を広げていきたい。

また、本研究の第4, 5, 6章が、盛土の締固め施工を行うのに適している機械として、前後進コンパクタのみを対象としたことも今後の課題として挙げられる。今後は他の機種、特に第3章の結果から、前後進コンパクタと同様に盛土の締固め施工を行うのに適している機械として考えられるランマについて、同様の研究を行っていきたい。その際、ランマの締固め原理は第2章で示したとおり衝撃力であり、またその運動はクランクによる強制変位であることに留意しなければならない。すなわち本研究と同様の手法では、接地板下部の土中応力や、跳ね上がりを含む運動を、数値計算によって推定することは困難である。重錘締固めに関する研究¹⁾やランマの運動に関する研究²⁾を参考に、今後研究を進めていきたい。

参考文献

- 1) 大島昭彦, 高田直俊, 福本彦吉: 重錘落下締固めにおける重錘挙動と地盤応力, 土木学会論文集, No.561/III-38, pp.215-226, 1997.
- 2) 西村源六郎: 振動工学, pp.271-275, 誠文堂, 1969.

謝辞

本研究は、独立行政法人土木研究所 平成 21～25 年度重点研究「盛土施工の効率化と品質管理向上技術に関する研究」にて得られたデータを基に行ったものです。本研究の遂行と論文の作成にあたり、立命館大学理工学部環境システム工学科 建山和由教授に様々なご指導とご助言をいただきました。深く感謝を申し上げます。また、独立行政法人土木研究所技術推進本部先端技術チーム 藤野健一主席研究員には、本研究に携わる機会を与えていただくとともに、学位取得への様々なご支援を賜りました。心より感謝を申し上げます。私は前職の締固め機械メーカーに在籍していた頃から、締固め機械と土との相互関係に疑問と興味を持ち、詳細に勉強してみたいと考えておりました。藤野主席との出会いで研究に携わることができ、建山教授のご指導にて論文にまとめることができました。本研究および今後の継続研究が、土木研究所の目的であります「良質な社会資本の効率的な整備」に微力ながら貢献できれば幸いと思っております。

建山教授初め、立命館大学理工学部環境システム工学科 岡本享久教授、都市システム工学科 深川良一教授には本論文を審査していただきました。心より御礼申し上げます。

本研究のまとめにおきまして、東京理科大学理工学部土木工学科 龍岡文夫教授が2013年7月より「土と基礎」に連載しておられる「地盤工学・技術ノート：土の締固め」が大変参考になっております。龍岡教授に深く感謝を申し上げます。

実験とデータ整理、論文作成を進めるにあたり、鹿島道路株式会社機械部 山口達也部長、コベルコ建機株式会社直轄営業部 大中康弘アシスタントマネージャ、西松建設株式会社技術研究所 佐藤靖彦副所長、岩谷隆文研究員、三笠産業株式会社開発部 須永久治参事、株式会社東洋計測リサーチ 山下彰社長、武田勲氏に多大なご協力とご助言をいただきました。誠にありがとうございました。特に岩谷氏におかれましては、氏が交流研究員として土木研究所に出向されている期間を通して、機械畑出身で土木に関しては素人同然の私に対する確なご助言を多数いただきました。深く御礼を申し上げます。

株式会社安藤・間土木事業本部 中島聡課長には、建山教授門下の兄弟子として様々なご助言をいただきました。深く感謝を申し上げます。

「盛土施工の効率化と品質管理向上技術に関する研究」主担当の独立行政法人土木研究所先端技術チーム 茂木正晴主任研究員、施工技術チーム 森芳徳主任研究員を初め、先端技術チーム、施工技術チームの方々には、研究および論文作成へのご協力、並びに日々の業務内外でのサポート等、様々なご支援をいただきました。心より感謝申し上げます。

最後に、転職してまで自分の思う道を進んでいる私を見守ってくれている家族に、深い感謝の意を表して謝辞といたします。

参考文献は各章の最後に記載