

種々の土質条件に対する ローラ加速度応答法の締固め管理への適用性

藤山哲雄¹・益村公人²・建山和由³・石黒 健⁴・三嶋信雄⁵

¹正会員 工修 前田建設工業(株)技術研究所(〒179-8914 東京都練馬区旭町1-39-16)

²正会員 工修 日本道路公団試験研究所(〒194-8508 東京都町田市忠生1-4-1)

³正会員 工博 京都大学大学院工学研究科 助教授(〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

⁴正会員 工博 前田建設工業(株)技術研究所 課長(〒179-8914 東京都練馬区旭町1-39-16)

⁵正会員 工博 川崎地質(株)理事(〒108-8337 東京都港区三田2-11-15)

振動ローラ加速度応答を利用した締固め管理手法(ローラ加速度応答法)に対し、従来まで明らかにされていない土の種類および含水比の影響を調査すべく、これらをパラメトリックに変化させた転圧試験を行った。この結果、振動ローラ加速度応答の定量指標として提案する乱れ率と地盤密度の関係は含水比ごとに異なり、飽和度がおおよそ80%以上の転圧地盤に対しては密度推定を目的とした適用が困難であること、密度推定手法としては含水比の変動が少ない粗粒材料への適用が最も有効であることがわかった。一方、CBR、動的変形係数などの地盤強度・剛性を表す指標と乱れ率の間には土の種類および含水比によらず一意的な関係があり、締固め後の強度、変形抵抗性を判定する手法として有用であることを示した。

Key Words : vibratory roller, roller acceleration, compaction control, soil variety, water content, estimation of density, estimation of stiffness

1. はじめに

振動ローラは、振動輪(ロール)内の偏心錘を回転させて振動力を得ながら、自重と振動の効果により効率的に土の締固めを行う機械であり、大規模土工を中心に現在最も多用されている締固め機械の一つである。

この振動ローラの振動輪部の加速度を計測すると、締固めの進行による地盤剛性の増大にともなう、波形が変化してくることが認められる。この現象を利用し、施工中の振動輪の加速度を計測することによって、リアルタイムかつ面的に地盤の締固め具合を判定しようとする研究が従来から行われている。

この研究は北欧で先行し^{1),2)}、我が国では鳴津らが室内大型ピットでシルト質砂を用いた転圧試験³⁾を始め、岩砕⁴⁾、路盤・路床土⁵⁾、フィルダムロック材^{6)~8)}などの材料に対し、振動ローラ加速度応答を利用した締固め管理手法(以下、本論文ではローラ加速度応答法と呼ぶ)の適用性を検討した報告例がある。いずれも締固めにともなう振動ローラ加速度の変化を何らかの形で定量化し、これと密度あるいは地盤剛性などの締固め指標の間に相関を見出すことによって、施工管理

に適用できる可能性を示している。

このように本手法が提案されてから20年以上が経ち、北欧の一部地域では従来手法の補完手段として既に仕様書^{9),10)}に明記されている。しかしながら、我が国では多くの機関で締固め管理手法としての可能性が指摘されながら、未だ実用化には至っていない。この理由としては幾つか考えられるが、大きな理由の一つとして、土の種類や含水比が変化した場合に、振動ローラ加速度応答と締固め指標(密度や強度、剛性など)の関係が受ける影響について、これまでほとんど明らかにされていないことが挙げられる。すなわち、転圧試験等で振動ローラ加速度応答と密度あるいは地盤剛性などの相関を得たとしても、材料特性が頻繁に変化する実施工においてもこれが常に有効なのか、あるいは両者の関係を把握するためのキャリブレーション試験は具体的にどの程度の頻度で実施すべきなのか、これら実務上明確にしておくべき事項に対して、根拠を持った説明をできないのが現状である。一般に大規模土工事では同じ盛土内にて多種多様な材料が使用されるのが普通であるから、特に地質変化に富む我が国では、実務への展開が難しいものと考えられる。

表-1 振動ローラの機械諸元

| 機械諸元 | SV160DV |
|---------------|-------------|
| 車体総質量 M | 17,600 (kg) |
| ※フレーム質量 m_1 | 4,310 (kg) |
| 振動輪質量 m_2 | 6,000 (kg) |
| 起振力 F | 294 (kN) |
| 振動数 f_0 | 28.3 (Hz) |
| 振動輪直径 D | 1.71 (m) |
| 振動輪幅 B | 2.15 (m) |

※振動輪側フレーム、図-12参照

表-2 試験材料の物理特性

| 試験項目 | 砂質ローム | スクリーニングス | 粒調碎石(M-40) |
|---|----------|-------------|----------------|
| 土粒子密度 ρ_s (Mg/m ³) | 2.790 | 2.641 | 2.664 |
| 最大粒径 D_{max} (mm) | 2 | 2.5 | 53 |
| 細粒分含有率 F_c (%) | 38.4 | 18.6 | 6.4 |
| 均等係数 U_c | 59.5 | 66.0 | 46.1 |
| 最大乾燥密度 ρ_{dmax} (Mg/m ³) | 2.087 | 2.182 | 2.284 |
| 最適含水比 w_{opt} (%) | 9.8% | 6.3% | 5.6% |
| 地盤材料の工学的分類 | 細粒分質砂 SF | 細粒分質礫質砂 SFG | 細粒分まじり砂質礫 GS-F |

※突固めによる土の締固め試験法: E法

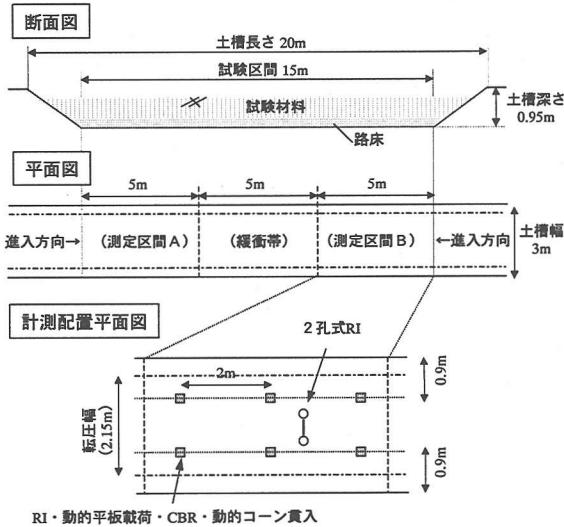


図-1 試験盛土槽形状図

表-3 各試験ケースの含水比

| 土質 | 層厚 | 含水比 | | |
|----------|------|------|-----------|-------|
| | | 乾燥側 | w_{opt} | 湿潤側 |
| 砂質ローム | 30cm | 8.1% | 10.6% | 13.6% |
| | 60cm | 7.1% | 8.7% | 10.8% |
| スクリーニングス | 30cm | 3.0% | 4.7% | 7.3% |
| | 60cm | 3.1% | 5.0% | 7.2% |
| 粒調碎石 | 30cm | 3.7% | 4.5% | 7.0% |
| | 60cm | 3.8% | 6.4% | 8.4% |

た試験土槽の形状を図-1に示す。使用した振動ローラは起振力294kN (30tf) の大型機種である。

転圧試験は幅3m×長さ20m×深さ0.95mのコンクリート製の室内大型土槽に厚さ15cmの十分締固めた路床 (CBR 70%以上) を構築し、その上に所定の材料を投入して行った (測定区間A・Bで2材料を同時実施)。撒き出し厚は締固め後の厚さ30cm、および60cmの2ケースを用意した。

そこで本研究では、同一転圧機種、撒き出し厚の条件下で、土の種類および含水比をパラメトリックに変えた転圧試験^{11),12)}を行い、これら土質条件の違いが振動ローラ加速度応答と締固め指標 (密度、現場CBR、動的コーン貫入値、動的地盤変形係数) との関係に及ぼす影響を調査し、その適用性を検討した。特に、

- ① 従来より締固め指標として一般的な密度を振動ローラ加速度計測から推定する場合
- ② 地盤の力学的指標である強度、地盤剛性を推定する場合

とでは、土の種類・含水比変動に対する適用性が大きく異なり、施工管理手法としての評価項目を明確に区別する必要があることを示す。

2. 試験概要

(1) 転圧条件

転圧試験に用いた振動ローラの機械諸元を表-1に、ま

(2) 試験材料および試験ケース

試験材料は砂質ローム、スクリーニングス (碎石を製造する際に生じる粒径2.5mm以下の細かい部分)、粒度調整碎石 (呼び名M-40) の3種類を用い、各々室内突固め試験 (JSFT 711-1990) E法 (4.5Ec締固め) による最適含水比 w_{opt} 付近、およびその乾燥側、湿潤側の3水準の含水比に調整して試験に供した。各材料の物理特性を表-2に、また各試験ケース毎の含水比を表-3に示す。ケース数は、締固め厚30cm・60cmを合わせて表-3に示す合計18ケースとなる。図-2には各試験材料の粒度分布を示している。砂質ロームが細粒分をやや多く含む砂質材料 ($F_c=38.4%$)、スクリーニングスはそれより細粒分が少ない $F_c=18.6%$ の砂質材料、粒調碎石が最大粒径53mmまでを含む礫材料である。これらが多種多様な道路盛土材を全てカバーするものではないが、試験場所近郊で入手しやすい材料のうち、砂質土~礫質土の範囲で異なる粒度分布の材料を用意した。

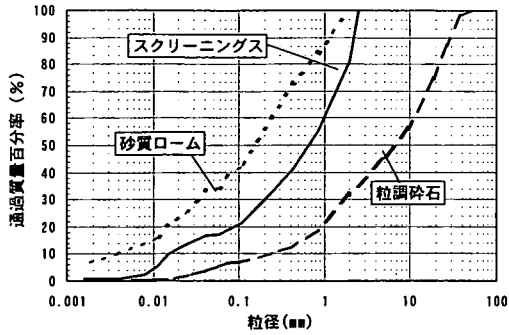


図-2 各試験材料の粒度分布

表-4 計測項目一覧

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

(3) 計測項目

計測項目の一覧をまとめて表-4に示す。またこれらの計測位置については図-1中に示している。

初期状態（転圧0回）および転圧2, 4, 8, 12, 16回後の地盤密度を表面型RIを用いて6カ所計測し、さらに深さ方向の密度分布を2孔式RIにより1カ所測定した。また、地盤の強度・剛性を調べる目的で、現場CBR試験、簡易動的コーン貫入試験（長谷川式土壌硬度計）、動的平板載荷試験をRI計測位置付近で実施した（ただし表-3の太斜字で示した試験ケースのみ実施）。

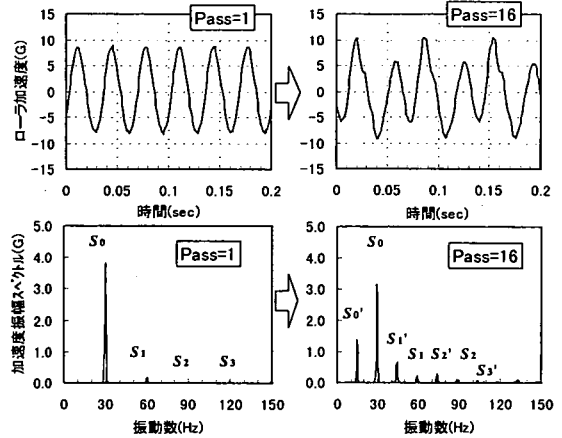
主な計測項目の概要を以下に記す。

a) 表面型RIおよび2孔式RI

表面型RIは線源深さ20cmのJIS認定型RIを使用した。また2孔式RIは、あらかじめ地中に埋設した2本の導管に線源および検出部を設け、これらを徐々に引き上げながら転圧層内の地盤密度を深さ方向に連続的に測定できるRIであり、1cmピッチで自動測定できるタイプを使用した¹³⁾。

b) 簡易動的コーン貫入試験（長谷川式土壌貫入計）

簡易動的コーン貫入試験は、2kgの重錘を落下させて先端部がコーン形状（φ20mm, 先端角60°）のロッドを地中に打ち込み、5cm貫入毎の打撃回数 N_h を測定して地盤の硬度を調査する試験器である。今回用いた試験器（長谷川式土壌貫入計）は植生土壌の硬度を簡易に判定する目的で開発されたものであるが、地盤工学会基準（JGS 1433-1995）の簡易動的コーン貫入試験（土研式簡易貫入試験器）とほぼ類似した試験器となって



(a) 転圧1回目

(b) 転圧16回目

図-3 転圧にともなう加速度応答の変化例
(砂質ローム $w=10.6\%$ 、層厚30cmのケース)

いる。既往の報告では、土研式試験器の貫入抵抗値 N_d と $N_h = 1.66N_d$ なる関係があるとされている¹⁴⁾。

c) 動的平板載荷試験

動的平板載荷試験は、質量10kgの重錘を高さ1mから自由落下させ、直径30cm円形載荷板を介して地表面に衝撃的な荷重を加え、その時の衝撃加速度の積分により推定した載荷板の最大変位と載荷重の比より動的な変形係数 E_w を算出する機構となっている。本試験機は旧東ドイツで開発された後、その簡便さからヨーロッパを中心に普及が進んでおり、ドイツ運輸省鉄道局では既に標準試験機として規格化されている。我が国でも建築基礎地盤の剛性評価に適用が試みられている例¹⁵⁾が報告されている。

d) 振動ローラ加速度

振動ローラ加速度については、市販のひずみゲージ型加速度計（容量50G）を用いて振動輪（ロール）部の鉛直加速度を連続計測した。この際、各計測ポイントの直上を通過する際のタイミング信号を別チャンネルで入力することにより、後述する波形処理を行う際に各地盤の計測点と対応づけられるようにしている。

3. 振動ローラ加速度応答の定量化手法

図-3(a)(b)に転圧1回目と16回目における振動ローラ加速度の計測結果の一例（砂質ローム $w=10.6\%$ ）を示す。下段は波形をFFT解析したものである。

図をみると、転圧1回目では振動ローラの加速度波形は正弦波に近く、そのFFT解析結果においては振動ローラの振動数 $f_0 = 28.3\text{Hz}$ 付近に対するスペクトル S_0 が

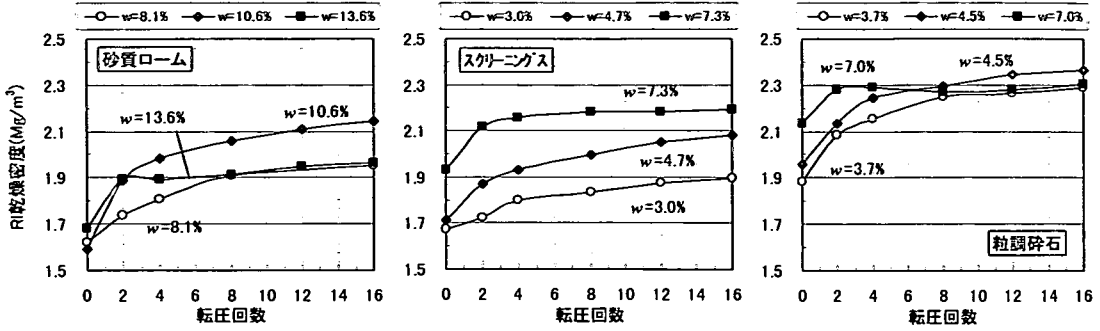


図4 表面型RIによる乾燥密度～転圧回数の関係 (層厚 30cm のケース)

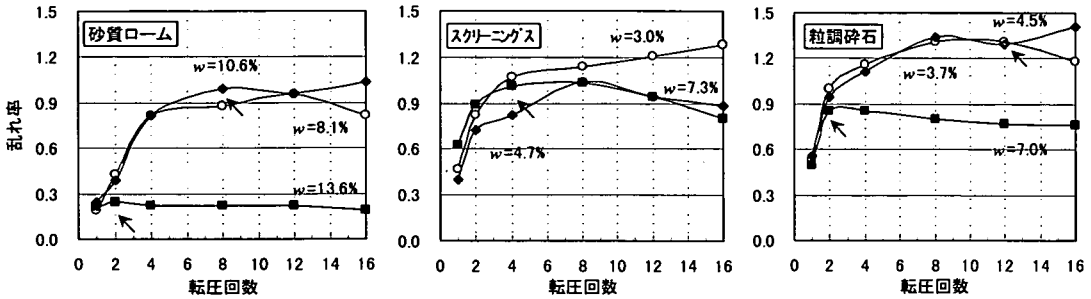


図5 乱れ率～転圧回数の関係 (層厚 30cm のケース)

主に卓越している。しかし、転圧 16 回目では振動輪が締まった地盤からの反発を受けるために波形が大きく乱れており、そのFFT解析結果においては高調波スペクトルといわれる基本振動数 f_0 の n 倍 ($n = 2, 3, \dots$) 振動数に対するスペクトル $S_1, S_2, S_3, S_4, \dots$ の出現量が増大し、さらには $1/2$ 分数調波スペクトルといわれる $1/2 f_0$ の $(2n-1)$ 倍 ($n = 1, 2, 3, \dots$) 振動数に対するスペクトル $S_0', S_1', S_2', S_3', S_4', \dots$ まで出現してくることがわかる。

そこで、これら高調波・ $1/2$ 分数調波スペクトル成分の出現量に着目し、次のような指標によって、地盤の締固めにもなう加速度の「乱れ具合」を定量的に表す。ここではこれを「乱れ率」と名付ける¹⁶⁾。

$$\text{乱れ率} = \frac{\text{高調波・}1/2\text{分数調波スペクトルの和}}{\text{基本振動数}+1/2\text{基本振動数のスペクトル}} = \frac{F/(m_1+m_2)g}{S_0 + S_0'}$$

$$= \frac{\sum_{i=1}^3 S_i + \sum_{i=1}^3 S_i'}{S_0 + S_0'}$$

(1)

F : 起振力
 m_1 : フレーム質量
 m_2 : 振動輪質量

ただし、文献16)では高調波・ $1/2$ 分数調波スペクトルの出現量として次数無限大までの総和を定義しているが、高調波・ $1/2$ 分数調波スペクトルの高次成分は値が小さく乱れ率の大小に実質的にほとんど寄与しない

め、ここでは実務性を考慮して3次までの和をとった。乱れ率に相当する加速度スペクトルを利用した指標はいくつかの提案式があり¹⁷⁾、それぞれ締固め指標と正の相関を示すことが多く報告されているが^(2),3),5)~8)、本論文では、特に転圧によって剛性の高まった地盤では $1/2$ 分数調波スペクトル成分を考慮すべきとの既往研究成果⁷⁾を参照し、また後述する振動ローラ機械条件の影響を除去した地盤剛性評価手法¹⁶⁾への適用を念頭に置いて、基本波のスペクトル $S_0 + S_0'$ を起振力 F の前輪側自重に対する倍率 $(F/(m_1+m_2)g)$ で除した指標としている。詳細は文献7),16)を参照されたい。なお、本実験では、RI計測点の直上を振動輪が通過する前後1.024秒間(およそRIの計測範囲40cmを通過する間)の加速度波形を切り取ってFFT解析し、乱れ率を算出した。

4. 乱れ率～乾燥密度関係に関する実験結果

(1) 転圧回数と乾燥密度・乱れ率の関係

図-4に転圧回数と表面型RIによる乾燥密度の関係を、また図-5には転圧回数と乱れ率の関係を示す(層厚 30cmのケース)。いずれもヤード内の平均値で示している。図-5の転圧回数～乱れ率の関係をみると、各材料とも含水比が低い水準のケースでは、図-4の密度の増加

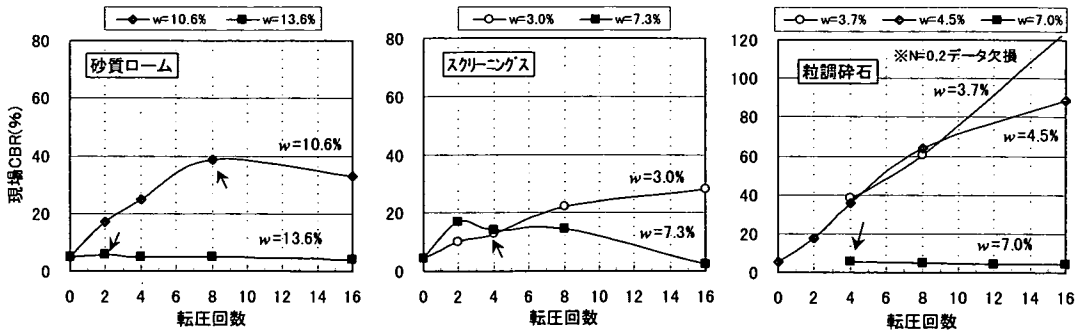


図-6 現場CBR～転圧回数の関係（層厚30cmのケース）

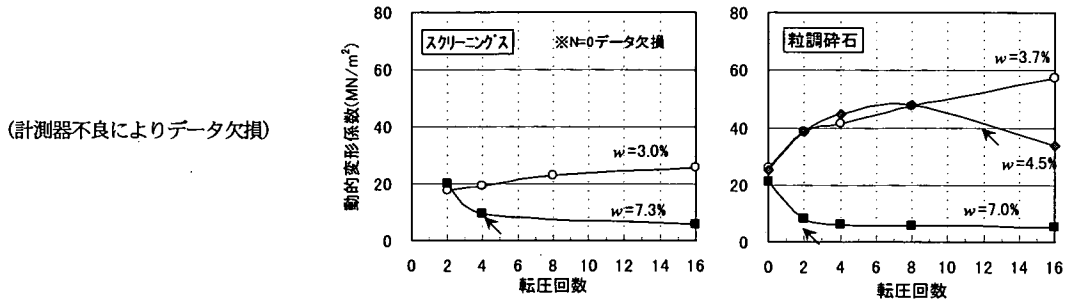


図-7 動的変形係数～転圧回数（層厚30cmのケース）

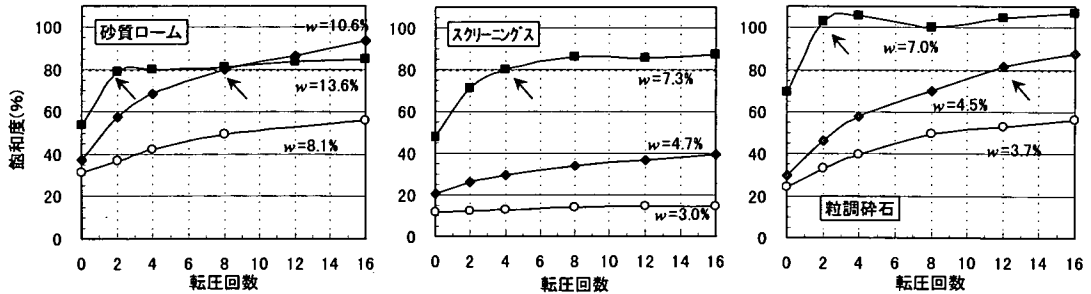


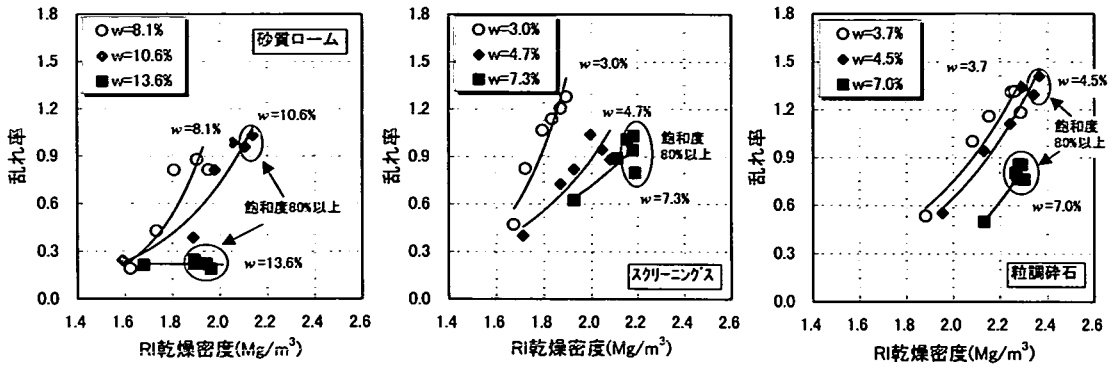
図-8 表面型RIによる飽和度～転圧回数（層厚30cmのケース）

傾向と同様、転圧にともなって乱れ率も順調に増加しており、締固め施工管理手法としての適用性が示唆される。しかし、 w_{opt} より湿潤側の高含水比のケース（■プロット）では、転圧回数に対して密度が若干増加するにもかかわらず、乱れ率はむしろ減少の傾向を示していることがわかる。

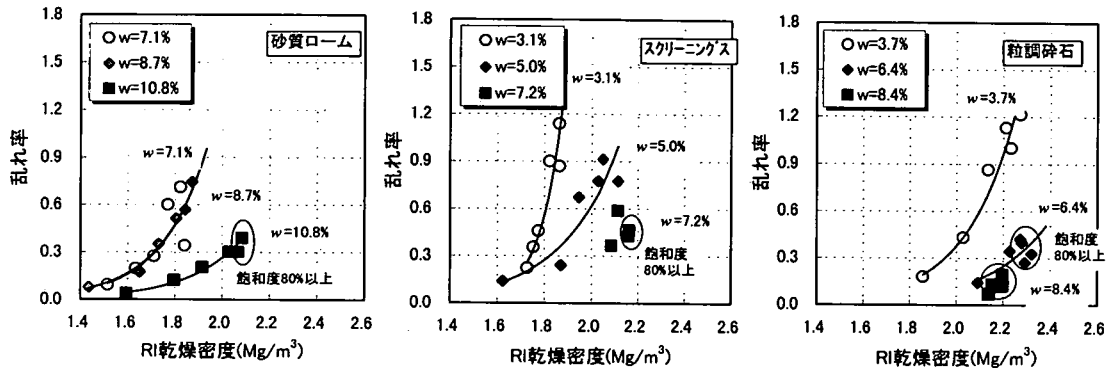
これは図-6に示す現場CBR、および図-7に示す動的変形係数 E_w も同様な傾向を示しており、湿潤側含水比のケース（■プロット）ではこれらの値が転圧回数に対してほとんど増加しないか、もしくは減少していることがわかる（ただし、砂質ロームにおける動的変形係数は計測器不良により欠損）。この湿潤側含水比のケースの転圧状況を観察すると、振動ローラの走行に

伴って転圧面が波を打つ、いわゆるウェーピング現象が生じていた。すなわち、転圧による振動エネルギーは地表面付近の間隙水圧上昇と地表面の変形に転化され、もはやそれよりも深部の土の締固めに対しては有効に作用していない状態と推察される。

ここで、転圧回数と地盤の飽和度の関係を図-8に示した。これと乱れ率およびCBR・動的変形係数の転圧回数に対する傾向（図-5～図-7）を対比させると、飽和度がおおよそ80%を超えた場合（図中↗の点）、乱れ率およびCBR、動的変形係数ともそれ以上増加しない、もしくは減少する傾向を示すことがわかる。これはすなわち、地盤の密度が高まり高飽和度になった結果、サクシオンが消失し土粒子間の結合力が弱まったこと、お



(a) 層厚 30cm のケース



(b) 層厚 60cm のケース

図-9 表面型 RI による乾燥密度～乱れ率の関係

よび通常の地震荷重に比べ高い周波数の振動（約 30Hz）によって土が非排水に近い状態で繰返しせん断を受け、転圧中に間隙水圧の蓄積が顕著になったこと（田中ら¹⁸⁾は、砂の繰返しせん断強度に与える飽和度の影響を検討し、飽和度がおおよそ80%以上になると繰返しせん断強度が急激に低下し、完全な液状化を示す飽和砂のそれに近づくことを示している）、これらによって密度の増大にもかかわらず地表剛性の低下が生じ、結果的に乱れ率およびCBR、動的変形係数の値が低下したと予想される。

以上のように、おおよその目安として飽和度80%以上の地盤では、乱れ率は転圧に伴う密度の増加傾向と対応せず、乱れ率の増加によって締固めの進行を判定したい場合、施工管理手法としての適用範囲外といえる。比較的高含水比な細粒土やRCDコンクリートなどにおいては、このような現象が生じることをあらかじめ認識しておく必要がある。しかしながら、乱れ率は地盤強度・剛性の低下をそのまま反映していることから、任意の含水比条件下においてもこれらの評価は適切に行える可能性がある。これについては後述する。

(2) 乱れ率による乾燥密度評価の適用性について

乱れ率による乾燥密度評価の適用性を総括的に見るため、各土質および含水比に対して乱れ率～乾燥密度の関係を整理したのが図-9(a)(b)である（層厚30cmと60cmそれぞれについて示した）。これを見ると、図中に示した飽和度80%以上のデータを除けば、いずれの土質についても乱れ率～乾燥密度関係は比較的良好な正の相関を示すことがわかる。しかしながら、乱れ率～乾燥密度関係は土質および含水比毎に異っており、しかもそれぞれ数%の含水比の差でありながら、各曲線はかなり異なることが伺える。

この傾向は、砂質ロームを対象に種々の含水比で乾燥密度とCBR値の関係を調べた結果¹⁹⁾（図-10）と類似している。図-10をみると、同じ土であってもCBRと乾燥密度の関係は含水比により大きく異なり、乾燥側の含水比（ $w=7.0\sim 7.9\%$ ）ではCBRと乾燥密度の間には強い相関が見られるが、 $w=13.0\sim 13.9\%$ の場合には、乾燥密度が増加してもCBRは増加せず小さな値にとどまっていることがわかる。このように、一般に土の強度・剛性は乾燥密度のみならず含水比の影響を強く受ける。

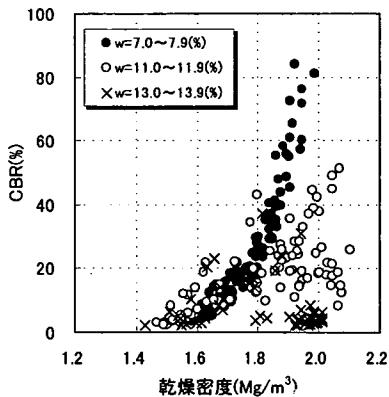


図-10 乾燥密度～CBRの関係¹⁹⁾

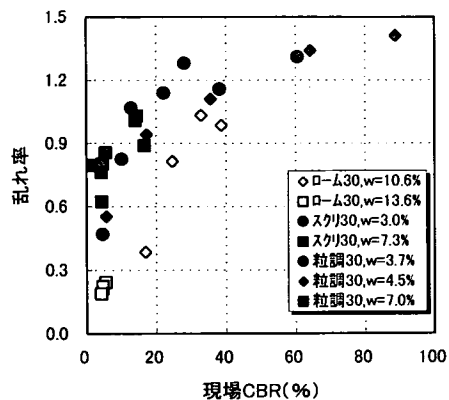


図-11 現場CBR～乱れ率の関係 (層厚 30cm)

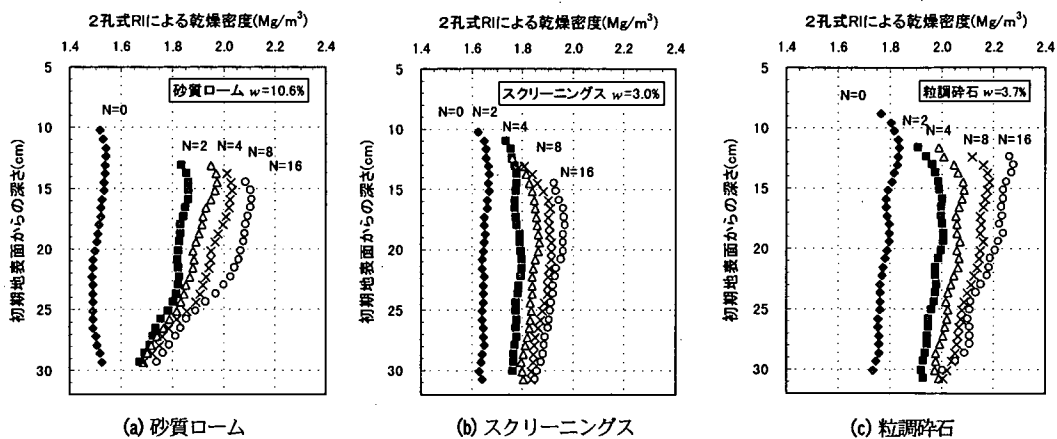


図-12 2孔式RIによる深さ方向乾燥密度分布 (層厚 30cm)

よって、振動ローラの加速度応答が直接的には地盤の剛性に対応することを考えれば、乾燥密度～乱れ率関係が含水比の影響を強く受けることはむしろ必然の結果と言える。

以上より、ローラ加速度応答法から密度を推定する場合、図-9に示すごとく想定される含水比範囲に応じた複数の乱れ率～乾燥密度関係をあらかじめ求めておかなければならないことになる。しかし、実際にこれを行うことは多大な労力を要し、現実的ではなからう。

本手法を現行の密度管理の代替手法として用いるとすれば、材料変化や含水比変動が大きな一般盛土では適用が難しいと言わざるを得ず、例えばフィルダムのロック材のような、材料規定が厳しくかつ含水比の変化をほとんど無視し得る粗粒材の適用に限定することが現実的と考えられる。特に、現行のロック材の密度管理は一般的に水置換法によっているが、孔体積が大きく多大な労力と費用がかかるため、測点数が希少にならざるを得ず、結果として合理的な締固め管理がな

されていないという現状がある。この意味からも、リアルタイムかつ面的判定が可能な本手法は、ロック材の密度管理への適用に対して非常に効果的であり、膨大なデータ数を取得することによって、従来不明であった堤体密度の平均値とバラツキ、さらには現行のダム堤体が有する設計値からの「余裕度」を定量的に把握することも可能となる。文献7)ではこの点に着目し、ロック材を対象とした本手法の適用性を確認しているので参照されたい。

5. 乱れ率～強度特性の関係に関する実験結果

次に、乱れ率と現場CBRの関係を図-11に示す。これらを見ると、乱れ率とCBRの関係は比較的良好であり、特に含水比の変化に対しても各材料の中で一意的な関係を示すことが注目される。前出図-10に示したように乾燥密度～CBR関係は含水比の影響を強く受けるが、乱

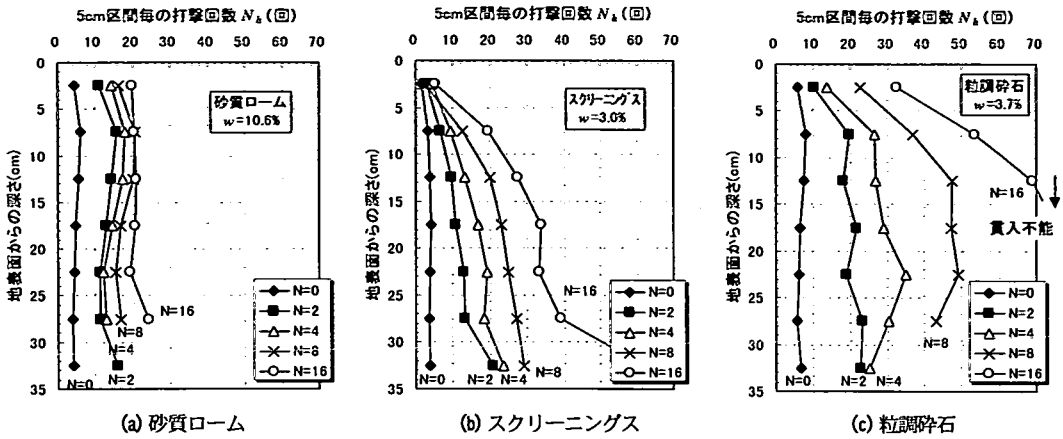


図-13 動的コーン貫入試験結果 (層厚 30cm)

れ率によればCBRのような地盤の剛性を示す指標を任意の含水比条件においても評価できると言える。ただし、図-11によれば乱れ率～CBR関係は材料毎に若干異なり、同じ乱れ率に対して「スクリーニングス<粒調碎石<砂質ローム」の順にCBRが大きくなる傾向が見受けられる。この理由は、以下に述べるような各土質ごとの表層付近の締固め傾向の違いと、これに対する振動ローラ加速度および現場CBR試験の測定領域の違いを考えれば説明が付く。

図-12(a) (b) (c)に2孔式Riによって測定した深さ方向の密度分布の一例を示す。これによると、砂質ロームでは地表面付近の密度が下層に比べかなり高くなっているのに対し、逆にスクリーニングスでは上下層で密度勾配がほとんどないばかりか、地表面付近でむしろ密度が小さくなっており、粒調碎石は両者の中間的な密度勾配をもっていることがわかる。この深さ方向の締固め傾向の違いは、図-13(a) (b) (c)の動的コーン貫入試験の結果ではさらに顕著であり、砂質ロームの N_k (ロッドを5cm貫入毎の打撃回数)は上下層でほぼ均一であるが、粒調碎石やスクリーニングスの地表面付近では極端に小さくなっている(その原因は明確ではないが、スクリーニングスや粒調碎石が粒状体であるため、拘束のない地表面で振動による大きなひずみを受けることにより逆に緩められてしまった可能性等が考えられる)。

ここで、現場CBR試験は直径50mmのピストンを25mm貫入させた時の荷重強さを測るものであり、その載荷規模を考えると主に地表面付近の剛性を測定する試験と言える。一方、図-12および図-13の結果より、下層部でも十分に振動ローラの転圧効果が及んでいることから、振動ローラの加速度応答は下層を含んだ締固め層全層の平均的な地盤剛性を反映していると考えられる。

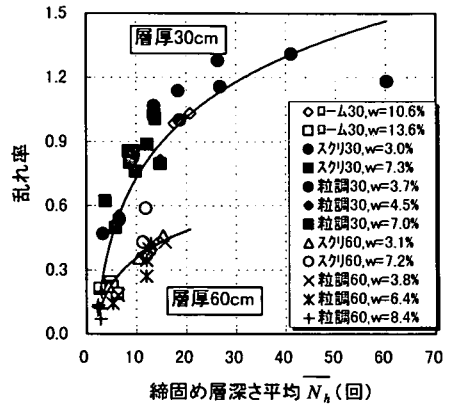


図-14 乱れ率～締固め層内平均コーン貫入値 \bar{N}_k の関係

したがって、CBR試験が表層付近の剛性、乱れ率が層内の平均的な剛性を反映すると考えれば、同じ乱れ率に対するCBRの関係が図-11のように「スクリーニングス<粒調碎石<砂質ローム」の順序で描かれる傾向が解釈できよう。

そこで、乱れ率が層内の平均的な剛性を反映しているという推察を踏まえ、一つの試みとして、図-13に示す動的コーン貫入値 N_k の深さ方向分布を、締固め層内(30cmおよび60cm)で算術平均した \bar{N}_k を1層あたりの強度とみなし、これと乱れ率との対応を調べた。この結果を図-14に示す。これを見ると、表層付近の局所的な剛性の違いの影響が取り除かれた結果、層内平均 \bar{N}_k と乱れ率の関係は、図-11におけるCBRのような材料毎の違いがなくなり、材料・含水比によらずに1本の良好な関係にまとめられることがわかる。また、同じ層内平均 \bar{N}_k に対し、乱れ率は層厚30cm>層厚60cmとなっているが、これは表層30cmの場合は乱れ率が強く締固

まった下部路床および土槽コンクリートまでを評価したためと考えられる。振動ローラ加速度応答の影響深さについては現在検討中であるが、この層厚30cm、60cmで差があることを考えると、今回用いた振動ローラでの評価深さは少なくとも30cm以上であると推察される。

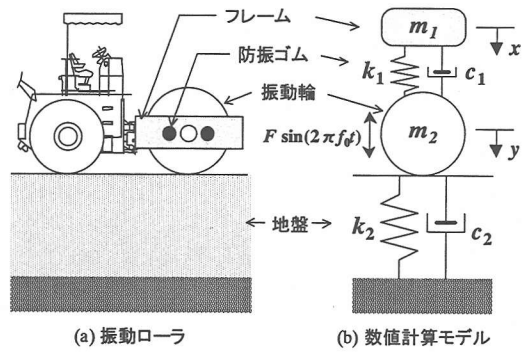
以上より、乱れ率によって土の種類および含水比によらず、現行の道路盛土一層撤出し厚標準の30cm以上の深い領域まで、転圧地盤の力学的指標である強度・剛性を判定し得ると言える。

現状の盛土締め管理は、 D_c 値による密度管理、あるいは空気間隙率による管理が一般的である。しかし、室内と現場で締め状況が異なるにも関わらず、基準となる最大乾燥密度を室内の突固め試験により定めていること、さらに先の図-10に示したように、同じ乾燥密度でも含水比が変化すればその強度・変形抵抗性が異なるため、密度の管理基準値（例えば $92\% \times \rho_{dmax}$ ）は、「強度が何 kN/m^2 以上」「変形係数が何 MN/m^2 以上」の保証にはならないという問題点を包含している²⁰⁾。

しかしながら、乱れ率が強度・剛性を表す指標と土の種類・含水比によらず一意的な関係がある性質を利用し、振動ローラ加速度応答によって盛土体全体の強度・変形抵抗性を直接判定することができれば、より高品位な盛土締め管理が可能となろう。ただし、水浸後の強度低下、あるいはクリープ沈下などの完成後の長期挙動については、施工時の強度・地盤剛性のチェックのみでは保証が難しい。最大乾燥密度、空気間隙率による規定が、強度の判定にはなり得ないにもかかわらず、なお現在広く受け入れられているのは、この水浸後の強度低下を最小限に保証する思想が根幹にあるために他ならない。したがって、実際の盛土施工においては、振動ローラ加速度応答を利用した強度・地盤剛性のチェックにより、施工時の盛土体の品質を面的かつリアルタイムに確認しつつ、問題が懸念される材料に対しては飽和度管理を併用したり、あるいは別途長期圧密試験、水浸沈下試験等の室内試験結果を実施するなどして、盛土の恒久的な品質、要求される性能を保証していくことが理想的であろう。

6. 振動ローラ加速度応答を利用した地盤剛性算定手法の検証

藤山・建山¹⁶⁾は、振動ローラ～地盤系を2自由度振動モデル（図-15）に置き換えた計算モデルにより振動ローラ挙動の検討を行い、あらかじめ実験的に振動ローラ加速度応答～地盤剛性の関係を求めておくことなく、乱れ率から地盤剛性を算定する手法を提案して



$$\begin{aligned}
 m_1 \ddot{x} + k_1(x-y) + c_1(\dot{x}-\dot{y}) &= m_1 g \\
 m_2 \ddot{y} + k_2 y + c_2 \dot{y} - k_1(x-y) - c_1(\dot{x}-\dot{y}) &= m_2 g + F \sin(2\pi f_0 t)
 \end{aligned}$$

ただし、 $k_2 y + c_2 \dot{y} < 0$ のとき、 $k_2 = c_2 = 0$

図-15 振動ローラ～地盤系モデル

いる。文献16)によると、乱れ率および振動ローラの機械諸元（フレーム質量 m_1 (kg)、振動輪質量 m_2 (kg)、振動数 f_0 (Hz)、起振力 F (N)）が与えられれば、地盤バネ係数 k_2 (N/m)は次式(2)により計算することができる。

$$k_2 = \frac{(\text{乱れ率} + 1)^2 \cdot (2\pi f_0)^2 \cdot m_2}{1 - 0.32\alpha + \sqrt{0.1024\alpha^2 - 1.64\alpha} + 1} \quad (2)$$

$$\alpha = 1 - \left(\frac{F}{(m_1 + m_2)g} \right)^2$$

一般に、振動ローラの加速度応答は地盤条件のみならず機械条件の影響も受けるため、振動ローラ加速度指標（乱れ率）～地盤条件の関係は各機種毎に求めておかなければならないが、本手法はこの問題点を解決し、任意の振動ローラに対してもその機械諸元を代入することによって直ちに地盤バネ係数を算定できることが特徴である。

前章までの議論により、任意の土の種類および含水比条件においても振動ローラ加速度応答と地盤の強度・剛性は一意的な関係にあることがわかった。そこで本章では、数値計算を援用した藤山らの地盤剛性算定手法について、任意の土質条件下における適用性を検証すべく、本実験で計測された乱れ率から地盤剛性を推定し、動的平板荷重試験により測定された地盤変形係数 E_{vd} との比較を行った。この結果を図-16に示す。ただし、式(2)で求まる地盤バネ係数 k_2 は弾性理論解から求まる式(3)²¹⁾を用いて地盤変形係数 E_{acce} に換算している（ポアソン比 ν は0.33と仮定）。

$$E_{acce} = \frac{2k_2(1-\nu^2)}{B \cdot \pi} \quad B: \text{振動輪幅(m)} \quad (3)$$

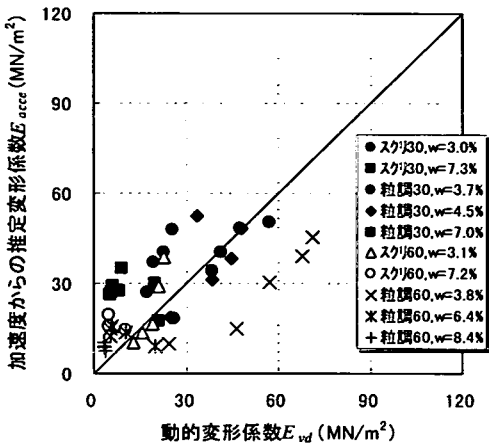


図-16 乱れ率による推定変形係数と動的変形係数の比較

図-16より、乱れ率から式(2)(3)を用いて算定される変形係数 E_{acc} と動的変形係数 E_{vd} はおおむね対応しており、藤山・建山の手法によって地盤変形係数を定量的に評価可能であると言えるが、材料によってばらつきが生じる結果となった。これは、変形係数の推定値が材料によって異なる結果を与えるのではなく、先の乱れ率と現場CBRの関係の議論と同様、乱れ率と動的平板載荷試験による評価範囲の違いが影響しているためと考えられる。すなわち、動的平板載荷試験の載荷荷重は振動ローラ転圧力395kNの約1/50にすぎないことより、動的変形係数は振動ローラ加速度応答による評価に比べて、材料毎の表層付近の剛性の違いに支配されている可能性が強い。実際、図-16をみると、特に乾燥側の含水条件では、スクリーニングスより粒調碎石の方が、同じ推定変形係数 E_{acc} に対して動的変形係数 E_{vd} が大きくなる傾向が見受けられ、先の図-11に示した現場CBRと乱れ率の関係と同様の傾向が認められる。また、層厚30cmにおける推定変形係数には下部路床の剛性も含まれていること、さらに土槽がコンクリートで拘束されている条件が変形係数の推定値に影響する可能性も否定できない。以上を鑑みると、例えばコンクリート拘束の影響がない通常の盛土において、比較的締固め層の深部までの地盤剛性を評価できる手法（例えば静的な平板載荷試験）によって、変形係数の推定値 E_{acc} の検証を行えば、その妥当性がより明瞭になると予想される。この結果については別途報告したい。

ところで、地盤剛性が転圧地盤の要求品質となる盛土として、道路・空港路床、鉄道盛土などがある。現在これらの構造物については、現場CBR、ブルーフローリング、平板載荷試験等による強度規定管理が実施されているが、一般にこれらの測定には多大な手間と費

用を要し、また先述したように現場CBR試験は表層付近の剛性しか測定できない。これに対し、本手法により任意の材料に対して、しかも撤出し層全層に対する地盤剛性を定量的に算定できるとすれば、設計値に対する合否判定のみならず、撤出し材料に応じた締固めの過不足をリアルタイムに制御し、一定品質の転圧面を造成するといった、従来より一歩進んだ施工管理を行うことが可能となる。今後、各手法毎の測定範囲の違いに留意しつつ、本手法の適用性をさらに検証していく予定である。

7. おわりに

ローラ加速度応答法による締固め管理の実用化を目指し、土質・含水比をパラメトリックに変えた室内大型土槽による転圧試験を行い、これまで不明であった土の種類・含水状態が変化する場合の適用性を検討した。この結果、以下の結論が得られた。

- ① 転圧にともなう振動ローラ加速度指標の増加によって締固めの進行を管理する場合、おおよその目安として飽和度80%以上の地盤は適用範囲外である。
- ② 振動ローラ加速度指標として提案する乱れ率と密度の関係は良好な相関が得られるが、土質および含水比毎に大きく異なる。したがって、密度管理の代替手法として用いるためには、あらかじめ両者の関係を想定される材料範囲に対して用意しておく必要がある。現実的には、密度推定手法としての適用には粗粒材など含水比変動が少ない盛土が適する。
- ③ CBR試験、動的平板載荷試験等の既往測定手法は地表面付近の局所的な強度・剛性に左右される傾向がある。これに対し、振動ローラ加速度ではより深部まで、今回使用した大型機種の場合少なくとも現行の道路盛土一層撤出し厚の標準30cm以上までの平均的な強度・剛性を評価できる。
- ④ 締固め全層の強度・剛性を表す指標と乱れ率は、土の種類および含水比によらず、一意的な関係がある。したがって、材料変化や含水比変動が避けがたい一般盛土では、強度・変形抵抗性の原位置判定手法として適用可能である。
- ⑤ 動的平板載荷試験を用いた今回の試験結果からは、藤山らの手法による地盤剛性評価手法の任意の材料条件に対する適用性を明瞭に示すことができなかった。今後、通常盛土において、深部までの地盤剛性を評価できる手法により検証を行う必要がある。

近年、第2東名建設工事では締固め厚60cmの厚層締固めが試行されており、またフィルダムロックゾーン

の締固め厚は100cmを超えるのが通常である。今後、振動ローラ加速度応答による評価深度を定量的に明らかにし、これら締固め厚の大きな盛土に対する一層内の品質評価をいかに行うかが課題と考えている。

参考文献

- 1) Thumer, H. and Sandstrom, A. : A New Device For Instant Compaction Control, Proceedings International Conference on Compaction, vol.2, pp.611~614, 1980.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 阿部 裕, 鬼木剛一, 北本幸義: 盛土の振動締固め管理手法に関する研究 (その1), 鹿島建設技術研究所年報第35号, pp.179~184, 1987.
- 5) 中村孝雄, 南条 章, 松本夷喜二: 路床・路盤の締固め管理の一手法について, 第18回日本道路会議論文集, pp.552~553, 1989.
- 6) 藤井弘章, 渡辺 忠: 種々の締固め管理方法の比較, 第21回土質工学研究発表会講演集, pp.1771~1774, 1986.
- 7) 藤山哲雄, 石黒 健: 振動ローラの加速度応答を利用した粗粒材料の現場締固め管理について, 土と基礎, No.507, pp.17~20, 2000.
- 8) 古屋 弘, 藤原宗一: 加速度センサーとGPSを組み合わせた締固め管理システムの開発, 土と基礎, No.507, pp.21~24, 2000.
- 9) Swedish National Road Administration : General Technical Construction Specifications For Roads, Chapter 4(Prepared Subgrade Construction), 1994.
- 10) Research Society for Road and Traffic : Technical Testing Instructions for Soil and Rock in Road Construction, TP BF-

StB Part E2, Surface Covering Dynamic Compaction Test, 1994.

- 11) 益村公人, 殿垣内正人, 川井洋二, 建山和由, 金森康継: 施工機械による締固め層厚の検討, 第33回地盤工学研究発表会講演集, pp.2071~2072, 1998.
- 12) 殿垣内正人, 川井洋二, 益村公人, 建山和由, 間瀬勝則: 締固め層内の密度分布に関する一考察, 第33回地盤工学研究発表会講演集, pp.2075~2076, 1998.
- 13) 豊田光雄, 中村 昭, 延山政之: 自動走査式フレーム型RI密度計を利用したロック材料の現場締固め特性の評価, ダム工学, pp.36~49, 1996.
- 14) 前田憲章: 緑の斜面づくり対策の調査について, SABO vol.65, pp.35~42, 2000.
- 15) 田中伸治, 二木幹夫, 渡辺一弘, 青木雅路, 長尾俊昌: 急速平板載荷試験による地盤評価法について (その3) 静的平板載荷試験法との比較, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.677~678, 1999.
- 16) 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.487/III-26, pp.237~245, 2000.
- 17) 土質工学会編: 粗粒材料の現場締固め, pp.246~252, 1989.
- 18) 田中敬三, 吉見吉昭, 時松孝次: 飽和度が砂の繰返しせん断強度に与える影響, 不飽和土の工学的性質研究の現状シンポジウム発表論文集, pp.225~228, 1987.
- 19) 建山和由: 振動ローラの振動挙動計測による土の締固め度評価手法 - 原理と適用性について -, 土と基礎7月号, pp.1~4, 2000.
- 20) 土質工学会編: 土の締固めと管理, pp.127~148, 1991.
- 21) 建山和由: 土の締固め施工の合理化に関する研究, 京都大学学位論文, pp.66, 1988.

(2001. 1. 15 受付)

APPLICABILITY OF ROLLER RESPONSE METHOD TO COMPACTION CONTROL FOR VARIOUS SOIL CONDITIONS

Tetsuo FUJIYAMA, Kimihito MASUMURA, Kazuyoshi TATEYAMA, Takeshi ISHIGURO and Nobuo MISHIMA

Roller compaction tests have been carried out to investigate the reliability of the roller response method for the quality control of soil compaction. In the tests, the acceleration of a vibratory roller has been measured for various conditions of the ground, such as types of soil, density and water content. The results of tests made it clear that it is generally difficult to evaluate the density of the compacted soil uniquely from the roller response because it is much affected by the type and water content of soil. The tests results also indicated that the possibility of the roller response method for evaluating the stiffness of the compacted soil uniquely. The application of the method to construction in soil compaction was discussed with knowledge obtained through the tests.