

24. 振動ローラ加速度応答法による盛土締固めの品質管理への適用

～粗粒材料を対象とした大型土槽実験～

| | | | |
|-------------------------|-------------------------|-------------------------------|-------------------------|
| 中日本高速道路 大林組 安藤ハザマ | ○中村 洋丈 古屋 弘 松本 江基 | 高速道路総合技術研究所 酒井重工業 不動テトラ | 藤岡 一頼 内山 恵一 浅田 浩司 |
|-------------------------|-------------------------|-------------------------------|-------------------------|

1. はじめに

道路盛土における土の締固めは、高盛土や大規模盛土の施工が増加しており、より一層の効率化、高品質化が求められている。また、道路土工指針¹⁾では盛土についても性能規定型の設計を指向するとしており、本来盛土に必要な強度や変形性能を直接的に計測・管理しようとする試みが行われてきている。その一つとして高速道路では平成10年頃から振動ローラに取り付けた加速度計による地盤反力の応答値を利用した地盤剛性計測手法²⁾（以下、「ローラ加速度応答法」という。）による盛土品質管理が試みられてきた。

ローラ加速度応答法は、地盤の状況を変形係数の強度指標として表せることが大きな特徴であり、これまでに加速度評価の理論、材料別の適用性、締固め度に替わる新たな品質管理の適用性等が、試験施工により検討されてきた。高速道路では平成19年8月に土工施工管理要領に路床検査のブルーローリングに代わる手法としてローラ加速度応答法が基準化され、同時に試験法³⁾も定められた。これを契機にローラ加速度応答法の導入が増加しているが、受注者の提案により従来のRI管理の補完として行われている程度で本格的な導入事例は少ない。これは実施工レベルの施工管理に適用する場合の基準が明確でないことも一因であったため、高速道路においては、路床や盛りこぼし橋台盛土⁴⁾等の剛性が必要な盛土施工に用いる品質管理基準を平成24年7月に定めている⁵⁾。

このように近年、適用が増加しているローラ加速度応答法であるが、一方で、計測される加速度応答値はどの程度の深さを評価しているか不明確であること、施工層の計測値は盛土下層の影響を受けること等が課題として指摘されている⁶⁾。そこで、筆者らはこれらの課題に対して基本的な評価をするために粗粒材を用いた大型土槽実験を実施した。具体には、まず一般的な品質管理で用いている転圧回数と締固め状態、ローラ加速度応答法から得られる剛性の整理、大型振動ローラを用いた場合の計測する深さの影響、施工層より下層

の施工履歴による剛性値の影響を検証した。この分析によってローラ加速度応答法を盛土締固めの品質管理に用いる際の適用条件について検証した。

2. 試験の目的

前述したような課題より本試験の目的は以下の2点とした。

2.1 計測層より下層の影響評価

ローラ加速度応答法における計測深さは、70cm程度という報告⁷⁾もあるが、正確な計測深さは不明確である。そこで本試験では大型振動ローラを用いて、粗粒材を対象とした計測を行うこととした。計測深さの影響の確認方法は、第一に、コンクリート底面（高剛性）の上に施工層を設け、施工層の累計層厚を変えて試験をし、コンクリート底面の大きな剛性の影響を受けない層厚をローラ加速度応答法の計測深さとする方法、第二に、管を異なる深さに埋設し、加速度応答値が管の深さによって変化することを想定し、通常の間が埋設していない箇所に比べて、剛性の変化がなくなった深さを、ローラ加速度応答法の計測深さとする方法とした。

2.2 下層と施工層の加速度応答値の比較

土槽の一番上の層を試験層（路床施工面）と想定して、施工厚20cmの層で施工し、その前段階で、下層を準備層30cm、基盤層10cm×4層で施工する。下層の施工時にも、加速度応答値を計測し、下層と施工層の加速度応答値を比較した。

3. 大型土槽実験の概要

3.1 試験ヤード

大型土槽を用いた試験のヤード図を図-1に示す。土槽は全長20m、試験区間15m、幅3m、深さ95cm、試験ヤードの平面図は(a)に示すように、長さ15m、幅3m、全層厚90cm、転圧幅・計測幅は2m、計測点は進行方向1mおきに15点とした。試験断面は(b)に示すように、全層厚90cm、土槽の下面はコンクリートになっており、その上に準備層30cm×1

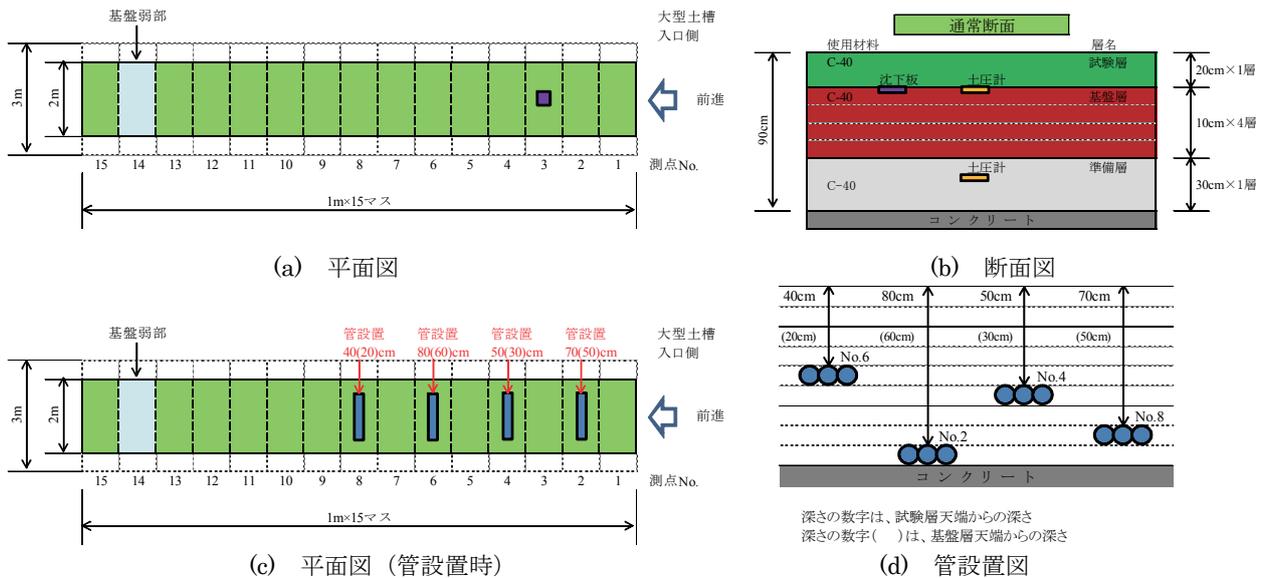


図-1 大型土槽の試験ヤード図

表-1 土質試験結果一覧

| 項目 | | 砕石(C-40) |
|-----------------------------|----------------------------|----------|
| 工学的分類 | 細粒分まじり砂質礫(GS-Cs) | |
| 土粒子の密度 ρ_s | (g/cm^3) | 2.720 |
| 自然含水比 w_n | (%) | 2.4 |
| 最大粒径 D_{\max} | (mm) | 37.5 |
| 粒度 (礫分) | (%) | 59.8 |
| 粒度 (砂分) | (%) | 30.0 |
| 粒度 (細粒分) | (%) | 10.2 |
| 液性限界 w_L | (%) | 22.0 |
| 塑性限界 w_p | (%) | 15.6 |
| 塑性指数 I_p | | 6.4 |
| 最大乾燥密度 ρ_{dmax} | (g/cm^3) | 2.296 |
| 最適含水比 w_{opt} | (%) | 5.6 |

表-2 転圧機械の諸元

| 項目 | | 転圧機械の諸元 | |
|-------------|------|----------------------|----------------------|
| 機械種別 | | SAKAI SV512D | SAKAI TW502 |
| 運転質量 | (kg) | 11,050 | 3,540 |
| 質量配分 | (kg) | 前軸 5,700 後軸 5,350 | 前軸 1,990 後軸 1,550 |
| 寸法 全長 | (mm) | 5,740 | 3,105 |
| 全幅 | (mm) | 2,300 | 1,390 |
| 全高 | (mm) | 2,900 | 1,700 |
| 締固め幅 | (mm) | 2,130 | 1,300 |
| 起振力 低振幅/高振幅 | (kN) | 172 / 226 | 26.5 / 34.3 |
| 振動数 低振幅/高振幅 | (Hz) | 36.7 / 27.5 | 55 / 55 |

層、基盤層 10cm×4 層、試験層 20cm×1 層とした。走行レーンは振動ローラのローラ幅を勘案して 1 レーンとした。なお、計測 No.14 は転圧の弱部を作るため、準備層 30cm の位置に発泡スチロールブロックを埋設している。

また、2.1 の計測深さを確認するため、(c)のように、管を計測 No.2,4,6,8 の 4 か所に埋設した。埋設深さは(d)に示すように、試験層の転圧・計測時には 40,50,70,80cm とし、基盤層 4 層目の転圧・計測時には 20,30,50,60cm とした。管の埋設方法基盤層 4 層目の層厚の状態から、小型バックホウ及び手作業で掘削し、所定の位置に埋設後に前後進プレートで十分に締固めた。

3.2 試験に用いた粗粒材

試験に用いた粗粒材の試験結果を表-1 に示す。材料は通称 C-40 と呼ばれる砕石で、工学的に分類は細粒分まじり砂質礫(GS-Cs)、自然含水比

$w_n=2.4(\%)$ 、粒度組成は礫分 59.8(%)、砂分 30.0(%)、細粒分 10.2(%)である。また、JIS A 1210 の E-b 法の突き固めによる最大乾燥密度 $\rho_{\text{dmax}}=2.296(\text{g}/\text{cm}^3)$ 、最適含水比 $w_{\text{opt}}=5.6(\%)$ である。

3.3 施工機械と計測項目

表-2に転圧・計測に用いた施工機械を示す。施工機械は2種類用いており、酒井重工業製の質量 10t級の振動ローラSV512D (以下、「SV512」という。)と質量4t級のTW502 (以下、「TW502」という。)である。なお、本論文の結果整理では高速道路における転圧機械の標準的な起振力を有する 10t級振動ローラのSV512の結果を主に用いている。SV512の諸元は締固め幅が2,130(mm)、起振力は低振幅で172(kN)、高振幅で225(kN)、振動数は低振幅で36.7(Hz)、高振幅で27.5(Hz)である。

計測項目はレベルによる表面沈下量の測定、RI計器による含水比測定、密度測定、ローラ加速度応答法による加速度応答値の測定、小型FWD試



写真-1 SV512による転圧・計測状況

験機による地盤の変形係数の測定である。ローラ加速度応答法は、 α システム⁸⁾とCCV⁹⁾の2種類を用いた。なお、RI計器による含水比、密度はRI計器と砂置換法の双方を同一地点で試験し、RI計器と砂置換法の計測結果の相関を求めて、補正した値を用いて、結果の整理を行った。

試験状況を写真-1に示す。写真は大型の振動ローラであるSV512による転圧・計測状況である。

ローラ加速度応答法の2種類の測定システムは、各々の加速度計を同じ振動輪に取り付け、転圧・計測は同時に行った。また、システムの加速度応答値の基本的な計測原理は同様であるが、計算方法の相違によって加速度応答値の計測間隔が異なる。 α システムでは2秒に1データ、CCVでは0.2秒に1データの取得である。

試験方法の標準パターンは、材料を撒き出し、敷き均した後に、SV512により前進、後進を繰り返す。前進、後進を各1回とカウントして転圧回数12回（6往復）まで行う。12回転圧後には、施工機械や振幅を変えて、TW502の低振幅、TW502の高振幅、SV512の低振幅、SV512の高振幅の順に転圧・測定した。

4. 試験結果

4.1 転圧回数と各計測値

図-1の試験層(施工層厚20cm, 下層層厚70cm)における転圧回数と各計測値の関係を以下に示す。

図-2は転圧回数と乾燥密度の関係である。図の横軸は施工機械、振幅と転圧回数を示す。横軸の記号はSV: SV512, TW: TW502, H: 高振幅, V: 低振幅, 数字: 転圧回数を示す。図の凡例は各計測点の15点各々である。転圧に応じて乾燥密度は $2.20(\text{g}/\text{cm}^3)$ 程度まで徐々に上昇し、SV512の転圧時には転圧6回程度ではほぼ値が収束している。密度比に直すと転圧6回程度で約90%である。なお、計測点No.13,14,15はNo.14の準備層に設置した発泡スチロールの影響を受けて、転圧による締固め効

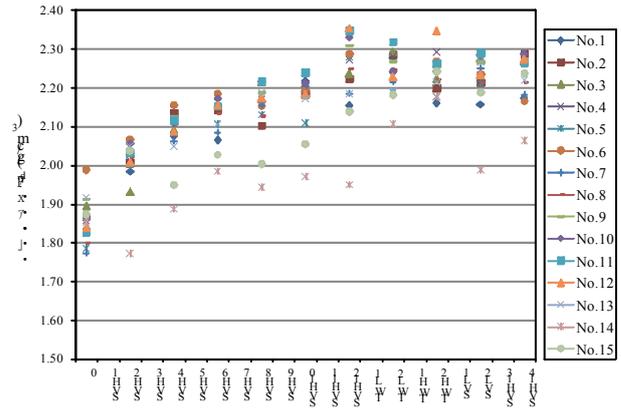


図-2 転圧機種・転圧回数と乾燥密度

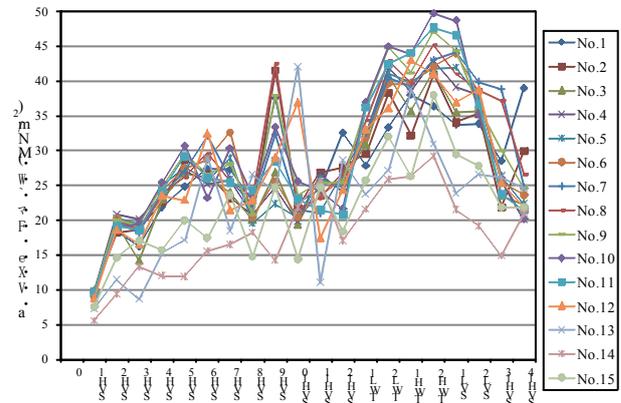


図-3 転圧機種・転圧回数と加速度応答法の変形係数

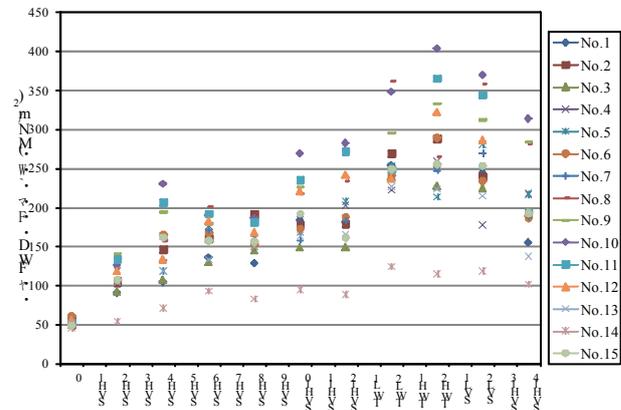


図-4 転圧機種・転圧回数と小型FWDの変形係数

果が小さく、密度が小さくなっている。また、施工機械が変わってSVH12後のTWL1では再び密度が増加している。これは転圧面が小型の振動ローラで均されて表面付近の乱れがなくなり均一化されたことで密度が上昇したと推測される。

図-3は転圧回数と α システムで得られた加速度応答値を機械諸元等で変換した変形係数との関係を示す。変形係数はSVH9では最大 $40(\text{MN}/\text{m}^2)$ 程度となるが、前後の傾向から類推するに、SVH9は特

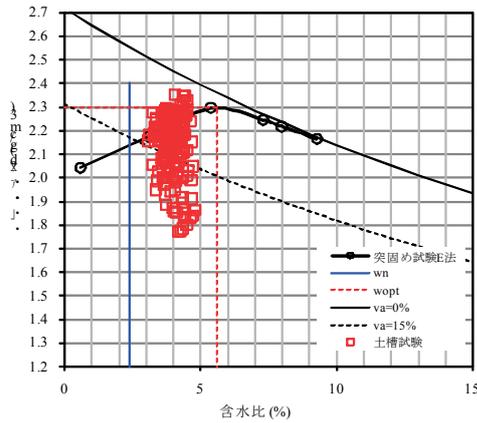


図-5 締固め曲線と土槽試験における含水比・乾燥密度

異値である可能性がある。前後の転圧回数を見るとSVH5～7付近で変形係数は $25(\text{MN}/\text{m}^2)$ 程度に収束している。SVH11では逆に変形係数が若干減少している。試験中の転圧状況を観察すると、SVH10以降は転圧面の剛性が十分に高くなり、かなり振動ローラの振動輪が暴れるような状態となった。したがって過転圧によって転圧面の表層付近が乱されている状況も想定され、その結果剛性が減少していることも考えられる。また、乾燥密度と同様にSVH12以降の変形係数は再び増加する傾向がみられる。これは振動の小さいローラで転圧することにより、転圧表面が均された状態となり、表面の密度が高くなったためと推測される。

図-4は転圧回数と小型FWDの計測による変形係数の関係を示す。変形係数はSVH6付近では $150\sim 200(\text{MN}/\text{m}^2)$ 程度に収束している。その後SHV10,12ではSVHよりも高い計測点が数点あるが、概ねSVH6と同程度である。SVH12以降の小型施工機械を用いたTWLやTWHの計測では、乾燥密度やローラ加速度応答値と同様に変形係数が再び増加する傾向で最大 $300(\text{MN}/\text{m}^2)$ 程度となった。その後、大型施工機械によるSVL,SVHでは変形係数がやや低下している。なお、小型FWDの変形係数がローラ加速度応答法の変形係数と異なるのは、両者の荷重の大きさ、載荷面の寸法、載荷時間の違いによると考えられる。小型FWDのほうが、より軽量で載荷面も小さいため、計測している地盤の深さや平面範囲は狭いと推測される。

これらの密度、変形係数の計測結果は、計測値のばらつきや、計測値の感度は異なるが、全体的な傾向としては、SV512の転圧6回程度で収束し、その後、転圧12回まで同程度の値である。大型のSV512で転圧後には小型のTW512で計測すると、密度、変形係数ともにやや増加する傾向にある。最後に再びSV512で計測するとやや低下する。この主因は使用した材料が砕石で盛土材料としては締め固めし易い材料であること、大型施工機械

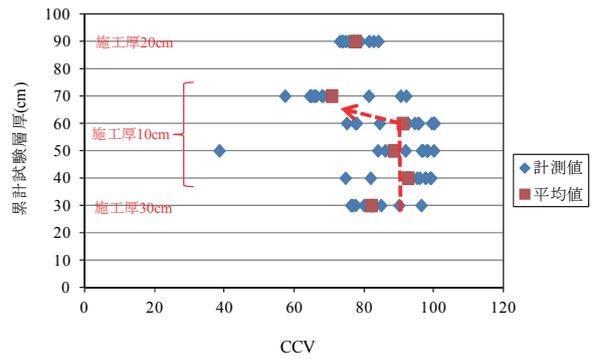


図-6 CCVによる計測深さ (SVH6)

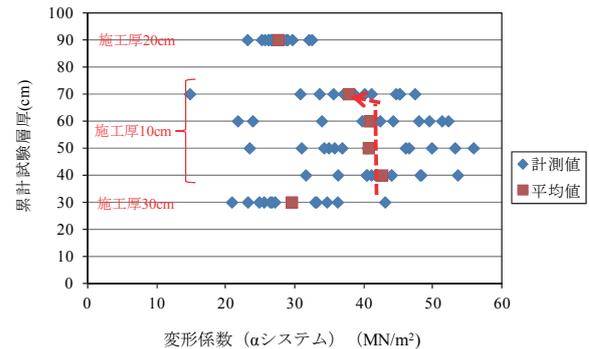


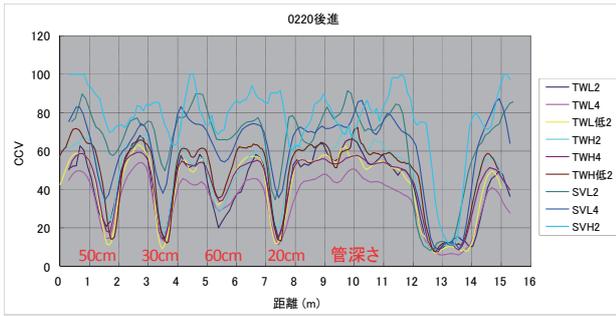
図-7 α システムによる計測深さ (SVH6)

の転圧力は大きいことから、転圧回数が6回程度で収束する傾向にあったと考えられる。

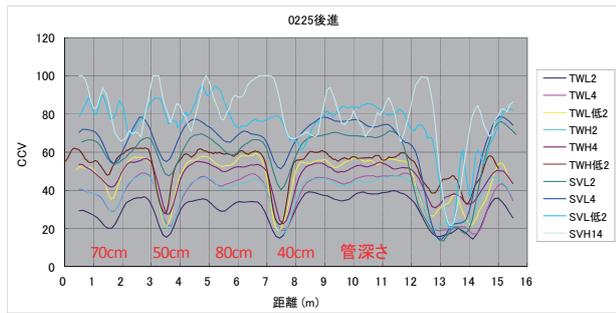
図-5はJIS A 1210のE-b法で突き固めた締固め曲線の結果と、土槽試験で計測した含水比、乾燥密度の結果を示したものである。最適含水比 w_{opt} が5.6(%)であるのに対して、施工含水比は3～5(%)であり、やや乾燥側の施工であった。乾燥密度は最大乾燥密度 ρ_{dmax} が $2.296(\text{g}/\text{cm}^3)$ であるのに対して、転圧初期は図中の低い値 $1.8(\text{g}/\text{cm}^3)$ から始まり、最大(最終)では $2.3(\text{g}/\text{cm}^3)$ 程度まで上昇している。これは室内の締固め曲線より上方となっているので、密度比で100%を超える状態である。したがって、土槽試験での転圧エネルギーは突固めE法の $4.5E_c$ のエネルギーよりも最終的には大きくなっている状態である。

4.2 各測定による計測深さ

計測層より下層の影響評価において、ローラ加速度応答法の評価する深さを確認した。コンクリート底面からの層厚と計測値の関係を図-6、図-7に示す。なお、SV512では転圧が進むと振動輪が大きく跳ね上がる現象がみられたため、このような現象が生じておらず、ある程度転圧が進んだ段階である6回転圧時(SVH6)で図を整理した。なお、計測値は、発泡スチロール設置の影響とヤード端部の影響があると考えられるNo.1,14,15を除いたものである。試験では施工層厚が30cmの準備層、施工層厚が10cmの基盤層を4層、施工層厚が20cmの



(a) 管理設時の計測（基盤4層目）



(b) 管理設時の計測（試験層）

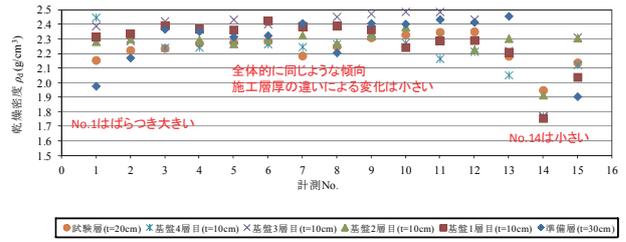
図-8 計測点別のCCV値

試験層の各計測値をコンクリート面からの累計の試験層厚として整理した。

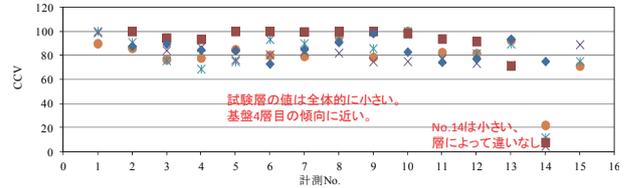
図-6はCCVによる計測深さである。試験層厚が基盤層や試験層で異なるため、深さの影響は、同じ10cmの施工層厚である基盤層の位置で評価することとした。CCVの計測値はコンクリート面から30cm厚の準備層ではCCVが90付近である。施工厚が10cmになる基盤層の累計試験層厚40～60cmではCCV値はほとんど変わらないが、基盤層4層目にあたる層厚70cmではCCVが70程度に低下した。施工条件が同様である基盤層でCCV値が低下したことは、最下層の底面にある剛性の高いコンクリートの影響がなくなり、剛性を評価するCCVの値が小さくなったと考えられる。したがってこの場合、ローラ加速度応答法で評価する深さは70cm程度と評価できる。

図-7は図-6と同様の条件で行ったαシステムで計測した変形係数と計測深さの関係である。同じローラ加速度応答法であるCCVと同様に、累計試験層厚40～60cmでは変形係数は40数(MN/m²)となりほとんど変わらないが、基盤層4層目にあたる層厚70cmでは37(MN/m²)程度に低下した。この結果はCCVと同じように評価する深さは70cm程度と評価できる。

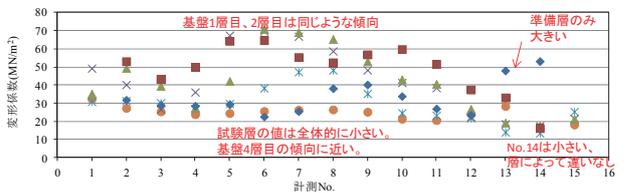
図-8は、管を異なる深さに埋設し、加速度応答値が管の深さによって変化することを想定して、剛性の変化がなくなった深さを、ローラ加速度応答法の計測深さとして整理した図である。図には各施工機械の種類、転圧回数、振動の大きさ別に



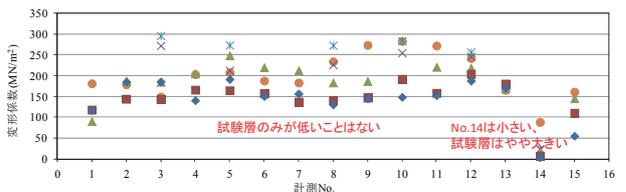
(a) 乾燥密度



(b) CCV



(c) 変形係数 (αシステム)



(d) 変形係数 (小型FWD)

図-9 計測点別のCCV値

凡例を示している。(a)は基盤4層目の転圧面の計測で、管深さは20,30,50,60cm, (b)は試験層の転圧面の計測で、管深さは基盤4層目よりも施工層厚分20cm深くなり、40,50,70,80cmである。(a)図では管が設置されている計測点のCCV値は設置されていない点に比べて小さくなっており10～20程度である。(b)図では管が設置されている計測点のうち、40,50cmは他に比べて値が低下しているが、70,80cmの低下程度が小さい。80cmでは管が設置されていない他の点とほとんど相違ない。したがって、ローラ加速度応答法で管を感知する深さ、即ち影響深さは70～80cm程度であるといえる。

4.3 下層と施工層の加速度応答値の比較結果

施工最上層の試験層を路床施工面と想定して、施工厚20cmの層で施工し、その前段階で下層を準備層30cm、基盤層10cm×4層で施工した。施工層のみでなく、下層の施工時にも加速度応答値を計測し、下層と施工層の加速度応答値を比較した。図-9は横軸に各計測点15点、凡例は施工層の段階

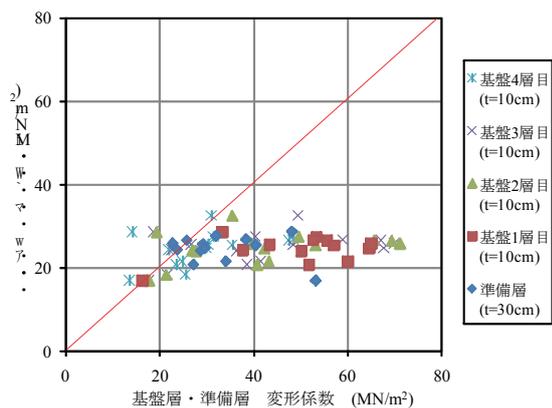


図-10 計測点別のCCV値

で準備層、基盤層、試験層の乾燥密度、CCV、 α システムによる変形係数、小型FWDによる変形係数の結果である。

(a)乾燥密度は施工層によらず全体的に同じような値を示し、施工層による値の傾向はない。発泡スチロールを設置したNo.14の値は小さい。乾燥密度はRI計器で測定しているが、RI計器は本試験では線源の長さが可変のものを使用しており施工層分のみの計測が可能である。したがって、施工層ごとの一定の傾向はないと考えられる。(b)CCVは試験層の結果は他の層に比べて全体的に小さい。また、試験層の結果は基盤4層目の傾向に近い。これは、試験層の施工ではその下の層である基盤4層目の影響を受けていると考えられる。ローラ加速度応答法の影響深さは約70cmであるが、計測する変形係数はより直下の層の影響を受けやすい結果であるといえる。(c) α システムの変形係数は、基盤1層目、2層目は同様な傾向である。試験層の値はCCVと同様に他の層に比べて全体的に小さく、基盤4層目の傾向に近い。CCVと同様に計測する変形係数はより直下の層の影響を受けやすいと考えられる。(d)小型FWDによる変形係数はばらついてはいるが、試験層のみの値が小さいといった一定の傾向はない。No.14は他の計測点に比べて小さいが、試験層はやや大きくなっている。これは、試験層まで層厚が厚くなると、準備層に設置した発泡スチロールの影響は小さくなるためと考えられる。

図-10は図-9の α システムの変形係数について、同じ計測点の試験層の結果と、他の層の結果を比較したものである。他の層が試験層と近い値であれば、試験層はその層の影響を多く受けていると判断できる。図より基盤層1層目や2層目は試験層の値と大きく異なるが、基盤4層目は試験層に近い値を示している。

5. 結論

1) 砕石を盛土材として大型振動ローラで転圧し

た場合、土槽のコンクリート面からの影響がなくなる深さ及び管理設による影響深さの結果より、ローラ加速度応答法の評価深さは70cm程度である。

- 2) ローラ加速度応答法の評価深さは70cmであるが、一般的な盛土施工と同様に、施工層を積層して施工した場合、計測される加速度応答値は施工・計測層の下層の剛性を受け、その影響度合いは計測層の直下層になるほど大きくなる。
- 3) 施工層の加速度応答値は下層の影響を受けるため、盛土施工の日常的な管理のように施工層のみの剛性を評価したい場合は、施工層で計測された剛性値は、下層の影響を除いた形で評価する必要がある。その評価は施工層と下層の剛性、ポアソン比、応力の伝達角を考慮して二層系のモデルによる検討も考えられる。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路土工- 盛土工指針，2010.
- 2) 横田聖哉・益村公人・吉田武男・藤山哲雄・石黒健：道路路床の性能規定化へ対応するための新たな現場管理手法の提案，土と基礎，Vol.50，No.1，pp.13-15，2002.
- 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)：NEXCO試験方法第1編土工関係試験方法，pp.58-63，2012.
- 4) 東日本高速道路(株)・中日本高速道路(株)・西日本高速道路(株)：設計要領第一集土工編，第2章盛土，2012.
- 5) 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，pp.参127-参166.
- 6) 横田聖哉・中村洋丈・内山恵一・神庭浩二：施工現場におけるローラ加速度応答法を用いた盛土品質管理手法の検討(その2)，土木学会年次学術講演会講演概要集，Vol.67th，pp.839-840，2012.
- 7) 藤山哲雄・高橋浩・古屋弘・疋田喜彦：振動ローラ加速度応答を利用した締固め管理手法による地盤評価深さの検討，土木学会年次学術講演会講演概要集，Vol.64th，No.1，pp.687-688，2009.
- 8) 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，No.510，pp.1-4，2000.
- 9) 藤岡一頼・北村佳則ら：ローラ加速度応答法を用いた道路路床の品質管理に関する研究(その1)，Vol.39th，No.2，pp.1343-1344，2004.