

ローラ加速度応答法による盛土品質管理

高速道路の盛土施工における活用事例

中村 洋 丈

盛土の品質管理方法は、取り扱う土量の増大やより高品質な盛土構築のために発展してきた。従来は締固め度で管理されていたが、最近では本来盛土に必要な地盤剛性を直接計測できるローラ加速度応答法の適用が試みられている。ローラ加速度応答法は、位置情報と連動することで、リアルタイムにかつ面的に地盤剛性の状況が把握できるメリットがあり、高速道路では路床や盛りこぼし橋台盛土地盤への適用を検討してきた。ここでは、この手法を実際の現場で試験施工から日常管理まで適用した事例を示し、それらの結果より基準化したローラ加速度応答法を用いた品質管理の適用方法や計測値の評価方法について紹介する。

キーワード：ローラ加速度応答法，盛土，品質管理，高速道路

1. はじめに

高速道路における盛土技術は、各地域の多種多様な土質材料に対応するため、施工前には試験施工を実施し、材料の特性と施工方法、品質管理方法を逐次検討しながら発展してきた。現在の高速道路建設は、第二東名・名神に代表されるような急峻な山岳部を通過する路線が多く、高盛土や大規模盛土の施工が多くみられ取り扱う土工量も飛躍的に増大しており、より一層の効率化、高品質化が求められている。このような背景から、施工機械の大型化や締固めの厚層化が導入され、盛土の品質管理についても新たな試みがなされている。

高速道路盛土の品質管理は、昭和62年にラジオアイソトープによるRI計器が実用化された。このRI計器を用いた現場密度測定は、それまで計測の結果に1日かかっていたものが数分で完了する画期的な技術であった。品質面でもそれまで砂置換法では数点のみの管理であったが、15点の平均値による多点管理となり、ある程度の面的な管理が可能となった。RI計器は一般的な盛土の標準管理方法として定着した¹⁾。また、最近では前述したように盛土の大規模化に伴って作業範囲の増大や場所によっては数百万 m^3 の土量を扱う現場も珍しくない。このような現場ではさらなる品質向上や効率化が求められている。こうした背景を受けて、平成13年には他機関に先駆けて、面的管理による品質管理の試みとして、GPSを利用した転

圧回数を管理する盛土の締固め管理システムを導入した¹⁾。

こうして品質管理手法は発展してきたが、これまでは密度による管理が中心である。一方、道路土工指針²⁾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を行われてきている。そのひとつとして、NEXCOでは平成10年頃から振動ローラに取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手法³⁾(以下、「ローラ加速度応答法」という。)による品質管理が試みられてきた(写真-1)。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

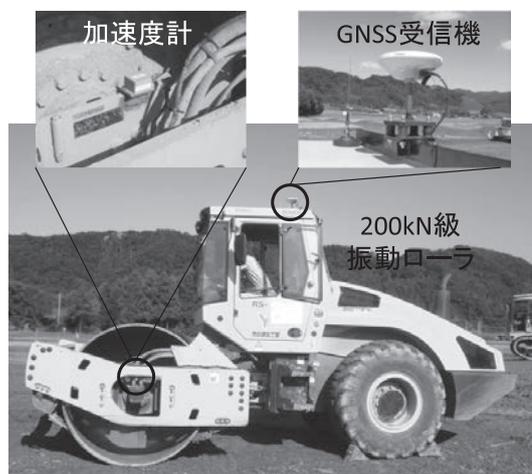


写真-1 振動ローラの加速度計取り付け状況

り、これまでに加速度評価の理論、材料別の適用性、締め固め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。NEXCO では平成 19 年 8 月に土工施工管理要領に路床検査のプルーフ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、NEXCO においては、品質管理基準を平成 24 年 7 月に定めている¹⁾ ところである。

本文では NEXCO におけるこのローラ加速度応答法の適用事例を紹介するとともに、盛土品質管理への適用、今後の課題について述べる。

2. ローラ加速度応答法の原理

ローラ加速度応答法とは、振動ローラの振動輪に設置した加速度計により、転圧時に地盤からの加速度を計測し、周波数分析することにより、地盤の剛性評価を行う計測方法である。ローラ加速度応答法の測定原理を図-1 に示す。転圧初期の地盤剛性が低い段階では、加速度計で計測される加速度は、振動ローラの振動特性と同様な周波数特性を示すため、その波形は比較的きれいな正弦波の形状を示す。一方、転圧作業

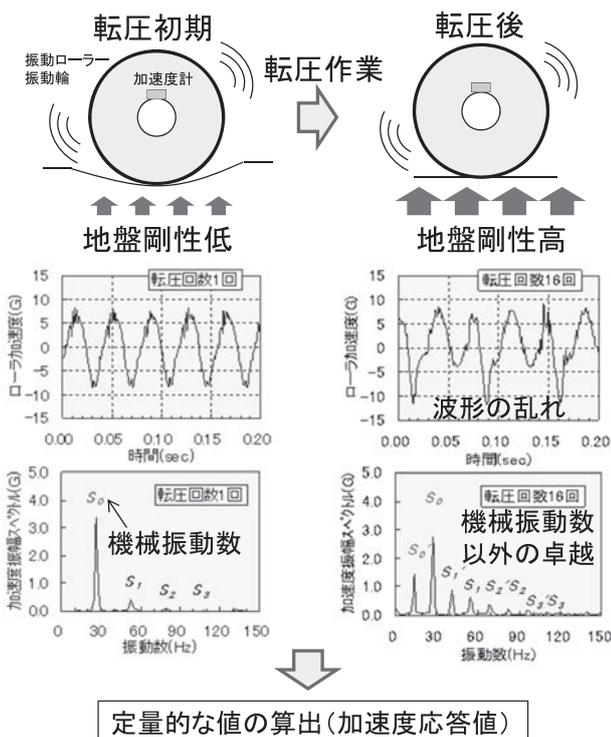


図-1 ローラ加速度応答法の概念図

が進み転圧作業後の地盤剛性が高い段階では、加速度計で計測される加速度の波形は乱れる。この波形を周波数分析すると、高調波のスペクトルが卓越してくる特性がある。この性質を利用し、地盤剛性を加速度波形の乱れの状態「加速度応答値」として定量的に示す指標である。主な特徴は以下の3点である。

- ①本来盛土に必要な剛性を直接的に評価できる。
- ②GNSS と連動すれば、リアルタイムにかつ施工ヤード全面の管理が可能である。
- ③従来の密度計測に比べて、施工しながら品質管理。

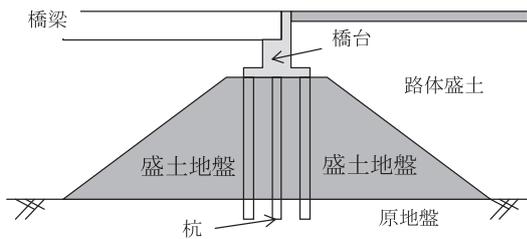
加速度応答値は、数秒に1回の計測が可能で、施工機械の位置情報をリアルタイムで取得できるGNSS と連携すれば、振動ローラのオペレータが施工しながら、施工位置と加速度応答値をリアルタイムかつ施工ヤード全面にわたっての計測が可能であり、かつ施工しながらに計測を完了する利点がある。

3. ローラ加速度応答法を用いた試験施工事例

NEXCO ではローラ加速度応答法の「地盤剛性」を計測できる特徴を生かせる品質管理として、含水比が低く比較的均一な良質材料を用いて施工し、CBR や変形係数等の強度や変形特性が求められる施工部位への適用が最適ではないかと考えている。具体的には、盛土仕上り後にたわみ量で間接的に盛土の剛性を確認している路床や、杭の抵抗に必要な盛土の変形係数の規定を設けている盛りこぼし橋台盛土地盤（以下、盛土地盤という。）への適用である。以下に計測事例を紹介する。

(1) 盛りこぼし橋台盛土地盤への適用

第一は盛土地盤の事例である。盛土地盤とは図-2 のように、盛りこぼし橋台を支持して杭の横方向の抵抗地盤となる盛土された人工的な地盤である⁴⁾。橋台延長を短くできることや、現地発生土を利用できるので経済性や土量計画の面から採用事例が増えている。杭の設計では盛土地盤の変形係数が求められるので、品質管理で直接的に変形係数を計測できる意義は大きい。ここで紹介する事例は、盛土地盤の施工において、試験施工から日常的な品質管理までローラ加速度応答法を適用した事例である。盛土地盤の完成イメージを写真-2 に示す。盛土地盤は橋台下面までの高さ約 13 m、土量約 25,000 m³ である。施工層数は 51 層、モデル施工は盛土地盤施工位置に 20 × 30m のヤードで実施して品質管理手法を決定し、その後、本施工を行った。盛土材料は [GS-F] 細粒分混じり砂質礫に分



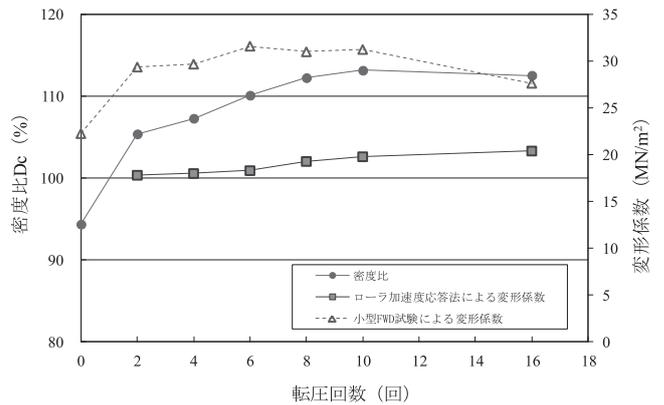
図一 2 盛りこぼし橋台盛土地盤の構造図



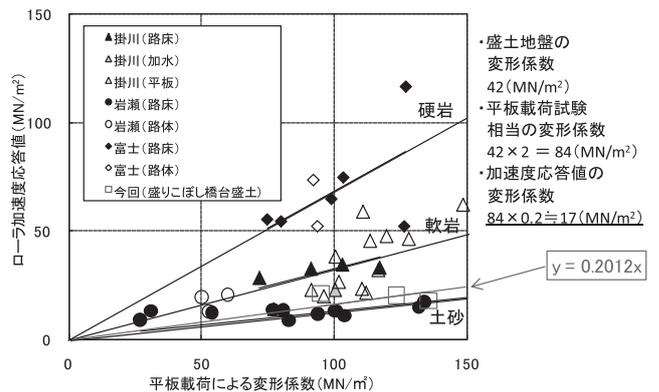
写真一 2 盛土地盤の完成イメージ

類され、自然含水比 16.6%，礫分 71.9%，砂分 16.1%，細粒分 12.0%，突固め試験 E 法における最適含水比 15.8%，最大乾燥密度 $1.946/\text{cm}^3$ ，修正 CBR62.2%であった。

試験施工では、各転圧回数において RI 計器による密度・含水比の計測、沈下量の計測、小型 FWD 試験、ローラ加速度応答法の計測に加えて、転圧回数 2, 8, 16 回において地盤の平板載荷試験 (JGS1521) を行った。加速度応答値は、 $2\text{m} \times 2\text{m}$ のメッシュで計測された値で、平板載荷試験から求まる地盤の変形係数との相関、転圧回数ごとに RI 計測結果との比較、全面計測した値の統計分布整理を行った。なお、施工機械は 200 kN 級振動ローラ、施工厚 20 cm、密度比の基準値は RI 計測 15 点の平均値で 97% 以上である。図一 3 に転圧回数と締固め度、各試験の変形係数の関係を示す。敷き均し時に密度比 94.3%，2 回転圧時には 105.4% となり密度の基準値 97% 以上を満足している。8 回転圧付近で密度比が収束している。密度比が高いのは現場転圧が室内試験の突固め試験よりも相当大きなエネルギーであるからと考えられる。加速度応答値、小型 FWD の値とともに転圧回数に応じて微増である。図一 4 に加速度応答値と平板載荷の変形係数の相関を示す。なお、この図はこれまでの試験結果も併記している。これまでの試験結果によれば、加速度応答値と変形係数の相関関係は、土質の軟硬によって



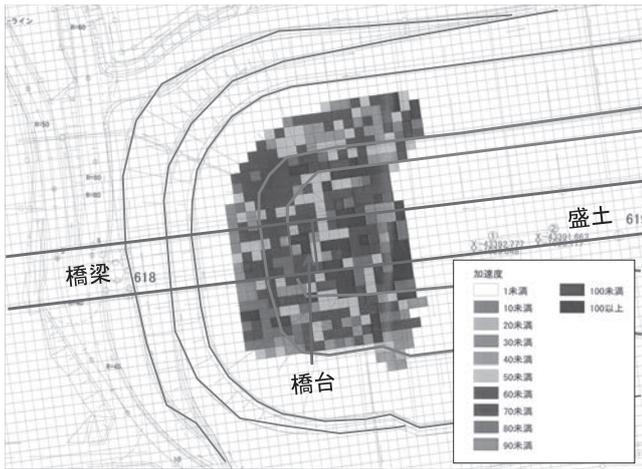
図一 3 転圧回数と密度及び変形係数



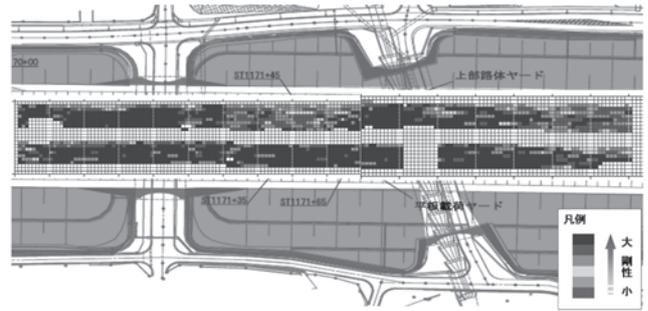
図一 4 平板載荷試験と加速度応答法の変形係数

異なると考えられる。相関関係が直線関係と仮定すると、土砂材料では相関の係数が低く、硬岩では高い傾向がある。今回の材料では土砂と軟岩の中間付近の傾向を示し、試験数は少ないが、相関の係数は「加速度応答値 $\div 0.2 \times$ 平板載荷の変形係数」の関係がみられた。盛土地盤の変形係数の規定値が $42\text{MN}/\text{m}^2$ であるので、加速度応答値にあてはめると $17\text{MN}/\text{m}^2$ となる。

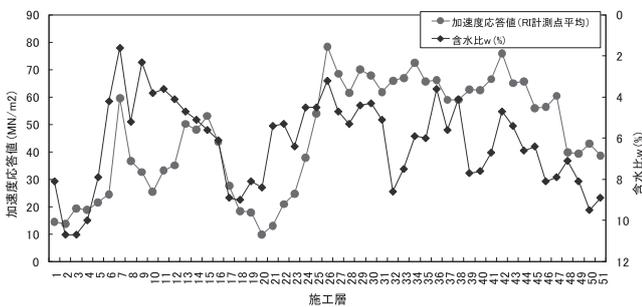
日常管理では GNSS による位置情報と加速度応答値を連動されることにより、図一 5 に示すよう加速度応答値 (変形係数) の分布図で管理することができる。分布図をみれば、加速度応答値の低い箇所を視覚的に把握でき、弱部の即時是正など施工全面にわたる管理が可能である。また、日常管理の分布図に示すように、メッシュの数だけ加速度応答値も計測可能で、施工最終の計測値だけでも数百～数千の計測値が得られる。この膨大な数の計測値に対して統計的な処理を加えて、日ごとの全面の平均値を算出したものが図一 6 である。図には含水比の計測結果も併記している。これをみると、加速度応答値と含水比の増減は同様な傾向を示している。含水比の変化は数%～10%の間であるが、加速度応答値は 10～80 の値を示している。このように加速度応答値は含水比の影響を受けている



図一五 加速度応答値の分布図



図一七 路床の最終検査への適用例



図一六 施工層ごとの加速度応答値

とはいえ、材料の含水比状態には注意が必要であるが、図一四で平板載荷試験との関係により求めた規定値 17 MN/m^2 より、ほとんどの値は大きくなっている。

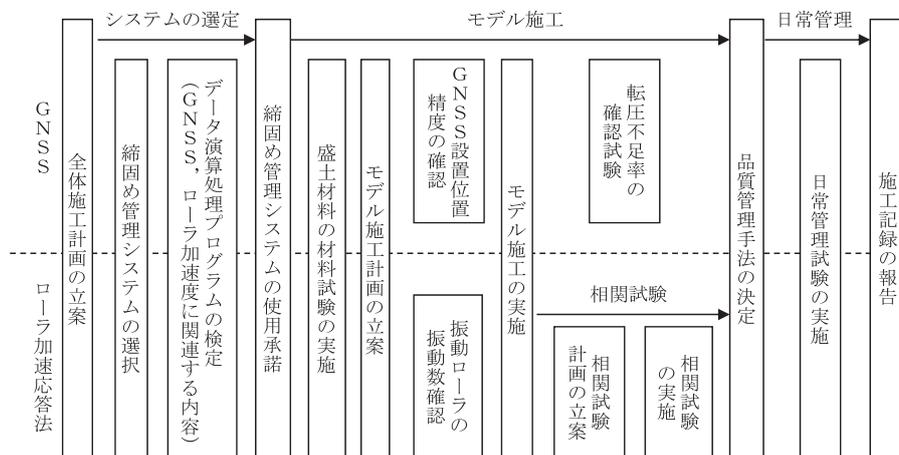
(2) 路床の最終検査への適用

路床設計では、地盤の変形係数（剛性）の代わりにたわみ量を規定することにより、路床面が舗装を支持できるかどうか判断している。施工では上部路床の仕上り後に、仕上り面の全体にわたって所定の重量を積載したダンプで走行して、路床面にたわみやわだちが

生じないかチェックするプルフローリングが行われる。この検査は監督員が実際に走行するダンプの近傍で目視によって路床面の状況を確認する、目視で問題がありそうな箇所はたわみ試験で確認するものである。したがって、仕上り全面を確認するには、かなりの時間と労力を要する。一方、図一七はローラ加速度応答法によって得られた加速度応答値（剛性）の分布である。ローラ加速度応答法では、施工と同時に剛性も計測することになるので、即座に面的な剛性分布が把握可能であり、かつ基準と照らし合わせて定量的な判断ができる。

4. ローラ加速度応答法を用いた盛土品質管理の活用

ローラ加速度応答法は、計測手段としては普及しつつあるが、現場の実施工に日常的に使用され、品質管理基準を設けて品質管理された事例は少ない。その一因は品質管理法が具体的に定められていなかったことである。NEXCOでは品質管理法を具現化するために、平成24年7月に施工管理要領にローラ加速度応答法の品質管理要領案を定めた。その適用範囲は盛土材料が良質材で剛性が必要な路床と盛土地盤とした。品質



図一八 ローラ加速度応答法の品質管理の流れ

管理全体の流れを図-8に示す。ローラ加速度応答法を現場に適用するには、計測時に位置情報を取得するためGNSSと併用することを原則とした。したがって、適用では全体計画の立案から始まり、GNSSとローラ加速度応答法のシステムの選定、次に転圧ごとのRI計測や加速度応答値を計測、及びRIや平板載荷との相関を確認し、品質管理、施工機械等を決定するモデル施工、品質管理法が決定した後に、日常管理に進む。

加速度応答値は数秒に1回程度のデータが取得される。したがって、1データ取得の間に振動ローラは1~2m程度、進行することになる。この時の管理ブロックの大きさや加速度応答値の判定方法が異なると、アウトプットされる加速度応答値も異なることになる。したがって、品質管理法としての加速度応答値の判定方法を図-9に示すように統一を図った。管理ブロックは2mとし、管理ブロックをさらに16ブロックのサブブロックに分割する。加速度応答値はサブブロックの4角1点でも通過すれば、そのサブブロックの値とした。管理値に用いる管理ブロックの値はサブブロックの50%以上通過した場合に、サブブロックの値を平均することにした。

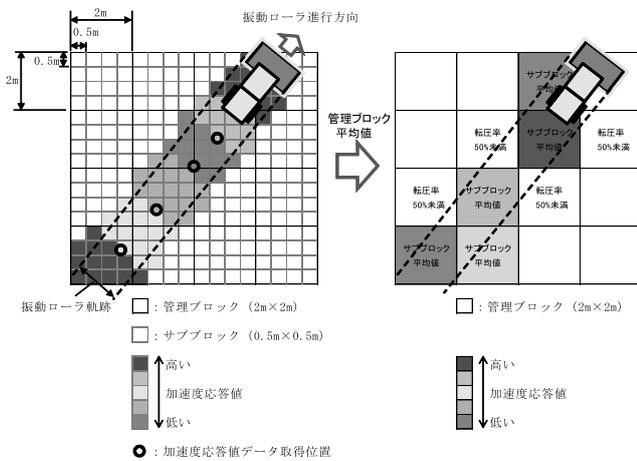


図-9 加速度応答値の判定の仕方

ローラ加速度応答法で計測される加速度応答値は、地盤剛性を評価する指標であるが、平板載荷試験で求める変形係数そのものの値ではない。ローラ加速度応答法と平板載荷試験では、荷重の荷重方法や計測・試験における荷重の伝達範囲や深さが異なり、評価している地盤剛性の範囲も異なる。しかし、設計では平板載荷試験で求めた変形係数が用いられていることから、加速度応答値の管理基準を設けるには、ローラ加速度応答法と平板載荷試験との相関をとる必要がある。図-10には平板載荷試験との相関の概念図を示す。日常管理で用いる前に試験施工でこの相関関係を

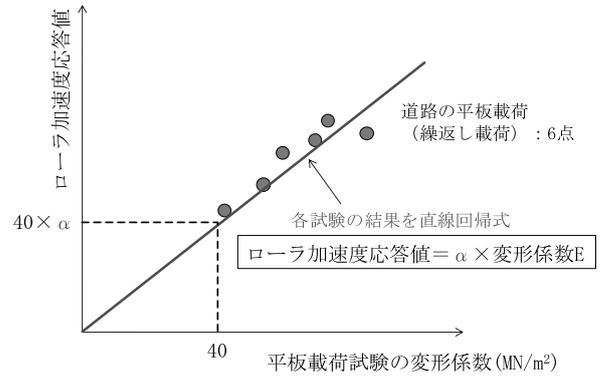


図-10 位置情報を併用した路床剛性値の表示例

確認する試験（相関試験）を実施する。

前述したように、ローラ加速度応答法を用いた日常管理では施工面全体の計測が可能であるので、膨大な量の計測値が得られる。したがって、分布図で施工面の弱部を把握すること以外に、管理基準に対して施工面全体としての評価をする必要があるため、計測値を統計処理することとした。統計処理は、図-11のように計測値のヒストグラムを作成する。一般的に計測結果は正規分布に近い形となるので、平均値や標準偏差を求める。ただし、図からもわかるように、計測の値が非常に高いものがある。これまでの試験施工では、ローラ加速度応答法は振動ローラの停止時や前後進切り替え時、振動ローラの発進時など、非定常時の動きでは加速度応答値がうまく計測できないことが確認されている。高い値が計測される原因はこれらにあると考えられる。この対処は機械側の対応や計測システム・理論での対応も考えられるが、簡便さから計測結果をデータ処理する側で対応することとした。このデータ処理は、計測されたデータの中で値の高い側10%の範囲 ($\mu - 1.28\sigma$) のデータは信頼性が低いと判断して除外し、データ除外後に再度、図-12のようにヒストグラムに統計処理するものである。図-12のデータ処理後は図-11と比較するとより正規分布に近い形となっている。この図から計測値の平均値と標準偏差を求め、計測値全体の合格率を90%として、

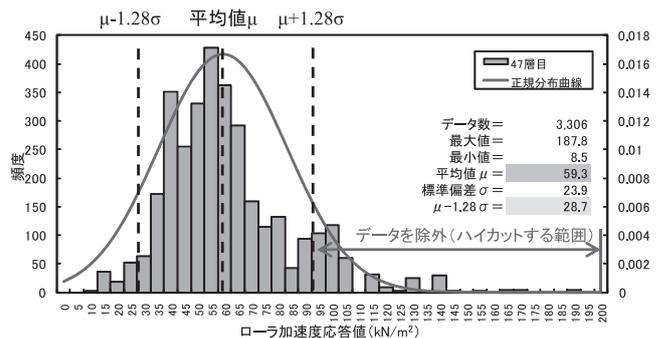


図-11 加速度応答値のヒストグラム

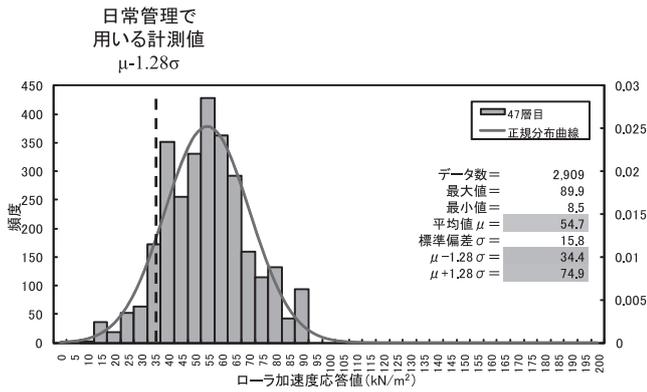


図-12 高い加速度応答値を除外後のヒストグラム

$\mu - 1.28\sigma$ の値を日常管理で用いる計測値とした。

5. おわりに

ローラ加速度応答法は地盤剛性がリアルタイムに全面的に評価でき試験施工レベルでは適用が増えているが、この方法は含水比の影響を受けやすいなど、万能な手法ではない。今後、日常管理にも適用していくには計測のメリットと限界を把握しつつ、適用できる土質や施工部位を限定することが必要である。また、

NEXCO の施工基準のような、統一的な管理基準も必要になると考える。これまで、盛土の品質管理は締め度で行われていたが、直接的に本来盛土に必要な地盤剛性を計測できるこの手法の優位性は大きい。まだ計測時の施工層の下層の影響や影響深さなどの課題も残されているので、今後も検討を進めたい。

J C M A

《参考文献》

- 1) 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, 2012.
- 2) (社)日本道路協会：道路土工-盛土工指針, 2010.
- 3) 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, 2002.
- 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, 2012. 藤岡一頼, 大窪克己：道路における盛土構造物の変化・変遷 (地盤工学会誌 土と基礎 54-9 (584) p16-18 2006.9

【筆者紹介】

中村 洋文 (なかむら ひろたけ)
 (株)高速道路総合技術研究所
 道路研究部 土工研究室
 研究員

