

# 応答荷重法による土の締固め管理手法

近藤 博<sup>1</sup>・石井 督<sup>2</sup>・藤田 秀実<sup>2</sup>・本間 重雄<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 東海大学教授 工学部土木工学科 (〒259-1292 神奈川県平塚市北金目 1117)

<sup>2</sup>学生会員 東海大学 工学研究科土木工学専攻博士前期課程 (〒259-1292 神奈川県平塚市北金目 1117)

<sup>3</sup>正会員 Dr. Eng. 東海大学教授 工学部土木工学科 (〒259-1292 神奈川県平塚市北金目 1117)

締固め管理のための重錘落下法に関する研究が各機関で行われている。重錘落下法には、重錘衝突時の加速度値や、加速度と荷重値を測定し地盤の締固め度を間接的に判定する2種の方法が提案されている。

本報告は、動的応答特性に問題のあると言われていた加速度計を用いず、重錘衝突時の荷重値計測のみから、静的支持力を推定し、直接的に締固め管理に利用できる方法について提案したものである。

**Key Words :** compaction, impact load, in-situ test, load test

## 1. はじめに

締固め地盤の品質管理は、一般に締固め度で行なわれている。現在では、密度と水分量の測定にラジオアイソトープから放射されるガンマ線、中性子線を用いる種々の方法が開発され利用されているが、多くの現場では砂置換法が用いられているのが現状である。この方法は原理的に明快であるが、判定に手間と時間がかかり、締固め度の測定結果を実時間で施工に反映させることはできない。そこで、盛土工事の品質の向上を考えた、締固め度に対応した指標を実時間で測定し、これを施工に瞬時にフィードバックできる簡易な測定システムの開発が望まれている。

このような観点に立ち、実時間的、かつ非破壊的な締固め管理手法が種々提案されている。その中で、重錘落下を採用した方法が主流になりつつあるようである<sup>1),2)</sup>。

重錘落下法として、現在、応答加速度法とインピーダンスヘッド法<sup>3),4)</sup>が提案されているが、両者とも、測定値と地盤の密度などの強度指標とを実験的に対応させる、間接的な利用法になっている。さらに、重錘落下から地盤支持力を推定している研究<sup>5)</sup>もあるが、重錘は高速で地盤に貫入しているにもかかわらず、重錘の速度に依存する動的成分が考慮されていない。

本報告は、まず、強さの異なる2種の供試地盤で重錘落下試験を行ない、重錘に設置した加速度計値、

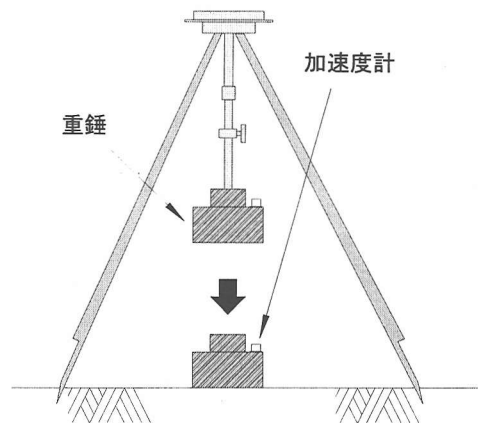


図-1 応答加速度法の概要図

重錘先端部に貼付したひずみゲージによる荷重値、及びレーザ変位計で重錘の貫入量を測定した。これらの3者を比較検討し、加速度計の動的応答性上の問題点を指摘するとともに、荷重値から貫入量が求められることも示した。次に、動的特性に問題があった加速度計を用いず、荷重値計測のみから、直接的に地盤の静的支持力を求めるための方法（以下、応答荷重法と記す）について提案したものである。

## 2. 既存の重錘落下法

提案されている重錘落下法は、締固め地盤に重錘を落下させて、その応答を調べることにより、地盤

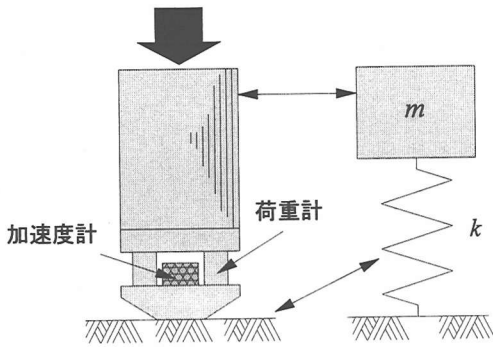


図-2 インピーダンスヘッド法の概要図

の弾性的な特性については地盤の硬さや変形特性を推定するものである。次に、今回の提案法との違いを明確にするために、2種の方法について簡単に特徴を説明する。

(1) 応答加速度法<sup>1), 2), 3), 6), 7)</sup>

図-1は、応答加速度法の概要図を示したものである。この方法は、所定の高さから加速度計を設置した重錘を地盤上に落下させ、衝突時の加速度のピーク値を、土の密度、あるいは地盤反力係数などの強度指標と実験的に相関させるものである。

(2) インピーダンスヘッド法<sup>3), 4)</sup>

図-2はインピーダンスヘッド法の概要図を示したものである。この方法は、図に示すように、荷重計と加速度計の両者を設置した重錘を落下させ、地表面における衝撃時の加速度 $a$ と衝撃荷重 $F$ を測定する。これらの値から、機械インピーダンス( $Z=F/v$ )を得る。機械インピーダンスは振動に対する抵抗に対象物の動的こわさを示す指標である。実用的には、機械インピーダンス値と土の密度、あるいは強度指標とを実験的に対応させるものである。

しかし、提案者は力と加速度の波形は相似で、その波形のパワースペクトルも殆ど同じであるので、重錘の質量を $m$ とおくと、 $F=ma$ の関係にあると述べている。したがって、力と加速度の両者を測定する理由は特になくと思われる。

3. 実験装置と方法

(1) 供試地盤

実験で用いた供試土は、カオリクレイと豊浦標準砂を重量比8:2の割合で混合し、含水比を約20.0%に調節したものをを用いた。

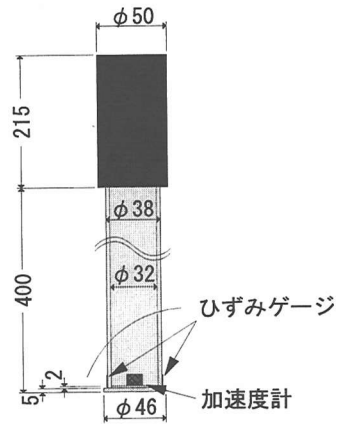


図-3 重錘の概要図

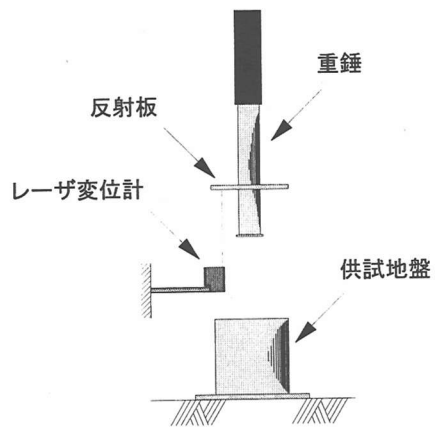


図-4 実験の概要図

供試地盤は、地盤の強さによる各センサの動的応答特性を検討するために、CBR値の異なる2種類（地盤A：CBR値0.53%、地盤B：CBR値13.6%）を用いた。なお、土槽はCBR試験用モールドを用い、層厚は17.5cmとなっている。

(2) 重錘

図-3は、今回の実験で用いた重錘の概要を示したものである。全長40cmのアルミニウム製パイプの上部に重りを、先端部にはアルミの円形板を取り付けた構造となっている。重錘先端部の表面には衝撃荷重測定に用いるひずみゲージを貼付し、内部には加速度計が設置してある。用いた加速度計は、ひずみゲージタイプで容量：1000m/s<sup>2</sup>、固有振動数：1400Hzである。また、土中貫入時の周面抵抗の影響を排除するために、先端部の円形板はパイプ外径より半径を4mm大きくしてある。また、図からも明らかなように、従来の研究で採用された重錘と比較して、接地

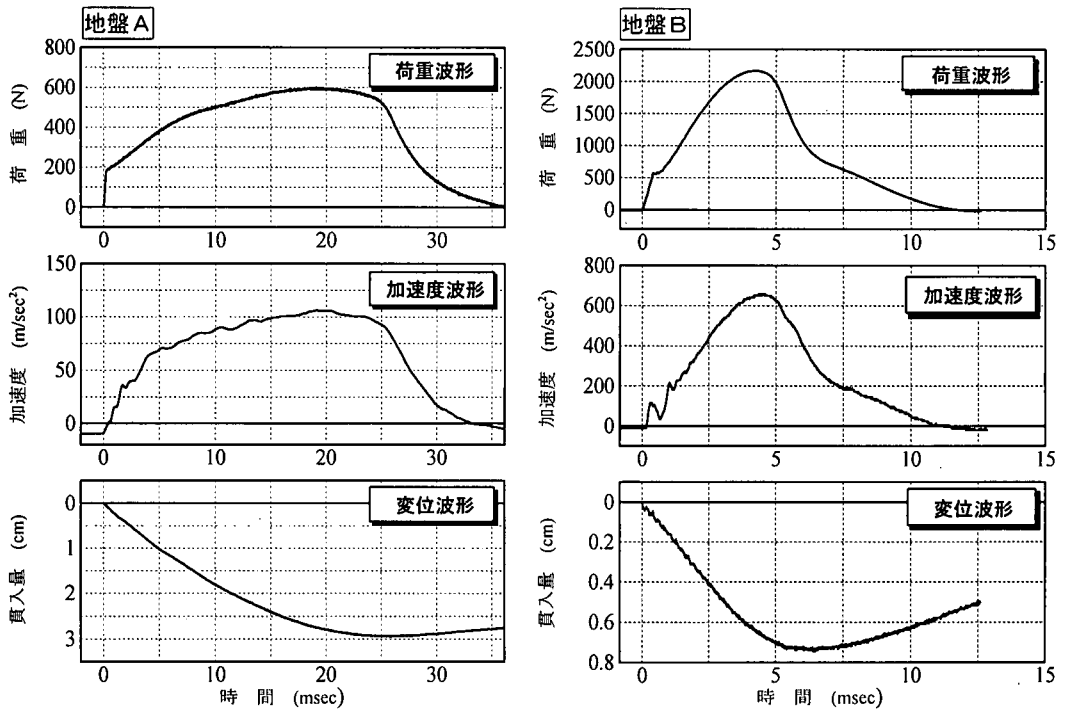


図-5 計測波形の例

面積を小さくしてある。これは、従来法とは異なり、重錘落下時に重錘を地盤の塑性域まで貫入させて地盤の支持力を求めるために採用したものである。

### (3) 実験方法

図-4は、重錘落下試験の概要図を示したものである。実験は、重錘を供試地盤から20cmの位置から自由落下させて実施した（落下高さ20cmは、供試地盤Aで、これ以上の高さから重錘を落下させても、同一の荷重-貫入量経路を通り、地盤が塑性域に達すると判断して採用した<sup>8)</sup>）。そのとき重錘に生じる衝撃荷重と加速度及びレーザ変位計による貫入量を計測し、波形処理した。なお、レーザ変位計は他のセンサの応答特性を検討するために設置したものである。

また、地盤の静的支持力を求めるため、重錘落下試験で用いた重錘を、载荷速度1mm/分で供試地盤に貫入させて、静的载荷試験（モノトニック試験）を実施した。

## 4. 実験結果と検討

### (1) 計測波形の例

図-5は、重錘落下試験を実施したときの、両地盤

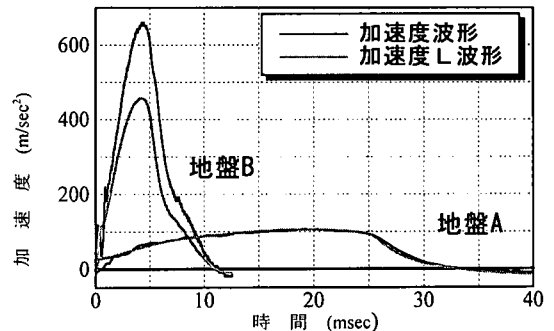


図-6 応答波形の比較

での荷重波形、加速度波形、及び変位波形の例を示したものである。

図から、加速度波形は初期に高周波の波が乗っているものの、荷重波形と同様な形状を示している。変位波形からは重錘が、地盤Aと地盤Bで、それぞれ約2.9cmと約0.74cm貫入した後、リバウンドしている様子がわかる。

### (2) 加速度波形の比較

図-6は、両地盤での、加速度波形と、荷重値を重錘の質量で除して求めた加速度値（以下、加速度L波形と記す）を比較して示したものである。なお、加速度L波形は、重錘の自由落下時の加速度（ $-1g$ ）

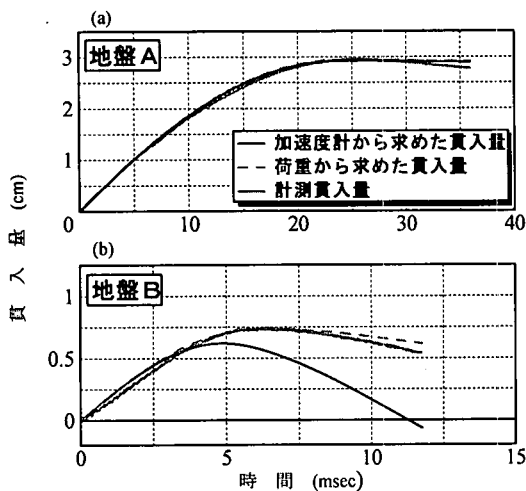


図-7 貫入量の比較

分下げて表示したものである。

地盤Aの場合、加速度のレベルは低く、加速度波形と加速度L波形の両者がよく一致していることがわかる。しかし、より高い周波数特性が要求される地盤Bの場合、図からもわかるように、両者の結果は一致せず、加速度L波形より加速度計での波形の方が大きくなっている。これは、どちらかのセンサに動的応答特性上の問題が生じていることを示唆するものである。

### (3) 実測貫入量と計算貫入量の比較

前節では、衝撃の大きくなる地盤Bにおいて、ひずみゲージと加速度計の動的応答性状に差異が生じることを示した。そこで、両センサから求まる加速度を積分して求めた変位と計測変位を比較することにより、センサの問題点について検討した。

図-7(a)は、地盤Aにおいて、3つの方法から求まる貫入量を示したものである。図から、三者がほぼ一致しており、3種のセンサの動的応答特性に問題がないことがわかる。図-7(b)は、地盤Bについての同様な比較を示したものである。図から、荷重値から求めた貫入量とレーザ変位計での計測値はほぼ一致した。しかし、加速度値から求めた貫入量は、後半で他の2つとは大きく異なっている様子がわかる。計測波形を周波数分析したところ、地盤Aでの固有振動数は約35Hz、地盤Bでは約200Hzとなった。後者の値は用いた加速度計の固有振動数の14%程度である。従って、加速度計の利用に際しては、その応答性能に注意する必要があることを示唆するものである。

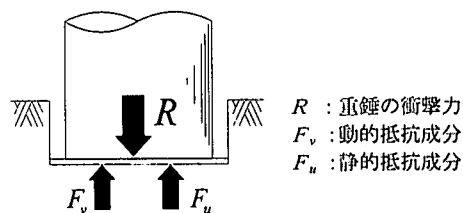


図-8 重錘先端部における力の釣合い

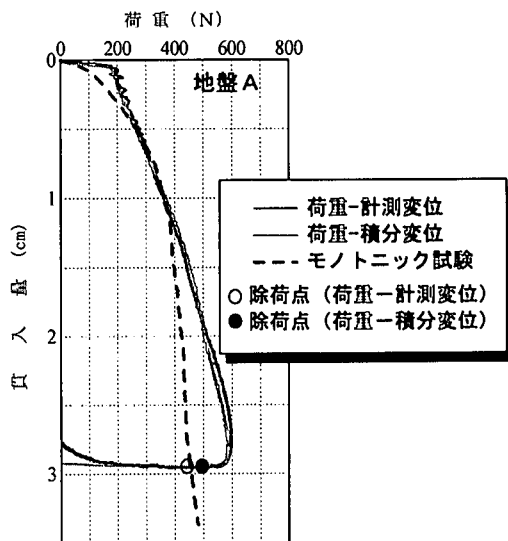


図-9 荷重-貫入量関係の比較

また、荷重値から求めた貫入量は、両地盤においてレーザ変位計での計測値と良く一致していることから、重錘と地盤の接触面での荷重値計測が行なえるように重錘形状を工夫（地盤に貫入するように、重錘の地盤に接触する部分の断面積を小さくすると共に、この部分で図-3に示した方法等で荷重を測定する）し、試験を実施したほうがよいと判断できる。また、これらの結果から、荷重値計測のみで、重錘と地盤の接触面での機械インピーダンスが求められることもわかる。

### (4) 静的支持力の推定

図-8は、重錘が地盤にある程度貫入し、地盤が塑性域に達しているときの重錘先端部における力の釣合いを示したものである。スタナミック試験(杭の高速載荷試験の一種)データの解釈法<sup>9)</sup>に倣うと、重錘の衝撃力 $R$ は近似的に、地盤の静的抵抗力 $F_u$ と、重錘の貫入速度 $v$ に比例した動的抵抗力 $F_v$ の和として、次式で表される。

$$R(t) = F_u(t) + F_v(t) = F_u(t) + Cv(t)$$

ここに、 $C$ は減衰定数である。

また、荷重-貫入量関係の最大変位点は除荷点と呼ばれている。除荷点では、速度がゼロであるため、この点での衝撃力 $R$ は静的抵抗力 $F_u$ のみとなる。地盤を弾塑性モデルで表現できると仮定すると、除荷点での衝撃力が静的支持力になる。

図-9は、地盤Aでの荷重-貫入量曲線を示したものである。黒実線は、レーザ変位計で計測した貫入量を用いた荷重-貫入曲線を画いたものである。また、○印は同曲線の除荷点を示す。灰色線は荷重値から求めた貫入量を用いて画いた荷重-貫入曲線である。同様に、同曲線の除荷点を●印で示す。図から明らかなように、両曲線は除荷点付近まではよく一致していることがわかる。

破線は、除荷点と静的載荷試験との関係調べるために実施したモニタリング試験での荷重-貫入曲線の関係を示したものである。この曲線は、貫入量1.5cm以降、荷重値は地盤の締め固めやモールドの拘束等の影響で増加する傾向を示しつつ、重錘落下試験値の除荷点付近で交わることがわかる。

以上の検討から、重錘落下試験の荷重値計測のみから地盤の静的支持力が近似的に推定でき、直接的に締め固め管理に利用できることがわかる。

## 5. まとめ

重錘落下試験の基本特性解明のための基礎的実験を実施・検討した結果、以下のことがわかった。

1. 重錘落下法に用いるセンサは、加速度計が基本となっているが、重錘形状を工夫し、動的特性

に問題の少ないひずみゲージを用いた荷重計測をしたほうがよい。

2. 計測荷重波形を、重錘の質量で除した値に、ひずみゲージタイプの加速度計波形に含まれる重力加速度成分を補正すると、ひずみゲージタイプの加速度計による計測加速度波形と一致する。
3. 地盤が塑性域に達する重錘落下試験を実施することにより、スタナミック試験のデータの解釈法である除荷点法を適用して、近似的な静的支持力を推定することができる。

## 参考文献

- 1) 北本幸義, 安本敬作, 鬼木剛一, 藤崎勝利: 地盤の衝撃特性を利用した厚層締固め管理手法, 土と基礎, Vol. 48, No. 4, pp. 25~28, 2000.
- 2) 早崎勉, 鬼木剛一: 新しい締固め管理システム, 土と基礎, Vol. 48, No. 7, pp. 9~12, 2000.
- 3) 土質工学会編: 土の締固めと管理, 土質工学会, pp. 212~213, 1991.
- 4) 境友昭, 出原浩: 土の締め固め管理のための非破壊試験法(その2), 第22回土質工学研究発表会発表講演集, pp1657~1658, 1987.
- 5) 境友昭, 田村徹: 重錘落下による地盤の硬さの計測, テラメカニクス, pp. 17~22, 1990.
- 6) 浦上康文, 橋口修三, 省部和男: 建設省技術研究所における技術開発90近畿技術事務所(2)簡易支持力測定器の開発, 積算技術, pp. 60~65, 1997.
- 7) 能登繁幸, 後藤彰, 佐藤厚子: 衝撃加速度を用いた土の締固め管理について, 第24回土質工学研究発表会発表講演集, pp1831~1832, 1989.
- 8) 佐藤友哉, 木村修一, 石井督, 近藤博: 動的載荷試験による杭の支持力推定に関する基本考察, 土と基礎, Vol. 49, No. 2, pp. 33~36, 2001.
- 9) 塚田幸広, 市村靖光, 森芳徳: 杭の動的支持力管理手法に関する調査, 土木研究所資料, pp. 17~18, 1996.

(2001. 3. 29 受付)

## A METHOD OF MANAGEMENT IN SOIL COMPACTIONS BY MEANS OF IMPACT LOADING METHOD

Hiroshi KONDO, Susumu ISHII, Hidemi FUJITA and Shigeo HONMA

The (rammer) weight falling method for managing soil compactions has been studied in several research organizations. Two kinds of methods were proposed previously which measures acceleration values and in addition load values at the collision to judge the degree of soil compactions indirectly.

This paper proposes a direct method for determining the degree of soil compactions and estimating the static values of bearing capacities, instead of using accelerometer which is doubtful in dynamic response, from the measurement of load values at the collision solely.