

# 塑性波頭の伝播からみた土の衝撃締固め機構 について

建山和由\*・島昭治郎\*\*・森川 勝\*\*\*

突固め試験に代表される土の衝撃締固めの機構について、理論的考察を行った。ここでは衝撃締固めをランマが地表面に衝突することにより地中に生じる塑性波頭の伝播とそれともなう土の圧縮現象と考え、短い時間ステップでこの現象をシミュレートする計算手法を考案した。この手法を用い、ランマの重量や落下高さなどの落下条件と土の中に生じる締固め特性との関係について考察を行い、その妥当性を室内実験により検討した。なお、計算、実験とも波頭伝播と土の圧縮は1次元でのみ考えた。

**Keywords :** soil compaction, impact, plastic front

## 1. はじめに

モールドの中にゆるく詰めた土の上にランマーを落とすと、ランマーは土中に貫入し、その分、土は締固められる。この現象は土の締固めにおける代表的な室内試験である突固め試験の基本をなしているにもかかわらず、その締固め機構に関しては未だ明らかにされていない。本研究では、土の衝撃締固め現象をランマーが地表面に衝突したときに地中に生じる塑性波頭の伝播とそれともなう土の圧縮現象と考え、数値計算ならびに実験により考察を行った。ただし、土の衝撃締固め現象を考える場合、波動の伝播ならびに土の変形は三次元的な現象としてとらえるべきであるが、今回は研究の第一歩として一次元の場合に限定して議論を行う。

## 2. 塑性波頭の伝播と衝撃締固めについて

一様な断面をもつまっすぐな棒が一端を固定されている状態を考える。この棒の他端に引っ張り力が瞬間的に加えられたとき (Fig.1) の現象を非常に短い時間ステップで考察する。まず、引っ張り力  $P$  を加えた端に変形と応力が生じ、これが波頭となって時間の経過とともに他端に向かって棒の中を伝播し、ある時間経過すると平衡状態に落ちつく。このとき、引っ張り力が大きいと棒の一部あるいは全体で塑性変形を生じるが、この部分で伝播する波を塑性波と呼んでいる<sup>1)</sup>。

塑性波の伝播の研究は、冒頭に述べたような棒の急激な引っ張り問題として1940年代の後半から Karman and Dawez<sup>2)</sup> や White and Griffis<sup>3), 4)</sup> によって始められた。また、これをもとに Salvadori, Skalak and

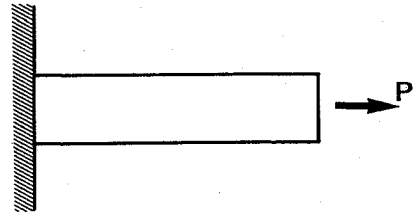


Fig.1 Longitudinal impact on a long uniform bar

Weidlinger は2種の理想的な応力~ひずみ関係をもつ材料に対し、一次元の弾・塑性波の伝播問題に対する考え方を示した<sup>5)</sup>。

ランマーで土を締固める場合、ランマーが地表面に衝突すると塑性波頭 (圧縮) が土中を伝播し、それともなう土中に塑性変形が生じて土が締固められるものと推察され、棒の引っ張り現象とのアナロジーが考えられる。そこで、本研究では土の衝撃締固めをランマーと地表面の衝突により地中に生じる塑性波頭の伝播とそれともなう土の圧縮現象と考え、この現象をシミュレートする数値計算手法を考案し、またこの計算手法の妥当性を室内実験により検討した。

## 3. 数値計算上の仮定・条件設定

土における塑性波頭の伝播とそれともなう土の締固めに関し、以下の仮定のもとに議論を進める。

(a) 塑性波は一次元的に伝播し、土は側方には変位しないものとする。本来、衝撃締固めにおけるランマーの効果は地中では三次元的に伝播し、土は側方にも変位するが、ここではまず、衝撃締固めに関する理論的アプローチの初歩として、波頭の一次元伝播ならびに土の一方変形という仮定を設ける。

(b) 土は下方に半無限連続で存在するものとする。すなわち、反射波等は考えず、初期の波頭の伝播による締固めのみを考える。

\*正会員 工博 京都大学講師 工学部土木工学科  
(〒606 京都市左京区吉田本町)

\*\*正会員 工博 京都大学名誉教授

\*\*\*正会員 工修 (株) 神戸製鋼所

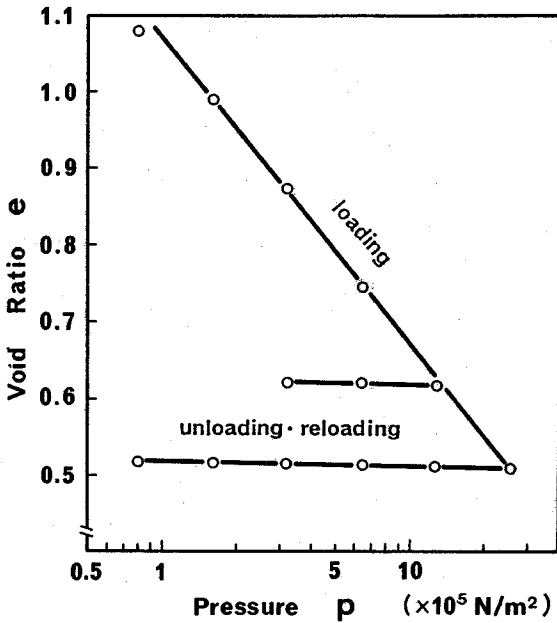


Fig.2 Experimental result of one-dimensional compression test for an unsaturated sandy loam

(c) 均質な不飽和土を対象とし、過剰間隙水圧は生じないものとする。

また、土の衝撃締固めの問題をシミュレートするためには、土の圧縮特性と土中における塑性波頭の伝播特性を定量的に表現する必要がある。

土の圧縮特性としては、土を一次元圧縮した際に得られる土の間隙比～圧力関係 ( $e \sim \log p$  関係) を用いることにする。Fig.2 に不飽和状態の砂質ローム (比重 2.83, 含水比 8.15%) を一次元圧縮して得られた  $e \sim \log p$  関係を示す。実験では標準圧密リング内にゆるく詰めた試料土に対し 6 段階の上載圧 (0.784, 1.57, 3.14, 6.27, 12.5,  $25.0 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ ) で圧縮試験を行い、 $p = 12.5 \times 10^5 \text{ N/m}^2$  ならびに  $25.0 \times 10^5 \text{ N/m}^2$  の 2 点においては除荷・再載荷時の挙動をも測定した。

Fig.2 では不飽和土においても飽和土と同様に載荷領域 (飽和粘土の圧密試験における正規圧密にあたる領域、以下、正規領域と呼ぶ) においては  $e \sim \log p$  関係は直線で近似でき、また、不飽和土の場合、除荷・再載荷過程での間隙比変化は非常に小さく、正規領域に比べると  $e \sim \log p$  関係の傾きにして約 1/50 しかないという結果が得られた。不飽和土に関する同様の実験結果は他の報告にもみられ<sup>6)</sup>、この結果をもとにここでは、次の仮定を設けることとする。

(d) 土が  $e \sim \log p$  面上の正規領域にあるときには、この部分の土はランマーの作用により締固められ、除荷・再載荷過程の領域にあるときには締固めは生じず、その部分の土は剛体として働く。

Fig.2 の正規領域の間隙比  $e$  と圧力  $p$  との関係は、式 (1) で近似することができる。

$$e_A - e = K \cdot \log \frac{p}{p_A} \dots \dots \dots (1)$$

$K$ : Fig.2 の場合は、 $K = 0.4$

$e_A, p_A$ :  $e \sim \log p$  面上の任意の基準点 (正規領域上) における間隙比と載荷圧 ( $\text{N/m}^2$ )

なお、式 (1) は、次式のように書き換えることができる。

$$p = p_A \cdot \exp\left(2.30 \cdot \frac{e_A - e}{K}\right) \dots \dots \dots (2)$$

次に、波頭の伝播速度については、前述の  $e \sim \log p$  関係から以下のようにして求める。材料の応力～ひずみ関係 ( $p \sim \epsilon$  関係) が与えられた場合、その材料内における波頭の伝播速度  $c$  ( $\text{m/sec}$ ) は式 (3) のように表わされる<sup>7)</sup>。

$$c = \sqrt{\frac{1}{\rho} \frac{dp}{de}} \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 $\rho$  は媒質となる材料の密度 ( $\text{kg/m}^3$ ) を、また  $dp/de$  は材料の応力～ひずみ関係の接線勾配 ( $\text{N/m}^2$ ) を表わす (弾性波の伝播の場合には  $dp/de = E$  一定であるので、 $c = \sqrt{E/\rho}$  となる)。

前述の砂質ロームに対し波頭の伝播速度を求めるため、Fig.2 の  $e \sim \log p$  関係を式 (4) を用いて応力～ひずみ関係に描き直すと Fig.3 のようになる。

$$\epsilon = \frac{e_B - e}{1 + e_B} \dots \dots \dots (4)$$

ただし、 $e_B$  は  $\epsilon = 0, p = 0$  のときの間隙比である。ここでは圧密リングの中に土をゆるく詰めて得られた状態を便宜的に  $\epsilon = 0, p = 0$  の状態とした。この図では、正規領域では締固めの進行とともに  $dp/de$ 、すなわち波頭の伝播速度が増加するという結果になっている。また、除荷・再載荷過程の  $dp/de$  は正規領域に比べて非常に大きいのでこの過程においては、 $dp/de = \infty$  とみなすことができる。以上の考察のもとに次の仮定を設けた。

(e) 土がランマーの衝撃を受ける場合、 $e \sim \log p$  面上の状態が正規領域にあるときには波頭の伝播速度は応力～ひずみ関係の接線勾配と密度から決まり、また除荷・再載荷過程にあるときには無限大の速度で伝播する。

ただし、除荷・再載荷過程におけるひずみが正規領域のそれに比べて無視できないほどの大きさをもつ場合 (たとえば飽和した粘性土にみられる) には、(d), (e) の仮定が成り立つとは考えられず、以下の議論をそのまま適用することはできない。

なお、式 (2), (4) より次式が誘導される。

$$\frac{dp}{de} = p \cdot 2.30 \cdot \frac{1 + e_B}{K} \dots \dots \dots (5)$$

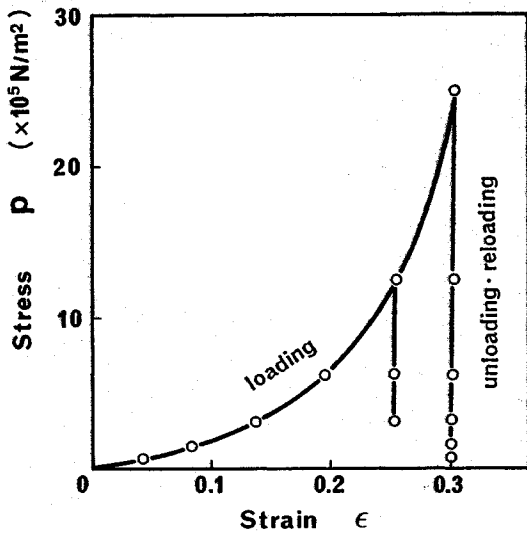


Fig.3 Stress-strain curve of an unsaturated sandy loam derived from Fig.2

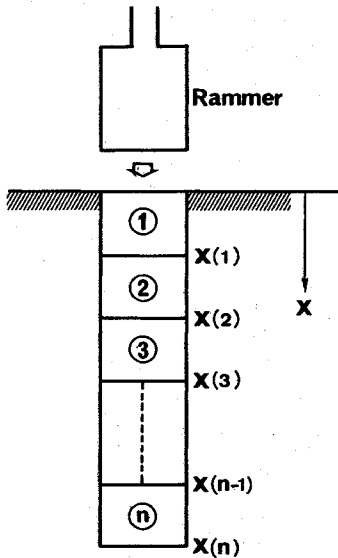


Fig.4 Element discretization for rammer-soil system

#### 4. 数値計算手法

以上の仮定のもとにランマーを地表面に衝突させるときに地中に発生する塑性波頭の伝播と土の締固めを数値計算により考察を行う。まず計算の基本的考え方について記す。

いま Fig.4 に示すように地中の深さ方向に①, ②, … ① という  $n$  個の要素を考える。各要素の土はその間隙比が互いに異なってよいが、1つの要素内では一定とする。地表面にランマーが衝突すると、まず要素①はランマーに押される。このときランマーの能力が十分大き

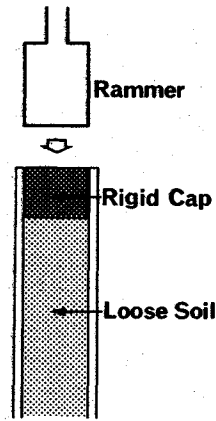


Fig.5 An assumption on rigid cap in calculation

いと要素①の土は締固められる。しかし、ランマーの能力が小さい場合には要素①の土は締固められず、ランマーの効果は圧縮波の波頭となり瞬時に（無限大の速度で）要素①内を通り、要素②へ伝播する。これはちょうど筒の中にゆる詰め土を満たし、その上に剛な物体でキャップをした柱の上端をランマーで打撃した場合、剛なキャップは変形せず、下へ移動するだけでランマーの打撃効果は下の土へ伝えられるという現象と同じと考えることができる (Fig.5 参照)。

このようにしてランマーの作用により締固めが生じた要素では間隙比の減少に対応して応力が発生する。この応力は上方の要素内を瞬時に（無限大の速度で）伝播し、ランマーの底面にまで伝えられる。このため、ランマーは地盤から抵抗を受けることになり、ランマーの速度は小さくなる。さらにこの減少した速度でランマーが引続きその効果を地表面に伝える、…として同じ操作を繰り返す、地中での締固め現象を追う。この計算過程では各要素の土がランマーの効果を受けて締固まるか、あるいは剛体として動くかの判定をいかにして行うかが問題になる。先に設定した条件に従えば、この判定には  $e \sim \log p$  面上での  $(p, e)$  の位置を調べればよいわけであるが、今回考えた計算手順では後述するように地中での圧力  $p$  を決定する前にこの判定を行う必要があるため、直接  $e \sim \log p$  関係を判定の基準に用いることができない。そこで、今回は以下の判定方法を用いた。

ランマーの作用を受けた土要素はランマーの速度  $v_R$  で下方に押される。この速度  $v_R$  が、考えている土要素が過去において受けた最大の速度  $v_h$  (以下、最大履歴速度と呼ぶ) より小さければこの要素は剛体として動き、逆に大きければ締固めが生じると判定を行うことにする。最大履歴速度  $v_h$  の大きさは、現在の間隙比とランマーの質量から以下のようにして求めることができる。ただし、計算仮定においてその記録があれば直接その値を用いればよい。

いま、質量  $m$  (kg)、底面積  $A$  (m<sup>2</sup>) のランマーを非常にゆるい土の上に静的に載せたときに土の間隙比が  $e_s$  になったとする。このとき  $e_s$  は式 (1) より次式を満たす。

$$e_A - e_s = K \cdot \log \frac{m \cdot g}{A \cdot p_A} \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 $e_A$ 、 $p_A$  は Fig.2 の  $e \sim \log p$  関係の正規領域における任意の基準点の間隙比と圧力を、また  $g$  は重力加速度 (m/sec<sup>2</sup>) を表す。この状態は地表面に静的にランマーを載せることにより得られるので、ランマーの衝突速度  $v_R = 0$  により得られたと考えることにする。

間隙比が  $e_s$  より小さい状態の土を同じランマーで作ろうとすれば当然、 $v_R > 0$  を満たす速度でランマーを地表面に落とさなければならない。逆の見方をすれば、間隙比が  $e_s$  より小さい土があった場合、その土は過去において  $v_R > 0$  なる速度でこのランマーの落下を受けたと見なすことができる。

そこで、現在の間隙比が  $e_1$  ( $e_1 < e_s$ ) なる土の最大履歴速度  $v_h$  を以下のように求める。まず、間隙比  $e_s$  の状態を  $\varepsilon = 0$  とすると、間隙比  $e_1$  のときの土中のひずみ  $\varepsilon_1$  は式 (4) において  $e_B = e_s$  とおくことにより (以下、式 (5) でも  $e_B = e_s$  とする)、次のように表わされる。

$$\varepsilon_1 = \frac{e_s - e_1}{1 + e_s} \dots\dots\dots (7)$$

$\varepsilon = 0$  なる基準状態における土の密度  $\rho_s$  (kg/m<sup>3</sup>) は、 $G_s$  を土の真比重、 $w$  を含水比 (%),  $\rho_w$  を水の密度 (kg/m<sup>3</sup>) とすると次式のように表わされる。

$$\rho_s = \frac{G_s \cdot \rho_w}{1 + e_s} \cdot (1 + w) \dots\dots\dots (8)$$

また、基準状態における波頭の伝播速度  $c_s$  は式 (5) に  $p = m \cdot g / A$  を使い、これと式 (8) を式 (3) に代入することにより得られる。

$$c_s = \sqrt{2.30 \cdot \frac{(1 + e_s)^2 \cdot m \cdot g}{G_s \cdot \rho_w \cdot A \cdot K \cdot (1 + w)}} \dots\dots\dots (9)$$

ただし、 $e_s$  は式 (6) より求まる間隙比である。

一般に、媒質の粒子速度  $v$  と波頭の伝播速度  $c$ 、ひずみ  $\varepsilon$  の間には次式の関係が成立する<sup>7)</sup>。

$$v = c \cdot \varepsilon \dots\dots\dots (10)$$

上式に  $c = c_s$  (式 (9)) と  $\varepsilon = \varepsilon_1$  (式 (7)) を代入することにより間隙比  $e_1$  なる土の最大履歴速度  $v_h$  を求めることができる。考えている土要素がランマーの作用により締めまるか否かは、ランマーの速度  $v_R$  とこの最大履歴速度  $v_h$  との大小関係により決まる。すなわち、

$$\begin{aligned} v_R > v_h &: \text{土要素は締めまる。} \\ v_R \leq v_h &: \text{土要素は剛体として動く。} \end{aligned} \dots\dots\dots (11)$$

$$v_h = \sqrt{2.30 \cdot \frac{m \cdot g \cdot (e_s - e_1)^2}{G_s \cdot \rho_w \cdot A \cdot K \cdot (1 + w)}} \dots\dots\dots (11')$$

と判定する。なお、締め前前の土が非常に緩く、 $e_1 > e_s$

の場合には静的にランマーを載せただけでも締めめが生じる。この場合の初期状態に対する最大履歴速度については、負の値を考えず、 $v_h = 0$  と考えることにする。

### 5. 計算過程の定式化

以上の流れに沿ってランマーの衝撃による土の締めめ現象を数値計算によりシミュレートするときの定式化を行う。いま質量  $m$  (kg)、底面積  $A$  (m<sup>2</sup>) のランマーが  $v_{R0}$  (m/sec) という初速度で地表面に衝突する場合を考える。地盤条件としては、土の初期間隙比  $e_0$ 、初期密度  $\rho_0$  (kg/m<sup>3</sup>) で一様とする (諸量に付した添字の 0 はそれが初期状態に関する量であることを表わす)。また、地表面を原点として鉛直下向きに  $x$  座標をとる (Fig.4 参照)。

まず、初期状態の土の最大履歴速度  $v_{h0}$  と波頭の伝播速度  $c_0$  を求める。 $v_{h0}$  は初期間隙比  $e_0$  から式 (11') を用いて計算する ( $e_1 = e_0$  とおく)。また波頭の伝播速度  $c_0$  は式 (2)、(5) に  $e = e_0$  を代入し、この結果と初期密度  $\rho_0 (= G_s \cdot \rho_w \cdot (1 + w) / (1 + e_0))$  を式 (3) に適用することにより次式により求められる。

$$c_0 = \sqrt{2.30 \cdot \frac{(1 + e_s) \cdot (1 + e_0)}{G_s \cdot \rho_w \cdot K \cdot (1 + w)} \cdot p_A \cdot \exp\left(2.30 \cdot \frac{e_A - e_0}{K}\right)} \dots\dots\dots (12)$$

$t = 0$  で  $v = v_{R0}$  という速度でランマーが地表面に衝突するとき、微小時間  $\Delta t$  の間は  $v_{R0}$  という速度を保つものとする。このとき  $v_{R0} \leq v_{h0}$  であれば一様な地盤全体にわたって締めめは生じない。よって、以下の議論では  $v_{R0} > v_{h0}$  の場合について考える。

シミュレーションでは、上記の初期状態から、波動の伝播、土要素の変形ならびにランマーの運動を時間間隔  $\Delta t$  ごとの変化として計算する。要素の大きさの決め方は、初期状態において微小時間  $\Delta t$  の間に波頭は  $x = c_0 \cdot \Delta t$  の距離を伝わるので、この  $x$  を要素の厚さとする。いま、 $i$  ステップ目 (時刻  $t = \Delta t \cdot (i - 1) \sim \Delta t \cdot i$ ) にランマーが  $v_R(i)$  の速度で鉛直下向きに運動しているとする。このとき、 $j$  番目 ( $j = 1, 2, 3, \dots$ ) の要素の間隙比が  $e(i, j)$ 、波頭の伝播速度が  $c(i, j)$ 、また、最大履歴速度が  $v_h(i, j)$  であったとする。以降の計算手順を Fig.6 のフローチャートにそって説明する。

ランマーが地表面に衝突すると、波頭は地中の各要素を  $c(i, j)$  なる速度で伝播していく。計算では波頭の伝播過程において要素①から順次締めめが生じるかどうかを式 (11) により判定する。このとき、第  $j - 1$  番目の要素までは締めめが生じないと判定され、第  $j$  番目の要素で初めて締めめが生じると判定されたとする。この場合、ランマーの効果は無限大の速度で  $1 \sim j - 1$  番目の要素内を伝播し、 $j$  番目の要素に達する ( $1 \sim j - 1$  番目の要素は剛体として動き、変形しないと考える)。波頭が

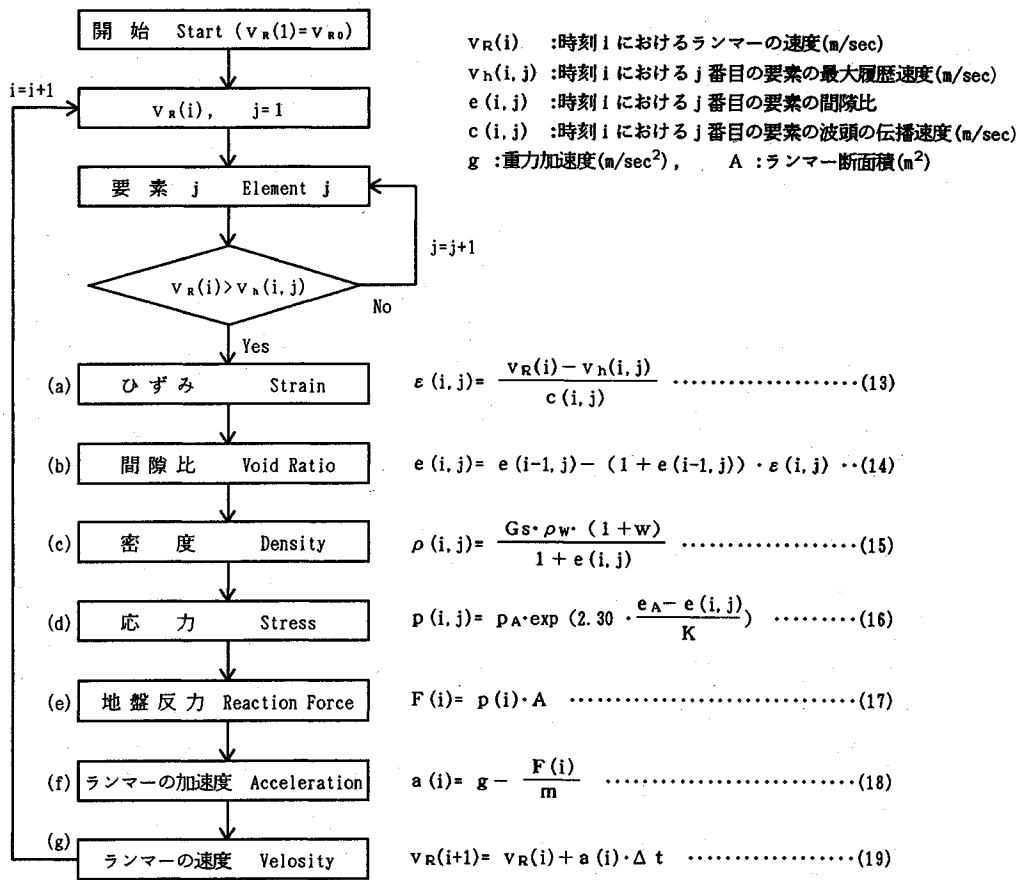


Fig.6 A process of calculation for propagation of plastic front and simultaneous soil compaction caused by rammer blow on soil surface

到達した要素①では以下の変形と応力を生じ、ランマーは地盤から抵抗を受けその速度を変化させる。

(a) 要素①内の粒子は  $v_R(i)$  という速度で運動する。このとき要素①内に生じるひずみ  $\epsilon(i, j)$  は、式 (10) より式 (13) で表わされる。ただし、式 (13) ではランマーのもっている速度  $v_R(i)$  のうち要素①の最大履歴速度  $v_h(i, j)$  の分は締固めに寄与せず、これを差し引いた速度で土が締固められると考えている。

(b) 式 (13) で表わされるひずみにより、要素①の土は  $\Delta t$  の間に式 (14) で表わされる間隙比  $e(i, j)$  にまで圧縮される。

(c) 要素①の土の密度は式 (15) で表わされる  $\rho(i, j)$  となる。

(d)  $\Delta t$  の間に要素①に発生する応力  $p(i, j)$  は式 (16) で表わされる (式 (2) より)。

(e) 要素①で発生した応力は無限大の速度で上の  $1 \sim j-1$  の要素を伝わりランマーの底面に地盤からの抵抗として作用する。このときランマーが土から受ける抵抗  $F(i)$  は式 (17) のようになる。

(f) ステップ  $i$  におけるランマーの加速度  $a(i)$  は式 (18) で表わされる。

(g) このステップの終了時におけるランマーの速度は、式 (19) で表わされる  $v_R(i+1)$  になる。

これで第  $i$  ステップ目の計算が終了したことになる。圧縮が生じた要素①では波頭の伝播速度も変化するので、これを圧縮後の間隙比  $e(i, j)$  に対して計算しておく必要がある (式 (12) に  $e_0 = e(i, j)$  を代入する)。また、この場合、要素①の最大履歴速度は  $v_R(i)$  に変わる。  $i+1$  番目のステップでは、ランマーは新たに求められた速度  $v_R(i+1)$  で地中に貫入することになる。以下、上記と同じプロセスを繰り返し、  $\Delta t$  毎の変化を計算する。

### 6. 数値計算による地中の締固め状況の検討

前節で述べた定式化にもとづき、実際にランマーの落下による地中の締固め現象を計算により求めてみる。

計算の条件としては、「ランマー重量×落下高さ＝一定」とし、ランマー重量と落下高さとの組合せを種々に

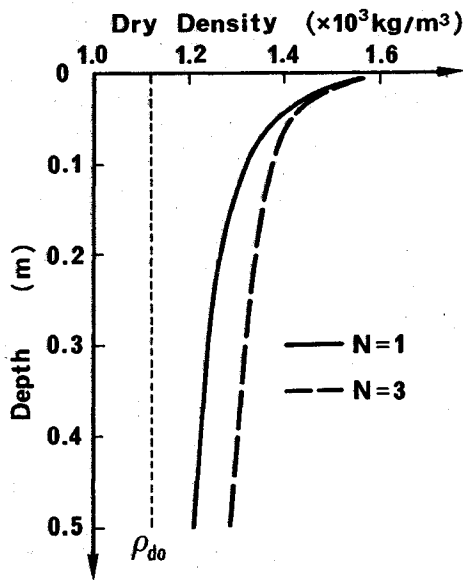


Fig.7 Effect of number of blows on density profile of a compacted soil  
(Calculation result :  $m=2.5$  kg,  $h=0.3$  m)

変化させてランマーを落下させ、地中の締固め状況の違いを調べる。これは、突固め試験において「ランマー重量×落下高さ」で表わされるランマーの落下エネルギーの値が同じでもその組み合わせにより得られる土の締固め密度に差があるという実験結果<sup>3)</sup>を考察するために行うものである。ランマー重量ならびに落下高さは JIS A 1210 の突固め試験第 1 法で用いられる 2.5 kgf (24.5 N) × 0.3 m を基準として、これより個々の要素を増減させて計算を行った。その他のパラメータとしては、以下のように設定した。

ランマーの底面積  $A=0.002$  m<sup>2</sup>

計算時間間隔  $\Delta t=0.0005$  sec

土の真比重  $G_s=2.83$ , 含水比  $w=8.15\%$

土の  $e-\log p$  関係の正規部分の直線の傾き  $K=0.4$

土の初期密度  $\rho_{d0}=1.12$  g/cm<sup>3</sup> (一様に分布)

水の密度  $\rho_w=1.00$  g/cm<sup>3</sup>

計算結果は、地中の密度分布 (乾燥密度で表示) の形で出力させ、特に地表面より 5, 10, 30 cm の深さまでの乾燥密度の平均値 ( $\rho_{d5}$ ,  $\rho_{d10}$ ,  $\rho_{d30}$ ) をも求めた。

Fig.7 は、重量 2.5 kgf (24.5 N) のランマーを 0.3 m の高さから落下させた場合の地中の締固め状況に関する計算結果を示したものである。実線が突固め回数 1 回の場合であり、破線が同じ土を 3 回突固めた場合の結果である。繰り返しの突固めは、1 回目の突固めが終わった状態の地中の密度分布を初期状態として、この上に 2 回目の落下を、さらに 2 回目の落下により得られた土の上に 3 回目の落下をという手順で地中の密度分布を計算し

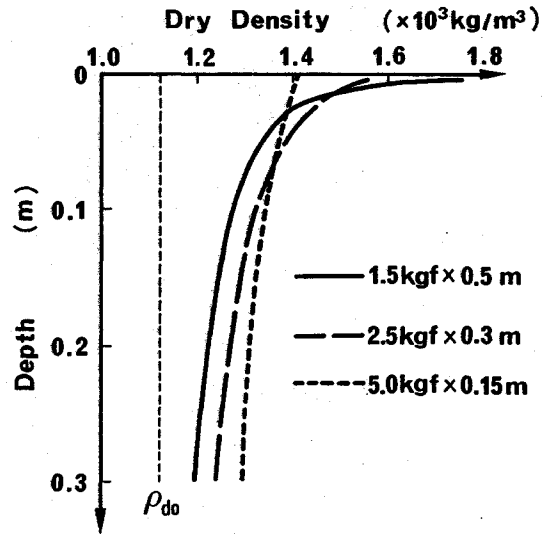


Fig.8 Calculation result of density profile of compacted soil—effect of loading conditions (rammer weight and height of falling)

て行けば求めることができる。

この図から、地中の密度分布は地表面で大きく地中深くなるほど密度が小さくなり初期状態に漸近すること、また、繰り返しの突固めにより地中密度は増加するが、その増加の傾向は地中の上層より下層部で著しいことが推察される。これは前述のように、上層部の土は 1 回目の突固めで十分締固まるので、2 回目、3 回目の突固めでは上層部の土は剛体として動き、ランマーの効果が直接下層部に伝えられるためと考えられる。

Fig.8 は、地中土の締固め後の密度分布をランマーの落下条件により比較したものである。図中の実線が重量 1.5 kgf (14.7 N) のランマーを 0.5 m の高さから、また破線と点線はそれぞれ 2.5 kgf (24.5 N) のランマーを 0.3 m の高さからと、5 kgf (49.0 N) のランマーを 0.15 m の高さから落下させた場合の結果である。

この図では「重量×落下高さ」で表わされるランマーの落下エネルギーが一定でも、ランマーの落下により得られる地中土の密度分布は異なり、軽いランマーを高いところから落とした場合には表層部の土がよく締固まるが下層部まではその効果が及ばず、逆に、重いランマーを低いところから落とした場合には、上層での締固め量は小さいが下層までその効果が伝わり、比較的一様な密度分布となるという結果が得られた。

Fig.9 は、ランマーの落下エネルギー=一定 (ランマー重量×落下高さ=7.35 N·m) の条件のもとで、ランマーの重量と落下高さの組合せを変えた場合、地中の締固め土の深さ方向の平均密度がどの程度異なるかを調べたものである。図の横軸にはランマーの重量と落下高さを併記しているが、「ランマー重量×落下高さ=一定」とい

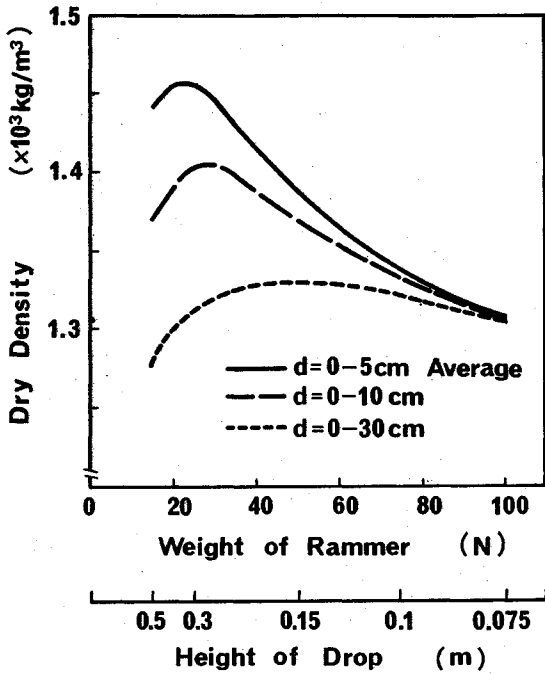
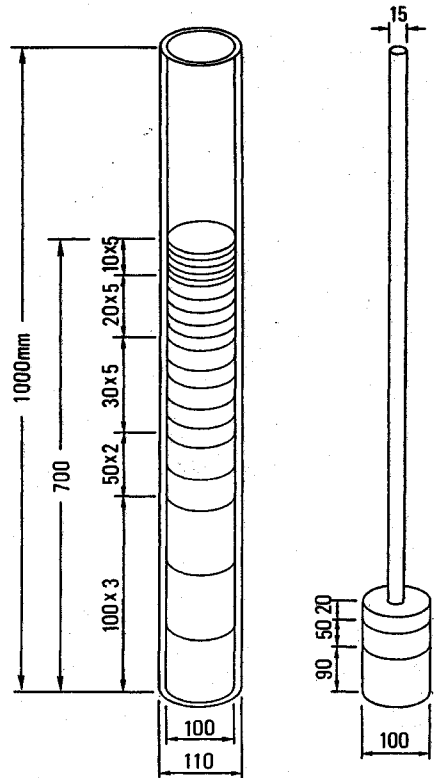


Fig. 9 Calculation result of average density in the soil on the condition that weight×height=constant

う条件を満たすように座標軸を取っている。計算結果を示す3本の線の違いは平均密度を求める際の対象とする地表からの深さを表わしており、実線が地表から5 cm深さまで、破線と点線はそれぞれ地表から10 cm、30 cm深さまでの平均密度を表わしている。この図では、地表から5 cm深さまでの浅いところではランマー重量が小さく落下高さが大きい方がよく締固まり、逆に重量が大きく落下高さが小さい場合の密度はかなり低いという傾向が現れている。これに対し、地表面から30 cm深さまでの平均密度を考えると、ランマー重量5 kgf (49.0 N) 付近で密度はピークを示し、「軽ランマー×高落下高さ」の組合せではあまり締固まらないことが推測される。

なお、Fig. 9をみると、JIS A 1210で規定されている「2.5 kgf (24.5 N) ランマー×0.3 m落下高さ」は5 cm深さの平均密度で最大となっている。JISで規定されている1000 ccモールドの高さが約13 cmであり、この中に3層に分けて土を締固めることを考えると「2.5 kgf (24.5 N) ランマー×0.3 m落下高さ」は、この突固め条件に関してはかなり効率の良い組合せであると判断できる。ただし、この結果は1つの計算結果であり、あらゆる土に対して成立するものではなく、また今回の計算結果は一次元でのみ考えているが、実際の突固めがモールドにより拘束されているとはいえ完全な一次元現象とみなせないことから、この結果はあくまで推定の域



(a) An acrylic resin pipe (b) Rammer

Fig. 10 Experimental apparatus

を出ないものと考えている。

## 7. 実験による検証

次にこの数値計算手法の妥当性を検討するため、室内実験を行った。

### (1) 実験方法

Fig. 10 (a)に示す内径100 mm、外径110 mm、長さ1000 mmのアクリルパイプに土試料を700 mmの高さまで入れ、その上にパイプの内径とほぼ等しいランマーを落下させ、得られる土の密度分布を測定した。ランマーはFig. 10 (b)に示すように、リング状の重りを重ね合わせたもので、重りの組合せによりその重量を4段階に変化させることができる。土試料は土表面から10 mmの厚さで5層、その下に20 mm厚さで5層、30 mm厚さで5層、50 mm厚さで2層、最下層は100 mm厚さ3層の計20層に分けパイプ内にセットした。このとき、各層ごとに10.6 kgfのランマーを静的に載せ初期状態とした。なお、各層の境界にはリング状の薄紙(リング幅2 mm)を挟み、マーカーとした。また、密度分布は各層境界のマーカーの間隔の値と、予め測っておいた各層の土重量から算出した。ただし、ここでは密度分布をアクリル筒内で締固められた土試料の単位体積重量の深

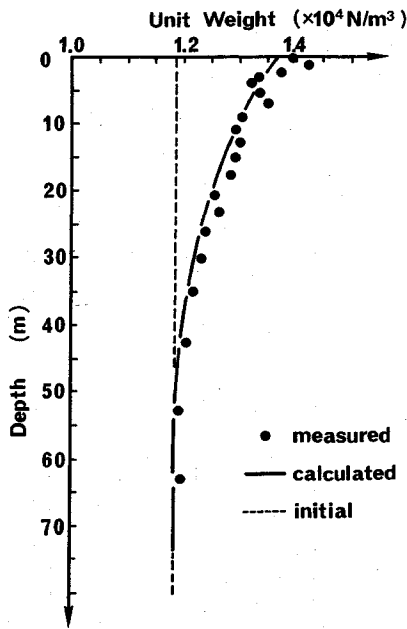


Fig.11 Comparison of experimental results with the calculation for density profile of compacted soil ( $m=7.8 \text{ kg}$ ,  $h=0.5 \text{ m}$ )

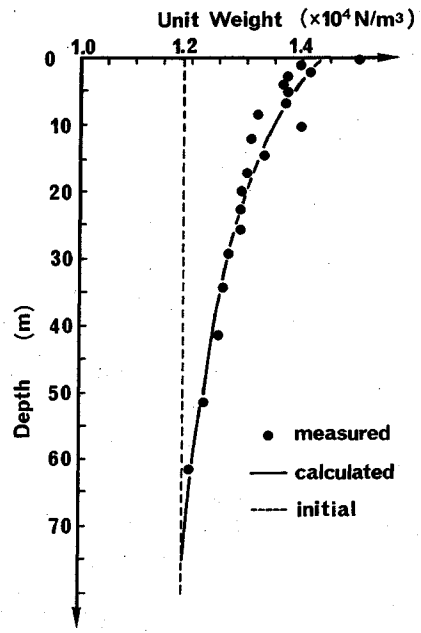


Fig.12 Comparison of experimental results with the calculation for density profile of compacted soil ( $m=10.6 \text{ kg}$ ,  $h=0.7 \text{ m}$ )

さ方向の分布で表わすこととする。

実験では締固めにともなう土の密度分布変化の他に、衝突時のランマーの振動挙動を計測するために、ランマーに圧電素子タイプの加速度変換器を取り付けた。

実験では、上記の方法にしたがいアクリルパイプの中にセットした試料土の上にランマーを落とし、締固め後のマーカーの間隔をメジャーで 0.5 mm まで読むことにより密度分布を求め、同時に実験時のランマーの加速度波形を加速度変換器から波形解析装置に出力させた。ランマーの落下時には、衝撃载荷によりアクリルパイプが側方に変形することも考えられるので、アクリルパイプを隙間なく包む鋼製のガイドを使用し、一次元変形条件が保たれるようにした。実験では落下条件による密度分布やランマーの振動挙動の違いを調べるため、重量を 2.6, 5.4, 7.8, 10.6 kg (25.48, 52.92, 76.44, 103.88 N) の 4 段階、落下高さを 30, 50, 70 cm の 3 段階に変化させて、これらの数種の組合せに対して締固め後の土の密度分布とランマーの加速度を計測した。

実験で用いた試料は砂質シルト (SF) で比重 2.68, 含水比 15.5% である。この試料に関して側方拘束の一次元圧縮を行ったところ、前述の Fig.2 と同じく除荷・再載荷領域における  $e \sim \log p$  関係の傾きが、載荷領域のそれに比べて非常に小さいこと、また Fig.3 と同じく除荷・再載荷過程における応力 $\sim$ ひずみ曲線の傾きが載荷領域に比べ非常に大きいことが確認された。圧縮試験から得られた載荷領域の  $e \sim \log p$  関係を式 (1) の形

で表わすと式 (20) が得られた。なお、式の下 ( ) 内は、実験と比較するための計算に用いるパラメーターをこの式から取り出して記述したものである。

$$1.33 - e = 0.605 \cdot \log \frac{p}{10^5} \dots \dots \dots (20)$$

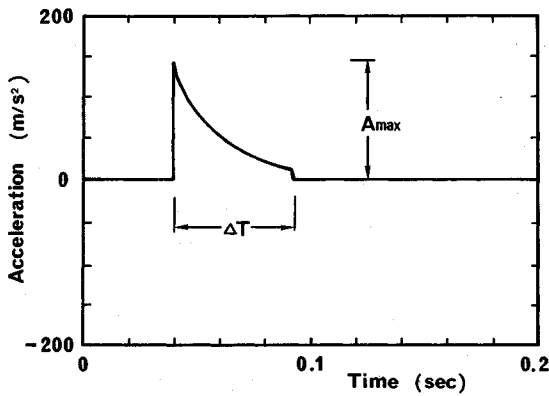
$$(K=0.605, e_A=1.33, p_A=1.0 \times 10^5 \text{ N/m}^2)$$

(2) 実験結果と計算結果

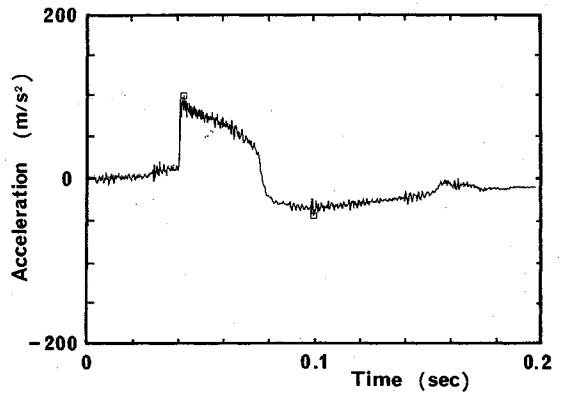
Fig.11, Fig.12 に密度分布に関する実験ならびに計算結果の一例を示す。このうち Fig.11 は、7.8 kg のランマーを 50 cm の高さから落下させた場合の結果を、また Fig.12 は 10.6 kg のランマーを 70 cm の高さから落下させた場合の結果である。両図ともプロット点は締固め後の実験結果を、実線はその計算結果を、また、点線は初期密度分布を表わす。いずれの実験においても初期密度については深さ方向に比較的一様な分布が得られた。これらの図では、地表面付近の限られた部分では実測結果の方が計算結果より大きな値を示すが、その下の大部分については計算により得られた密度分布は実測結果とよく一致している。他の落下条件についても、若干、地表面付近で実測値の方が計算値より大きくなる傾向はあるものの、ほぼ同様の一致がみられた。

Fig.13 (a) に衝突時のランマーの加速度波形の計算値の一例を、また同図 (b) にその実験結果を示す。いずれの図も衝突した瞬間に加速度はピークを示し、その後減少する形を示しているが、計算結果の方が加速度の大きさの時間に対する減衰が著しいようである。落下条





(a) Calculated wave



(b) Measured wave

Fig.13 Wave of acceleration of rammer during impact ( $m=10.6$  kg,  $h=0.7$  m)

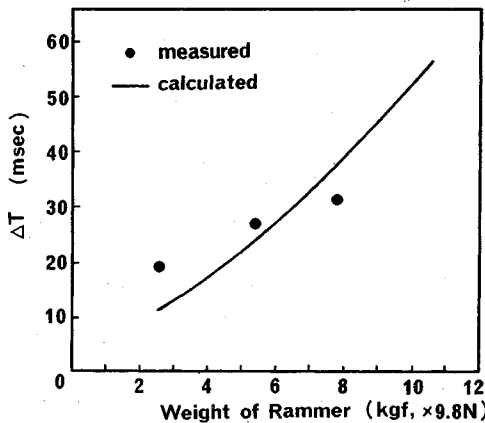


Fig.14 Comparison of the experimental results with the calculated results for  $\Delta T$  vs. weight of rammer ( $h=0.5$  m)

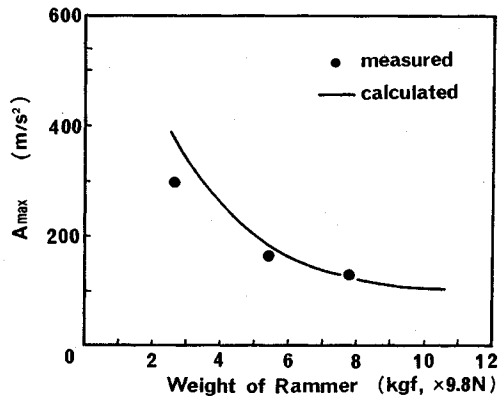


Fig.15 Comparison of the experimental results with the calculated results for  $A_{max}$  vs. weight of rammer ( $h=0.5$  m)

件による波形の違いを調べるためこの波形の継続時間 (Fig.13 (a) 中の  $\Delta T$ ) と加速度のピーク値 (Fig.13 (a) 中の  $A_{max}$ ) に着目し、3種のランマー重量によるこれら波形特性の違いを整理すると Fig.14, Fig.15 のようになった。このうち Fig.14 はランマー重量が波形の継続時間  $\Delta T$  に及ぼす影響を、また Fig.15 は、同じくランマー重量が加速度のピーク値に与える影響を表わしている。いずれも●が実測値を、実線が計算結果を示している。ただし、計算結果については種々の落下条件に対する加速度波形を計算により求め、そこから求められる加速度の継続時間やピーク値をプロットしたものを曲線で近似したものである。これらの図では、実測結果と計算結果とは比較的良好に一致しているが、計算結果の方が実測結果よりランマー重量による変動が大きく現われているようである。落下条件のうち落下高さが加速度波形に及ぼす影響について同様の整理を行ったところ、実測結果、計算結果ともランマー重量ほどは顕著な影響を受けないという結果が得られたが、ランマー重量のとき

と同じく計算結果の方が実測結果より高さによる変動が大きいという傾向がみられた。この原因としては、今回は土が衝撃締固めに対し剛・塑性的な挙動を示すと考えたが、厳密には弾・塑性的な挙動に近く、この弾性部分の影響を考慮できていないところに問題があるのではないかと考えている。

## 8. 結 論

本研究では、ランマーが地表面に衝突したときに地中に生じる土の衝撃締固めを塑性波頭の伝播とそれともなう土の圧縮現象と考え、土の衝撃締固め機構を理論的に考察し、その結果を2, 3の実験結果と比較した。解析では、ランマーによる塑性波頭が地中で一次的に伝播すると仮定し、土を一次元圧縮した際に得られる間隙比-圧力関係 ( $e-\log p$  関係) を用いて波頭の伝播に関する考察を行った。塑性波頭の伝播の解析における基本的考え方は以下の通りである。

1) 地中の土を深さ方向に配列された要素に分割し、土

の要素から順次波頭の伝播と圧縮を計算する。

2) 個々の要素に伝播してきた波頭により生じる粒子速度がその要素が過去において受けた最大の粒子速度(最大履歴速度)より大きければその要素の土は締固められ、逆に小さければその要素は締固められることなく剛体として動く。

3) 各要素を伝わる波頭の手速度は、 $e \sim \log p$  関係から得られる応力 $\sim$ ひずみ関係を用いて計算する。各要素で締固めが生じない(その要素が剛体として動く)場合には、その要素内での波頭の伝播速度を無限大とし、波頭は瞬時にして次の要素に伝播する。

この考え方のもとに、ランマーが地表面に衝突したときの土の締固め現象をランマーの重量、落下高さをパラメーターとして時間ステップを追って計算し、土の衝撃締固め機構の解明を試みた。その結果、以下のことが推察された。

1) ランマーの重量が小さく、落下高さが大きいときには地表面で大きな締固め効果が得られるが、地中の深さ方向の密度の減衰が大きく、ある程度の深さではほとんど締固められない。

2) 逆に、ランマー重量が大きく落下高さが小さいときには著しく大きな締固め効果は得られないが、地中深部にまでその効果が伝わり、地中の深さ方向に対して比較的一様な締固めが得られる。

3) 上記1), 2)に関連して「ランマー重量 $\times$ 落下高さ」で表わされるランマーの落下エネルギーの値が同じでも、その組合せにより締固め密度が異なり、所定の深さを締固めるのに最適な組合せが存在する。JIS A 1210 第1法で規定されているランマー重量(2.5 kgf-24.5 N)と落下高さ(0.3 m)は、モールドの高さは、かなり効率の良い組合せである。

次に数値計算の妥当性を検証するためにアクリルパイプの中に試料土を詰めて、この上にランマーを落とすという方法により一次元の衝撃締固め実験を行った。実験

では締固め後の土の深さ方向の密度分布ならびに衝撃時のランマーの加速度を測定し、計算結果との比較を行った。この結果、多少のばらつきはあるものの、締固め土の密度分布とランマーの加速度は実験と計算結果とで比較的良好な一致をみた。

おわりに

土の衝撃締固め機構を解明することを目的として若干の考察を行ったが、波頭の伝播ならびに変形を一次元でのみしか考えておらず、実際の現象を十分にシミュレートできるまでには至っていない。今回の考察の3次元への拡張が当面の課題と考えている。なお、本研究を進めるにあたりご助言をいただいた(財)土木研究センター 友昭氏、ならびに大阪市立大学 大島昭彦氏に感謝の意を表す。

#### 参考文献

- 1) 竹山壽夫著：初等塑性力学，丸善，pp.300~328，1969年。
- 2) Th. Von Karman and P.E. Dawez : Propagation of Plastic Deformation in Solids, Proc. VI, Int. Congr. for Applied Mechanics, 1946.
- 3) M.P. White and L. Griffis : The Propagation of Plasticity in Uniaxial Compression, Journal of Applied Mechanics, Vol.15, p.256, 1948.
- 4) M.P. White and L. Griffis : Permanent Strain in a Uniform Bar due to Longitudinal Impact, Journal of Applied Mechanics, Vol.14, pp.A337~343, 1948.
- 5) M.G. Salvadori, R. Skalak and P. Weidlinger : Waves and shock in Locking and Dissipative media, ASCE, EM2, pp.77~105, April, 1960.
- 6) 西原晃・平山修治・大野勲：動的締固め土の圧縮・強度特性，不飽和土の工学的性質研究現状シンポジウム発表論文集，土質工学会，pp.155~160，1987年
- 7) J.I.M. カチャノフ著，大橋義夫訳：塑性理論の基礎，養賢堂発行，pp.373~398，1969年
- 8) 島昭治郎，建山和由：土の締固めにおける突固め試験の適用性に関する研究，テラメカニクス第5号，pp.1~6，1985年

(1991.6.3 受付)

## APPLICATION OF PLASTIC WAVE PROPAGATION TO SOIL COMPACTION BY IMPACT

Kazuyoshi TATEYAMA, Shojiro HATA and Masaru MORIKAWA

Soil compaction caused by an impact load such as rammer falling on soil surface is theoretically studied by regarding it as the phenomenon of plastic front propagation and simultaneous soil compaction during propagation process. Some calculation is carried out to investigate the relationship between loading condition such as rammer weight or height of falling and density profile which is turned out inside the soil by rammer impact, where a wave front is idealized to propagate in one-dimensional direction. Some experiment is carried out to inspect the numerical method with a rammer falling on soil packed in an acrylic resin pipe. Approximate agreement between measured and calculated result was obtained on both the density profile of the compacted soil and dynamic behavior of a rammer during impact.