

# 重錘落下締固めにおける地盤への重錘貫入と衝撃力

大島昭彦\*・高田直俊\*\*

概要：重錘落下による土の衝撃締固めにおいて、実測データから重錘貫入量が重錘の衝突速度と衝撃持続時間に比例すること、衝撃持続時間は落下高に無関係で、単位面積当りの重錘質量に比例することを示した。これから重錘貫入量は重錘運動量に比例し、重錘底面積に反比例することが導かれる。この傾向は遠心模型実験からも確かめられ、通常の室内締固め試験にも認められた。これらの結果から重錘貫入時の最大衝撃加速度、最大衝撃力および最大衝撃応力の推定式を提案した。

Key Words : compaction, impact force, ram momentum, heavy tamping, sandy ground

## 1. はじめに

地盤の締固めは土構造物の品質を支配する重要な問題である。これは一般に静的締固めと動的締固めに分けられるが、地盤の表層から行う動的締固め工法は、振動ローラーに代表される振動締固めとランマー、タンパーに代表される衝撃締固めに大別される。後者は主に重錘落下による衝撃力によって土を締固めるもので、規模の大きさに差はあるものの、重錘落下締固め工法や室内締固め試験はその代表的なものである。

重錘落下による土の締固め機構は、これまで打撃エネルギーの観点から取り扱われてきたが、エネルギーを構成する重錘重量、落下高、打撃回数が締固め効果に与える影響水準が同一である保証はない。筆者らはこれまでに重錘落下締固め工法の遠心模型実験から、その締固め効果は打撃エネルギーでなく、重錘が打撃時に持っている運動量に強く依存することを報告した<sup>1),2)</sup>。

本論文は、これを具体的に調べるために、重錘落下による衝撃力、重錘貫入がどのように生じているか、また衝撃持続時間が何に依存するかを実測データから考察した。その結果から、重錘貫入量は重錘運動量に比例し、重錘底面積に反比例すること、また打撃孔の体積は重錘運動量に比例すること、これらが遠心模型実験結果を説明すること、通常の室内締固め試験にも当てはまることを示した。また同様の考察から、最大衝撃加速度、最大衝撃力および最大衝撃応力の推定式を提案した。

## 2. 地盤への重錘貫入現象<sup>3)</sup>

土のような塑性体への重錘衝撃問題では、エネルギーロス（塑性変形、熱、音エネルギー等）が大きいので、

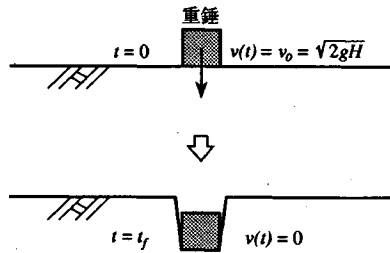


図-1 地盤への重錘貫入

力学的エネルギー保存則は成立せず、運動量保存則が支配法則となる。ここでの対象をゆるい半無限均一地盤とし、重錘のはね返りのない完全非弾性衝突を考える。

今、図-1に示すように質量  $m$  の重錘が落下高  $H$  から自由落下し、衝突速度  $v_0 (= \sqrt{2gH})$  で地盤に衝突した後、地盤に貫入し、時間  $t_f$  (衝撃持続時間と呼ぶ) 後に静止する場合を考える。

運動量保存則から重錘が地盤に衝突したときに持っている運動量  $mv_0$  は、重錘が静止するまでに働いた力積に等しいから、

$$\int_0^{t_f} F(t) dt = mv_0 \dots \dots \dots (1)$$

となる。この  $F(t)$  がいわゆる衝撃力で、静止するまで図-2のように刻々変化し、 $t_f$  までの時間積分は運動量  $mv_0$  に等しい。ここで重錘の鉛直衝撃加速度を  $\alpha(t)$  とすると、運動の第2法則から、

$$F(t) = m\alpha(t) \dots \dots \dots (2)$$

であるから、式 (1)、(2) から、

$$\int_0^{t_f} \alpha(t) dt = v_0 \dots \dots \dots (3)$$

となる。ただし、 $\alpha(t)$  は速度と逆向きを正の値としている。すなわち図-3に示すように  $\alpha(t)$  の  $t_f$  までの時間積分は衝突速度  $v_0$  に等しい。ここで衝撃加速度の波

\* 正会員 工修 大阪市立大学助手 工学部土木工学科 (〒558 大阪市住吉区杉本 3-3-138)

\*\* 正会員 工博 大阪市立大学教授 工学部土木工学科

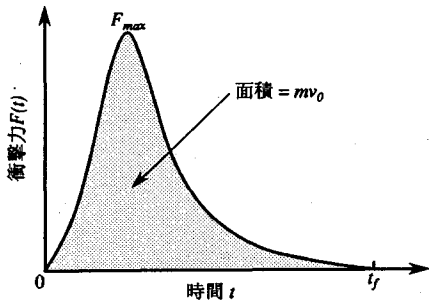


図-2 重錘の衝撃力波形

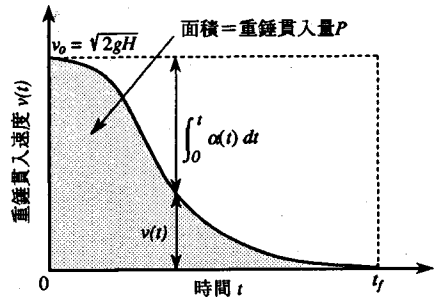


図-4 重錘の貫入速度波形

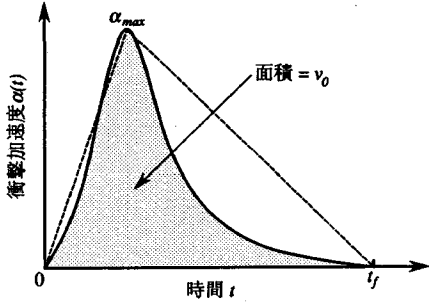


図-3 重錘の衝撃加速度波形

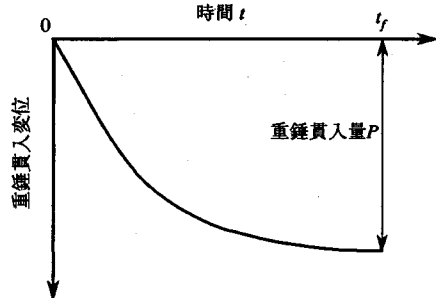


図-5 重錘の貫入変位波形

形そのものは地盤状態に依存すると考えられるため、最大衝撃加速度と衝撃持続時間の積  $\alpha_{max}t_f$  を基準にすれば、式(3)は次式のように単純化できる。

$$a_1 \alpha_{max} t_f = v_0 \dots \dots \dots (4)$$

ここに、 $a_1$  は加速度波形を表わす係数(無次元量)で地盤状態に依存し、 $0 \sim 0.5$ の値をとる。 $a_1 = 0.5$ の場合は図中に破線で示した  $\alpha_{max}$  を頂点とする三角形に相当し、これを越えることはない。

次に、衝撃加速度  $\alpha(t)$  を時間積分したものは、重錘の地盤貫入中の速度の減少量を表す。初期速度が  $v_0$  であるから、重錘の貫入速度  $v(t)$  は図-4に示すように、

$$v(t) = v_0 - \int_0^t \alpha(t) dt \dots \dots \dots (5)$$

となる。この速度  $v(t)$  を時間積分したものが、図-5に示すように重錘貫入変位であり、 $t_f$  まで積分すると最終的な重錘貫入量  $P$  となる。

$$P = v_0 t_f - \int_0^{t_f} \int_0^t \alpha(t) dt dt \dots \dots \dots (6)$$

すなわち図-4に示すように、 $P$  は矩形面積  $v_0 t_f$  から速度減少成分の面積を差し引いたものに等しい。そこで式(4)と同様に、 $P$  は矩形面積  $v_0 t_f$  を基準にすれば、次式のように単純化できる。

$$P = a_2 v_0 t_f \dots \dots \dots (7)$$

ここに、 $a_2$  は速度波形を表わす係数(無次元量)で地盤状態に依存し、 $0 \sim 0.5$ の値をとる。 $a_2 = 0.5$ の時は加速度波形が左右対称な場合に相当し、これを越えること

はない。

波形係数  $a_1, a_2$  はかなり似た値を採るが、異なる量である。またいずれもその変動幅は小さいと考えられる。

### 3. 衝撃持続時間 $t_f$

衝撃持続時間  $t_f$  は重錘質量、落下高、重錘底面積、重錘底面形状および地盤状態に依存すると考えられるが、実規模の実験の測定記録から前3要因の影響を調べた。

#### (1) 重錘落下締固め工法での測定例

対象地盤は層厚10m、 $N$ 値5程度の均質な埋立砂で、重錘は  $m = 25$  t、 $A = 4$  m<sup>2</sup> で、 $H$  を1, 2, 5, 10 m に変えた時の  $\alpha(t)$  を測定した。図-6にその加速度波形を、図-7, 8に加速度波形から時間積分して求めた速度波形、変位波形を示した。各波形とも  $H$  によらずほぼ相似形である。ただし  $H$  が大きくなると、 $\alpha_{max}$  の現れる時間は遅れる傾向が見られる。 $\alpha_{max}$  は  $H$  とともに増すが、 $t_f$  は  $H$  によらずほぼ一定である。図-6, 7にはこれらの測定値に対する式(4), (7)の波形係数  $a_1, a_2$  の値も示したが、 $H$  による変化は小さく、いずれも  $0.21 \sim 0.26$  程度の値を示す。

図-9に  $\alpha_{max}$  と落下高の平方根  $\sqrt{H}$  の関係を示した。 $\alpha_{max}$  はほぼ  $\sqrt{H}$  に比例している。これは式(3)に示したように、衝撃加速度の  $t_f$  までの時間積分は  $v_0 (= \sqrt{2gH})$  であること、 $H$  によらず  $t_f$  が等しいこと、波形がほぼ相似であることから説明できる。

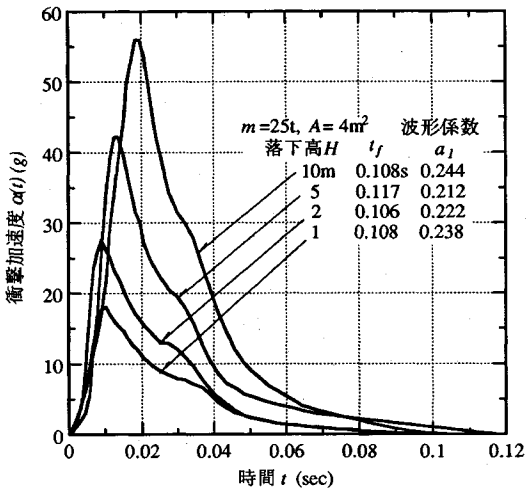


図-6 落下高と衝撃加速度波形

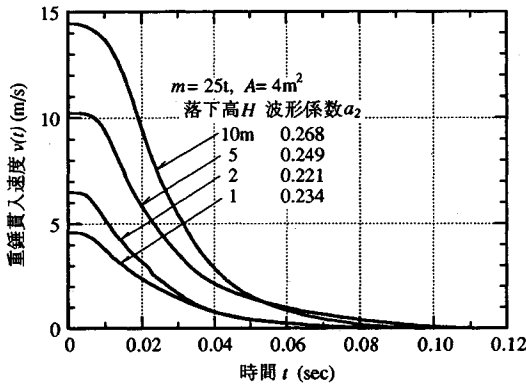


図-7 落下高と重錘貫入速度波形

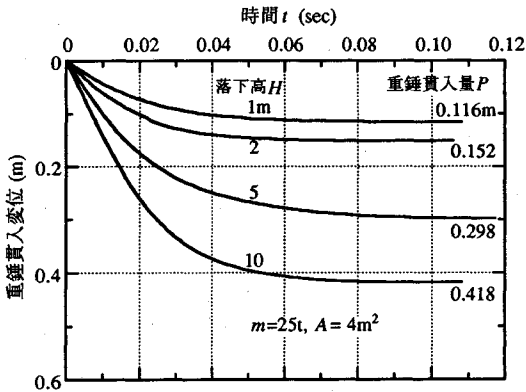


図-8 落下高と重錘貫入変位波形

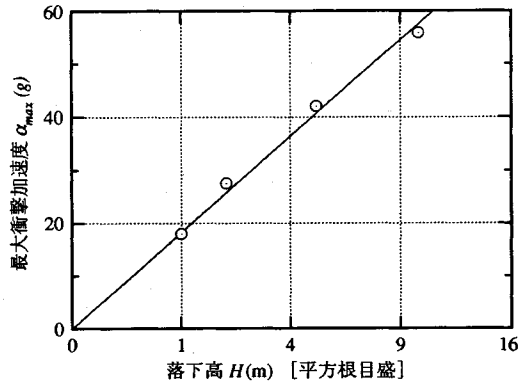


図-9 最大衝撃加速度と落下高の関係

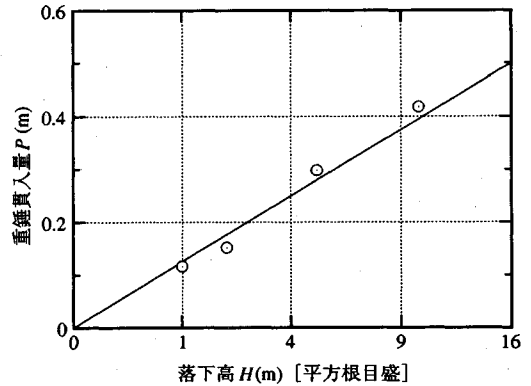


図-10 重錘貫入量と落下高の関係

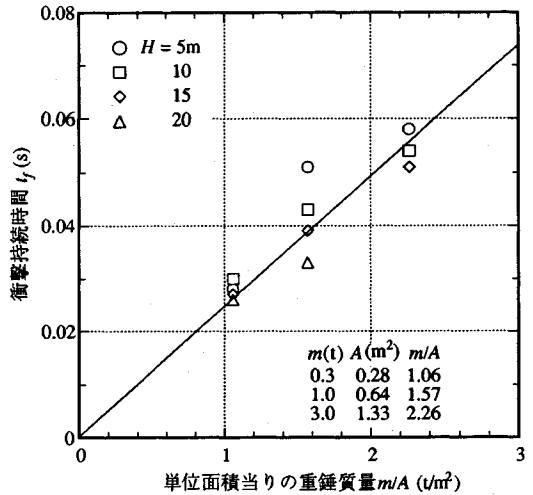


図-11 衝撃持続時間と単位面積当たりの重錘質量の関係

図-10に重錘貫入量 $P$ と $\sqrt{H}$ の関係を示した。 $P$ もほぼ $\sqrt{H}$ に比例している。これは $H$ によらず $t_f$ が等しいので、式(7)で説明できる。

(2) 落石覆工への重錘落下実験での測定例

次に、枘谷ら<sup>4)</sup>による落石覆工(ロックシェッド)へ

の実規模の重錘落下実験を示す。重錘は $m=0.3, 1, 3$  t、(底面は球状で、それぞれ底面積 $A=0.28, 0.64, 1.33$  m<sup>2</sup>)で、 $H=5, 10, 15, 20$  mから、コンクリート基礎上の厚さ90 cmの砂層(粒度のそろった山砂を足踏みにより締固めている)上に落下させている。図-11

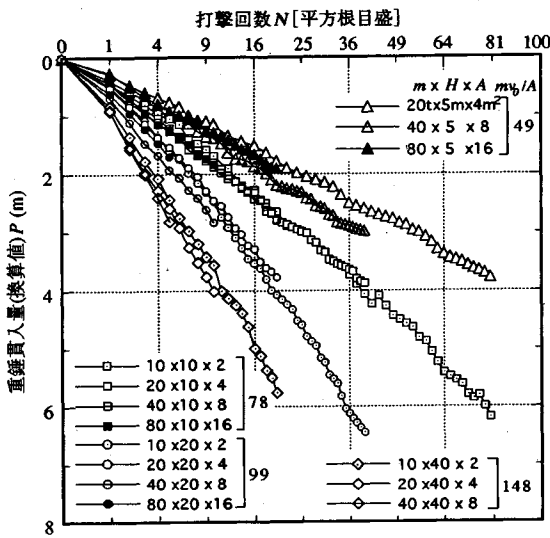


図-12 重錘貫入量(換算値)と打撃回数の平方根の関係

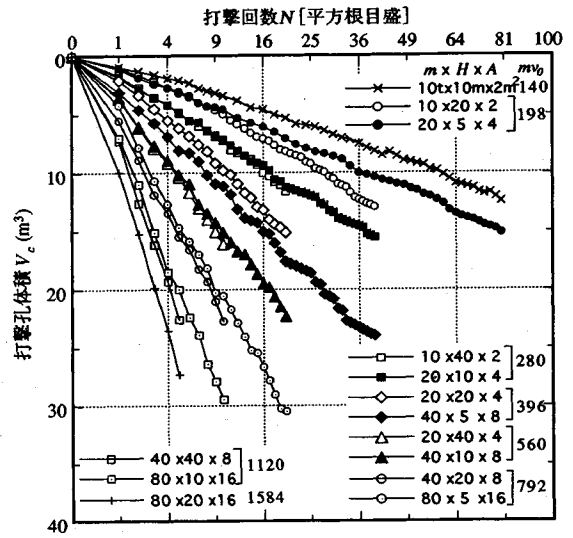


図-13 打撃孔体積と打撃回数の平方根の関係

に原文の図を再整理して求めた  $t_f$  と単位面積当りの重錘質量  $m/A$  の関係を示した。ただし複数の同条件の実験値にはかなりばらつきがあるので、 $t_f$  は同条件の値の平均値をとった。 $H$  が小さい場合には  $t_f$  はやや大きくなる傾向が見られるが、 $t_f$  は  $m/A$  にほぼ比例している。

$t_f$  が  $H$  にあまり影響されないことは、吉田ら<sup>5)</sup>、佐々木ら<sup>6)</sup>による同様の落石覆工の実験からも結論されている。彼らはまた、 $H$  と  $A$  が同じで  $m$  が大きいほど  $\alpha_{max}$  は小さいこと、 $H$  と  $m$  が同じで  $A$  が大きいほど  $\alpha_{max}$  は大きいことを報告している。これらは式(3)が表すように衝撃加速度の  $t_f$  までの時間積分は  $m$ 、 $A$  によらず  $v_0$  に等しいので、 $H$  が同じ場合には  $t_f$  は  $m$  が大きいほど大きく、また  $A$  が大きいほど小さくなり、 $\alpha_{max}$  が  $m/A$  に比例的と考えることと矛盾しない。

以上から  $t_f$  は、次のように表すことができる。

$$t_f = b \frac{m}{A} \dots\dots\dots (8)$$

$b$  は地盤定数 ( $(m^2/t)s$ ) で、ゆるい地盤ほど大きい値をとる。

#### 4. 重錘落下による締固め効果

##### (1) 重錘貫入量 $P$ と打撃孔体積 $V_c$

式(7)、(8)から、 $P$  は次式で表すことができる。

$$P = c \frac{mv_0}{A} \dots\dots\dots (9)$$

ここに  $c$  は地盤定数 ( $=a_2b$ ,  $(m^2/t)s$ ) であり、前述したように波形係数  $a_2$  の変動幅はあまり大きくないので、 $c$  は主として地盤定数  $b$  に依存し、ゆるい地盤ほど大きい値をとる。すなわち、 $P$  は重錘運動量  $mv_0$  に比例し、重錘底面積  $A$  に反比例し、ゆるい地盤ほど大きくなる。

重錘落下によって地盤が直接締められる量は打撃孔体積  $V_c$  として表すことができる。 $V_c$  は孔壁が崩れなければ重錘貫入量に重錘底面積を乗じたものであるから、式(9)から次式となる。

$$V_c = c mv_0 \dots\dots\dots (10)$$

すなわち、 $V_c$  は  $mv_0$  に比例し、重錘底面積の影響はない。したがって締固めに与える影響は重錘質量の方が落下高より大きい(落下高は平方根で機能する)ため、打撃点直下の締固めは打撃エネルギーには依存しない。

##### (2) 遠心模型実験結果

次に式(9)、(10)の成立を重錘落下締固め工法の遠心模型実験で調べた結果を示す<sup>2)</sup>。遠心加速度  $100g$  場で原型換算半径  $15m$ 、層厚  $20m$  の砂質土地盤 ( $D_r=50\%$ ) を用いて、落下高を  $H=5, 10, 20, 40m$  (原型換算値、以下同様) に、重錘は単位面積当りの質量が  $m/A=5t/m^2$  になるように、 $[m, A]$  を  $[10t, 2m^2]$ 、 $[20, 4]$ 、 $[40, 8]$ 、 $[80, 16]$  に組み合わせて、総打撃エネルギー ( $=W \cdot H \cdot N$ ,  $W$  は重錘重量) が一定の  $8,000tf \cdot m (78.5kJ)$  となるように打撃回数  $N$  を与えた計14ケースの実験結果である。

図-12に繰返し打撃に対する重錘貫入量  $P$  と打撃回数の平方根  $\sqrt{N}$  の関係を示した。ただし、 $P$  は打撃孔の崩壊量を算出して重錘底面積  $A$  で除した値を加えた換算値<sup>2)</sup>で、打撃孔壁の崩れによって孔底が埋まり、見かけの貫入量が小さくなることを補正したものである。 $P-\sqrt{N}$  関係はほぼ原点を通る直線関係を有し、 $mv_0/A$  (図中の同じ外形のマーク) が同じ場合はほぼ同じ  $P-\sqrt{N}$  関係となる。また同じ  $N$  において、 $mv_0/A$  が2倍になると  $P$  も2倍となる比例関係が認められる。これから次式が成り立つ。

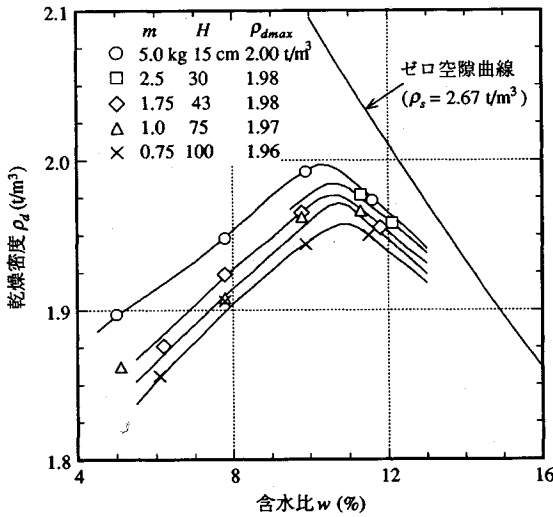


図-14 エネルギー一定で  $m, H$  を変えた締固め試験

$$P = c \frac{mv_0}{A} \sqrt{N} \dots \dots \dots (11)$$

上式は先の式 (9) と整合する。

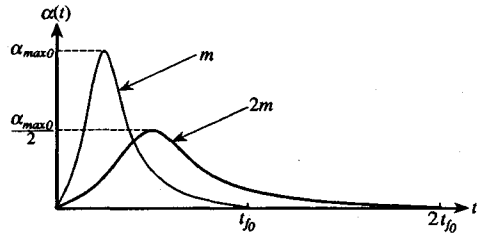
図-13 に繰返し打撃に対する打撃孔体積  $V_c$  と  $\sqrt{N}$  の関係を示した。  $V_c$  は  $P$  に  $A$  を乗じて求めている。  $P$  と同様に  $V_c - \sqrt{N}$  関係もほぼ原点を通る直線関係を有し、  $mv_0$  (図中の同じ外形のマーク) が同じ場合はほぼ同じ  $V_c - \sqrt{N}$  関係となる。 また同じ  $N$  における  $V_c$  を比較すると、  $mv_0$  が 2 倍になると  $V_c$  も 2 倍となる比例関係が認められる。 したがって次式が成り立つ。

$$V_c = c mv_0 \sqrt{N} \dots \dots \dots (12)$$

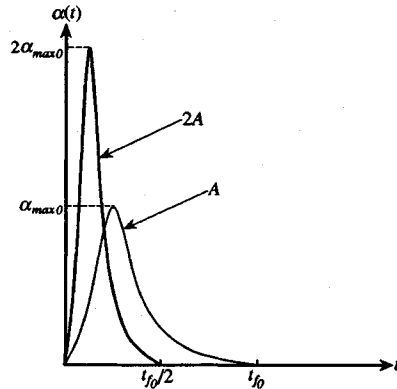
上式は先の式 (10) と整合する。 この場合の地盤定数  $c$  は平均的に  $8.3 \times 10^{-3} (\text{m}^2/\text{t}\cdot\text{s})$  となった。 式 (11), (12) の成立は、重錘底面積のみを変えた遠心実験からも確かめている<sup>2)</sup>。

(3) 室内締固め試験結果

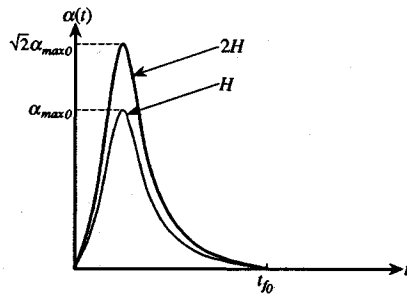
以上の傾向は大規模な重錘落下に限らず、動的な締固め一般に通じるものと考えられる。 その例として、通常の突固めによる締固め試験で、ランマー質量  $m$  を 5, 2.5, 1.75, 1, 0.75 kg に選び、1 打撃のエネルギーが  $75 \text{ kgf}\cdot\text{cm} (7.36 \text{ J})$  となるように落下高  $H$  を変えた場合の試験結果を示す<sup>3)</sup>。 試料は最大粒径 38 mm, 細粒分 10% を含む礫質のまさ土で、モールド径 15 cm, 3 層 55 回突固め、乾燥法、非繰返し法による。 図-14 に締固め曲線を示した。 ランマー質量が大きいものほど最大乾燥密度  $\rho_{dmax}$  が大きく、締固め曲線自身も上方に位置する。 したがって、締固め効果に対して落下高よりもランマー質量の影響水準が高い。 これも運動量で説明できると考えられる。



(1) 重錘質量  $m$  変化 ( $H, A$  一定)



(2) 重錘底面積  $A$  変化 ( $H, m$  一定)



(3) 落下高  $H$  変化 ( $m, A$  一定)

図-15  $m, H, A$  を変えた時の重錘加速度波形の変化

5. 衝撃加速度, 衝撃力, 衝撃応力の性状

2., 3. の考察から重錘加速度波形を推定し、最大加速度、最大衝撃力および最大衝撃応力の推定式を導く。

(1) 衝撃加速度

式 (4) に式 (8) を代入して  $t_f$  を消去すれば、最大衝撃加速度  $\alpha_{max}$  は次式で表わすことができる。

$$\alpha_{max} = d \frac{A}{m} v_0 \dots \dots \dots (13)$$

ここに、 $d$  は地盤定数 ( $=1/a_1 b, \text{t}/\text{m}^2/\text{s}$ ) であり、先の地盤定数  $c$  と同様に波形係数  $a_1$  の変動幅はあまり大きくないので、 $d$  は主として地盤定数  $b$  に依存し、ゆるい地盤ほど小さい値をとる。 すなわち  $\alpha_{max}$  は重錘底面積  $A$  と衝突速度  $v_0 (= \sqrt{2gH})$  に比例し、重錘質量  $m$  に反比例し、ゆるい地盤ほど小さくなる。 したがって地盤条件が同じ場合に  $m, A, H$  をそれぞれ独立に 2 倍した

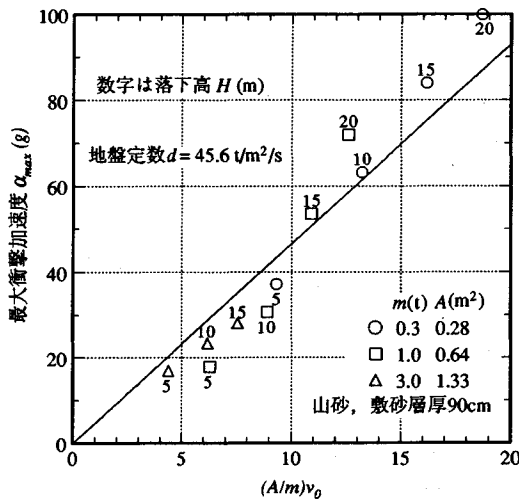


図-16 最大衝撃加速度と  $(A/m)v_0$  の関係 (吉田ら<sup>7)</sup>)

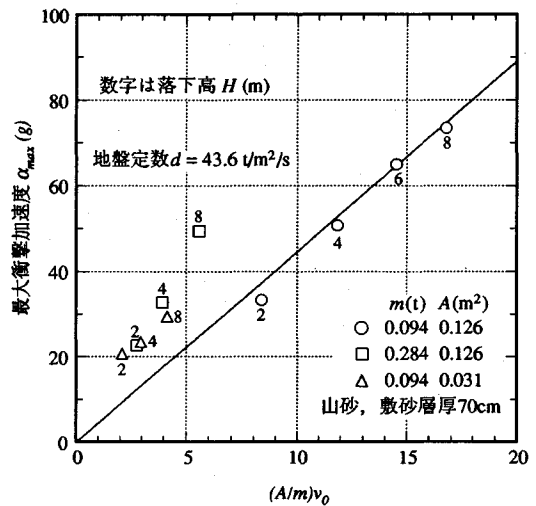


図-17 最大衝撃加速度と  $(A/m)v_0$  の関係 (佐々木ら<sup>8)</sup>)

場合の重錘の衝撃加速度波形の変化を模式的に表わすと図-15のようになる。図は基準とした  $m, A, H$  に対する最大衝撃加速度、衝撃持続時間をそれぞれ  $\alpha_{max0}, t_{r0}$  として表わしている。

吉田ら<sup>7)</sup>、佐々木ら<sup>8)</sup>は落石覆工への重錘落下実験で  $m, A, H$  を変えて重錘の衝撃加速度を測定している。敷砂層はともに山砂をそれぞれ層厚 90, 70 cm に足踏みで締固めている。図-16, 17 に原文のデータを再整理して  $\alpha_{max}$  と  $(A/m)v_0$  の関係を示した。少しばらつきがあるものの、式 (13) がほぼ成立している。また両者で打撃条件、地盤条件が異なるにも関わらず、両者の地盤定数  $d$  はほぼ等しい。先の図-9 の結果も式 (13) に整合する。

(2) 最大衝撃力、最大衝撃応力

次に最大衝撃力  $F_{max}$  は  $m\alpha_{max}$  であるから、式 (13) より、

$$F_{max} = dAv_0 \dots\dots\dots (14)$$

となる。すなわち  $F_{max}$  は  $m$  によらず  $A, v_0$  に比例する。

さらに最大衝撃応力  $\sigma_{max}$  は  $F_{max}/A$  であるから、

$$\sigma_{max} = dv_0 \dots\dots\dots (15)$$

となり、 $\sigma_{max}$  は  $m, A$  によらず  $v_0$  のみに比例する。重錘落下締固め工法の現場実験で、落下高を変えて打撃点直下 1 m 位置で測定した最大土圧が、落下高の平方根  $\sqrt{H}$  と比例関係にあることを示したが<sup>9)</sup>、これも式 (15) で説明できる。

6. ま と め

・重錘落下による土の衝撃締固め機構を重錘による衝撃力波形に着目して考察し、各種の実測データから以下の結論が得られた。

- 1) 衝撃持続時間は落下高に無関係で、重錘質量に比例し、重錘底面積に反比例する。
- 2) 重錘貫入量は重錘運動量に比例し、重錘底面積に反比例する。また打撃孔体積は重錘運動量に比例する。
- 3) この傾向は重錘落下締固め工法の遠心模型実験結果を説明し、また室内締固め試験にも当てはまる。
- 4) 重錘落下による締固め効果は、打撃エネルギーでなく、重錘運動量に強く依存する。
- 5) また、同様な考察から、重錘質量、底面積、落下高を変えた時の重錘加速度波形の変化が推定できる。
- 6) 最大加速度は重錘底面積と重錘の衝突速度に比例し、重錘質量に反比例する。
- 7) 最大衝撃力は重錘底面積と衝突速度に比例する。
- 8) 最大衝撃応力は衝突速度のみに比例する。

本論文では締固め効果を重錘貫入量と打撃孔体積を主題にして示したが、地盤面の沈下量、地盤全体の圧縮量および地盤の内部変形も重錘運動量に強く依存することを文献2) で示している。これらも重錘による衝撃力の伝播に起因するものであり、打撃点から遠いほど減衰するが、やはり重錘運動量に強く依存するものと考えられる。

またここで示した最大衝撃力の推定式は、重錘のはね返りが生じない層厚が厚く、密度が低い地盤の場合に適用的だと考えている。

参 考 文 献

- 1) 高田直俊・大島昭彦・池田通陽・竹内功：重錘落下締固め工法の遠心力模型実験 一重錘貫入量と地盤変形一、土木学会論文集, No. 475/Ⅲ-24, pp. 89~97, 1993.
- 2) 大島昭彦・高田直俊：重錘落下締固めにおける打撃条件と地盤の圧縮・変形量, 土木学会論文集, No. 481/Ⅲ-25, pp. 135~143, 1993.

- 3) 大島昭彦・高田直俊：重錘落下締固めにおける重錘運動量と締固め効果，第27回土質工学会研究発表会，pp. 2103～2106，1992.
- 4) 榎谷浩・吉田博・佐藤真：落石実験データベースに基づく衝撃力の評価，第二回落石の衝撃力およびロックシェードの設計に関するシンポジウム，北陸道路研究編，pp.64～70，1986.
- 5) 吉田博・石塚賢吉・細川豊：ロックシェード上の落石による衝撃力の推定法に関する研究，道路2月号，pp.38～43，1978.
- 6) 佐々木康・古賀泰之・舟見清己：敷砂上の落石の衝撃力に関する実験的研究，土木学会論文報告集，第340号，pp.127～137，1983.
- 7) 吉田博・榎谷浩・佐藤真・井原朋美：落石実験データベースの作成と落石の衝撃力評価について，土木学会構造工学論文集，Vol.33 A，pp.571～583，1987.
- 8) 佐々木康・古賀泰之・舟見清己・谷口栄一：敷砂上の落石の衝撃力に関する実験報告書，土木研究所資料，第1822号，1982.
- 9) 高田直俊・大島昭彦・渡辺篤・池田通陽：重錘落下締固め工法の現場実験と遠心模型実験—地盤変形，土圧，強度増加—，土木学会論文集，No.469/Ⅲ-23，pp.127～134，1993.

(1993.3.19 受付)

## IMPACT FORCE AND RAM PENETRATION OF GROUND IN HEAVY TAMPING

Akihiko OSHIMA and Naotoshi TAKADA

Field measurements showed that the ram penetration of ground was proportional to the ram impact velocity and the impact duration; the impact duration was proportional to the ram mass of unit base area, not influenced by ram drop height. These facts lead to the idea that the ram penetration was proportional to the ram momentum and inversely proportional to the ram base area. This tendency was supported by the centrifuge model test and was also found in the ordinary laboratory compaction test. From these results, estimation of maximum acceleration, maximum impact force and maximum impact stress were discussed.