

重錘による砂地盤打撃時の重錘加速度と貫入量 —重錘の質量と底面積の影響—

大島昭彦¹・高田直俊²・池田通陽³・山崎康弘⁴

¹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)

²正会員 工博 大阪市立大学教授 工学部土木工学科 (〒558 大阪市住吉区杉本 3-3-138)

³正会員 海洋工業 (株) 工務部 (〒160 東京都新宿区舟町 12)

⁴正会員 工修 (株) 大成建設 関東支店 (〒331 埼玉県大宮市桜木町 2-287)

重錘を落下させて衝撃的に地盤を締固める際の締固め効果は、重錘の打撃エネルギーではなく、運動量に依存することを実験的に示してきた。また打撃時の重錘挙動を調べるために重錘加速度測定の室内実験を行ってきたが、実規模の現場実験で確かめる必要がある。今回、25t から 1.25kg の幅広い質量と底面積を有する重錘を用いた現場、室内打撃試験を砂地盤に対して行い、打撃時の重錘加速度と重錘の地盤への貫入量を調べた。その結果、これまでの室内試験と同様に、加速度波形形状は重錘の質量と底面積の大きさによらず、重錘の単位面積当たりの質量に依存し、落下高の影響は小さく、最大加速度、最大打撃応力および重錘貫入量は提案式で説明できることがわかった。

Key Words : compaction, impact acceleration, impact stress, field test, model test, sandy ground

1. はじめに

重錘落下による地盤の締固め機構を調べるために、筆者らは、これまでに重錘質量、底面積、落下高の打撃条件と地盤密度、土の種類を変えた遠心模型による打撃実験から、重錘貫入量や締固めの及ぶ範囲は打撃エネルギーでなく、重錘の運動量に依存すること^{1),2)}、重錘の貫入現象は非弾性衝突に基づく運動量保存則で説明できること³⁾を示してきた。また、地盤打撃時の重錘挙動と地盤応力を調べるために行った室内締固め試験と同規模の条件下で重錘の衝撃加速度を測定する実験から、衝撃加速度波形は重錘の単位面積当たりの質量に依存し、落下高の影響は小さく、重錘貫入量は運動量に比例することを報告した⁴⁾。しかし、この実験は重錘の質量、底面積や落下高の規模が小さいので、実規模の重錘挙動を外挿できる保証はない。

そこで本論文は、重錘の質量と底面積の大きさ(以下、重錘規模と呼ぶ)が衝撃加速度と地盤への貫入量に与える影響を調べるため、まず規模の大きい重錘の質量と底面積の組み合わせを幾通りかに変えた現場実験で、地盤打撃時の重錘衝撃加速度を測定した。次に現場試料を現場と同じ密度に締固めた模型地盤で小型重錘を用いた同様の室内実験を行った。

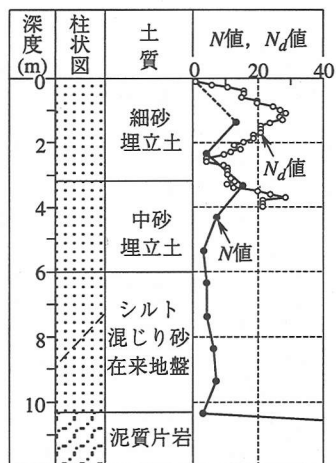
これらから重錘質量、重錘底面積、落下高が衝撃加速度、打撃応力、重錘貫入量に及ぼす影響を調べ、その締固め機構を考察した。

2. 現場実験⁵⁾

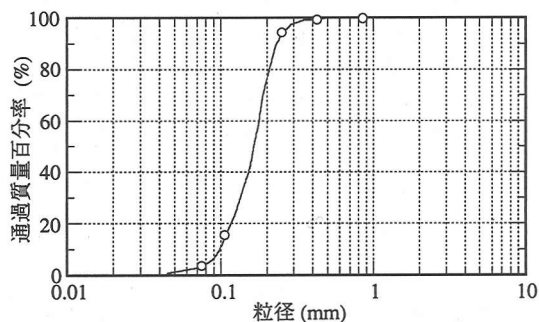
(1) 地盤状況

現場は島根県那賀郡三隅町の日本海に面した海岸の埋立て地(埋立面積 69ha)で、1994年5月に盛土が完了したところである。図-1に実験地点の地盤柱状図と N 値および簡易動的コーン貫入試験(コーン直径 2.5cm, 先端角度 60°, 重錘質量 5kg, 落下高 40cm)による N_d 値(10cm 貫入毎の打撃回数)を示した。地表面から深度 6m までが浚渫埋立て砂、深度 6~11m がごく緩い従来の砂地盤である。埋立層は深度 1m と 3.5m 付近がやや強く、2.5m 付近がやや弱い不均質な状況にあった。

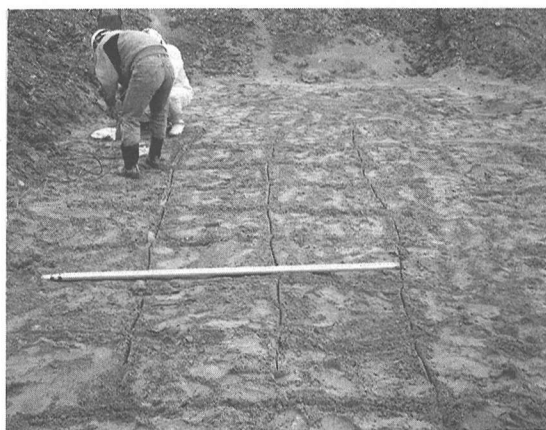
深度 0.5m 付近で採取した砂の粒度は図-2に示すとおりで、粒径のそろった細砂である。主な物理性質を表-1に示した。深度 0~1m で測定した現場地盤密度の平均値は $\rho_d = 1.40\text{g/cm}^3$ で、表層部は比較的密な状態(相対密度 D_r は約 70%)にあった。写真-1に現場の地盤状況を示した。



図一 1 現場の地盤柱状図



図一 2 現場試料の粒度



写真一 1 現場の地盤状況

(2) 実験方法

a) 重錘と打撃条件

重錘毎の打撃条件を表一 2～4 にまとめた。

中型重錘は図一 3 に示す重錘質量 $m=25, 50, 100\text{kg}$ 、底面積 $A=100, 200, 400\text{cm}^2$ を組み合わせた正方形断面の重錘で、単体①、②、③、およびそれらを溶接して合体させたものである。

表一 1 現場試料の物理性質

D_{max} (mm)	F_c (%)	U_c	ρ_s (g/cm^3)	ρ_{dmax} (g/cm^3)	ρ_{dmin} (g/cm^3)	w_n (%)	ρ_{dn} (g/cm^3)
0.85	4.0	1.5	2.67	1.50	1.20	10	1.40

含水比 w_n と密度 ρ_{dn} は 5 地点における平均値

ρ_{dmax}, ρ_{dmin} は JGS T 161 (最大・最小密度試験) による

表一 2 中型重錘の打撃条件

重錘No.	質量 m (kg)	底面積 A (cm^2)	m/A (kg/cm^2)	落下高 H (m)
B1	25	200	0.125	1.25
B2	〃	100	0.25	
B3	50	400	0.125	
B4	〃	200	0.25	2.5
B5	〃	100	0.50	
B6	100	400	0.25	5
B7	〃	200	0.50	
B8	〃	100	1.0	

表一 3 大型重錘の打撃条件

重錘No.	質量 m (kg)	底面積 A (cm^2)	m/A (kg/cm^2)	落下高 H (m)
C1	500	2,000	0.25	2.5
C2	〃	1,000	0.50	
C3	1,000	4,000	0.25	
C4	〃	2,000	0.50	5
C5	〃	1,000	1.0	
C6	2,000	4,000	0.50	10
C7	〃	2,000	1.0	
C8	〃	1,000	2.0	

表一 4 超大型重錘の打撃条件

重錘No.	質量 m (kg)	底面積 A (cm^2)	m/A (kg/cm^2)	落下高 H (m)
D1	12,000	30,000	0.40	2.5, 5,
D2	25,000	40,000	0.625	10, 20

大型重錘は図一 4 に示す $m=500, 1000, 2000\text{kg}$ 、 $A=1000, 2000, 4000\text{cm}^2$ を組み合わせた正方形断面の重錘で、単体①、②、③、およびそれらを溶接して合体させたものである。大型重錘の単位面積当たりの質量 m/A は中型重錘のそれぞれ 2 倍とした。

超大型重錘は図一 5 に示す重錘落下締固め工法用の 12, 25t の重錘 (正方形断面) である。

なお、中型、大型重錘では上部の方が断面が大きいものがあるが、実際の打撃時の貫入量は下部の部材内で収まっている。

b) 打撃方法と計測方法

重錘の落下方法は、重錘頭部に取り付けた吊上げ用ロッドを、中型重錘は空気圧シリンダーで、大型重錘は油圧シリンダーで圧着してクレーンで所定の高さまで鉛直に吊上げ、シリンダーの空気圧、油圧を解放して自由落下させる。超大型重錘は重錘落下

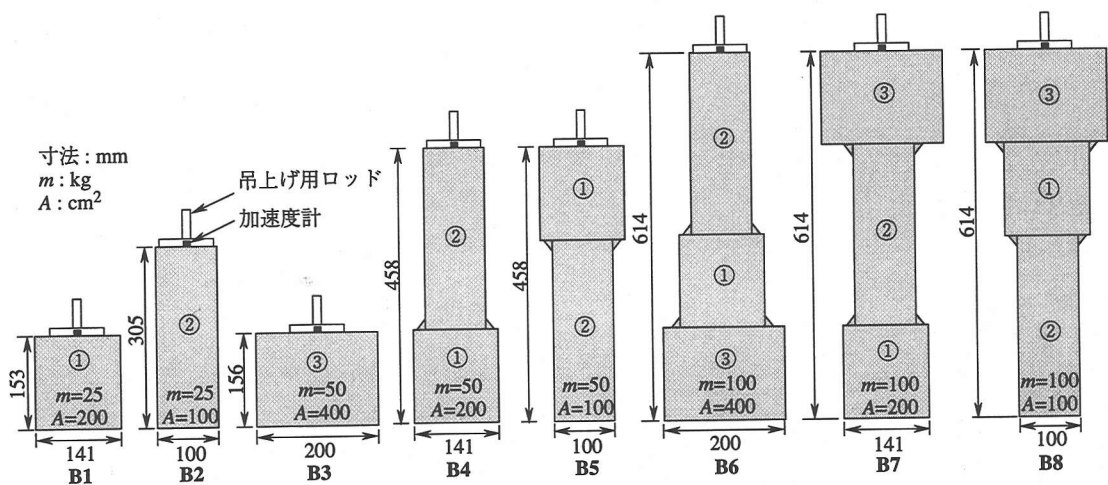


図-3 中型重錘

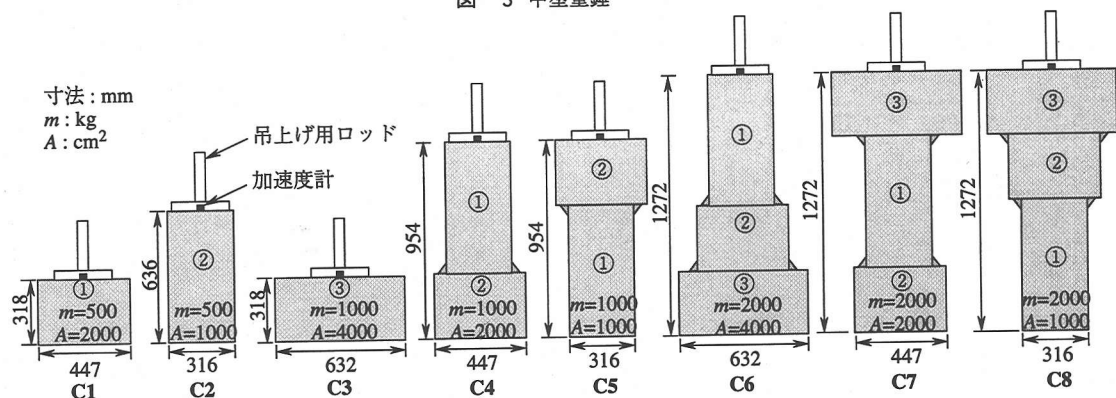


図-4 大型重錘

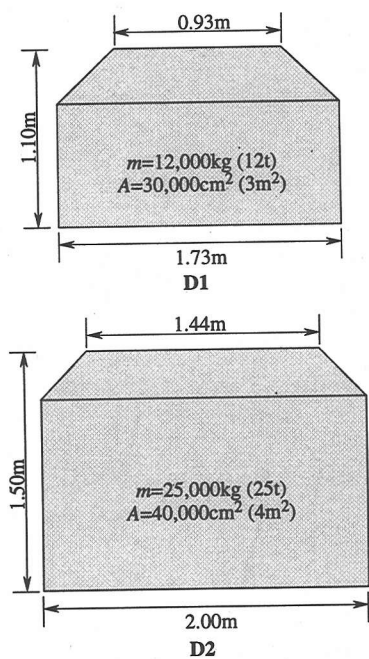


図-5 超大型重錘



写真-2 大型重錘(C6)の実験状況

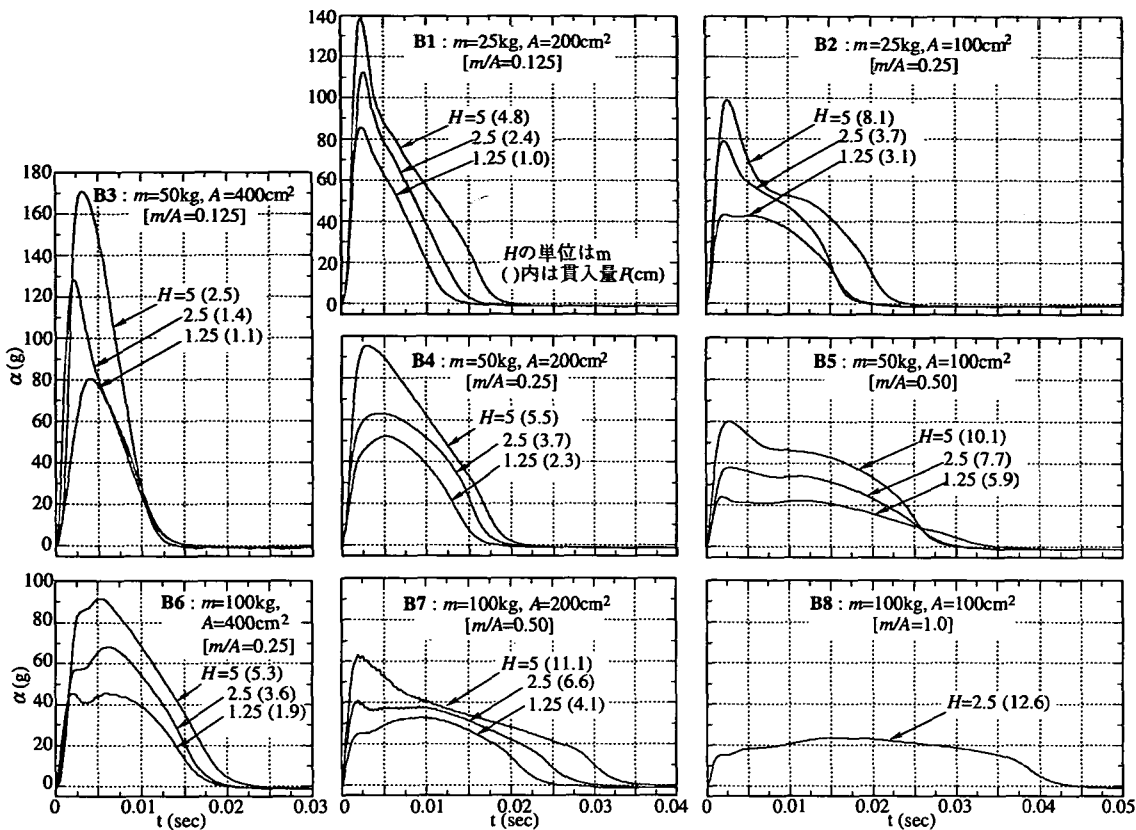


図-6 中型重錘による1打撃目の加速度波形

締固め工法の手法で落下させる。中型、大型重錘の実験は約10m四方の平坦な敷地で行い、打撃位置は互いに干渉しないように、中型で0.6m、大型で1.5m程度離れた。超大型のうち25t重錘は中型、大型と同じ敷地内で、12t重錘は約100m離れた別の敷地で、それぞれ3m程度離して打撃した。地盤面は水準器によって水平に整地した。写真-2に大型重錘(C6)の実験状況を示した。

各重錘には容量100g(固有振動数4000Hz)、200g(6000Hz)のひずみゲージ式の加速度計(超大型重錘は500g(4800Hz)を2個)を取り付け、300Hzのローパスフィルターをかけ⁴⁾、動ひずみ計(応答周波数DC~10kHz)で測定し、データアナライザー(A/D変換12bit)によりサンプリング間隔100μsecで記録した。なお、地盤面を水平にして重錘を地盤面に鉛直に落下させたので、加速度計の感知方向は鉛直のみを対象とした。

(3) 衝撃加速度波形

図-6に中型重錘による1打撃目の加速度波形を示した。図の横の並びは重錘質量 m が、縦の並びは重錘底面積 A が、右上がりの斜めの並びは重錘の単

位面積当りの質量 m/A が同じである。図中の()内は重錘貫入量 P (cm)である。加速度波形は重錘条件によって大きく異なるが、文献4)で示した室内実験と同様に、同じ m/A ではほぼ等しく、 m/A が小さいほど最大加速度 α_{max} が大きく、かつ衝撃持続時間 t_f が短くなること、落下高 H が大きくなると t_f がやや長くなる傾向があるものの、 H の影響は m と A に比べて小さいこと、 α_{max} が生じる時間は重錘仕様によらずほぼ一定(約0.002sec)であることが現場実験からも確認できる。文献4)の室内実験では加速度波形は2つのピークを有し、第2ピークが主体となる波形であったが、現場実験では m/A が大きくなると第2ピークが現れるものの、第1ピークが主体となる波形となった。これは現場の地盤密度が特に表層部で比較的高かったためと考えられる。

図-7に大型重錘による1打撃目の加速度波形を示した。加速度波形の形状は中型重錘の場合と同様である。中型重錘の加速度波形と比較すると、同じ m/A 、 H で、 α_{max} はあまり変わらないが、 t_f は大型の方が長い(大型重錘の時間スケールは中型重錘の2倍にしている)傾向が見られる。

図-8に超大型重錘による1打撃目の加速度波形

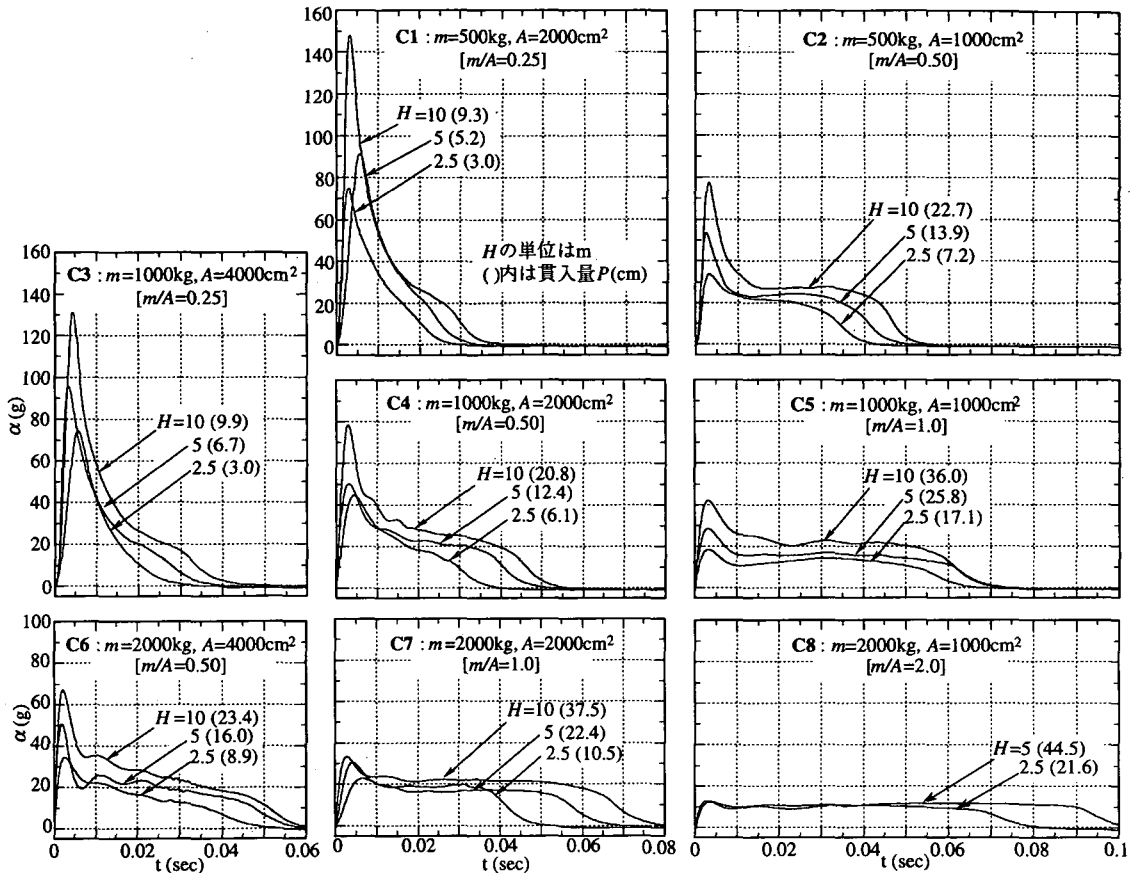


図-7 大型重錘による1打撃目の加速度波形

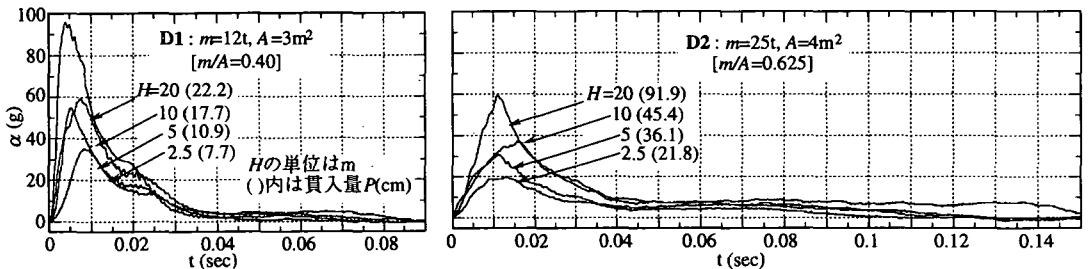


図-8 超大型重錘による1打撃目の加速度波形

を示した。これも中型、大型重錘と同様な傾向を示している。大型重錘に比べて t_f はさらに長くなっている。D1の12t重錘はワイヤードロップ方式(重錘にワイヤーを連結したまま、クレーンからワイヤーを引出して落下させる方式)を採っているため、ワイヤー引出し抵抗によるエネルギーロスが大きかった。また最も重いD2の25t重錘の t_f が特に長く、重錘貫入量が特に大きいのは、前述した地盤の深さ2.5m付近のゆるい層に打撃の影響が及ぶためと考えられる。

3. 室内実験⁶⁾

(1) 実験方法

a) 重錘と打撃条件

重錘規模をさらに幅広くとるために、文献4)で示した小型重錘を用いて、現場試料を現場と同じ密度に締固めた模型地盤を用いた室内実験を行った。

表-5に小型重錘を用いた室内実験の打撃条件をまとめた。小型重錘は質量 $m=1.25, 2.5, 5\text{kg}$ 、底面積 $A=9.84, 19.63, 39.26\text{cm}^2$ (直径3.54, 5.0, 7.07cm) を組み合わせた円形断面(平底)のものである。落

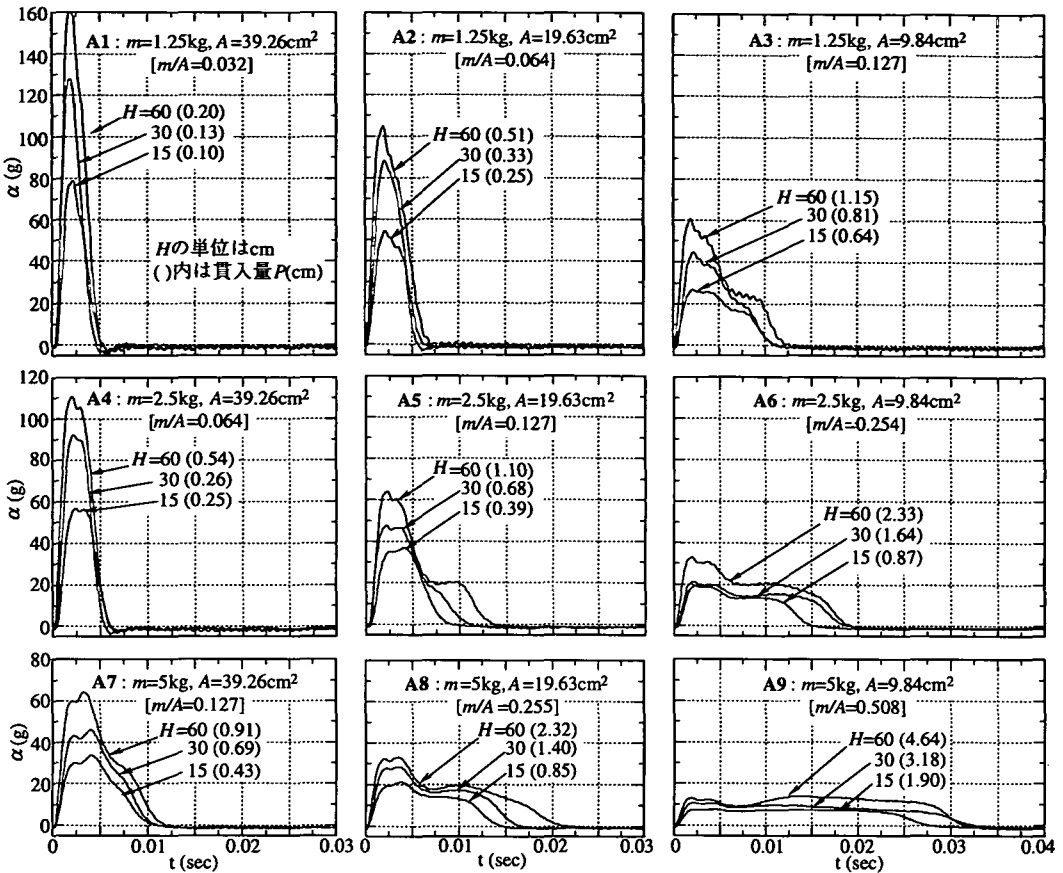


図-10 小型重錘による1打撃目の加速度波形

表-5 小型重錘の打撃条件

重錘No.	質量 m (kg)	底面積 A (cm ²)	m/A (kg/cm ²)	落下高 H (cm)
A1	1.25	39.26	0.032	15
A2	1.25	19.63	0.064	
A3	1.25	9.84	0.127	
A4	2.5	39.26	0.064	30
A5	2.5	19.63	0.127	
A6	2.5	9.84	0.254	
A7	5.0	39.26	0.127	60
A8	5.0	19.63	0.255	
A9	5.0	9.84	0.508	

下高 H は15, 30, 60cmに選んだ。なお、円柱、四角柱の重錘形状の違いは加速度波形にほとんど影響しないことを確認している⁴⁾。

b) 模型地盤と打撃方法

現場で採取した試料（自然含水比10%）を室内で直径30cm、高さ35cmのステンレス鋼製モールド内で層厚30cmに、現場と同じ密度（ $\rho_d=1.40\text{g/cm}^3$ ）に締固めて地盤を作成した。締固めは10層に分け、ランマー質量10.2kg、落下高30cm、打撃回数25回で行った。地盤を均一に締固めるために、モールド内径

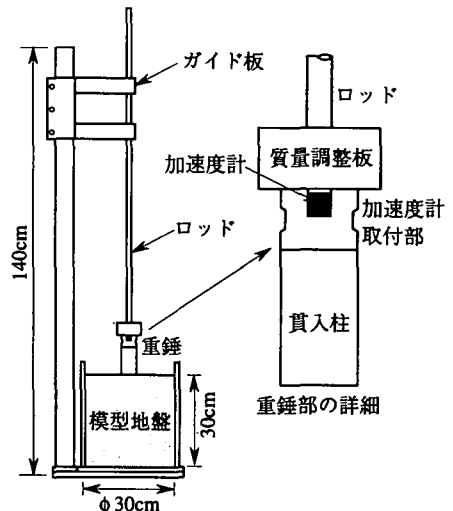


図-9 室内実験用の重錘落下装置

と同じ直径の底板を持つランマーを用い、一次元的に地盤を締固める手法を採った。なお層厚30cmに対して、重錘貫入量15cm程度までは加速度波形に与える底板の影響はないことを確認している⁴⁾。

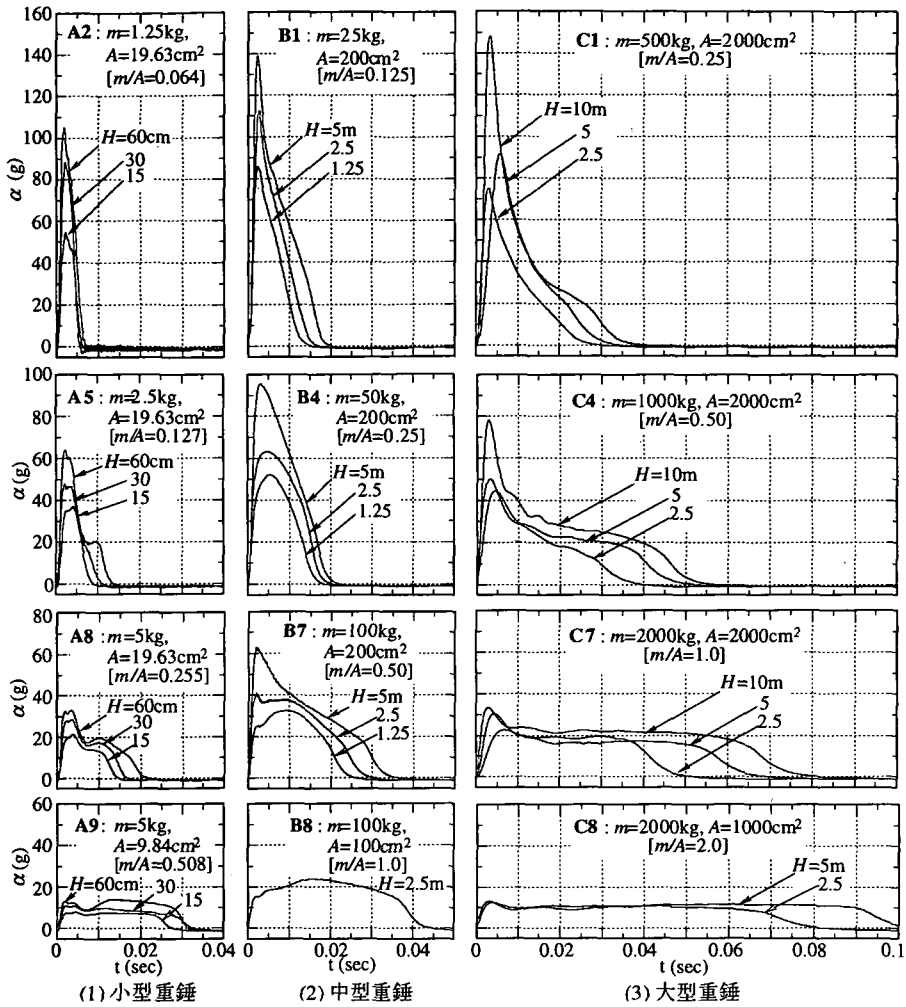


図-11 重錘規模による加速度波形の比較

重錘打撃は図-9に示す重錘落下装置を用いて重錘加速度を測定した。重錘はロッド、質量調整板、加速度取付部、貫入柱からなり、質量調整板を交換して質量 m を、貫入柱を交換して底面積 A を変化させた。実験装置、計測方法の詳細は文献4)を参照されたい。

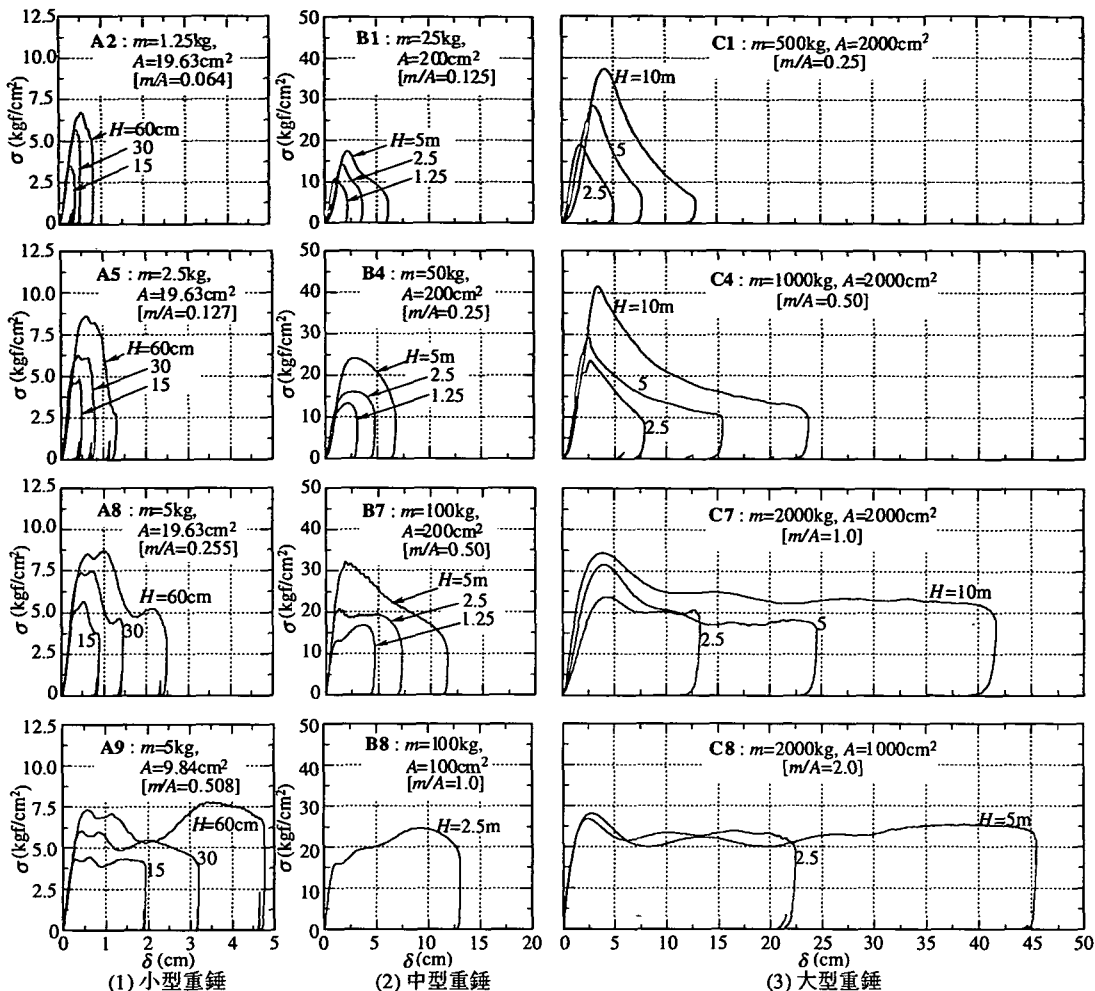
(2) 実験結果

図-10に小型重錘による1打撃目の加速度波形を示した。図中の()内は重錘貫入量 P である。先の現場実験結果と同様に、加速度波形は同じ m/A でほぼ等しく、 m/A が小さいほど最大加速度 α_{max} が大きく、衝撃持続時間 t_f が短くなること、落下高 H が大きくなると t_f が長くなる傾向があるものの、 H の影響は m と A に比べて小さいこと、 α_{max} が生じる時間は重錘仕様によらずほぼ一定となることが室内実験でも見られる。

4. 重錘規模の影響

(1) 加速度波形の比較

図-11に小型(A)、中型(B)、大型(C)重錘の加速度波形の代表例を比較した。図の横の並びは順に m が20倍、 A がほぼ10倍ずつ大きくなる。右上がりの斜めの並びは m/A がほぼ等しい。最大加速度 α_{max} が生じる時間は、前述したように重錘規模によらずほぼ一定(約0.002sec)である。小型重錘は H を小さくしているの、同じ H で加速度の大きさを直接比較できないが、中型、大型重錘では、 H が同じ場合には同じ m/A の波形形状は似ている。しかし同じ m/A でも重錘規模が大きいほど t_f が長く、第1ピークがより顕著となっている。これは重錘規模が大きいほど H を大きくしたためと考えられる。



図一12 重錘規模による打撃応力-変位関係の比較

(2) 打撃応力-変位関係の比較

静止時の加速度を $\alpha=0g$ としているため、打撃応力 σ は $(\alpha+1) \times m/A$ から求める。また重錘変位 δ は α を時間で2回積分して求める。こうして求めた $\sigma-\delta$ 関係を重錘規模別に図一12に示した。これは動的な平板載荷試験による荷重強さ-沈下量曲線に相当する。初期の立ち上がりの直線勾配は動的な地盤反力係数 K_d に（弾性域）、その後が塑性域に、下降部が除荷域に相当する。 σ は最終的には重錘の自重応力に収束する。

小型重錘の $\sigma-\delta$ 関係の縦軸と横軸のスケールの比は中型、大型重錘のそれらと同じにしている。多少のバラツキはあるが、 K_d は重錘規模や落下高 H によらずほぼ一定で約 17kgf/cm^3 となった。 H が大きいほど初期の直線区間が長い。 m/A が大きいものほど重錘変位が大きく、塑性域における σ の第2ピーク（ひずみ硬化）が生じ、地盤が締固められているこ

とがわかる。加速度波形と同様に、 m/A が同じ場合（右上がり斜めの並び）の $\sigma-\delta$ 関係の形状は似ている。

以上のことから、初期の立ち上がりから σ の第1ピークまでは、地盤の慣性抵抗が重錘を減速させ、それ以降は地盤の塑性抵抗が卓越して重錘を停止させるものと考えられる。この点は、重錘の貫入速度に依存した土の動的な応力-ひずみ関係に関わる問題と認識しているが、今後の課題としたい。

(3) 最大加速度

図一13に小型、中型、大型、超大型重錘の最大加速度 α_{max} と $(A/m)v_0$ 関係を示した。ここに v_0 は加速度の時間積分から算出した衝突速度で、落下高 H は実験時に若干誤差があるので（公称値）、 $\sqrt{2gH}$ でなくこの方法で算定した（なお速度波形の時間積分から求まる重錘貫入量は実測値にほぼ等しくなった）。

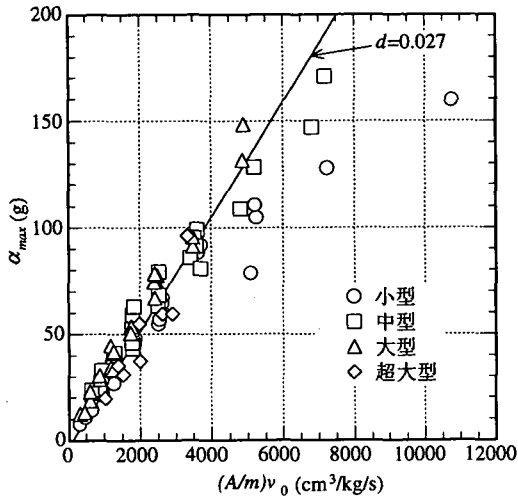


図-13 最大加速度と $(A/m)v_0$ の関係

α_{max} はほぼ $(A/m)v_0$ に比例し、文献3)で示した次式が確認できる。

$$\alpha_{max} = d \frac{A}{m} v_0 \quad (1)$$

d は地盤係数で、緩い地盤ほど小さな値をとる。この場合 $d=0.027(\text{kg}/\text{cm}^2/\text{s})$ となった。ただし、小型重錘の値が他に比べて小さいのは、模型地盤の密度が現場地盤よりやや低かったためと考えている。

(4) 最大打撃応力

最大打撃応力 σ_{max} は $\alpha_{max} \times m/A$ から求められるので、式(1)より次式となる。

$$\sigma_{max} = d v_0 \quad (2)$$

図-14に σ_{max} と v_0 の関係を示した。式(1)が成立すれば、当然式(2)も成立する。

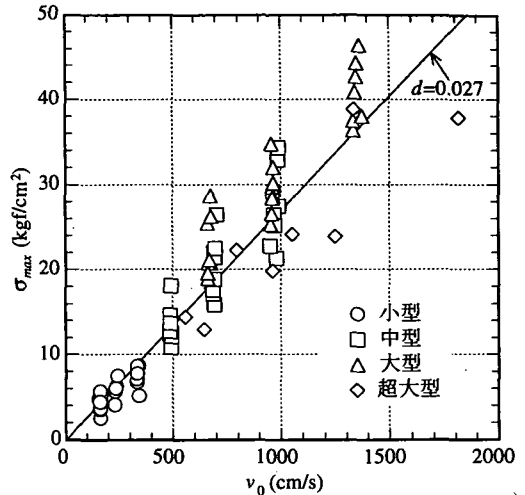


図-14 最大打撃応力と v_0 の関係

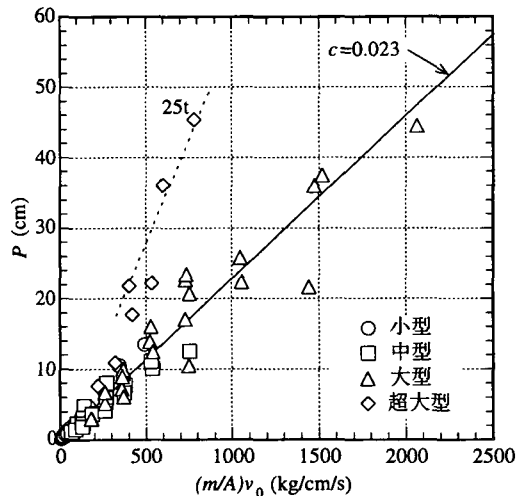


図-15 重錘貫入量と $(m/A)v_0$ の関係

(5) 重錘貫入量

図-15に重錘貫入量 P と $(m/A)v_0$ の関係を示した。25tの超大型重錘の P が他に比べて大きいのが、小型～大型重錘までは比例関係にあり、文献3)で示した次式が成立する。

$$P = c \frac{m}{A} v_0 \quad (3)$$

c は地盤定数で、緩い地盤ほど大きな値をとる。この場合 $c=0.023(\text{cm}^2/\text{s}/\text{kg})$ となった。式(1)～(3)は、均質な地盤で成立するもので、超大型重錘の P が大きくなったのは、前述したように現場地盤の深さ2.5m付近のゆるい層に打撃効果が及んだため、地盤定数 c が大きくなったと考えられる。

P に重錘底面積 A を乗じたものが打撃孔の体積となり、重錘打撃により直接締固められる地盤圧縮量を表す。したがって式(3)より、重錘落下による締固

めは重錘が打撃時に持つ運動量 mv_0 に依存することが確認できる。

文献4)の室内実験による加速度波形は、第1ピークと第2ピークで最大加速度を示すものが混在したため、最大加速度、最大打撃応力の性状は複雑となったが、今回は第1ピークで最大値を示す場合が主体であったため、文献3)で示した運動量保存則から誘導された式(1)～(3)が成立したと考えられる。

5. 結論

重錘落下による締固め機構を調べるために行った25～100kgの中型重錘、500～2000kgの大型重錘、12、25tの超大型重錘を用いた現場実験および1.25～5kgの小型重錘を用いた室内実験から、以下の結論が得

られた。

1) 加速度波形の形状は、各重錘規模毎に重錘の単位面積当たりの質量に依存し、重錘の単位面積当たりの質量が小さいほど最大加速度は大きく、衝撃持続時間は短い。

2) 重錘規模によらず、最大加速度はほぼ一定の時間で生じる。

3) 重錘の単位面積当たりの質量が同じでも重錘規模が大きいほど、また落下高が大きいほど、衝撃持続時間が長く、加速度波形の第1ピークが顕著となる。

4) 加速度波形を時間積分して求めた打撃応力-変位関係において、動的な地盤反力係数を表す初期勾配は、重錘規模や落下高によらずほぼ一定で、落下高が大きいほど直線区間が長い。

5) 最大加速度、最大打撃応力および重錘貫入量は、重錘規模によらず文献3)の提案推定式で説明できる。

現場実験を行った地盤の表層部が深度方向にやや不均質であったために、重錘の加速度、貫入量と重錘規模の関係にやや不安が残るが、定性的な傾向は捉えていると考えている。

謝辞：現場実験を行うに当たって便宜をはかって頂いた中国電力(株)および現場関係者の皆様に謝意を表します。

参考文献

- 1) 大島昭彦, 高田直俊:遠心模型実験による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.
- 2) 大島昭彦, 高田直俊, 田中善広:重錘落下による締固め範囲と運動量の関係 -単点打撃における密度と強度の増加域-, 土木学会論文集, No.554/III-37, pp.185~196, 1996.
- 3) 大島昭彦, 高田直俊:重錘落下締固めにおける地盤への重錘貫入と衝撃力, 土木学会論文集, No.487/III-26, pp.61~67, 1994.
- 4) 大島昭彦, 高田直俊, 福本彦吉:重錘落下締固めにおける重錘挙動と地盤応力, 土木学会論文集(本号), 1997.
- 5) 山崎康弘, 大島昭彦, 高田直俊, 池田通陽, 鳴海直信:重錘落下による衝撃加速度の現場測定実験(第1報), 第30回土質工学会, pp.2035~2038, 1995.
- 6) 大島昭彦, 高田直俊, 山崎康弘, 池田通陽, 鳴海直信:重錘落下による衝撃加速度の現場測定実験(第2報), 第30回土質工学会, pp.2039~2042, 1995.

(1996.5.31 受付)

EFFECT OF RAM MASS AND BASE AREA ON RAM IMPACT ACCELERATION AND PENETRATION OF SANDY GROUND

Akihiko OSHIMA, Naotoshi TAKADA, Michiharu IKEDA and Yasuhiro YAMAZAKI

A series of field and laboratory tests of ram blow to confirm that the impact force and compaction of sandy ground are dependent on the ram momentum rather than the kinetic energy were carried out under a variety of ram masses from 1.25 kg through 25 t and of ram base area and drop height. The waveform of ram impact acceleration was predominantly dependent on the ram mass per unit area of the ram base, and the effect of drop height on the waveform was less as expected from previous laboratory tests. The maximum impact acceleration, maximum impact stress and the ram penetration of the ground were well interpreted by the proposed mathematical models.