

重錘落下締固めにおける重錘挙動と地盤応力

大島昭彦¹・高田直俊²・福本彦吉³

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 工修 関西電力(株) 土木建築室 (〒530-70 大阪市北区中之島 3-3-22)

室内締固め試験と同規模の条件で地盤を締固める際の重錘衝撃加速度と模型土層内の底面土圧および重錘の地盤への貫入量を測定し、重錘質量、重錘底面積、落下高および地盤密度によって、加速度波形、土圧波形、地盤内の応力減衰および重錘貫入量がどのように変化するかを調べた。その結果、加速度波形は重錘の質量と底面積によって大きく異なるが、重錘の単位面積当たりの質量が同じ場合にはほぼ同じ形状となること、波形は2つのピークを持ち、第1ピークは地盤の弾性挙動に、第2ピークは塑性挙動に起因すること、地盤内の応力減衰は重錘底面積が小さいほど大きいことを見出した。これらから重錘落下による衝撃締固め機構を運動量と打撃エネルギーの両観点から考察した。

Key Words : compaction, impact acceleration, impact stress, earth pressure, ground density, sandy soil

1. はじめに

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、重錘貫入量、地盤面沈下量、体積圧縮量および締固めが及ぶ範囲が打撃エネルギーでなく、重錘が打撃時に持つ運動量に依存することを報告した^{1)~3)}。また重錘の貫入現象を非弾性衝突に基づく運動量保存則から考察することによってそれが説明できること、さらに衝撃加速度と衝撃応力および重錘貫入量の推定式を提案した⁴⁾。

この重錘落下による締固めは、重錘が地盤を打撃するときに発生する衝撃力とその地中での伝播過程に依存すると考えられる。衝撃力の大きさは重錘に発生する衝撃加速度を、伝播過程は地中の土圧を測定することによって得られる。これまでに重錘の衝撃加速度を測定する研究は数多く行われているが、加速度値を利用した地盤の締固め管理手法⁵⁾や落石覆工(ロックシェッド)への衝撃荷重の測定⁶⁾の目的で行われており、加速度波形に与える打撃条件(重錘の質量、底面積、底面形状および落下高)や地盤条件(密度、土の種類)の影響は、必ずしも明確にされていない。

本論文では、室内締固め試験と同規模の条件下で地盤を打撃するときの重錘の衝撃加速度と地盤底面の土圧および重錘貫入量を測定する実験を行い、重錘質量、重錘底面積、落下高および地盤密度によ

り、加速度波形、打撃応力波形、土圧波形、地盤内の応力減衰および重錘貫入量がどのように生じるか、また何に依存するかを調べ、重錘落下による衝撃締固め機構を考察した。

2. 実験方法

(1) 試料

試料は、奈良県生駒山系で採取したまさ土を選び、予めロサンゼルス試験機で脆弱な粒子を破碎させ、最大粒径 $D_{max}=2\text{mm}$ に調整している。試料の粒度分布を図-1に、物理性質を表-1に示した。試料の細粒分含有率 F_c が5%以上あり、JGS T 161の最大・最小密度試験は適用できないので、最大乾燥密度 ρ_{dmax} は締固め試験(JIS A 1210 A-b法)の最大乾燥密度で、また最小乾燥密度 ρ_{dmin} は気乾状態の試料を内径10cmのモールドに漏斗で落下高0.5cmで層厚7.5cmにまきだし、直径10cm、質量775gのステンレス板を静かに載せ、底面からゆっくり水浸させて沈下が収まったときの密度で定義した。

(2) 実験装置

a) 模型地盤

模型地盤は直径30cm、高さ35cmのステンレス鋼製モールド内に層厚30cm(層厚の設定値については後述する)に作成した。最適含水比 w_{opt} に調整した

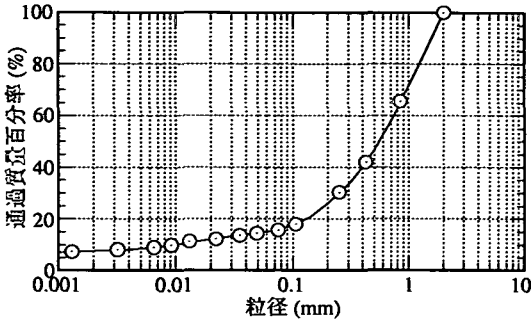


図-1 試料の粒度

表-1 試料の物理性質

ρ_s (g/cm ³)	D_{max} (mm)	F_c (%)	U_c	ρ_{dmin} (g/cm ³)	ρ_{dmax} (g/cm ³)	w_{opt} (%)
2.71	2.0	15.7	77	1.325	1.918	11.8

表-2 模型地盤の締固め条件

D_r (%)	w_0 (%)	ランマー 質量(kg)	落下高 (cm)	打撃回数 (回)	締固め 層数(層)
10	11.8	10.2	3	5	10
35		〃	5	10	〃
50		〃	10	〃	〃
65		〃	20	〃	〃
75		〃	〃	20	〃
85		〃	〃	40	〃

ランマー底面：φ30cm円盤

試料を10層に分けて締固めた。締固め密度は相対密度 $D_r=35\%$ を標準とし、地盤密度の影響を調べるために $D_r=10, 50, 65, 75, 85\%$ を加えた。模型地盤を均一に締固めるために、モールド内径と同じ直径の底板を持つランマー（質量 10.2kg）を用い、一次元的に地盤を締固める手法を採った（底板には空気抜き溝と孔を設けてある）。各密度に対する締固め条件を表-2にまとめた。

b) 重錘落下装置と重錘

重錘打撃は図-2に示す重錘落下装置を用い、地盤の中央を複数回打撃し、重錘加速度と地盤底面土圧を測定した。打撃後、重錘貫入量と地盤面沈下量を測定した。

重錘はロッド、質量調整板、加速度計取付部、貫入柱からなり、重錘を鉛直に自由落下させるためにロッドをガイド板に沿わせている。ガイド板にはテフロンブッシュを入れ、さらにシリコンオイルで摩擦を軽減している。重錘は質量調整板を交換することにより質量 m を 1.25, 2.5, 5kg に、貫入柱を交換することにより底面積 A を 9.84, 19.63, 39.26cm²（それぞれ直径 3.54, 5.0, 7.07cm）に変えた。重錘の底面形状は円柱・平底とした。底面形状が加速度波形に与える影響については後述する。

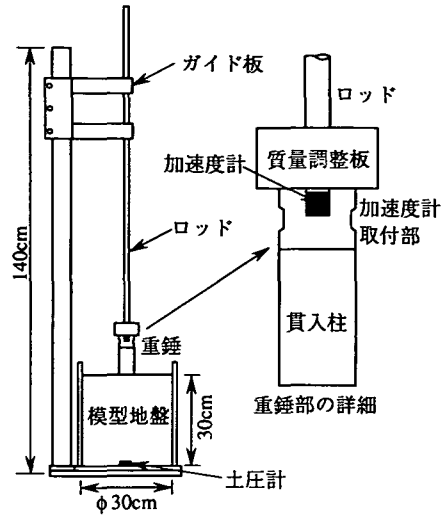


図-2 重錘落下装置

c) 加速度と土圧の計測方法

加速度計取付部には容量の異なる2種類の加速度計（ひずみゲージ式で容量 50g（固有振動数 2300 Hz）、100g（4000Hz）、200g（6000Hz）を打撃条件に応じて選ぶ）を取り付けた。これはデータの信頼性の確認と複数回打撃による加速度の急増に対応するためである。また模型地盤を作成するモールドの底板中央には土圧計（直径 3cm、容量 5kgf/cm²）を取り付けた。これらの波形を動ひずみ計（応答周波数 DC~10kHz）で測定し、データアナライザー（AD変換 12bit、最小サンプリング周期 20μsec）によりサンプリング間隔 100μsec で記録した。

(3) 加速度測定の予備実験

a) ローパスフィルターの影響

一般にある対象物に重錘を衝突させて重錘に発生する衝撃加速度を計測すると、重錘自身に発生する高周波の弾性波も計測される。そのためこのような実験では動ひずみ計で捉えられるアナログ波にローパスフィルター（LPF）をかけ、高周波成分を除去するのが一般的である。そこで加速度波形に与える LPF の影響を調べた。実験条件は $D_r=35\%$ 地盤（層厚 30cm）で、打撃条件 $m=2.5\text{kg}$, $A=19.63\text{cm}^2$, 落下高 $H=30\text{cm}$ である。

計測結果を図-3に示した。加速度は上向きを正とし、落下前の静止時を初期値(0g)としているので、加速度は自由落下時に $-1g$ 、静止時に 0g となる（以下同様）。LPF をかけない場合には、地盤との衝撃による1つの大きな波の上に高周波の小さな波がのった形となっている。この傾向は 1kHz の LPF でも同様で、300Hz ではほぼ高周波の波が消えている。

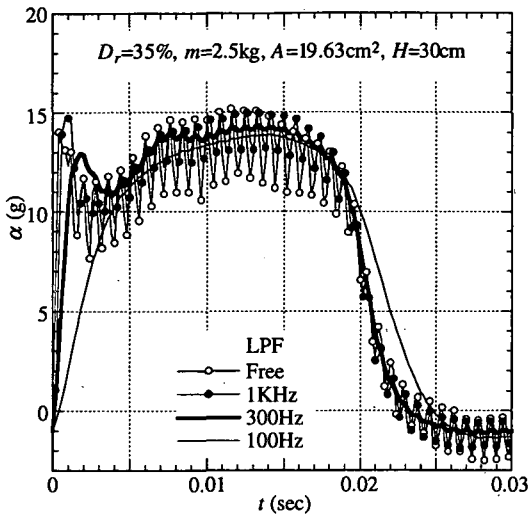


図-3 加速度波形に与えるローパスフィルターの影響

しかし 100Hz では重錘が地盤へ貫入していくときの波形まで変化している。LPFが1kHzと300Hzで加速度の立ち上がりが異なるが、これも高周波成分の影響と考えられる。この結果から、以下の実験では300HzのLPFをかけて計測した。

b) 地盤層厚の影響

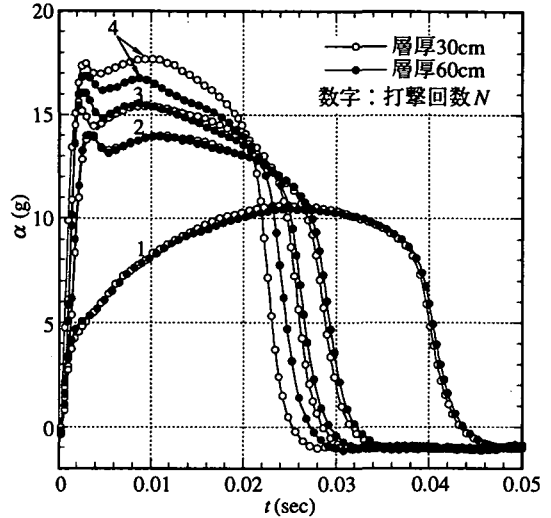
模型地盤の底面が剛板であるため、重錘加速度と重錘貫入量を計測する場合には、衝撃力の反射波と底面の影響が懸念される。そこで加速度波形に与える模型地盤層厚の影響を調べた。 $D_r=40\%$ 地盤の層厚を30, 60cmに変え、最も重錘貫入量が大きくなる $m=5\text{kg}$, $A=9.84\text{cm}^2$, $H=60\text{cm}$ で4回打撃した場合を比較した。

図-4 (1), (2)にそれぞれ両者の打撃回数 $N=4$ までの加速度波形と地盤底面の土圧波形を比較した。図(2)には打撃毎の重錘貫入量 P を示した。加速度波形は2つのピークを持ち、 N の増加とともに第1ピークが卓越してくる。土圧 p は加速度 α と似た波形となるが、 p の発生は α よりも遅れる。遅れ時間は当然層厚30cmの方が小さく、 N の増加とともに小さくなる。これは重錘貫入に伴う層厚減少と地盤が締め固められて衝撃応力の伝播速度が上がるためである。

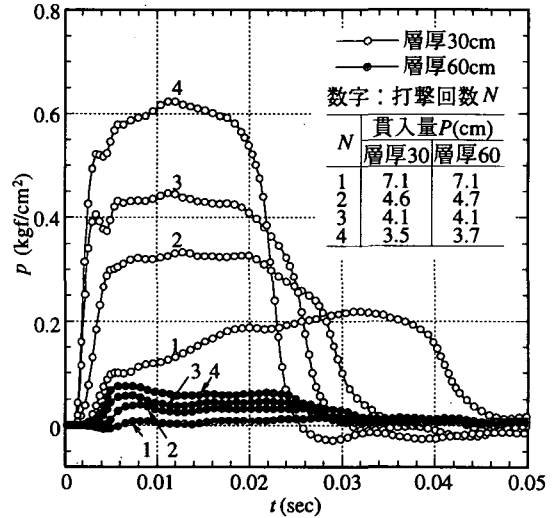
地盤表面に与えられる打撃応力 σ は、静止時を $\alpha=0g$ としているため、次式で求められる。

$$\sigma = (\alpha + 1) \times m/A \quad (1)$$

最大土圧 p_{max} は当然層厚30cmの方が大きい。層厚30cmの場合の最大加速度 α_{max} から式(1)で最大打撃応力 σ_{max} を求めると、 $N=1\sim 4$ に対して5.9, 7.7, 8.7, 9.5kgf/cm^2 となり、 p_{max} はそれぞれ1/26, 1/23, 1/19, 1/15程度に減衰している。層厚60cmでは減衰率はさらに大きい。



(1) 加速度波形



(2) 土圧波形

図-4 加速度、土圧波形に及ぼす地盤層厚の影響 ($D_r=40\%$, $m=5\text{kg}$, $A=9.84\text{cm}^2$, $H=60\text{cm}$)

加速度波形を見る限り、底面からの反射波の影響は特に現れていない。両者の α および P は $N=1\sim 3$ まではほぼ一致している。 $N=4$ では層厚30cmの方が α が大きく、衝撃持続時間が短く、 P が小さいことから、底面の影響がやや現れているが、反射波が加速度に与える影響は小さいと考えられる。 $N=3$ までの P の累積値は約15cmとなっていることから、地盤層厚30cmでは重錘貫入量が15cmの範囲(層厚の1/2)までは底面の影響はないと考えられる。また、地盤密が高い場合には重錘貫入量が小さくなるので、層厚の影響も小さくなると考えられる。以下の実験では地盤層厚は30cmとした。

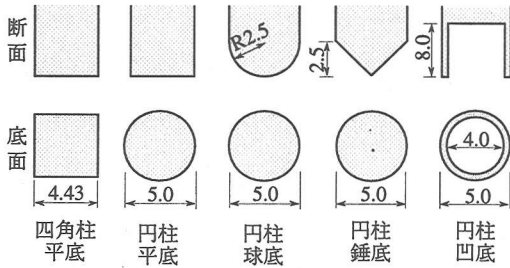


図-5 重錘底面形状 (単位cm)

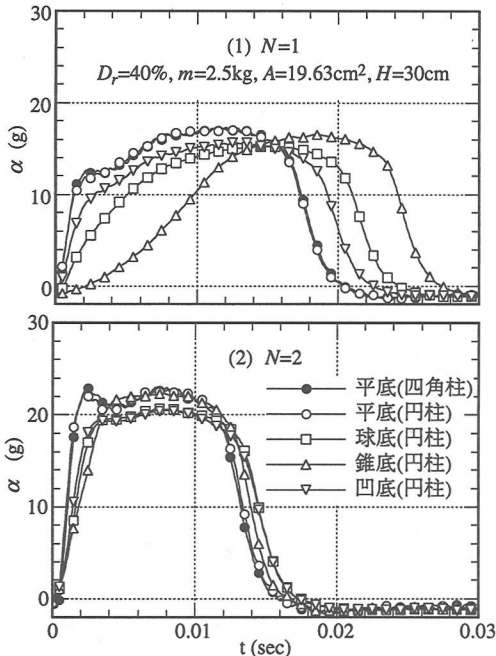


図-6 重錘底面形状と加速度波形

c) 重錘底面形状の影響

図-5に示す貫入柱を持つ重錘を用いて、底面形状の影響を調べた。いずれも断面積は同じ $A=19.63 \text{ cm}^2$ である。実験条件は $D_f=40\%$ 地盤、 $m=2.5 \text{ kg}$ 、 $H=30 \text{ cm}$ である。

図-6に打撃回数 $N=1, 2$ の加速度波形を比較した。 $N=1$ では、平底の四角柱と円柱の波形はほぼ一致し、2つのピークを持つ。球底、錐底は滑らかな波形を示し、 α_{max} はやや小さい。凹底は第1ピークが不明瞭であるが、その形状は平底と類似している。 $N=2$ では、底面形状によらず全て2つのピークを持つ似た形状となり、平底の四角柱と円柱は一致するが、球底、錐底、凹底の加速度はやや小さい。 $N=1$ の波形が異なるのは、平底では重錘底面が同時に地盤と接触するのに対し、球底、錐底では地盤面に接触する面積が貫入とともに増加するためである。また凹底では重錘先端の底面積は平底の36%である

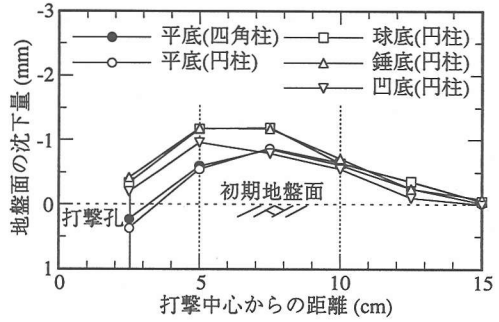


図-7 重錘底面形状と地盤面沈下量

表-3 実験条件

D_f (%)	質量 m (kg)	底面積 A (cm^2)	m/A (kg/cm^2)	落下高 H (cm)
35	1.25	39.26	0.032	15
	〃	19.63	0.064	30
	〃	9.84	0.127	60
	2.5	39.26	0.064	120
75	〃	19.63	0.127	15
	〃	9.84	0.254	
	5.0	39.26	0.127	30
	〃	19.63	0.255	60
10, 50, 65, 85	2.5	19.63	0.127	30

重錘の底面形状は平底円柱

が、内部で土の閉塞効果が發揮されるために平底と大きな差は生じなかったと考えられる。 $N=1$ で底面形状に応じた打撃孔が形成されるため、 $N=2$ の波形は底面形状の影響をあまり受けていない。

図-7に $N=1$ 打撃後に測定した地盤面形状を示した。平底に比べて球底、錐底、凹底の地盤面の膨張量が大きい。締固め効果は平底が優れている。以下の実験には円柱・平底の重錘を用いた。

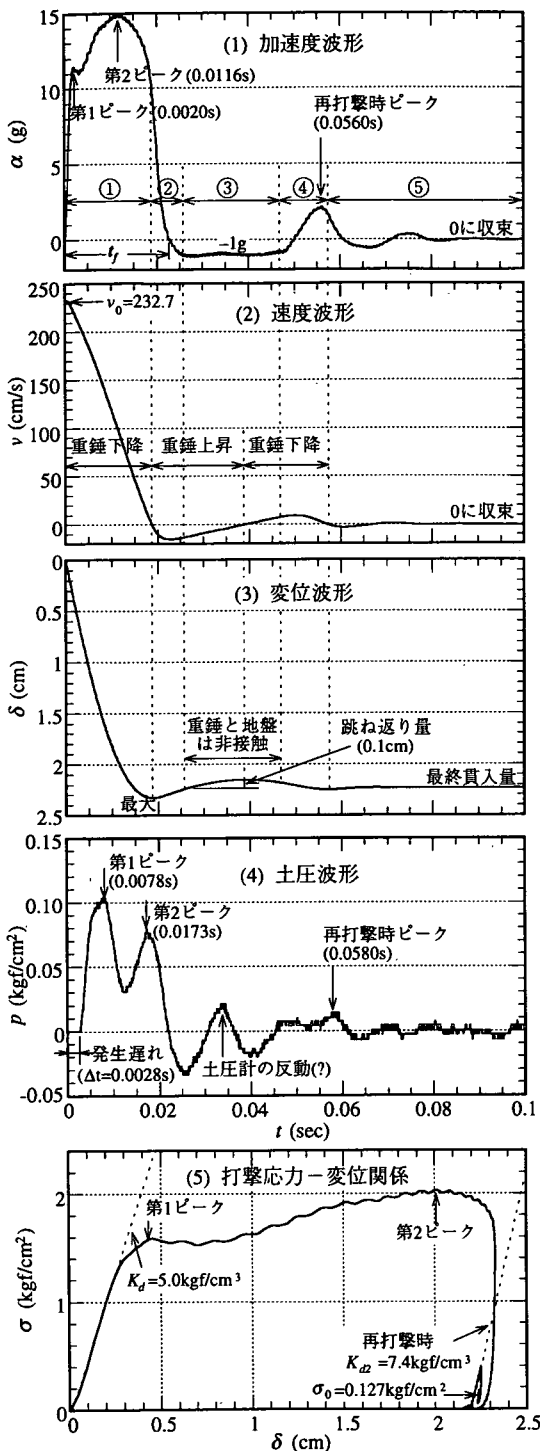
(4) 実験条件

表-3に実験条件をまとめた。重錘質量 m 、底面積 A 、落下高 H がそれぞれ2倍ずつ増える値を組合わせた(重錘条件としては9種類)。ただし、 $D_f=35\%$ 、 $m=5 \text{ kg}$ 、 $A=9.84 \text{ cm}^2$ 、 $H=120 \text{ cm}$ のケースは重錘貫入量が15cmに達すると考えられたため行っていない。また $D_f=75\%$ 地盤では打撃による地盤変形範囲がごく狭いので、1つの模型地盤内の3ヶ所で打撃した(土圧の測定は行っていない)。3ヶ所で打撃することによる加速度波形への影響はないことは事前に確認している。

3. 打撃条件と衝撃波形

(1) 計測結果の処理と重錘挙動

図-8に代表例として $D_f=35\%$ 地盤の [$m=2.5 \text{ kg}$,



図一八 計測結果の処理と重錘挙動の例
 ($D_r=35\%$, $m=2.5\text{kg}$, $A=19.63\text{cm}^2$, $H=30\text{cm}$)

$A=19.63\text{cm}^2$, $H=30\text{cm}$] の打撃回数 $N=1$ における重錘の加速度 α , 速度 v , 変位 δ , 土圧 p の波形および打撃応力 σ と変位 δ の関係を示した。 v , δ は α のそれ

ぞれ1, 2回時間積分から, また σ は式(1)から求めている。初期速度 v_0 ($=232.7\text{cm/s}$) は, 最終的に $v=0$ となるように逆算して求めたが, $\sqrt{2gH}=242.6\text{cm/s}$ よりもわずかに小さい。これは落下装置と重錘ロッドの摩擦および落下時の空気抵抗の影響と考えている。

各波形から重錘の挙動を説明すると(図(1)の丸数字に対応), ①重錘が地盤を打撃し, $v=0$ となる時点で δ は最大となる。加速度波形は2つのピークを持つが, v , δ からこれらは識別できない。② $v < 0$ で重錘は跳ね返って上昇しているが, 地盤も同様に膨張しているため, 重錘は地盤から反力を受けている。③ $\alpha = -1g$ となり, 重錘は地盤から離れ(非接触), $v=0$ となるまで慣性で上昇を続け, その後 $v > 0$ で再び下降していく。この間の重錘の跳ね返り高さは約 0.1cm である。④再び地盤を打撃する(再打撃)。⑤小さな跳ね返りを繰り返し, $\alpha = 0g$, $v = 0$, $\delta = P$ (最終貫入量) へ収束し, 重錘は静止する。 δ の収束値 P は実測した貫入量 2.1cm にほぼ等しく, 加速度は正しく測られている。重錘が跳ね返るため, 衝撃現象は繰返し生じるが, ここでは1つの指標として図(1)に示すように初期打撃における α が0となる時間までを衝撃持続時間 t_f と定義した。

土圧 p は α に対して $\Delta t = 0.0028\text{s}$ 遅れて発生している。この時間から応力の伝播速度 c および波動論から地盤の弾性定数 E を求めると,

$$c = 0.3\text{m} + 0.0028\text{s} = 107\text{m/s}$$

$$E = c^2 \rho = 107^2 \times 1.66 = 19.0\text{MN/m}^2 = 194\text{kgf/cm}^2$$

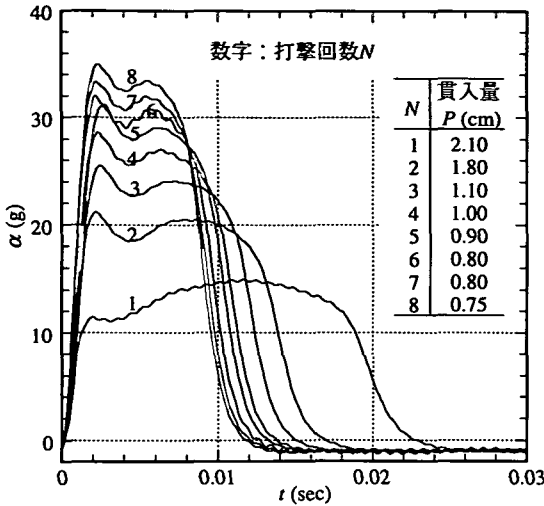
となる。 p も α と同様に2つのピークを持つが, p の第1ピーク時間は α よりも 0.0058s 遅れ, Δt に一致しない。また $\alpha = -1g$ を示す過程で, p が生じているが, これは土圧計を容器底面に固定したための反動と考えられる。これらの点は今後の課題としたい。

σ - δ 関係は動的な平板載荷試験における荷重強さと沈下量の関係に, また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 に相当する。 σ は最終的に重錘の自重応力 $\sigma_0 = 0.127\text{kgf/cm}^2$ に収束する。この σ - δ 関係を通常の静的な応力-変位関係と対照すれば, 初期の直線部が弾性域に, その後が塑性域(ひずみ硬化)に, 下降部が除荷域に相当する。初期, 再打撃における K_d は, それぞれ $5.0, 7.4\text{kgf/cm}^2$ となり, 初期打撃によって地盤が締固められていることがわかる。

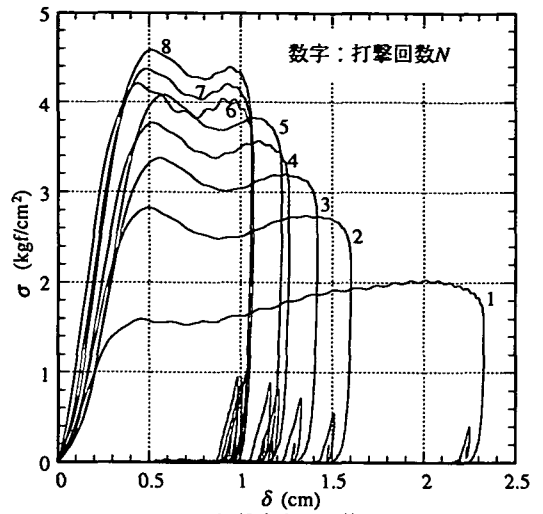
計測結果の処理は, 他の打撃条件でもこれと同様に行った。

(2) 複数回打撃における波形

図一九に図一八と同ケースで8回連続打撃したときの加速度波形, 打撃応力-変位関係を示した。図



(1) 加速度波形



(2) 打撃応力-変位関係

図-9 複数回打撃における波形 ($D_r=35\%$, $m=2.5\text{kg}$, $A=19.63\text{cm}^2$, $H=30\text{cm}$)

中に重錘貫入量 P も示した。打撃回数 N の増加とともに α_{max} は大きくなり、 t_f は短くなる。波形はやはり2つのピークを持つが、 α_{max} は $N=1$ では第2ピークで、 $N=2$ 以降は第1ピークで生じている。打撃応力-変位関係は N の増加とともに初期勾配が増加し、変位が減少している。しかし $N=6$ 以降の P はほぼ一定となっている。これは N の増加とともに重錘直下の地盤の締固めが飽和状態に達するためと考えられる。

(3) 打撃条件と衝撃波形の関係

a) 加速度波形

図-10 に $D_r=35\%$ 地盤で行った全ケースの打撃回数 $N=1$ 回目の加速度波形を重錘条件別に示した。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。また図中の()内は重錘貫入量 P (cm) を表す。重錘条件によって波形形状は大きく異なっているが、 m/A が同じ場合には各落下高 H 毎にほぼ同じ形状を示す。波形は2つのピークを持ち、最大加速度 α_{max} は m/A が小さいときは第1ピークで、 m/A の増加とともに第2ピークで生じるようになる。 m/A が大きいほど α_{max} は小さく、衝撃持続時間 t_f は長く、重錘貫入量 P は大きい。 t_f は H が高くなると長くなる傾向が見られるが、あまり大きな違いはない。また第1ピークが発生する時間は打撃条件によらず一定で、ほぼ 0.0020s である。

b) 打撃応力波形

図-11 に式(1)から求めた同じケースの打撃応力波形を示した。当然、波形形状は図-10の α と相似となるが、各 H 毎に σ の第1ピークは m , A によらずほぼ一定であるのに対して、第2ピークは α とは逆

に m/A が大きいほど大きい。

c) 底面土圧波形

図-12 に同じケースの地盤底面の土圧波形を示した。土圧波形は、図-11の σ と異なり、 m/A には相関はない。 p の第1ピーク値は A (図の縦の並びは同じ A) の増加とともに、最大値は mA (図の右下がり斜めの並びは同じ mA) の増加とともに大きくなっている。

d) 打撃応力-変位関係

図-13 に同じケースの打撃応力 σ -変位 δ の関係を示した。各条件とも H が大きくなると初期の直線部分が長くなるが、動的な地盤反力係数 K_d は打撃条件によらず、ほぼ一定 ($K_d=5.0\text{kgf/cm}^3$) である。これは地盤の弾性抵抗が初期密度のみに依存するためと考えられる。 σ の第1ピーク以降は一旦、軟化挙動を示すが、 m/A が大きい場合には硬化挙動を示した後、除荷に至る。これは m/A が大きいほど重錘貫入が生じやすいため、地盤が締固められ、地盤反力が増加する(地盤の塑性抵抗が増加する)ためと考えられる。

(4) 最大加速度、最大打撃応力、貫入量の性状

文献4)で地盤への重錘貫入現象を非弾性衝突に基づく運動量保存則によって考察し、最大加速度 α_{max} 、重錘貫入量 P が次式のような簡単な関係で表せることを示した。

$$\alpha_{max} = \frac{1}{a_1} \frac{v_0}{t_f} \quad (2)$$

$$P = a_2 v_0 t_f \quad (3)$$

ここに、 a_1 , a_2 は波形係数(無次元量)である。さらに衝撃持続時間 t_f が実測データから式(4)で表され

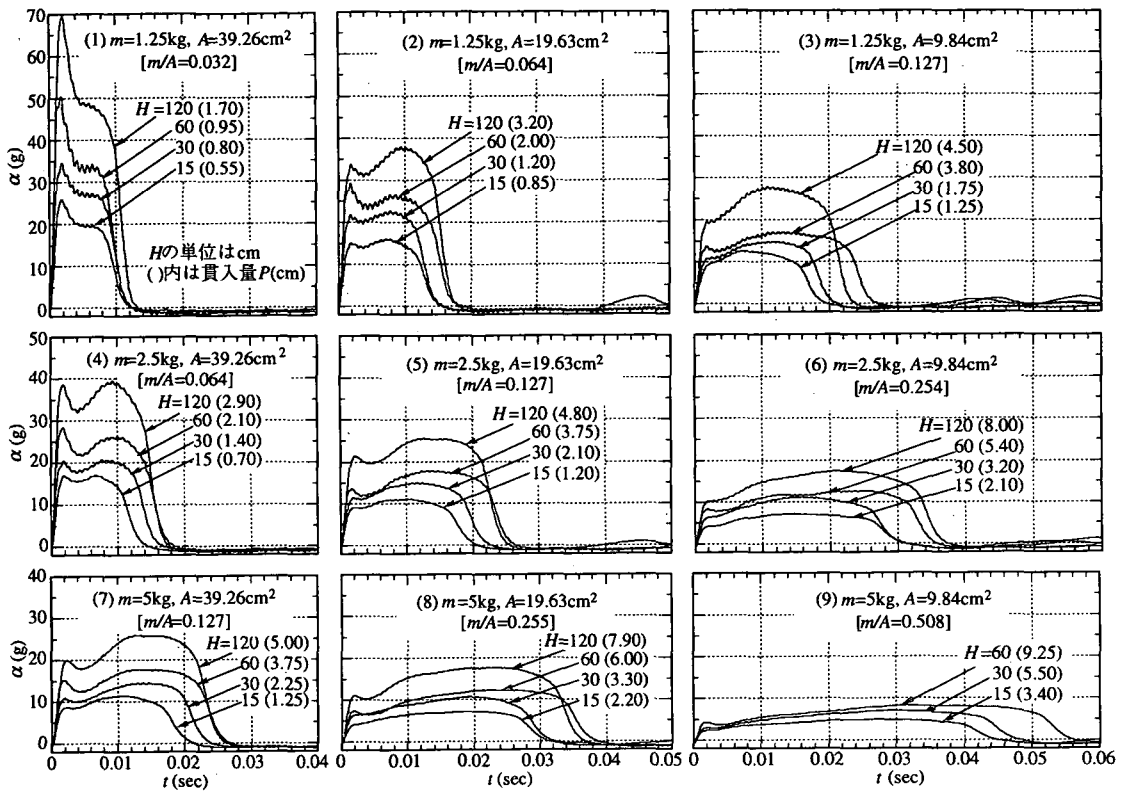


図-10 $D_r=35\%$ 地盤における加速度波形

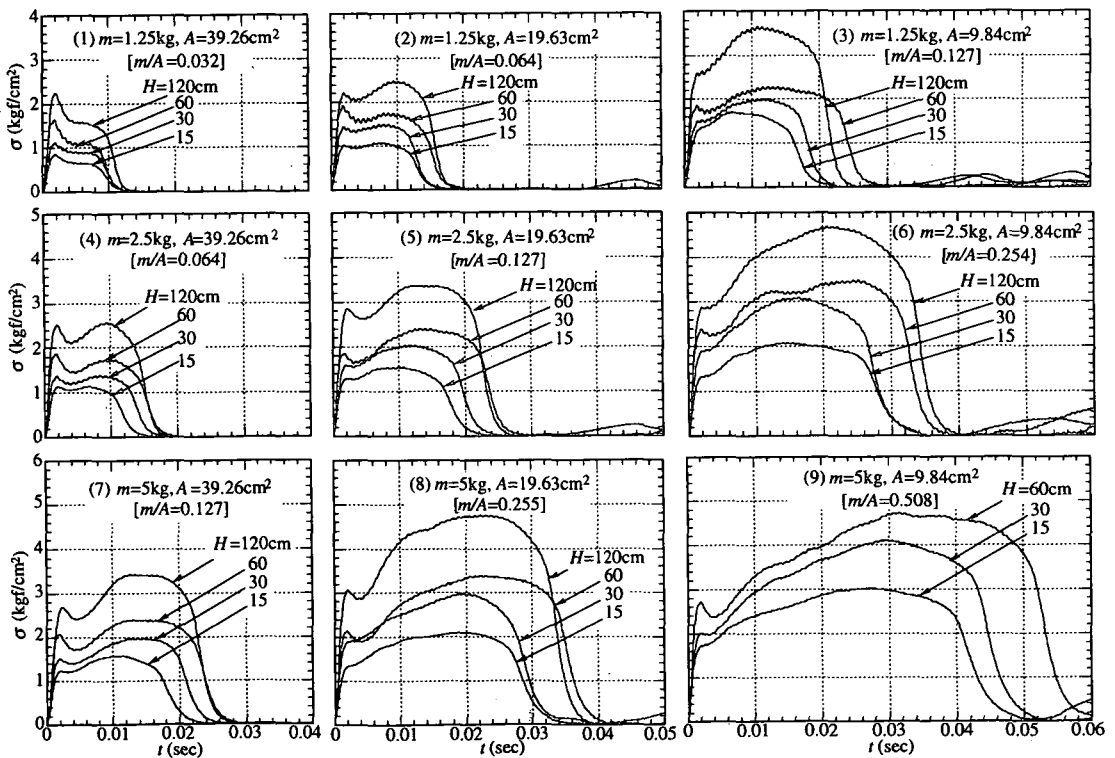


図-11 $D_r=35\%$ 地盤における打撃応力波形

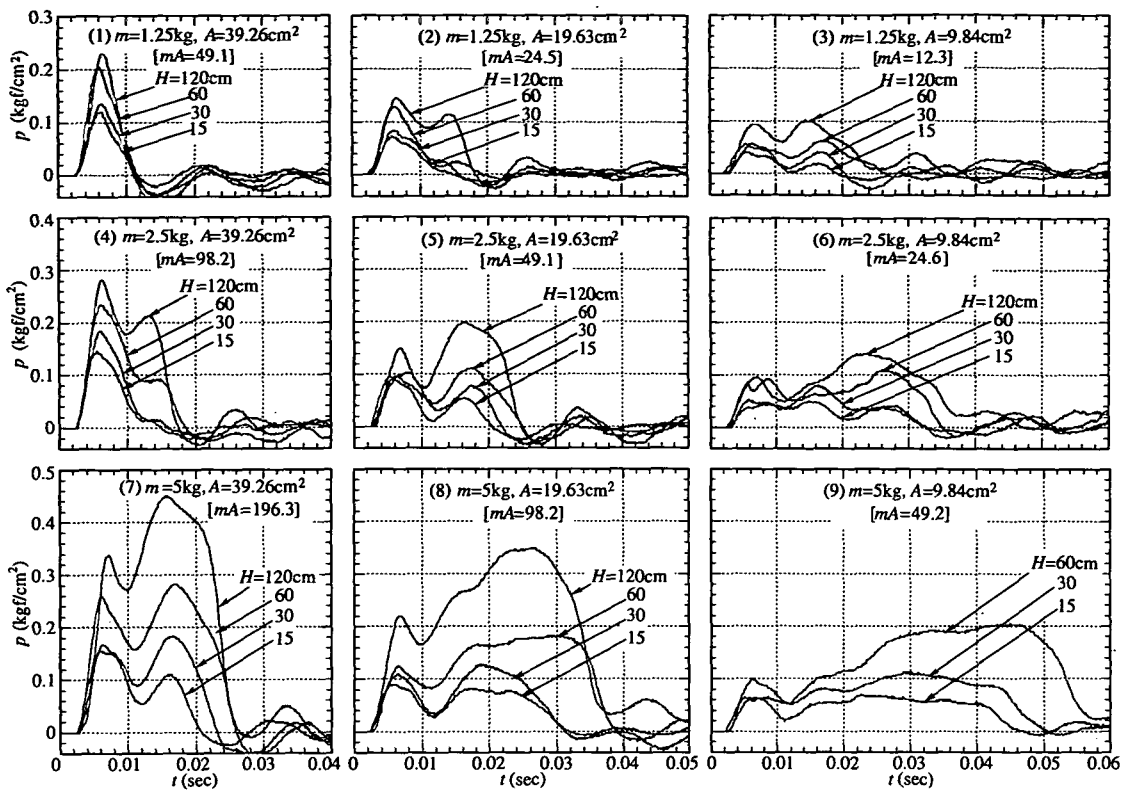


図-12 $D_3=35\%$ 地盤における底面土圧波形

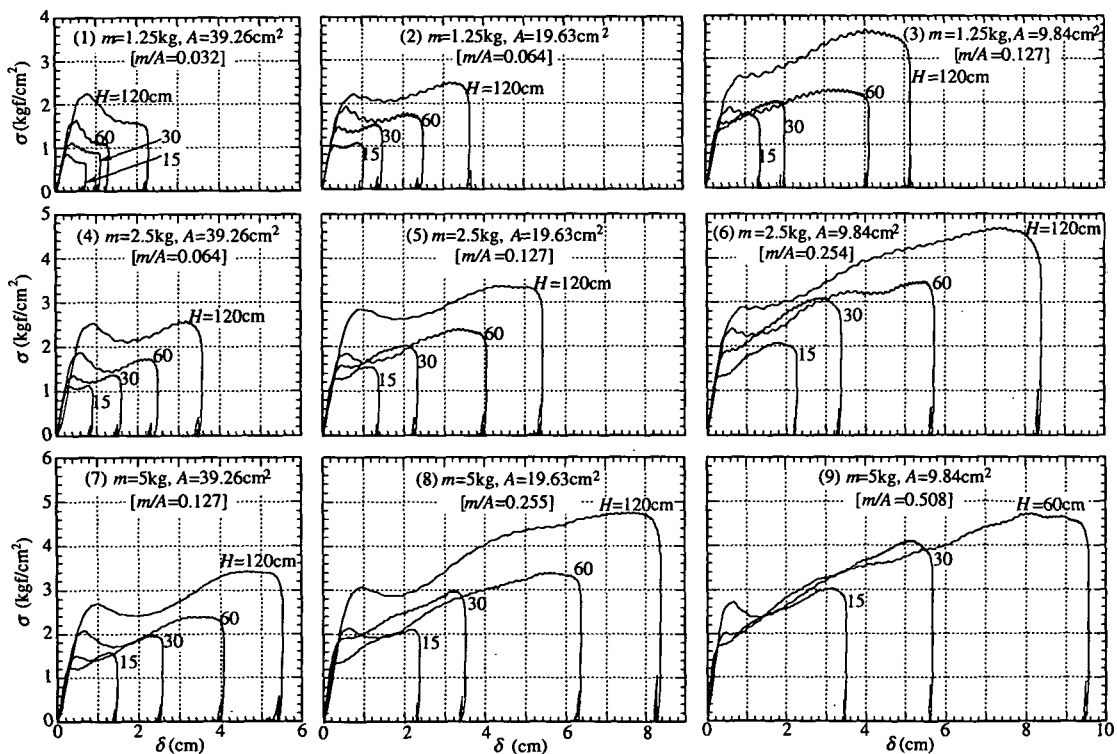
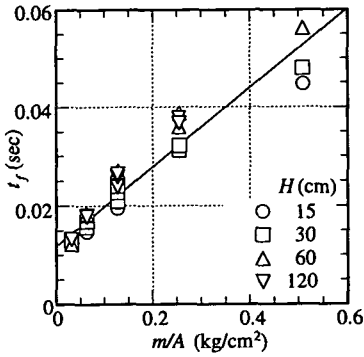
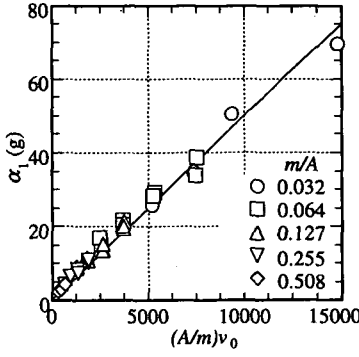


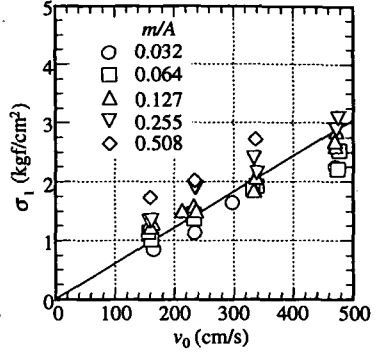
図-13 $D_3=35\%$ 地盤における打撃応力-変位関係



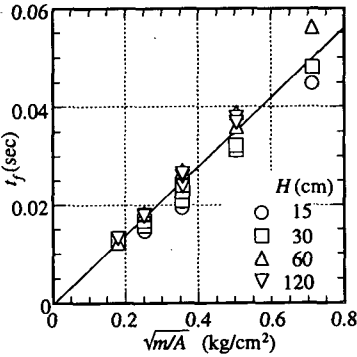
(1) t_f と m/A の関係



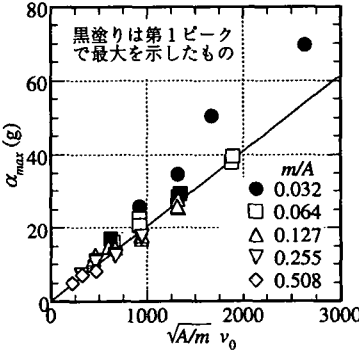
(1) α_1 と $(A/m)v_0$ の関係



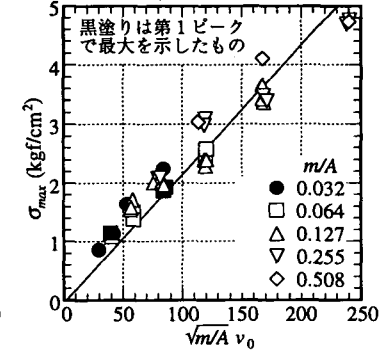
(1) σ_1 と v_0 の関係



(2) t_f と $\sqrt{m/A}$ の関係



(2) α_{max} と $\sqrt{A/m} v_0$ の関係



(2) σ_{max} と $\sqrt{m/A} v_0$ の関係

図-14 衝撃持続時間

図-15 最大加速度

図-16 最大打撃応力

ること、それにより α_{max} , 最大打撃応力 σ_{max} , P が式(5)~(7)で推定できることを示した。

$$t_f = b \frac{m}{A} \quad (4)$$

$$\alpha_{max} = d \frac{A}{m} v_0 \quad (5)$$

$$\sigma_{max} = d v_0 \quad (6)$$

$$P = c \frac{m}{A} v_0 \quad (7)$$

ここに、 b , $d(=1/(a_1 \cdot b))$, $c(=a_2 \cdot b)$ は地盤定数で、地盤が緩いほど b と c は大きく、 d は小さい値をとる。

a) 衝撃持続時間

図-14(1)に $D_f=35\%$ 地盤で行った全ケースの $N=1$ 回目の加速度波形から求めた t_f と m/A の関係を示した。切片をもつ直線関係、ないしはやや上に凸な曲線を示し、式(4)が成立していない。そこで m/A を平方根として整理すると、図(2)に示すように次式の比例関係が得られる。

$$t_f = b' \sqrt{\frac{m}{A}} \quad (8)$$

したがって、この場合には式(2), (3)から、 α_{max} , σ_{max} , P は次式で表される。

$$\alpha_{max} = d' \sqrt{\frac{A}{m}} v_0 \quad (9)$$

$$\sigma_{max} = d' \sqrt{\frac{m}{A}} v_0 \quad (10a)$$

$$P = c' \sqrt{\frac{m}{A}} v_0 \quad (11a)$$

各波形が2つのピークを持ったため、以下では第1ピーク値と最大値に分けて上式の妥当性を調べる。

b) 最大加速度

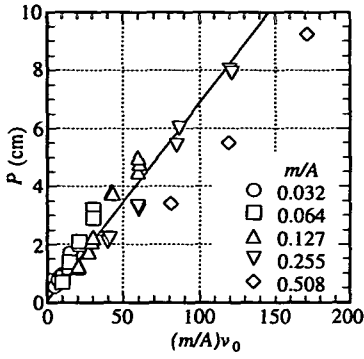
図-15(1), (2)にそれぞれ第1ピーク加速度 α_1 と $(A/m)v_0$ の関係、最大加速度 α_{max} と $\sqrt{A/m}v_0$ の関係を示した。 α_1 は $(A/m)v_0$ にほぼ比例しており、式(5)が成立している。 α_{max} は第1ピークで最大を示すものを除けば、ほぼ比例しており、式(9)が成立している。なお α_{max} を $(A/m)v_0$ で整理すると、やや上に凸の曲線となった⁸⁾。

c) 最大打撃応力

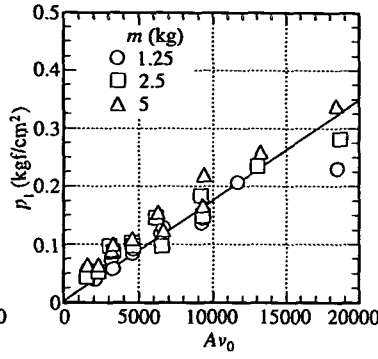
図-16(1), (2)にそれぞれ第1ピーク打撃応力 σ_1 と v_0 の関係、最大打撃応力 σ_{max} と $\sqrt{m/A}v_0$ の関係を示した。打撃応力は式(1)から求めている。 σ_1 は少しばらつきがあるものの、 v_0 に比例しており、式(6)が成立している。 σ_{max} もほぼ比例しており、式(10a)が成立している。なお σ_{max} を v_0 で整理すると、 m/A に依存した結果となった⁸⁾。

d) 重錘貫入量

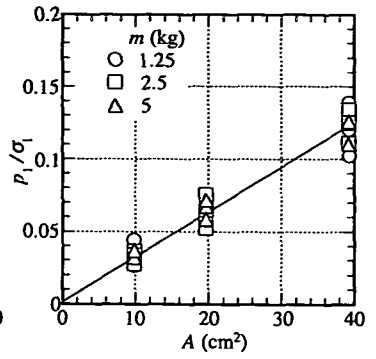
図-17(1), (2)に重錘貫入量 P の式(7), (11a)の妥当性を示した。最も貫入し易い $m/A=0.508$ を除けば、式(7)がほぼ成立している。式(11a)の関係は相関性はよいが、下に凸の曲線関係となった。



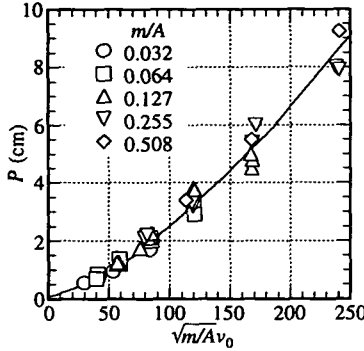
(1) P と $(m/A)v_0$ の関係



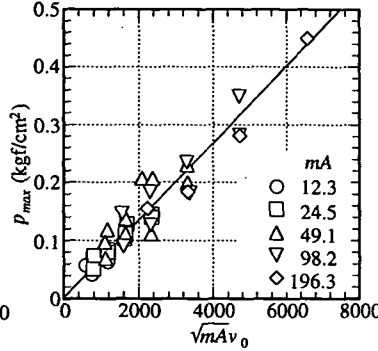
(1) p_1 と Av_0 の関係



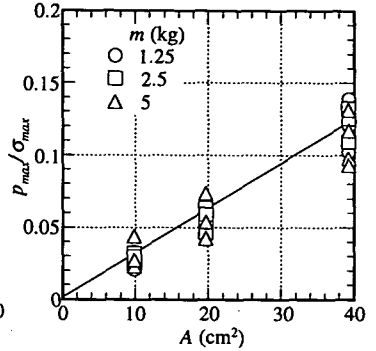
(1) p_1/σ_1 と A の関係



(2) P と $\sqrt{m/Av_0}$ の関係



(2) p_{max} と $\sqrt{mAv_0}$ の関係



(2) p_{max}/σ_{max} と A の関係

図-17 重錘貫入量

図-18 最大底面土圧

図-19 地盤応力の減衰

e) 最大底面土圧

図-12で第1ピーク土圧 p_1 は A に、最大土圧 p_{max} は mA に依存したため、その関係をそれぞれ図-18(1), (2)に示した。両者ともほぼ比例関係が成立している。

f) 地盤応力の減衰

図-16と図-18の関係から、第1ピーク値および最大値における土圧と打撃応力の比、すなわち地盤内での応力の減衰は、ともに重錘底面積 A に依存することになる。その関係を図-19に示した。 m によって少し幅があるものの、ほぼ比例関係が見られる。したがって地盤応力の減衰は m や H に依存せず、 A のみに依存し、 A が小さいものほど減衰が大きいといえる。すなわち動的な荷重載荷の場合にもある深さの地盤内応力が載荷幅に直接関わることを示している。

(5) 衝撃波形と地盤の締固めの考察

文献4)では加速度波形は重錘条件によらず、相似な波形となるものとして扱ったが、今回の測定では波形は相似でなく、特に最大値の出方が重錘条件によって変化することがわかった。第1ピーク値は地盤の初期の弾性挙動に対応するもので、 α , σ , P は

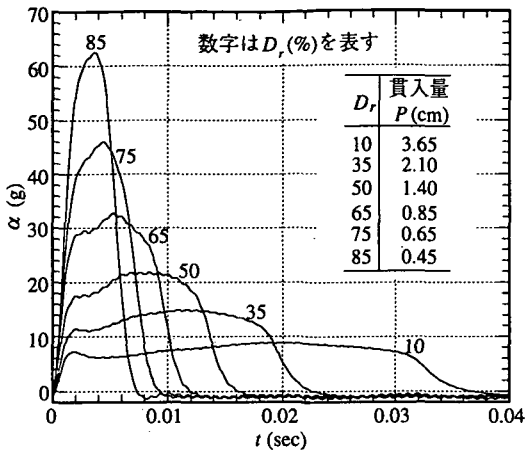
文献4)で提案した前述の関係式(5)~(7)が成り立った。しかし、地盤の塑性抵抗に起因する第2ピーク値は、性状が異なり、式(9)~(11a)が成立した。式(10a), (11a)を変形すると、次式のようになり、 σ , P は打撃エネルギー ($WH=mgH$, W は重錘重量を表す) に依存することになる。

$$\sigma_{max} = d' \sqrt{\frac{2WH}{A}} \quad (10b)$$

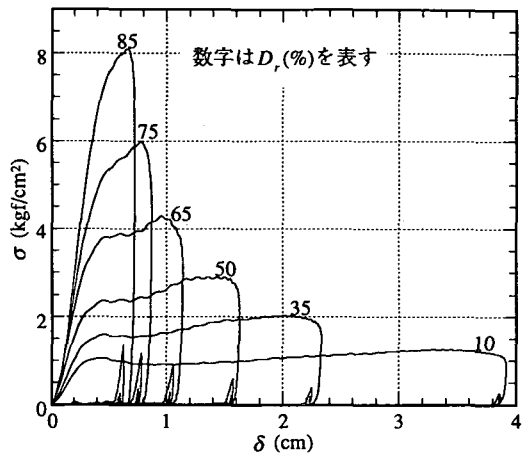
$$P = c' \sqrt{\frac{2WH}{A}} \quad (11b)$$

また最大土圧 p_{max} は $\sqrt{mAv_0}$ に依存したため、やはり打撃エネルギー ($\sqrt{mAv_0} = \sqrt{2WHA}$) に依存することになる。いずれも重錘底面積 A の影響を受ける。

A が小さいほど第2ピークの打撃応力は大きくなったが、逆に地盤内での応力減衰は大きくなった。これは同じ m でも A が小さいほど、荷重分散が著しくなるため、また地盤への重錘貫入量が大きいため貫入による衝撃力の吸収(減衰)が大きくなるためと考えられる。これは重錘落下締固め工法の遠心模型実験で、 m 一定で A のみを変えた場合に、 A が小さいほど打撃孔近傍の変形は大きい、全体的な地盤変形には大きな差がなかったこと¹⁾と整合する。



(1) 加速度波形



(2) 打撃応力-変位関係

図-20 異なる地盤密度における波形 ($m=2.5\text{kg}$, $A=19.63\text{cm}^2$, $H=30\text{cm}$)

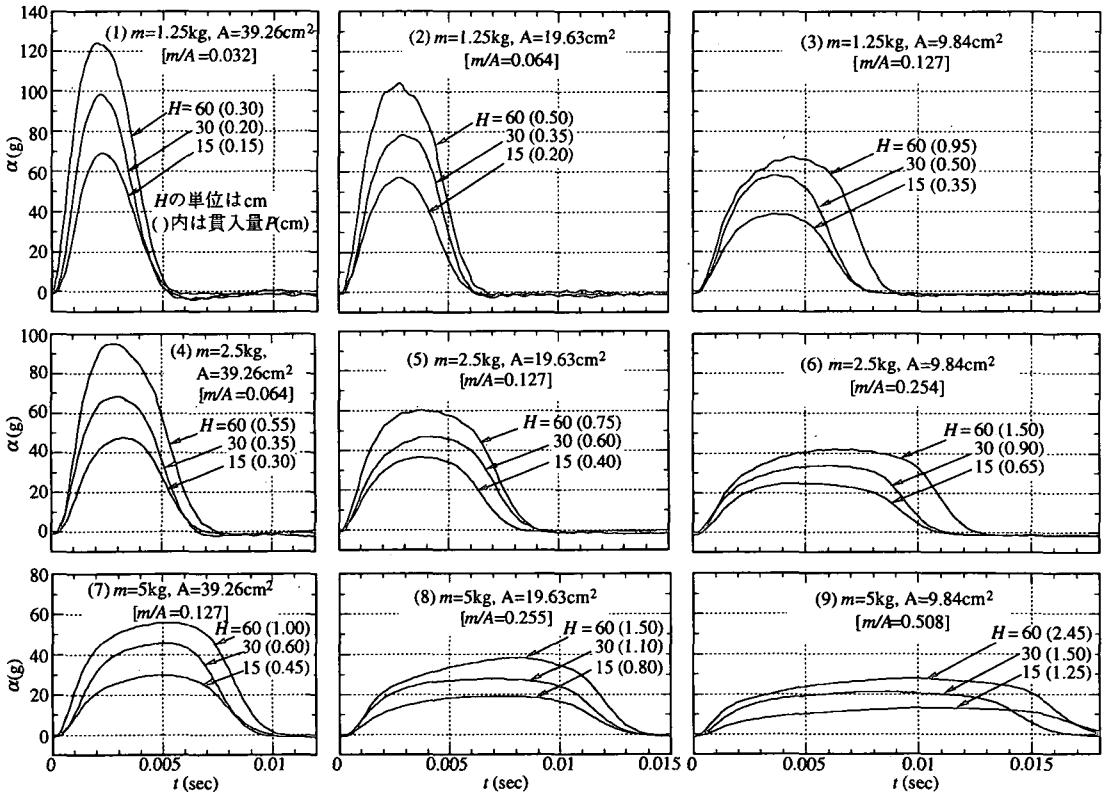


図-21 $D_r=75\%$ 地盤における加速度波形

4. 加速度波形と地盤密度

図-20に $D_r=10, 35, 50, 65, 75, 85\%$ 地盤で行った [$m=2.5\text{kg}$, $A=19.63\text{cm}^2$, $H=30\text{cm}$] の打撃回数 $N=1$ 回目の加速度波形, 打撃応力-変位関係を示した。また図中に重錘貫入量 P を示した。密度が大きいほど, α , σ は大きく, t_p , P は小さい。また動的な

地盤反力係数も大きい。この傾向は図-9に示した複数回打撃の場合と似ている。しかし $D_r=65\%$ 以下では2つのピークが見られるが、それ以上では不明瞭となっている。

図-21に $D_r=75\%$ 地盤で行った全ケースの打撃回数 $N=1$ 回目の加速度波形を重錘条件別を示した。図-10の $D_r=35\%$ 地盤に比べて波形は単純で、ピーク

は1つとなり、 α_{max} は大きく、 t_f は短くなっている。波形は m/A 毎に異なった形状となるが、 $D_r=35\%$ 地盤と同様に同じ m/A では各 H 毎にほぼ同じ形状となり、 t_f に与える H の影響は小さい。図には示さないが、この場合の α_{max} 、 σ_{max} 、 P の性状も $D_r=35\%$ 地盤と同様であった。

5. 結 論

重錘落下による締固め機構を重錘加速度、地盤底面の土圧の測定から調べた。まず、加速度測定の予備実験結果から、以下の結論が得られた。

1) 重錘の衝撃加速度の測定には300Hz程度のローパスフィルターをかけるのがよい。

2) 重錘貫入量の2倍以上の地盤層厚があれば、加速度波形に与える土層底面の影響はない。

3) 重錘の底面形状によって加速度波形は異なるが、底面が正方形と円形の平底はほぼ等しく、また締固め効果は平底が優れている。

次に、地盤密度を変えて重錘加速度、地盤底面の土圧の測定した結果から、以下の結論が得られた。

4) 重錘加速度の波形形状は、重錘条件によって大きく異なるが、重錘の単位面積当り質量 m/A に依存し、落下高の影響はあまり大きくない。

5) 重錘加速度、底面土圧波形は2つのピークを持ち、 m/A が大きいほど第2ピークで最大を示す。また第1ピークが発生する時間は、打撃条件によらず一定を示す。

6) 第1ピーク値は地盤の弾性挙動に、第2ピーク値は塑性挙動に起因すると考えられる。両者でその影響要因が異なり、前者は既提案式で推定でき、後者は打撃エネルギーと重錘底面積に依存する。

7) 地盤内の応力減衰は、重錘質量、落下高によらず、重錘底面積が小さいほど大きい。

今後、重錘加速度に与える土の種類や飽和度の影響を調べていきたい。

謝辞：実験に協力された山崎康弘氏（(株)大成建設、元大阪市立大学大学院生）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: 重錘落下締固め工法の打撃点間隔と改良深度 - 砂質地盤に対する運動量に基づく設計法 -, 土木学会論文集 (投稿中) .
- 4) 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.
- 5) 佐藤厚子, 能登繁幸, 下条晃裕: 衝撃加速度による盛土の品質管理方法, 第35回北海道開発局技術研究発表会, pp.123~128, 1991.
- 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) 大島昭彦, 高田直俊, 福本彦吉: 地盤を重錘打撃するときの重錘挙動の測定 - 打撃条件と地盤条件の影響 -, 第29回土質工学研究発表会, pp.2057~2060, 1994.
- 8) 福本彦吉, 大島昭彦, 高田直俊: 重錘落下による打撃応力波形と底部土圧波形, 土木学会第49回年次学術講演会, III-723, pp.1436~1437, 1994.
- 9) 大島昭彦, 高田直俊, 福本彦吉: 重錘落下による重錘加速度および地盤応力と打撃条件の関係, 土木学会第49回年次学術講演会, III-722, pp.1434~1435, 1994.
- 10) 山崎康弘, 大島昭彦, 高田直俊: 重錘落下による衝撃加速度に与える重錘底面形状と土の種類の影響, 土木学会第50回年次学術講演会, III-261, pp.522~523, 1994.

(1996.5.31 受付)

RAM PENETRATION BEHAVIOR AND ENSUING EARTH PRESSURE DURING RAM BLOW ON SANDY SOIL

Akihiko OSHIMA, Naotoshi TAKADA and Hikoyoshi FUKUMOTO

Measurement of impact acceleration of ram, earth pressure and ram penetration of ground was carried out under a variety of ram mass, ram base area and drop height in a series of the laboratory compaction tests. The waveforms of ram acceleration for the cases where the ram mass per unit ram base area is the same show a similar form, although the waveform changes remarkably with changes of the ram mass and ram base area. The waveform has two peaks; the first one is considered to be dependent on the elastic behavior of the soil and second one on the plastic behavior. The former can be interpreted in respect of the ram momentum and later in respect of the kinetic energy of the ram.