

## (27) 地盤へ重錘が衝突するときの衝撃力

大阪市立大学工学部 ○大島昭彦 高田直俊

### 1. はじめに

落石覆工(ロックシェッド)の耐衝撃問題の研究で、コンクリート構造物上の敷砂層に重錘を落とし、重錘の衝撃加速度を測定してコンクリート構造物に生じる衝撃力を調べる実験が数多く行われている。しかしこれまでの研究では構造物の挙動に重きがおかれ、敷砂層に対する考察が希薄のように思われる。筆者らは、重錘を落下させたときの衝撃力を利用して地盤を締固める工法(重錘落下締固め工法)の締固め機構を遠心模型実験によって調べており、これまでに重錘の地盤への貫入量や地盤圧縮量は打撃エネルギーではなく、重錘運動量に強く依存することを報告している<sup>1),2)</sup>。

本論文は地盤に対する重錘の衝撃力を対象に、まず重錘の衝撃加速度がどのように生じているか、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、加速度波形と重錘質量、重錘底面積、落下高の関係を求め、これ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<sup>3)</sup>。

### 2. 重錘衝突時の衝撃加速度

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)が大きいため、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、重錘の跳ね返りのない完全非弾性衝突を考える。

いま、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。上式の $F(t)$ が衝撃力で、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。

次に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、

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

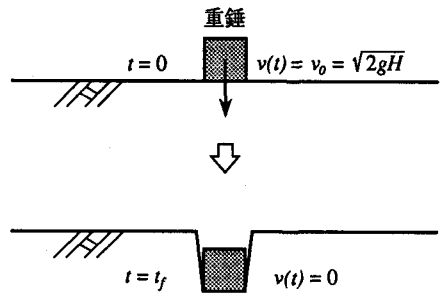


図-1 地盤への重錘貫入

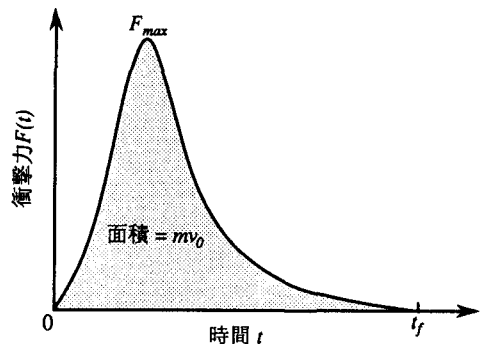


図-2 衝撃力波形

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無次元係数で地盤状態に依存し、0~0.5の値をとる<sup>3)</sup>。 $a_1=0.5$ 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、常識的に0.5を越えることはない。

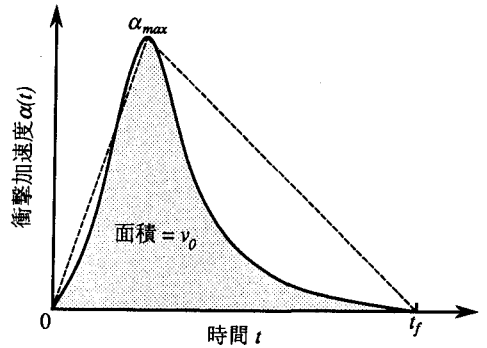


図-3 重錘の衝撃加速度波形

### 3. 衝撃持続時間 $t_f$

$t_f$ は重錘質量 $m$ 、落下高 $H$ 、重錘底面積 $A$ 、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、実規模実験の測定記録から前三者の影響を調べた。

#### 3.1 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 $m=25t$ 、 $A=4m^2$ で、 $H$ を1、2、5、10mに変えた時の重錘の $\alpha(t)$ を測定した。

図-4にその加速度波形を示した。 $H$ 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が、各波形とも $H$ によらずほぼ相似形である。 $\alpha_{max}$ は $H$ とともに増すが、 $t_f$ は $H$ によらずほぼ一定である。図中にこれらの測定値に対する式(4)の波形係数 $a_1$ の値も示したが、 $H$ による変化は小さく、いずれも0.22程度の値を示す。

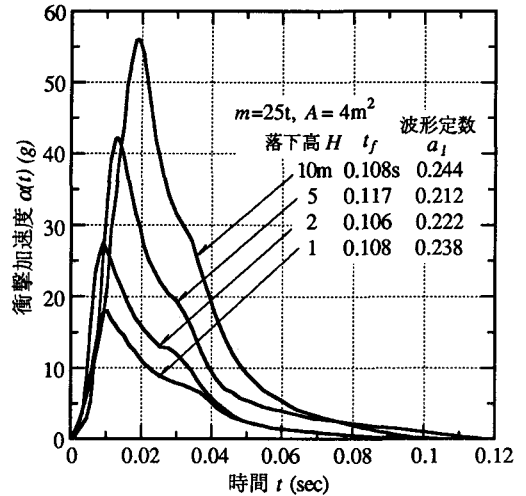


図-4 落下高と衝撃加速度波形

図-5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。これは衝撃加速度の $t_f$ までの時間積分が $v_0(=\sqrt{2gH})$ 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。

#### 3.2 落石覆工への重錘落下実験での測定例

次に、梶谷ら<sup>4)</sup>による落石覆工への実規模の重錘落下実験を示す。重錘は $m=0.3, 1, 3t$ 、(底面は球状で、それぞれ $A=0.28, 0.64, 1.33m^2$ )で、 $H=5, 10, 15, 20m$ から、コンクリート基礎上の厚さ90cmの砂層(粒度のそろった山砂)上に落下させている。

図-6に $t_f$ と単位面積当りの重錘質量 $m/A$ の関係を示した(原文の図を再整理。ただし $t_f$ は同条件の値の平均値)。 $t_f$ は $m/A$ にほぼ比例し、落下高 $H$ はあまり影響していない。

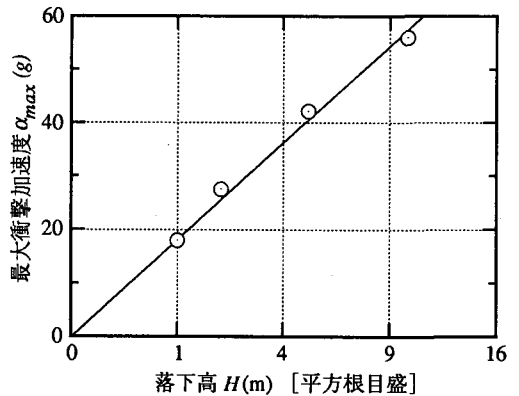


図-5 最大衝撃加速度と落下高の関係

$H$ は $t_f$ に影響しないことは、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、同じ $H$ 、 $A$ で $m$ が大きいほど $\alpha_{max}$ は小さいこと、同じ $H$ 、 $m$ 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 $t_f$ 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、 $m/A$ 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。

$$t_f = b \frac{m}{A} \dots\dots\dots (5)$$

$b$ 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. 衝撃加速度，衝撃力，衝撃応力の性状

##### 4.1 衝撃加速度

式(4)に式(5)を代入して $t_f$ を消去すれば、 $\alpha_{max}$ は次式のようにになる。

$$\alpha_{max} = d \frac{A}{m} v_0 \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 $d$ は地盤定数( $v_0 m^2/s$ )で、 $d=1/(a_1 b)$ である。波形係数 $a_1$ に比べて地盤定数 $b$ の方が変化幅が大きいので、 $d$ は主として $b$ に依存し、ゆるい地盤ほど小さい値をとる。式(6)から $\alpha_{max}$ は $A$ と $v_0$ に比例し、 $m$ に反比例し、ゆるい地盤ほど小さくなることがわかる。地盤条件が同じ場合に $m$ 、 $A$ 、 $H$ をそれぞれ独立に変えた場合の加速度波形の変化を模式的に表わすと図-7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 $\alpha_{max0}$ 、 $t_{f0}$ としている。

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。図-8、9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。式(6)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-5の結果も式(6)に整合する。

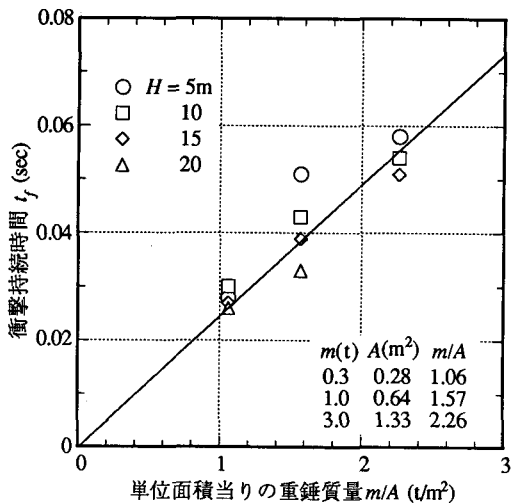


図-6 衝撃持続時間と単位面積当りの重錘質量の関係

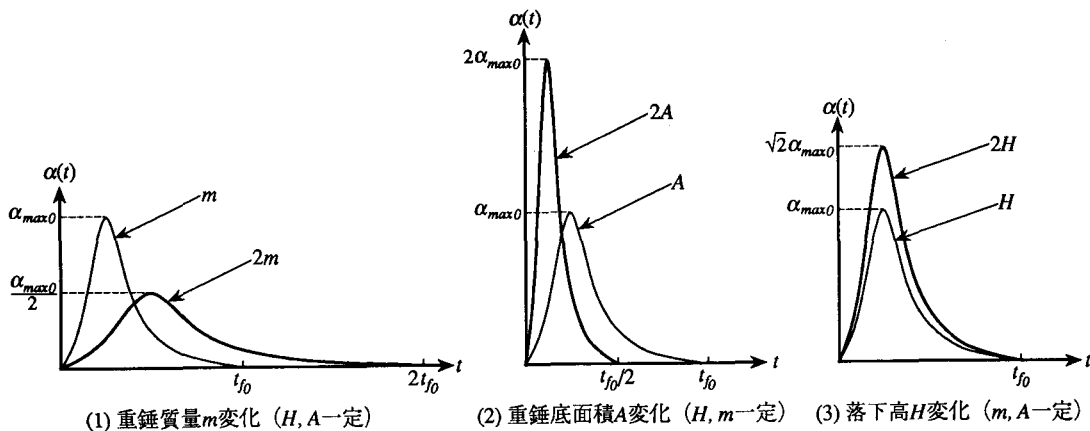
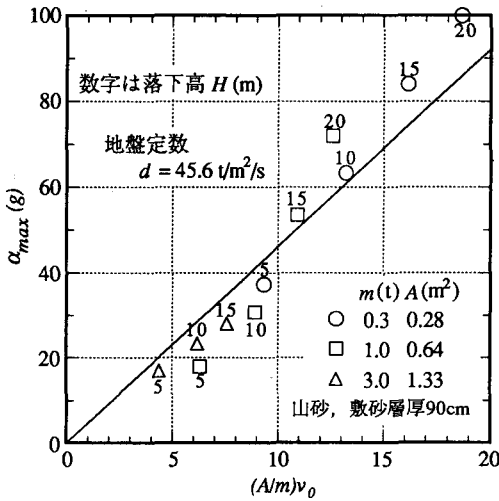
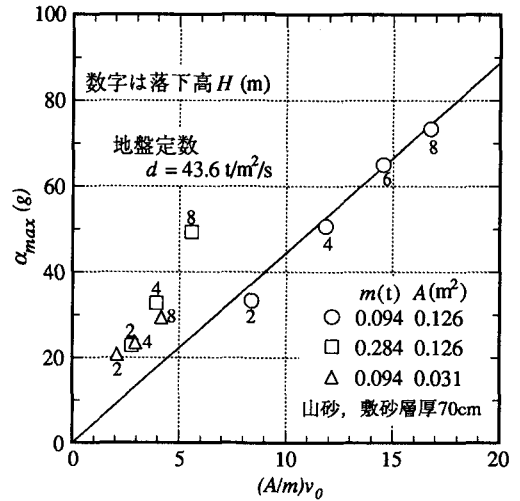


図-7  $m$ 、 $H$ 、 $A$ を変えた時の衝撃加速度波形の変化



図一 8 最大衝撃加速度と $(A/m)v_0$ の関係 (吉田ら<sup>7)</sup>)



図一 9 最大衝撃加速度と $(A/m)v_0$ の関係 (佐々木ら<sup>8)</sup>)

#### 4.2 最大衝撃力, 最大衝撃応力

最大衝撃力 $F_{max}$ は $m\alpha_{max}$ であるから, 式(6)から,

$$F_{max} = dA v_0 \dots \dots \dots (7)$$

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,

$$\sigma_{max} = d v_0 \dots \dots \dots (8)$$

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, 打撃点直下1mで測定した土圧が, 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(8)で説明できる.

#### 5. あとがき

重錘落下による地盤への衝撃加速度と衝撃持続時間を実測データから考察し, 単純な形で最大衝撃力を推定できることを示した. ただし, 地盤層厚が薄い場合や地盤密度が高い場合では重錘の跳ね返りが生じるため, ここで示した推定式は当てはまらないと考えられる. また本論文では衝撃力を主題として示したが, 重錘の貫入量や打撃孔体積が重錘運動量に比例することを同様な考察から導いている<sup>3)</sup>.

#### 参考文献

- 1) 大島・他: 重錘落下締固め工法における打撃仕様と効果, 第25回土質工学会研究発表会, pp. 1853-1856, 1990.
- 2) 大島・他: 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.
- 3) 大島・他: 重錘落下締固めにおける地盤への重錘貫入と衝撃力, 土木学会論文報告集 (投稿中).
- 4) 梶谷・他: 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ッ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・他: ロックシェッ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・他: 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・他: 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.33A, pp.571-583, 1987.
- 8) 佐々木・他: 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・他: 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 -, 土木学会論文報告集 (投稿中).