ランマーによる土の締固めに関するエネルギー的考察

日大生産工　○今野　誠　　　日大理工　宮森　建樹
日大生産工　　木田　哲量　　加藤　清志

1. はじめに

一般に、土の締固め特性を把握するための室内試験としてランマーを用いた突固めによる土の締固め試験が行われている。その締固めの力学的意味を明らかにするために、土の変形特性を単純化してエネルギー的考察を行った。

2. 土の荷重・変形関係

問題を単純化するために次のような仮定を設けた。

(1)　土の持つ載荷時の荷重・変形関係は線形である.

(2)　除荷時の荷重・変形関係も線形であり、再載荷時においても除荷時の線形関係が成り立ち、除荷時と再載荷時には完全な弾性関係が成り立つ。

(3)　載荷時の変形から除荷時の変形を差し引いた残留変形が、締固め後の土の変形量となる。

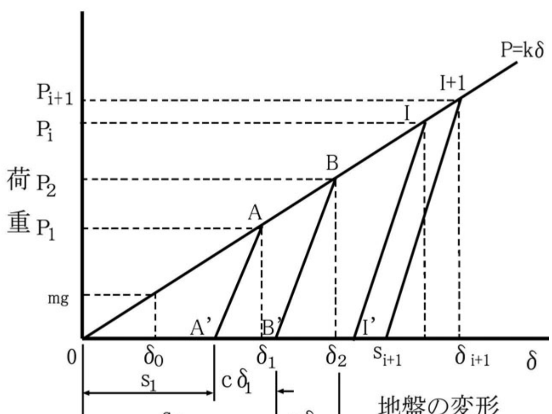


図-1 荷重と地盤の変形の関係

仮定より、土の荷重・変形関係を示すと図-1のようであり、荷重をP、変形をδ、その勾配をk（変形係数）とすると、それらの関係は次式で表される。

$$P = k\delta \tag{1}$$

載荷時に、変形 δ_1 に達したときの荷重を P_1 とし、その点をＡ点とする。

$$P_1 = k\delta_1 \tag{2}$$

この状態から、除荷して荷重をゼロとしたとき、点 A から点 A' まで変形は直線的に回復する。この回復量を δ_{r1} とし、変形 δ_1 に対する回復変形の割合をｃとすると

$$\delta_{r1} = c\delta_1 \tag{3}$$

除荷した状態から、さらに再載荷を行なうと、荷重・変形の経路は $A' \to A$ を経て、B 点に達する。B 点に達した後に除荷したときに B' 点に達するものとする。B 点における変形を δ_2 とすると、式(2)、(3)を用いて、P_2、δ_{r2} が求められる。δ_2 と δ_1 の差を $\Delta\delta_1$ と置くと

$$\Delta\delta_1 = \delta_2 - \delta_1 \tag{4}$$

この $\Delta\delta_1$ は $B - B'$ 間の長さに等しい。

ｉ番目の再載荷とｉ+1 番目の載荷について、上記の関係を適用すると次のようになる。

$$P_i = k\delta_i \tag{5}$$

$$\delta_{ri} = c\delta_i \tag{6}$$

$$\Delta\delta_i = \delta_{i+1} - \delta_i \tag{7}$$

Energetic Observation on Soil Compaction by Rammer

by

Makoto IMANO , Tateki MIYAMORI , Tetsukazu KIDA and Kiyoshi KATO

3. エネルギー保存則

ランマーを用いた土の突固めにおいて、その基本的な力学特性を説明するため、現象を単純化し、ランマーの位置エネルギーが全て土の変形に費やされるものとする。

ランマーの質量を m、落下高さを h、重力加速度を g とする。突固め回数が i＋1 番目のときのエネルギーについて考察する。図−1より、このときの荷重・変形関係の経路は $I' \to I \to I+1$ となる。したがって、ランマーの位置エネルギーは

$$mg(h+\delta_{ri}+\Delta\delta_i)=mg(h+c\delta_i+\Delta\delta_i) \tag{8}$$

一方、土の変形に費やされるエネルギーは

$$\begin{aligned}&(p_i\delta_{ri}/2)+\left\{p_i+(k\Delta\delta_i/2)\right\}\Delta\delta_i\\&=(kc\delta_i^2/2)+\left\{(k\delta_i)+(k\Delta\delta_i/2)\right\}\Delta\delta_i\end{aligned} \tag{9}$$

エネルギー保存則より、式(8)と(9)が等しいことから

$$\begin{aligned}&\left\{(\delta_i)+(\Delta\delta_i/2)\right\}\Delta\delta_i+(c\delta_i^2/2)\\&=(mg/k)(h+c\delta_i+\Delta\delta_i)\end{aligned} \tag{10}$$

上式中、mg/k はランマーの質量によって生じる変形であるので、それを δ_0 と置くと、$\Delta\delta_i$ に関する次の2次方程式が得られる。

$$\Delta\delta_i^2+2(\delta_i-\delta_0)\Delta\delta_i+c\delta_i(\delta_i-2\delta_0)-2\delta_0 h=0 \tag{11}$$

上の方程式の根のうち、適合する解は次のようになる。

$$\Delta\delta_i=\left\{(\delta_i-\delta_0)^2+2\delta_0 h-c\delta_i(\delta_i-2\delta_0)\right\}^{1/2}-(\delta_i-\delta_0) \tag{12}$$

式(7)より、i＋1回目の突固めまでに生じる変形量 δ_{i+1} は次の式から求められる。

$$\begin{aligned}\delta_{i+1}&=\delta_i+\Delta\delta_i\\&=\delta_0+\left\{(\delta_i-\delta_0)^2+2\delta_0 h-c\delta_i(\delta_i-2\delta_0)\right\}^{1/2}\end{aligned} \tag{13}$$

さらに、

$$\alpha_i=\delta_i/\delta_0 \qquad (13)'$$

と置いて正規化すると

$$\alpha_{i+1}=1+\left\{(\alpha_i-1)^2+2(h/\delta_0)-c\alpha_i(\alpha_i-2)\right\}^{1/2} \tag{14}$$

4. 計算結果の検討

$i=0$ のとき、式(13)'において $\alpha_0=\delta_0/\delta$ と置くと

$$\alpha_i=1+\left\{1+2(h/\delta_0)\right\}^{1/2} \tag{15}$$

i＝1 のとき、

$$\alpha_2=1+\left\{(\alpha_1-1)^2+2(h/\delta_0)-c\alpha_1(\alpha_1-2)\right\}^{1/2}$$

上式において

$$\begin{aligned}&(\alpha_1-1)^2=1+2(h/\delta_0)\\&\alpha_1(\alpha_1-2)=2(h/\delta_0)\end{aligned}$$

であるから

$$\alpha_2=1+\left\{1+2(h/\delta_0)(2-c)\right\}^{1/2} \tag{16}$$

以下、式(14) を用いて α_i をもとめることができる。

さらに、締固め密度に直接関係する i 回目の突固め後の残留変形を s_i とすると

$$s_i=\delta_i(1-c) \tag{17}$$

となる。

(1) ランマー質量および土の変形係数が突固め時の変形量に及ぼす影響

弾性理論から、円形等分布荷重を受ける半無限弾性体の荷重中心の変形量 δ と全荷重 P の関係は次式で表される。[1)]

$$P = (\pi A)^{1/2} E\delta / 2(1-\nu^2) \tag{18}$$

ここに

A：載荷面の面積

E：ヤング率

ν ：ポアソン比

この関係が、締固められる土についても適用することができるものとすると、式(11)の k は次のように書き改められる。

$$k = (\pi A)^{1/2} E / 2(1-\nu^2) \tag{19}$$

したがって、変形係数 k はランマーの底面積の 1/2 乗に比例して大きくなることが分かる。ランマーの質量 m によって生じる変形量 δ_0 は

$$\delta_0 = mg / k = 2(1-\nu^2) mg / (\pi A)^{1/2} E \tag{20}$$

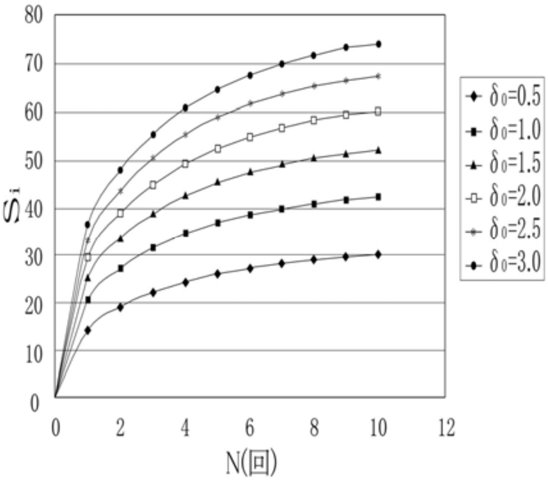
となる。

式(13)および(14)からも分かるように δ_0 は突固め後の土の変形量の基準変形量になっている。このことは、ランマーの底面積が異なる場合には、ランマーの質量 mと落下高さhを一定として、すなわちランマーによる見かけの締固めエネルギー (mgh) を一定として突固めても、締固め後の変位量が異なることを意味している。

すなわち、締固められる土の単位体積当たりの突固めエネルギーを一定として突固めても、ランマーの底面積の大きさによって締固め後の変形量は異なり、底面積が大きくなると変形量が小さくなることがわかる。

一方、δ_0 はランマーの質量 m に比例しているので、ランマーの質量を大きくすると締固め後の変形量も大きくなることが分かる。

δ_0 を基準変形量として、それが締固め後の変形量に及ぼす影響を調べるために、ランマーの落下高さを $h = 300mm$、$c = 0.2$ としたとき、$\delta_0 = 0.5〜3.0mm$ の範囲での突固め回数ごとの残留変形量 s_i の計算結果を図-2 に示した。



図−2 S_i と N (回)の関係

図−2から、いずれの場合も第1回目の突固めによる残留変形量がもっとも大きく、その後は突固め回数の増加とともに変形量の増分が減少すること、および δ_0 増大とともに変形量が大きくなることが分かる。

ランマーの底面積が締固め後の変形量に及ぼす影響を $\delta_0 = 0.5mm$ と $1.00mm$ の計算結果をもとに考えてみる。ランマーの質量がどちらの場合も同一であるとすると、式(20) より $\delta_0 = 0.5mm$ の場合のランマーの底面積は $\delta_0 = 1.0mm$ の底面積の4倍になっていることが分かる。図−2 の結果から突固め回数に関わらず、$\delta_0 = 0.5mm$ での残留変形量は $\delta_0 = 1.0mm$ の残留変形量の約 3/4 となっており、締固めエネルギーが一定であってもランマーの底面積の大きさによって締固め効果が異なることが分かる。

(2) ランマーの落下高さが突固め時の変形量に及ぼす影響

ランマーの落下高さ h が締固め時の変形量に及ぼす影響を把握するために、残留変形量の大きさの程度を示す指数 α_{si} を次のように定めた。

$$\alpha_{si} = s_i / \delta_0 \tag{21}$$

回復性の変形の大きさを表す値を $c=0.2$ としたときの、α_{si} と h/δ_0 の関係を突固め回数N をパラメータとして計算した結果を図-3 に示した。この図から h/δ_0 の増大とともに、α_{si} が大きくなる傾向が見られるが、式(14)からも分かるように、突固め回数に関係なく、α_{si} は h/δ_0 の 1/2 乗にほぼ比例して大きくなる。しかしながら、cの値が大きくなるとこの傾向は異なってくる。

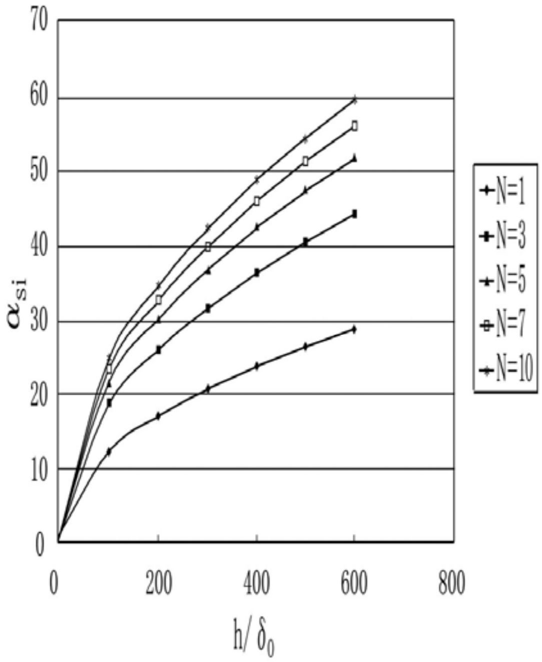


図-3 α_{si} と h/δ_0 (回)の関係

(3) 回復変形量が突固め時の変形量に及ぼす影響

ランマーを落下した後の土の回復変形量が締固め変形量に及ぼす影響を知るために、$h/\delta_0=100$ としたときの、α_{si} とＮの関係をCをパラメータとして計算した結果を図-4 に示した。$c=0$ の場合は、弾性的な回復変形がゼロであるので、各突固め時のランマーによって与えられる締固めエネルギーは全て土の非回復性の変形を生じさせるために費やされる。したがって、同一の締固めエネルギー与えた場合、$c=0$ のときに α_{si} の値が最も大きくなることがわかる。

一方、$c=0.5$ のときは、突固め回数が 4 回以上になると、α_{si} の値はほとんど増大していない。これは、ランマーの落下によって土中に蓄えられたひずみエネルギーの大半が回復性の変形によって解放されてしまうためと判断される。

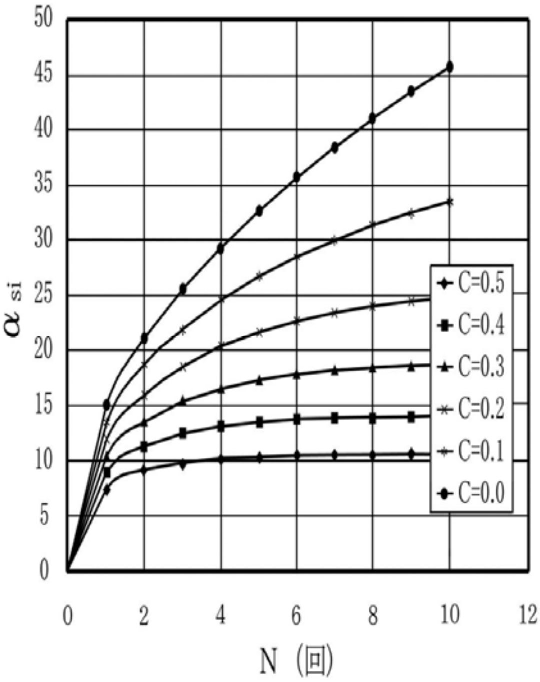


図-4 α_{si} と N (回)の関係

5. むすび

土の締固めは土構造物築造において極めて重要な仕事であるが、理論解析が極めて少ない分野である。本研究は締固めの理論化に当たり、現象を単純化して進めた。これによっても締固めの本質をかなり明瞭にする事ができた。

参考文献

1) 大崎順彦:基礎構造、4.1 地中応力, pp.147-191,コロナ社,1961.6