

重錘落下を受けた砂質土地盤の変形挙動の解析

日本国土開発(株) 正会員 〇四宮圭三
 山口大学工学部 正会員 兵動正幸
 山口大学工学部 正会員 村田秀一
 山口大学工学部 正会員 安福規之
 (株)ハザマ 正会員 丸山浩史

1. はじめに 重錘落下締固め工法(Dynamic Compaction)の現行設計の基本は、締固め衝撃力(改良深度)、打撃エネルギー量(改良度合)、打撃エネルギーの与え方(施工方法)の3点からなっている。しかし、地盤締固めのメカニズムは十分に解明されておらず、同工法の適用は従来の経験式及び現地での試験施工に基づいて行われているのが現状である。そこで著者らは同工法の合理的な設計法の確立を目指し、重錘落下を受けた地盤内要素の締固めのメカニズムを解明するために、瞬時に载荷・除荷が可能な瞬発载荷式三軸圧縮試験機を試作し、土要素に対し種々の応力変化を繰返し衝撃圧として与え、その実験結果より地盤締固めの定量的評価、改良効果(静的せん断強度特性)について研究を行ってきた¹⁾²⁾。本研究では、さらに瞬発载荷を受けた砂質土のせん断及び体積ひずみを間隙比変化量として定式化を図り、その結果を用いて実地盤を対象に軸対称FEM動的解析を行い、重錘落下による地盤内応力及び変形挙動について考察を行った。

2. 間隙比変化の定式化 重錘落下によって生じる地盤内応力増分を平均主応力増分 Δp 及び偏差応力増分 Δq に分けて考え、それぞれの成分による間隙比変化の定式化を図る。そこで瞬発载荷式三軸圧縮試験機を用いて行った等方応力载荷試験、平均主応力载荷試験結果よりそれぞれによる間隙比変化の評価を行う。なお試験に用いた試料はまさ土であり、供試体は初期相対密度60%で完全飽和状態とした。

図-1に初期拘束圧 $p_c=30\text{kPa}$ から種々の大きさの等方応力载荷を行った試験で载荷回数毎にまとめた間隙比と平均有効主応力の関係を示す。いずれの繰返し回数においても $p=200\text{kPa}$ 付近に変曲点が認められ、その応力は一種の降伏応力とみなされる。さらに、この降伏応力は、载荷回数 N 、初期拘束圧 p_c によらず一定となり、静的等方圧縮、除荷試験により得られる降伏応力 p_y にもほぼ等しい。そこで、等方応力载荷における間隙比変化 Δe_1 を図-2に示すように、载荷時の応力 $p_c+\Delta p$ の大きさが p_y を境に $p_c+\Delta p \leq p_y$ 、 $p_c+\Delta p \geq p_y$ の場合に分けて定式化をはかる。 Δe_1 は载荷回数の増加にともない増加するので、定式化に当たっては载荷回数の影響を考慮した次式で検討する。

$$\Delta e_1 = \lambda_1^*(N) \cdot \log[(p_c + \Delta p)/p_c] \quad (p_c + \Delta p \leq p_y)$$

$$\lambda_1^*(N) \cdot \log[p_y/p_c] + \lambda_2^*(N) \cdot \log[(p_c + \Delta p)/p_y] \quad (p_c + \Delta p > p_y)$$

ここに、 $\lambda_1^*(N)$ 、 $\lambda_2^*(N)$ は図-1の $e \sim \log p$ 関係の直線の勾配であり、図-2に示すように、降伏応力 p_y 前後のそれぞれの直線の勾配であり、繰返し回数 N に依存する。図-3にプロットで示した等方応力载荷時の間隙比変化は载荷回数が一定の場合、図-2の概念図で示されるように载荷時の平均有効主応力が降伏応力 p_y を初期拘束圧 p_c で正規化した p_y/p_c に至るまでは同一の直線上にあり、さらに降伏応力を過ぎてもそれぞれ同じ傾きを

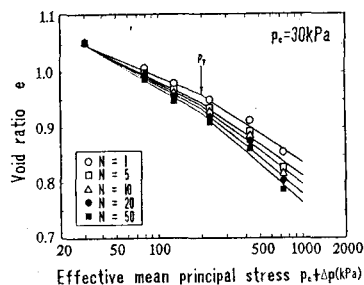


図-1 等方応力载荷時の $e \sim \log p$ 関係

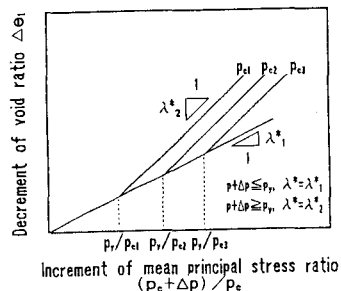


図-2 間隙比変化定式化の概念図

有する直線上にあることを意味している。図-3の実線は上式によるもので、実験結果と比較的良好に対応していることが明らかである。

次に、平均主応力一定載荷試験における間隙比の変化を Δe_2 とし、 Δe_2 と有効応力比増分 $\Delta \eta$ の関係を示したのが図-4である。これから、 Δe_2 は $\Delta \eta$ の増加とともに増加し、初期圧密圧 p_c が大きい程大きくなる傾向が認められる。この間隙比変化 Δe_2 を p_c 及び $\Delta \eta$ の指数関数として定式化を行ったところ次のような関係式を得た。

$$\Delta e_2 = b1 \cdot (p_c / p_0)^{b2} \cdot \Delta \eta^{b3}$$

ここに、 $b1$ 、 $b2$ 、 $b3$ は実験定数であり、 $b1$ 、 $b3$ は繰返し回数 N の関数で表され、 p_c はkPa単位で与え、基準応力 $p_0 = 100\text{kPa}$ により正規化されている。

平均主応力一定試験における間隙比変化は、ダイレイタンスによるものであり、一般的な応力変化に対する間隙比変化は、等方圧縮による間隙比変化 Δe_1 とこのダイレイタンス成分による間隙比変化 Δe_2 を重ね合わせることににより評価できる。

3. FEMによる重錘落下時の地盤応力解析と締固め領域の評価

重錘落下による地盤内応力を評価するために、2次元軸対称条件下でのFEM動的解析(弾性解析)を行った。解析領域は、厚さ15m、幅40mの埋立地盤(相対密度60%)を想定して208要素に分割した。載荷はモデル上面中心付近に行い、入力波形として、実施工でえられた重錘加速度の記録波形を参考に、荷重のピーク値が20t(重錘質量) $\times$ 60g(重錘加速度)、継続時間0.1secの三角形のパルスを設定した。図-5は重錘落下時の地盤内の平均主応力増分 Δp の最大値の分布を示したものである。この図から Δp は重錘直下付近で最も大きく圧力球根状に下方に分布していることがわかる。応力解析でえられた結果をもとに2.で提案した予測式を用いて地盤内の間隙比変化の分布を示したのが図-6である。これから重錘落下によって締固められた領域は、ほぼ深度方向：水平方向=2:1の形状の広がりを持ち、締固めには平均主応力増分 Δp の成分が大きく寄与することがわかる。

4. おわりに 瞬発載荷式三軸圧縮試験機を用いた室内試験より重錘落下時の応力変動に対応し得る間隙比変化の実験式を作成し、FEM動的解析とリンクさせることにより実地盤での評価が可能となった。また、地盤締固め効果を評価する上では平均主応力増分 Δp が重要なファクターとなることがわかった。

【参考文献】

- 1) 四宮他(1992)：重錘落下時における砂質土の間隙比変化、第27回土質工学研究発表会概要集、pp. 761～pp. 762
- 2) 四宮他(1992)：瞬発載荷を受けた砂質土のせん断強度特性、第27回土質工学研究発表会概要集、pp. 757～pp. 760

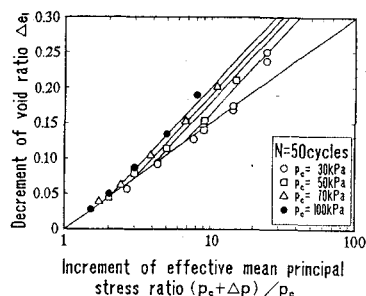


図-3 等方応力載荷時の間隙比変化

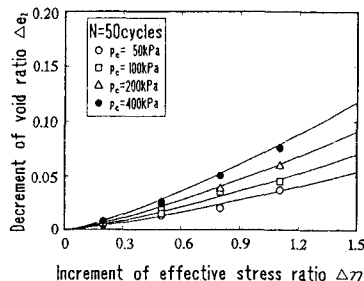


図-4 平均主応力一定載荷時の間隙比変化

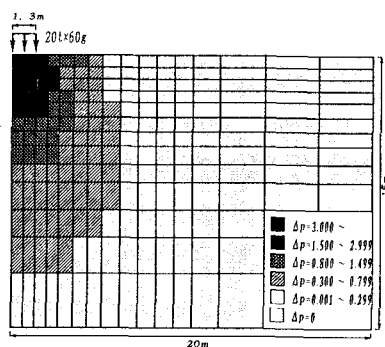


図-5 重錘落下時の地盤内平均主応力増分の分布

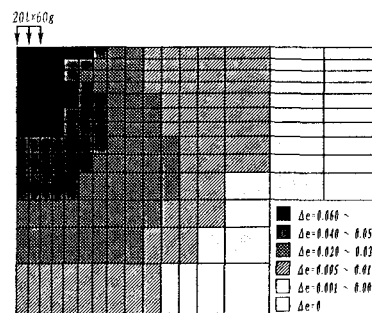


図-6 重錘落下時の地盤内間隙比変化の分布