

動圧密工法による砂質地盤の改良度評価について

兵 動 正 幸*・村 田 秀 一*・安 福 規 之*

Evaluation Method for Degree of Improvement on Sandy Grounds in Dynamic Consolidation

Masayuki HYODO, Hidekazu MURATA and Noriyuki YASUFUKU

Abstract

Dynamic consolidation has been used on a wide variety of soil types and conditions in recent ten years. However, its mechanism of improvement has not been fully understood yet. A simplified method for evaluating the degree of improvement is proposed in this paper based on the results of some triaxial compression tests. The triaxial tests under low and high confining pressures were performed, considering the magnitude of stress increments induced by falling weights. The change of void ratio of sand was related by the increment of mean principal stress and deviator stress, respectively. Combining the tests' results with finite element method on in situ problem, the change of void ratio, which is related to the improvement of ground, was evaluated in each element in the ground.

1. まえがき

動圧密工法は、10tf以上の重量をもつ重錘を数十mの高さから自由落下させ、地表面に大きな衝撃力を繰返し加えることによって地盤を締固める地盤改良工法である。この工法は1960年代後半 Menard ら¹⁾によって開発され、その対象土質は当初の砂や砂礫地盤から、粘性土、岩砕盛土またはゴミ埋立て地盤などのように適用範囲も広がってきている^{2),3),4),5)}。しかし、同工法による地盤改良メカニズムについては、対象地盤の複雑さや衝撃力下の地盤挙動の把握の困難さなどのためにまだ不明な点が多い。従って、地盤の締固め効果を定量的に評価することは難しく、設計方法もかなり経験に依存しているのが現状である。

この工法がわが国に導入されてから十数年が経過し、その需要が増加する傾向にある中で改良効果や設計方法に対して定量的な検討を行う必要に迫られている。

そこで今回、上記のことを目的として現場実験が行われた^{6),7)}。現場実験の対象土質は、風化の進んだまき土による盛土地盤であり、地盤条件の複雑さを避けるためにできるだけ均質に盛土し、ほぼ乾燥状態のものを作った。

本研究は、この現場実験と並行して、重錘落下によって生じる地盤内応力を想定した高圧及び低圧の三軸圧縮試験を行ったものである^{8),9)}。この三軸圧縮試験結果に基づき、重錘落下によって生じる地盤変形を土の圧縮及びせん断の観点からとらえ、地盤の締固め度を定量的に評価することを目的としている。

2. 地盤改良メカニズムの概念

2-1 重錘落下による地盤内応力の変化

地盤の初期及び重錘落下時の地盤内応力状態は、Fig. 1 に示すような概念で表される。初期の応力状態は、Fig. 1 (a) に示されるように有効上載圧 σ_v と静止土圧による K_0 圧密状態にあると考えられる。重錘落下により地盤内には瞬時に応力が増加し、Fig. 1 (b) の

* 建設工学科

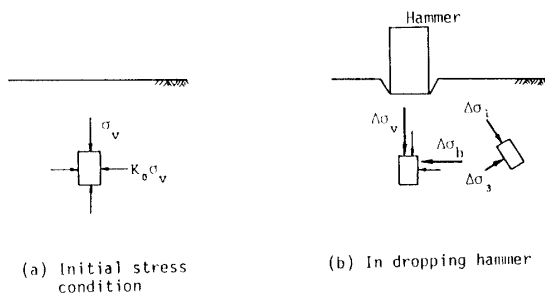


Fig. 1 Stress conditions at initial state and in dropping hammer

ような応力状態になることが予想される。すなわち、重錘落下の直下付近では初期の主軸と同方向にかなり大きな鉛直応力と側方応力の増加が考えられる。直下部より側方に離れると、初期の主応力軸から幾分傾斜した方向に主応力の増加が生じる。いずれにしても、これらの応力増加は次に示す等方応力 p と偏差応力 q に分けて表される。

$$\Delta p = (\Delta \sigma_1 + 2\Delta \sigma_3) / 3 \dots\dots\dots(1)$$

$$\Delta q = \Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3 \dots\dots\dots(2)$$

また、2次元の一般応力状態では、これらは次式で表される。

$$\Delta p = (\Delta \sigma_x + \Delta \sigma_y) / 2 = (\Delta \sigma_1 + \Delta \sigma_3) / 2 \dots\dots\dots(3)$$

$$\Delta q = \{(\Delta \sigma_x - \Delta \sigma_y)^2 + 4\Delta \tau_{xy}^2\}^{1/2} = \Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3 \dots\dots\dots(4)$$

ここで、横軸を p 、縦軸を q とした p - q 座標平面でこの応力変化過程を考えると、初期及び重錘落下時における地盤内応力状態はいずれの地点においても、Fig. 2 に示すように K_0 圧密状態の初期点 A と重錘落下時の点 B の2点でそれぞれ表すことが出来る。主軸の方向の変化による影響を無視すると、この A 点から B 点に至る地盤内の締固め特性は p 成分による等方圧縮と q 成分によるダイレクションの重ね合わせにより表現が可能と思われる。

2-2 地盤改良の予測方法の検討

Fig. 2 に示すような様々な応力変化に対応した間隙比の変化のグラフが得られておれば、重錘落下による地盤内応力の変動に対応する地盤の間隙比の変化を求めることができ、締固め効果を定量的に評価することが出来る。しかし、地表面に作用する衝撃力による地盤内応力を予測することや実施工において計測することは非常に難しい。ここでは一つの試みとして有限要素法を用いた動的応答解析により地盤内応力の算定を行い、締固め効果の予測を行う。

まず、室内三軸試験により Fig. 2 の応力成分 p 及び

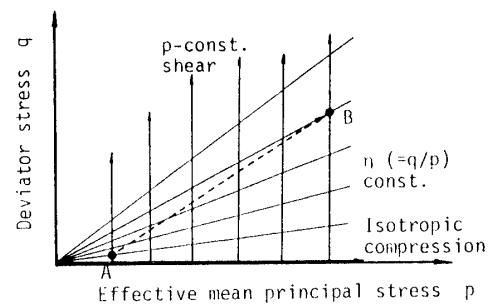


Fig. 2 Schematic diagram for presenting the decrement of void ratio due to increase of stress in ground by dropping hammer

q の変動による間隙の変化量をそれぞれ求め、定式化あるいはグラフ化しておく。一方重錘落下時の衝撃力を载荷した場合の地盤各要素の等方応力 p と偏差応力 q を有限要素法を用いて算定する。この2つの結果から、地盤内各要素の間隙比の変化を求め、これより地盤内の締固め効果を算定する。今回、現場実験において地盤内応力や改良効果の評価のために N 値の測定を行っているので、解析結果と比較することによりこの方法の妥当性を検討する。

3. 室内試験の概要

3-1 試験の内容

重錘落下により生じる地盤内応力の増加に対する土の体積圧縮量を評価するために三軸圧縮試験を行った。現場実験では、重錘落下直下部において数 MPa もの高圧の応力が測定されたので、室内試験では高圧三軸圧縮試験機を導入して高圧域での実験も行った。2-1 で述べたように、重錘落下時の応力増分を平均主応力と偏差応力の増分に分けて評価するため、以下のような試験を行った。

(1) 等方圧縮・除荷試験

高圧三軸試験機を用いて等方応力载荷及び除荷試験を行った。载荷試験では20kPa~10MPa (0.2~100 kgf/cm²) の等方応力を作用させ、各载荷応力毎の体積変化量を測定した。一方、除荷によるリバウンド量を

検討するために等方応力1.5, 3.0, 5.0MPaからの除荷試験も行った。また、重錘の繰返し落下による影響を検討するために、除荷及び再載荷試験を繰返し行った。

(2) 側圧一定せん断試験

試験用に用いた試料の強度の把握と平均主応力一定せん断試験の予備実験として、側圧一定せん断試験を行った。まず等方圧縮による体積圧縮の変化量が0.005 cm³/min以下になるまで圧縮し、その後ひずみ制御方式でせん断試験を行う。この時の軸圧縮速度は0.1%/minとし、軸圧縮量が3 cmになるまで試験を行った。

(3) 平均主応力一定せん断試験

偏差応力の増分による体積圧縮量を評価するために、40kPa~6MPaの11種の等方圧で圧密後、それぞれについて平均主応力 p 一定せん断試験を行った。(2)項同様に等方圧縮を行った後、応力制御方式で p 一定のせん断試験を行い、各応力比点での体積変化を測定した。

3-2 試験装置および供試体

拘束圧 $\sigma_3 = 500\text{kPa}$ (5kgf/cm²)以下の三軸圧縮試験では低圧三軸試験機を用い、それ以上の拘束圧では高圧三軸試験機を用いた。

試験に用いた試料は、現場実験が行われた現位置で採取したまき土である。三軸圧縮試験には、2 mmふるい通過分で74 μm 以下の細粒分を取り除いた試料を用いた。試料の物性値を Table 1 に示し、粒径加積曲線を Fig. 3 に示す。三軸圧縮試験用の供試体は、相対密

Table 1 Material properties for tested soil

G_s	U_c	e_{max}	e_{min}	γ_{max} (g/cm ³)	γ_{min} (g/cm ³)
2.687	4.276	1.043	0.560	1.628	1.315

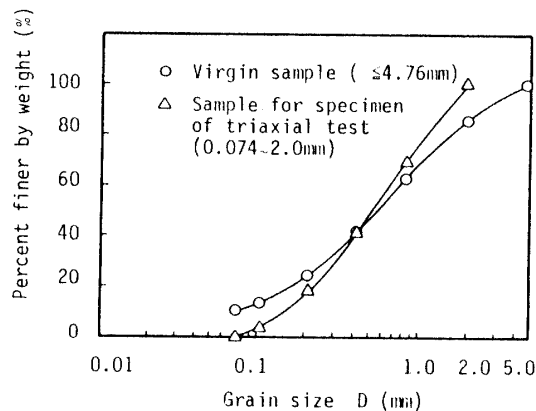


Fig. 3 Grain size distributions for virgin sample and tested sample

度を現場の盛土とほぼ同一の $Dr = 50\%$ の緩詰め状態とし、また体積変化の測定を容易にするために飽和状態とした。

4. 三軸圧縮試験結果

4-1 等方圧縮・除荷試験

この試験では $p = 3\text{MPa}$ までの等方応力で圧縮、除荷を3回繰返したのち10MPaまで等方圧縮を行った。他にも1.5, 5MPaからの除荷試験を行ったが、除荷曲線の勾配はこれとほぼ同じのものであり、除荷および再載荷時の繰返しに対して顕著な違いは現われていなかった。この結果から、繰返し載荷による影響はないものとみなし、以後は単調載荷のみによる評価を行った。

実験に用いたまき土は、かなり風化が進んでおり粒子骨格が脆弱なため粒子破碎を生じやすく、 $e - \log p$ 関係は低圧から高圧に至るまで終始圧縮傾向を示し、直線的に変化している。また、この土の最小間隙比 $e_{min} = 0.65$ であり、実験結果では400~500kPaの等方圧による圧縮で最小間隙比以下に締固めることができる。これは試料の粒子破碎によるためであり、このような状態に至る等方応力の大きさは試料によって異なるが、重錘落下時の数 MPa の応力状態においては他の砂や地盤材料でも同様な現象が生じるものと考えられる。

4-2 側圧一定せん断試験

拘束圧 $\sigma_3 = 100\text{kPa} \sim 3\text{MPa}$ の6種類について排水せん断試験を行った。それぞれの偏差応力 q 、軸ひずみ ϵ_1 、体積ひずみ v の関係を Fig. 4 に示す。せん断に伴うダイラタンシーは、すべての拘束圧で圧縮側に生じ、拘束圧が大きくなるほど体積圧縮量は大きく現われることがわかる。偏差応力 q のピークは、軸ひずみ $\epsilon_1 = 20\%$ 付近で認められ、緩い砂のせん断特性に似た傾向を示している。 q のピーク値を用いてモールの応力円を描くと、低圧から高圧域まで直線の包絡線が得られ、 $c = 0$ 、 $\phi = 34.4^\circ$ を得る。このように低圧から高圧に至るまでの強度は拘束圧に比例して増加しており、粒子破碎が生じても強度は比例的に増加していることが認められる。このことは重錘落下による高圧下での締固めが強度増加に有効であることを示している。

4-3 平均主応力一定せん断試験

平均主応力 p 一定のせん断試験で得られた軸差応力 q 、軸ひずみ ϵ_1 、体積ひずみ v の関係を Fig. 5 に示す。前項と同様に拘束圧が大きいほど q の増加による体積圧縮量は大きくなる。また、すべての試験で応力比が

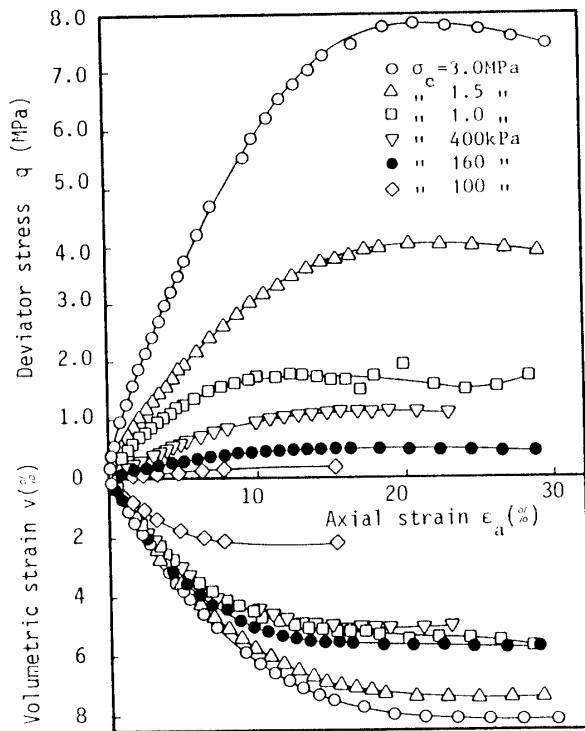


Fig. 4 Results of σ_3 -constant shear tests

$\eta = 1.50$ 付近で破壊に至っている。

せん断に伴う間隙比の変化を等方圧縮試験結果と一緒に e - $\log p$ 図上に表すと Fig. 6 のようになる。図上の最上部の曲線が等方圧縮によるものであり、その下に応力比 $\eta (=q/p)$ 一定の曲線群が描かれている。縦に並ぶプロットは、一連の p 一定せん断試験結果であり、等方圧縮後破壊に近づくまでの結果が示されている。 η 一定曲線は、各せん断試験の同一の η における値を連ねたものである。この図は、Fig. 2 の概念図で示した重錘落下時の応力変化における間隙比の変化を与えるものであり、低圧から高压域に至るあらゆる等方応力及び偏差応力の変化に対応できる。

5. 重錘落下による間隙比変化の定式比

重錘落下時を想定した地中応力の変動による地盤内の間隙比変化の定式化を試みた。ここで用いた試料は、等方圧縮、除荷における e - $\log p$ 関係で p の変動に対して載荷、除荷時とも直線関係を示したので、これらの関係からそれぞれの傾き λ 及び α を求めた。

p 一定のせん断試験における間隙比の変化 Δe は、応力比 η の増加とともに増加し、その増加の程度は p に依存している。この場合の間隙比の変化を各拘束圧毎に η との関係で表したものを Fig. 7 に示す。図中のプ

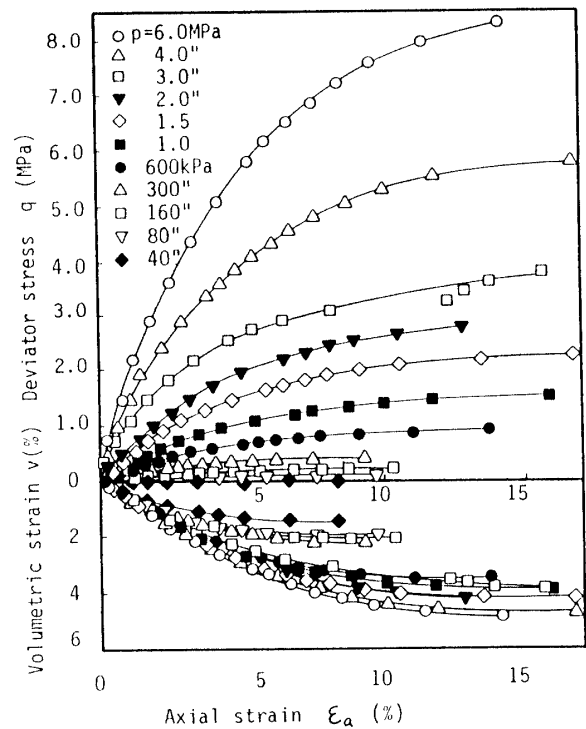


Fig. 5 Results of p -constant shear tests

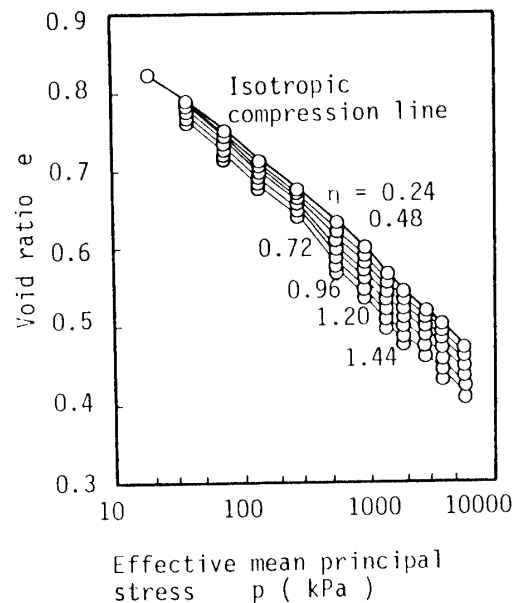
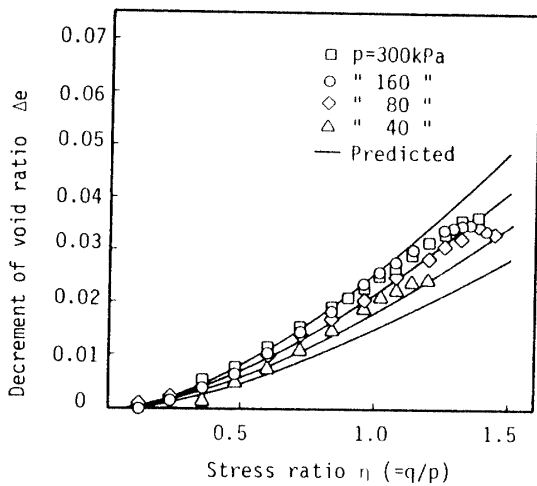
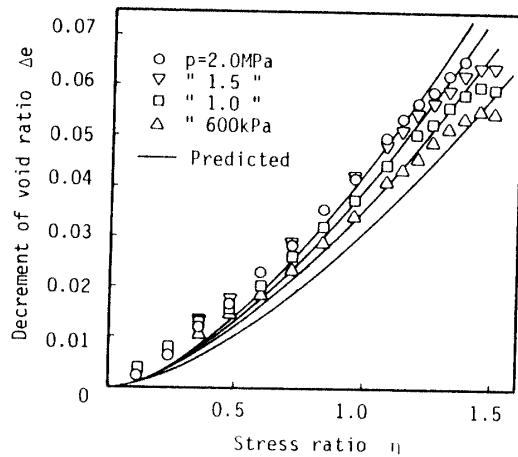


Fig. 6 Results obtained by isotropic consolidation and p -const. tests on reduction of void ratio due to compression and shear stresses

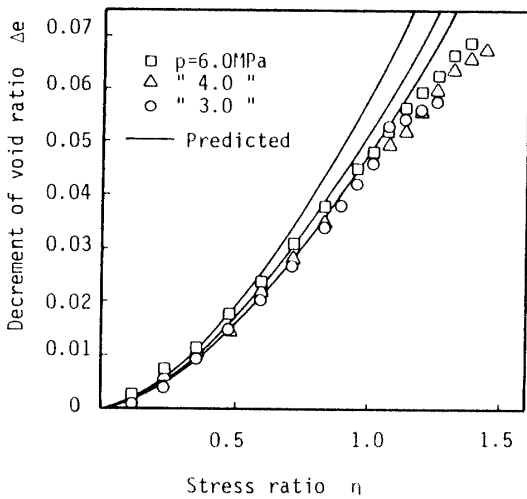
ロットは、低圧から高压に至る11種類の拘束圧下におけるせん断試験結果を表している。この間隙比変化 Δe を p 及び q の指数関数として回帰を行ったところ次の



(a) $p = 40 \sim 300 \text{ kPa}$



(b) $p = 600 \text{ kPa} \sim 2 \text{ MPa}$



(c) $p = 3 \sim 6 \text{ MPa}$

Fig. 7 Relationship between reduction of void ratio and stress ratio

ような関係式を得た。

$$\Delta e = 0.00545 p^{0.271} \eta^{1.585} \dots (5)$$

ここで、 p の単位は(kPa)である。図中の実線は、上式によりそれぞれの実験結果を予測したものであり、実験値と良好な対応を示していることが分かる。

等方圧縮による間隙比変化と p 一定せん断によるそれとを重ね合わせると次式が得られる。

$$e = e_0 - (\lambda - \kappa) \ln(p/10) - 0.00545 p^{0.271} \eta^{1.585} \dots (6)$$

ただし、 p の単位は(kPa)である。式中のパラメータは、 $e_0 = 0.86$, $\lambda = 0.064$, $\kappa = 0.0215$ という値が得られている。式(6)を図示すると Fig. 8 のようになり、この図を用いることにより重錘落下時の地盤内の任意の点で p 及び η がわかれば、その点での間隙比が容易に

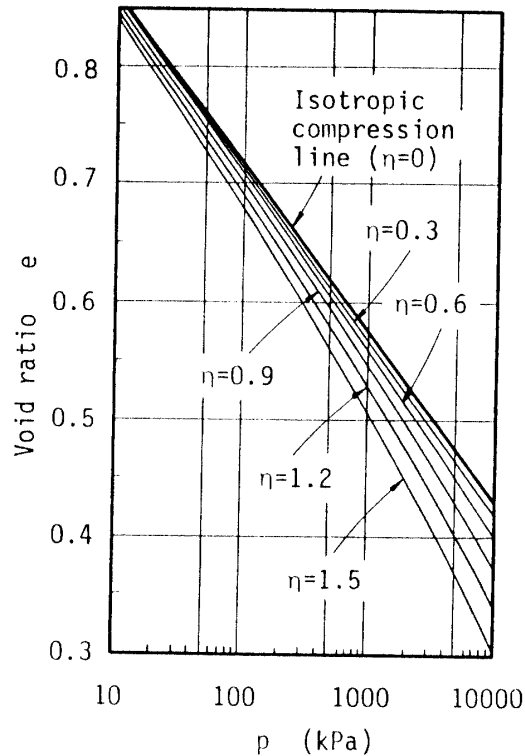


Fig. 8 Diagram for presenting reduction of void ratio due to increments of stresses in dynamic consolidation

計算できることになる。したがって、この式を有限要素法などによる応力解析と組み合わせて用いることにより地盤内の間隙比の変化、すなわち締固め度が定量的に評価できる。

6. 粒子破碎特性の検討

等方圧縮，除荷試験を行った供試体は，等方応力 0.4~0.5MPa で最小間隙比以下に締固まり10MPa の等方圧縮を受けると，間隙比が0.35~0.40の岩塊状の固結状態となった。このような現象が見られるのは，供試体の土粒子が粒子破碎しているためであると思われる。粒子破碎現象は，試料によって生じる応力の大きさは異なるが，他の砂や礫材料においても同様に生じるものと思われる。ここでは，試験を行った試料の粒子破碎を調べるために，それぞれの試験後の供試体について粒度試験を行った。ただし，高圧下での等方圧縮及びせん断試験後の供試体は塊状を示し，粒度試験が困難であったので，これらを袋に詰めてコンクリートの床に40回たたきつけてほぐした。処女試料についても同一の条件とするために同様の打撃を与えた。

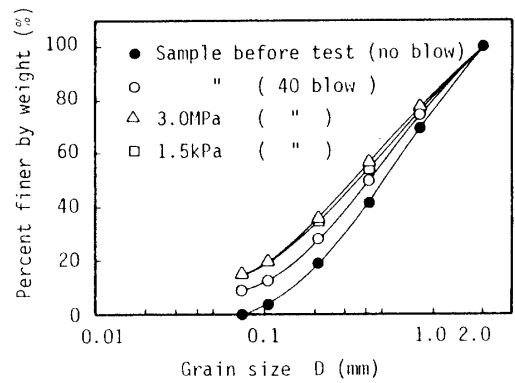
Fig. 9 に (a) 等方圧縮・除荷試験，(b)側圧一定せん断試験，(c) p一定せん断試験後の粒度分布をそれぞれ示す。それぞれの試料は，処女試料に比べて細粒分が増加する結果となっており，圧縮やせん断中に粒子破碎が生じた様子が認められる。(c)の p=0.16MPa のせん断試験においても，粒子破碎が生じていることを考えると，この試料は比較的低い応力域から粒子破碎が生じることが認められる。また，等方圧縮を行った試料よりもせん断試験を行った方が細粒分が多くなる傾向が認められる。

以上に示すように今回行った試験では，粒子破碎を伴った結果大きな圧縮性が生じたものと考えられる。したがって，重錘落下による効率的な締固めのためには，粒子破碎を生じさせるような応力レベルの負荷が必要と考えられる。今回用いた試料は，風化の進んだまき土で破碎性の材料であったために，低い応力域から粒子破碎が起こり，かなり大きな圧縮性を示した。しかし，他の強固な粒子を持つ粒状材料であっても重錘の落下時に生じる高圧下では，粒子破碎を伴い大きく圧縮されるものと考えられる。

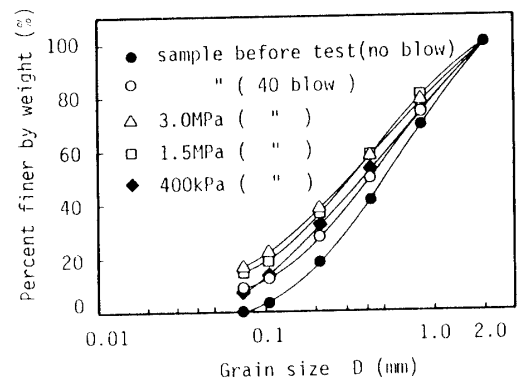
7. FEM による重錘落下時の地盤応力解析と締固め効果の評価

7-1 解析方法

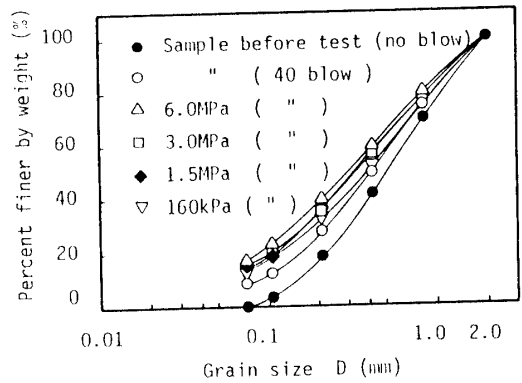
重錘落下による地盤内応力を評価するために，2次元のFEM 動的解析を行った。解析対象は，今回現地実験を行った盛土地盤である。解析領域は，Fig. 11に示すように厚さ15m，幅40mであり，左右対称の条件で



(a) After isotropic compression test



(b) After σ_3 -const. test



(c) After p-const. test

Fig. 9 Grain size distribution after each test

208要素に分割された。載荷はモデル上面中心付近に行い，外力の大きさ及び特性は出来る限り現地実験の結果を踏まえることにした。入力波形として，現地実験において重錘に取り付けられた加速度計が地盤と衝突の際に記録した波形を参考に，三角形のパルスを設定した。加速度のピーク値が60g，継続時間が0.1sec程度

であったので、重錘の質量20tを考慮して、Fig.11のような荷重を入力として加えた。

地盤定数は、現場の密度測定結果やN値などからTable 2のような値とした。ここで、せん断剛性率GはN値から次式を用いて計算した。

$$V_s = 80N^{1/2} \dots\dots\dots(7)$$

$$G = \rho_t V_s^2 \dots\dots\dots(8)$$

ここに、 V_s ：横波速度 (m/s), N：N値, ρ_t ：地盤の密度。

7-2 解析結果

Fig. 12, 13に鉛直加速度及び地中応力の深度分布を

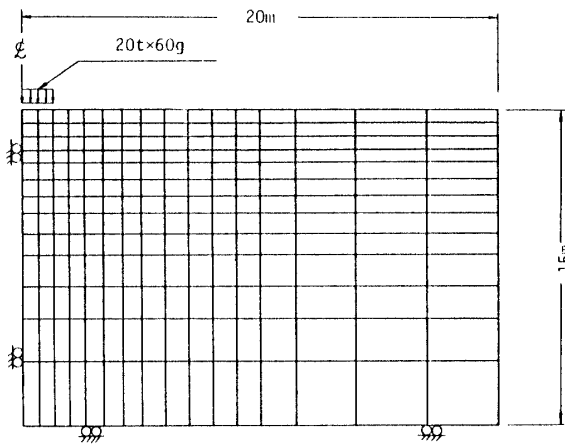


Fig. 10 Finite element model for analyzed fill

それぞれ示す。Fig.12中には、現地実験における落下回数20回目の加速度の実測値も合わせて示す。実測値の方が解析結果より若干大きめの加速度となっているが、実測においては重錘落下の浅い部分で大きな残留変形を伴うことを考慮に入れると両者はかなり良い対応となっている。また、Fig.13において土中応力は数十 kgf/cm²のオーダーに至っており、地盤内においては、粒子破碎を伴うかなり高圧域での圧縮、せん断が行わ

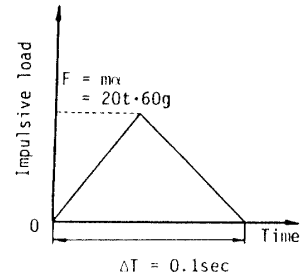


Fig. 11 Input wave

Table 2 Material properties of the fill for dynamic FEM analysis.

N-value	γ_t (tf/cm ³)	G (kPa)	h
6	1.45	60,000	0.01

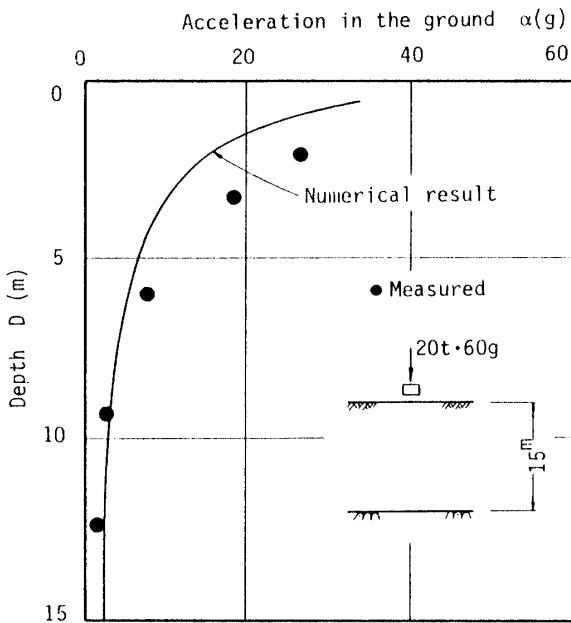


Fig. 12 Analytical and experimental results of accelerations in the fill

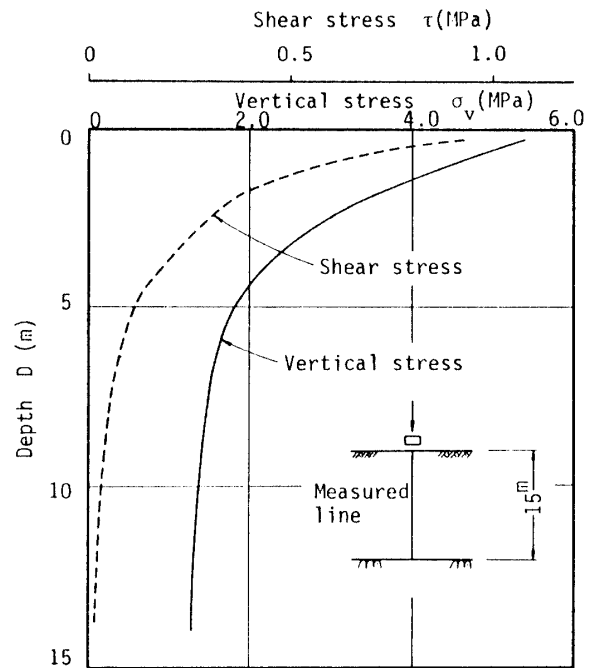


Fig. 13 Analytical results of shear stress and vertical stress in the fill

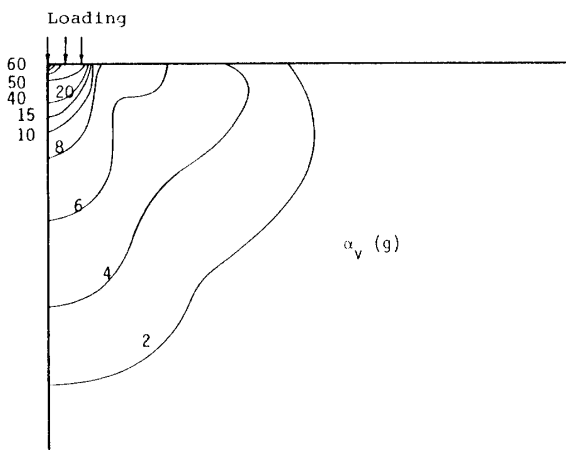


Fig. 14 Distribution of vertical acceleration in the fill analyzed

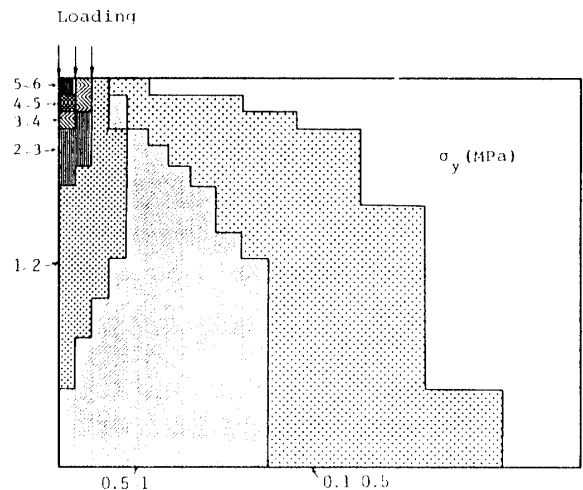


Fig. 15 Distribution of vertical stress in the fill analyzed

れたことが推察される。Fig. 14, 15に鉛直加速度及び鉛直応力のコンターをそれぞれ描いている。加速度はほぼ放射状に応力は下応向に伝わっていく様子が認められる。

次に、解析結果の地盤内応力を用いて、重錘落下による地盤の改良度すなわち、地盤の締固めの程度の評価を試みる。ここで解析は2次元であるので、重錘落下時の平均主応力及び偏差応力の変動量を式(3), (4)で表す。このp及びqの増分を三軸圧縮試験で求めた実験式、式(6)に代入すると重錘落下時の応力変化に対応した間隙比の変化量が計算される。Fig. 16に、解析で得られた地盤の間隙比のコンターを示す。重錘落下点より干若深部で最も間隙比の小さくなる場所が現れ、 $e=0.56$ 程度に至っている。

この解析結果の妥当性を調べるために、現場で改良効果の判定のために行われたN値の計測結果と比較を行う。Fig. 17は、重錘落下点付近のN値の分布図である。重錘落下点鉛直方向に、N値及び解析で求められた間隙比変化の対応を調べてみるとFig. 18のようになる。図のように、間隙比の変化とN値との間にかなり良好な対応が認められ、本解析の妥当性が検証された。

8. 結 論

重錘落下による地盤改良度評価を定量的に行うために、高圧及び低圧の三軸圧縮試験機を用いて、土の圧縮及びせん断に伴う体積変化量を調べ、任意の応力変化に対応する間隙比変化の定式化を行った。重錘落下による地中応力変化を平均主応力成分pと偏差応力成分qの2つに分け、これらの任意の変化による間隙比変

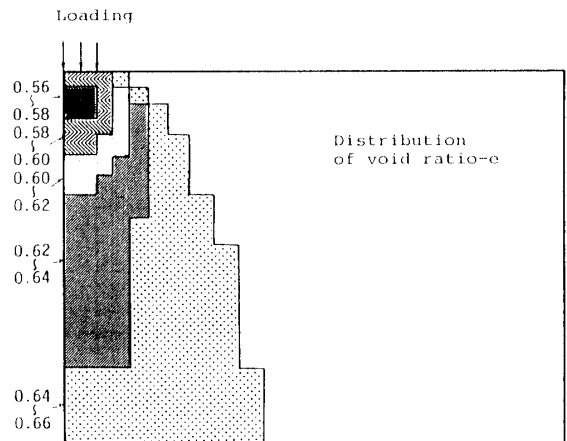


Fig. 16 Distribution of void ratio in the fill analyzed

化の評価が可能とした。得られた実験式は、FEM動的応力解析結果と組み合わせられ、現実の地盤に対する評価が可能となった。動圧密工法の効果を調べるために、現場において現地実験が行われたので、ここで提案する方法を用いて地盤改良の評価を行った。

その結果、提案の方法により現場の間隙比が評価され、それを現場実験における重錘落下後のN値と対比したところ、比較的良い対応関係が見いだされた。しかし、本方法をさらに適切なものにするためには以下に挙げるような問題点の解決が必要と思われる。

- 1) さらに広範な材料の変形特性の把握。
- 2) 重錘落下時の瞬間的な応力の増加と三軸試験における静的载荷との対応 (速度効果)。
- 3) 衝撃力の作用に対する地中応力評価に対する解析

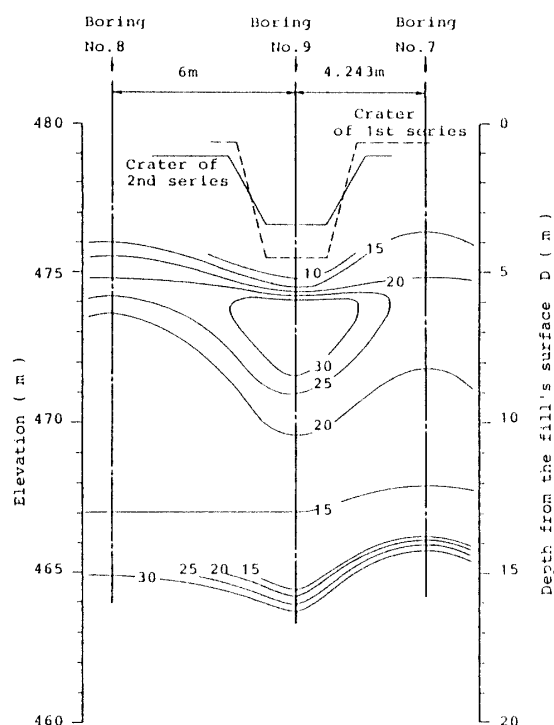


Fig. 17 Distribution of standard penetration N-value measured after applying some dropping hammers

方法及び材料定数評価方法の確立。

4) 水中での重錘落下時における有効応力の評価

以上の事項は主として室内実験及び解析における問題点として挙げたものであり、現在も検討を進めている。この方法をさらに精度の高いものにしていくためには、やはり現場からの有効なデータがより多く得られることが望まれるところである。

参 考 文 献

1) Menard, L. and Boise, Y.: Theoretical and practical aspects of dynamic consolidation, Geotechnique, Vol.25, No.1, pp.3-18, 1975.
 2) 森 博: 衝撃力による地盤改良方法について, 土と基礎, Vol.23, No.9, pp.47-54, 1975.
 3) 山田正俊: 動圧密工法, 土と基礎, Vol.29, No.5,

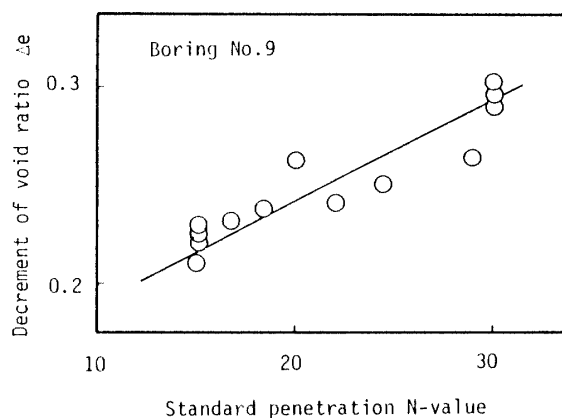


Fig. 18 Relationship between decrement of void ratio analyzed and standard penetration N-value measured in the fill

pp.21-28, 1981.

4) 三笠正人, 木下哲生, 丸井英一: 新しい指数 T 値による重錘落下締固め工法の管理, 土と基礎, Vol. 34, No.8, pp.35-42, 1986.
 5) 湯浅健二, 坂本 容, 山崎秀次, 大倉卓美: 動圧密工法による岩砕埋立地の地盤改良と効果確認, 土と基礎, Vol.35, No.5, pp.39-44, 1987.
 6) 逢澤正行, 森 国夫, 渡辺 篤: 重錘落下締固め工法—動的計測について—, 第23回土質工学研究発表会講演集, pp.2053-2056, 1988.
 7) 高田直俊, 藤田哲治, 渡辺 篤, 池田通陽: 重錘落下締固め工法の現場実験—地盤変形と土圧について—, 第23回土質工学研究発表会講演集, pp. 2057-2060, 1988.
 8) 兵動正幸, 村田秀一, 中野清人, 中村哲也, 渡辺篤: 重錘落下による砂質土の圧縮性の評価について, 第23回土質工学研究発表会講演集, pp. 2045-2048, 1988.
 9) 兵動正幸, 村田秀一, 安福規之, 中村哲也, 渡辺篤: 重錘落下による砂地盤の改良効果の評価について, 土木学会第43回年次学術講演会講演概要集, III, pp.745-746, 1988.

(昭和63年10月15日受理)