

# 締固められた粘性土の先行圧縮応力 と強度の推定

太田秀樹\*・伊藤雅夫\*\*・石黒 健\*\*\*  
・米谷 敏\*\*\*\*

『締固められた粘性土の先行圧縮応力と強度を簡易に推定する手法』の提案を目的として、静的および動的に締固めた粘性土に対して一連の室内試験を行った。この結果、動的な方法で締固められた土の先行圧縮応力と強度を、密度と含水比の値を知ることによって概略推定できることが分かった。ただし、このためには同じ土を用いた一連の静的圧縮一等体積せん断試験を行い、密度・含水比～先行圧縮応力～強度の相関関係を調べておくことが必要となる。

**Keywords** : compacted cohesive soils, precompaction pressure, shear strength, laboratory test

## 1. はじめに

Proctor<sup>1)</sup>が粘性土の締固めに関する著名な論文を発表してから約55年たっているが、『粘性土の締固め』を解明しようとする努力は継続して積み重ねられ、土工技術は長足の進歩をとげた。

今日に至るまでの粘性土の締固めに関する研究の流れをまとめてみよう。粘性土の締固めに影響を及ぼすさまざまな要因(粘性土の種類、密度・含水比、あるいは締固めエネルギーや締固め方法など)の一つ一つに着目して、その役割を明らかにしようとする流れがある。締固め土(不飽和な土)を学究的に取り扱う流れであり、不飽和土の有効応力を取り扱った Bishop<sup>2)</sup>の研究が初期の代表例といえよう。わが国では不飽和土の力学的性質を詳細に調べた川上・阿部<sup>3)</sup>や綿引<sup>4)</sup>らの研究、不飽和土の構成式構築を目指す軽部<sup>5)</sup>の研究などがこの流れに属している。

『なぜ、どのようにして粘性土が締固まるのか』を理解することが、粘性土の締固めの本質を知るうえで重要であるという考え方に異論はないであろう。一方、Lamb<sup>6)</sup>、久野<sup>7)</sup>らは、より実用的な立場をとっている。彼らは、締固め土に要求される機能(例えば CBR 特性など)をより有効に改善することを念頭において粘性土の選定方法や密度・含水比の設定方法、締固め方法などを論じている。すなわち、『どのようにすれば粘性土をよりよく締固められるか』を追求した。事実、彼らの研究成果は実施工に対して多大の貢献を果たした。

締固めの目的(構造物や車両荷重の支持、沈下量の抑制、遮水など)と直接的に結びつく粘性土の品質(強度・変形性・透水性などの工学的性質)に着目するのも1つの考え方である。すなわち、『締固めのメカニズムについては深く詮索せず、締固めた結果(締固められた粘性土の性質)のみに注目する』姿勢である。その流れは、締固めの祖である Proctor にまでさかのぼる。わが国では、締固め土に対して『先行圧縮応力の概念』を導入した伊勢田・水野<sup>8)</sup>らの研究を始めとし、『等価先行圧密圧力の考え方』によって締固め土の強度を論じた太田・畠<sup>9)</sup>、西原・平川・大野<sup>10)</sup>らの研究、水浸時の挙動への拡張を図った畠・建山・藤本<sup>11)</sup>の研究などが挙げられる。これらは、『不飽和土における有効応力の問題』のような、締固め土のもつ複雑で未解明な部分をできるだけ回避し、実用性という立場に立って現場問題への迅速な適用を図っている。太田・西田・国安・金子<sup>12)</sup>や岩崎・橋本・大西・本郷<sup>13)</sup>らは最近、締固め土の工学的性質に基づく現場締固め管理手法を提唱した。彼らの成果は、実際現場への適用段階へ近づきつつあるといえる。

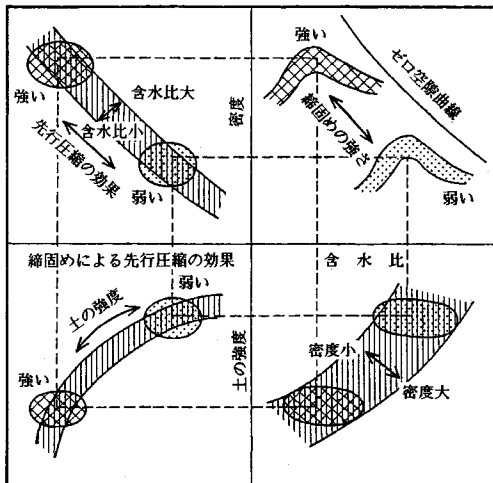
締固めに関する研究の流れを振り返ってきたが、ここで、筆者らの考え方を示しておきたい。現在、現場における締固めは、密度・含水比(あるいは飽和度)といった指標によって管理されている。これらは粘性土の工学的性質と密接に結びついてはいるものの、締固め地盤の機能と直結するものではない。本来は締固め地盤の工学的性質を直接知りながら施工を行いたいわけであるが、原位置試験(強度・変形・透水性など)を頻繁に行いながら土を盛っていくことが多大な労力と工期、そして費用を要求するために、代替的な指標として土の密度や含水比などが選ばれていると解釈される。密度・含水比という便宜的な指標だけがひとり歩きをし、その影で本来監視されるべき締固め土の工学的性質が見落とされるよう

\* 正会員 工博 金沢大学教授 工学部土木建設工学科  
(〒920 金沢市小立野 2-40-20)

\*\* 正会員 工修 前田建設工業(株)技術研究所 土質研究室室長

\*\*\* 正会員 工修 前田建設工業(株)技術研究所 土質研究室

\*\*\*\* 前田建設工業(株)技術部次長



図一 『土の締固め』の概念

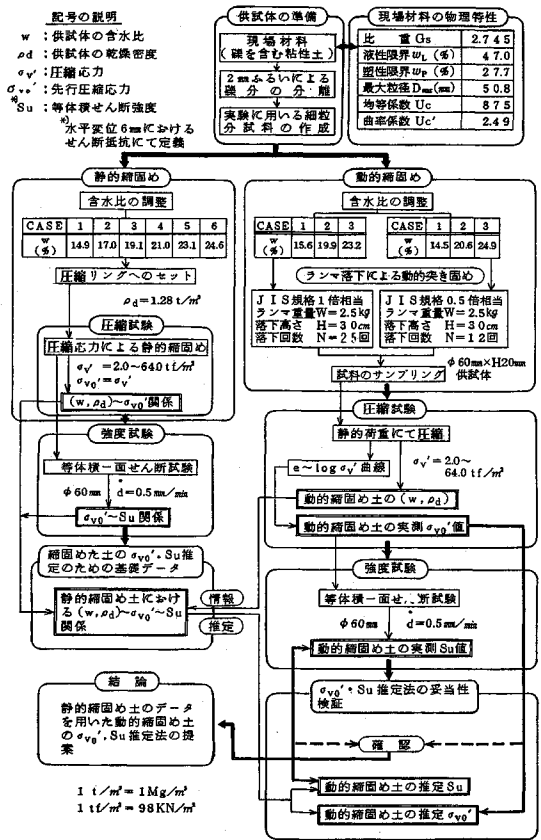
なことがあってはならない。筆者らは、『締固められた地盤の工学的性質を簡便・安価かつ迅速に求める手法』を追求することによって、現場締固めがより合理的なものにならないだろうか考える。その第一段階として、室内で締固めた粘性土を対象に一連の実験を行ったのでここに紹介したい。

詳細な議論に入る前に結論を先に示しておくほうが便利であろう。その概念を示すために図一1を準備した。結論は以下の3点となる。

- ① 従来、『粘性土の締固め』は第一象限で示される密度・含水比の関係において議論されてきた。ところが、これらは実は、第2象限で示される『粘性土を締固めることによる先行圧縮の効果』や、第3象限で示される『締固められた粘性土のもつ強度』などと1対1に対応している。
- ② そして、土が同一のものであれば、これらの間の関係(縦線でハッチングしたような関係)は締固めの方法にあまり影響されない。
- ③ 従って、一連の静的圧縮一せん断試験によって図一1の縦線のハッチングのような相関関係をあらかじめ求めておけば、動的な方法で締固められた粘性土の工学的性質が推定できる。締固めた後の密度・含水比の値を測り、図一1にプロットすれば、先行圧縮応力と強度を求めることができる(静的な圧縮試験も『締固め』の一種である)。

## 2. 研究のフロー

図二に研究のフローを示す。まず、ある粘性土を準備し、含水比を数種類に調整する。試料の一部は一面せん断箱の中につめて静的な荷重によって締固める(通常の圧縮試験と何ら変わらない)。一方、残りは締固め用



図二 研究のフロー

のモールドへ移し、ランマ落下によって動的に突き固めている。以後、前者を静的締固め土、後者を動的締固め土と称する。さらに、動的締固めには強く突き固めた場合(JIS規格の1倍相当、落下回数25回)および弱く突き固めた場合(JIS規格の0.5倍相当、落下回数12回)の2種類を準備した。このようにして合計3種類の室内締固め土(静的・JIS1倍・JIS0.5倍試料)を作製し、これらの粘性土を用いて圧縮一せん断試験を実施した。得られた実験結果より、静的締固め土と動的締固め土の圧縮一強度特性を比較して両者の相関性を調べた。この結果を用いて『ある粘性土を任意の方法で締固めた際に発揮される先行圧縮効果や強度を、同じ粘性土を用いた圧縮(静的締固め)一強度試験の結果から簡易に推定する手法』を提案した。新しい考え方として、従来概念的に発表<sup>8),9),12)</sup>されてきた締固め土の力学特性の理解の一方法を、厳密に管理された一連の実験を行うことによって確認しようとするのが本論文の目的である。

## 3. 試料および実験方法

実験に用いた試料は、図二上部に示すような物理特

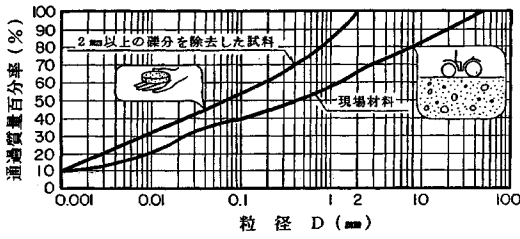


図-3 試料の粒度特性

性を有する礫混り粘性土である。また、実験装置は等体積せん断が可能な改良型一面せん断試験装置である(装置および等体積せん断の詳細は三笠<sup>14)</sup>の文献を参照されたい)。

実験の手順を以下に示す。

- ① 礫混り粘性土を2mmふるいによってふるい分ける(実際には、ふるいを通して細粒分のみを用いた)。礫混り試料および細粒分試料の粒度分布を図-3に示す。
- ② ふるい分けした試料を  $w=15\sim 25\%$  の間で何段階かに分けて含水比調整する。
- ③  $\phi 60\text{ mm}\times\text{H}20\text{ mm}$  のリング内に試料をゆるく詰める(初期乾燥密度約  $1.28\text{ t/m}^3$  ( $1.28\text{ Mg/m}^3$ ), ⑤の静的締固め用試料)。
- ④  $\phi 100\text{ mm}$  のモールド内に試料を詰め、ランマの落下による動的な突き固めを行う(突き固めの方法はJISA1210による)。この後、試料を乱さないように注意しながら  $\phi 60\text{ mm}\times\text{H}20\text{ mm}$  のリングをこの中に圧入し、サンプリングする(動的締固め土)。
- ⑤ ③, ④の試料を一面せん断試験装置にセットし、 $\sigma_v' = 2.0\sim 64.0\text{ tf/m}^2$  ( $19.6\sim 627.2\text{ kPa}$ ) の上載荷重で段階的に圧縮を行う。各載荷段階とも時間一沈下曲線は数十分以内に平衡し、圧縮は短時間で終了した。
- ⑥ 圧縮終了後、約  $0.5\text{ mm/min}$  のせん断スピードで等体積せん断を行う(水平変位  $8\text{ mm}$  程度まで)。せん断中の鉛直変位をゼロに保つことにより等体積条件が達成される。本実験では、せん断箱に取り付けたダイヤルゲージによって鉛直変位の発生をチェックし、せん断中にこの値が常にゼロとなっているように鉛直荷重を手動で調整した(鉛直変位は  $1/100\text{ mm}$  の精度で制御された)。

松尾・軽部<sup>15)</sup>にならない、試料間の接触面積の変化と、せん断箱と試料との摩擦の影響との相殺を考慮して、せん断中の断面補正は行っていない。実験の全過程を通じて供試体からの水の出入りはほとんどなく、実験の前後で含水比の変化は見られなかった。

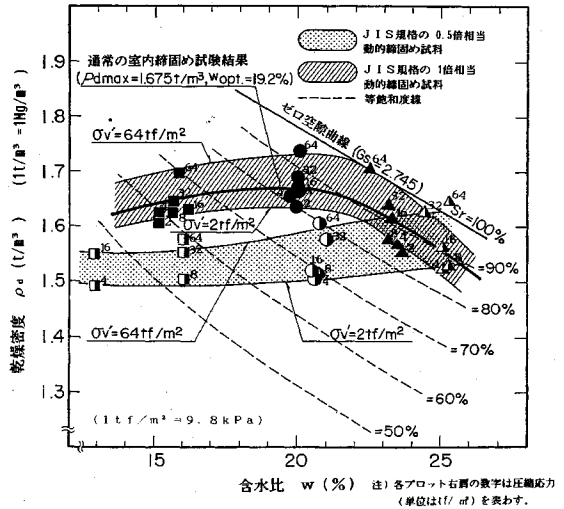


図-4 締固め後の密度・含水比

表-1 実験ケース

締固め方法	OASB		締固め方法	OASB		
	マーク	平均含水比		マーク	平均含水比	
圧縮応力 による静 的締固め	1	□	14.9	1	□	14.5
	2	▽	17.0	2	●	20.6
	3	◇	19.1	3	▲	24.9
	4	○	21.0	1	■	15.6
	5	×	23.1	2	●	19.9
	6	△	24.6	3	▲	23.2

注) 図-4~図-13まで凡例は同様。

#### 4. 室内締固め特性

粘性土の締固めは従来、含水比と密度からなる座標上にプロットされた、いわゆる締固め曲線によって論じられることが多かった。本文でもまず、ここから議論を始めよう。図-4は、試料を動的に締固め、さらに圧縮した後の含水比と密度の値をプロットした結果である(図中の記号は表-1を参照)。これらのデータは、厳密に言えば締固め曲線とは異なる。圧縮による密度増加の影響が含まれているからである。ただし、圧縮荷重が小さな場合、圧縮による密度変化が小さく、両者はほぼ等しいものとなる。図中に通常の室内締固め曲線(JIS規格1倍で締固め)を太線にて併記したが、同じ締固め方法で準備し、さらに圧縮したJIS1倍の動的締固め一圧縮試料(黒塗りの点)のデータは、当然この曲線付近にプロットされることになる[ただし、 $\sigma_v' = 64.0\text{ tf/m}^2$  ( $627.2\text{ kPa}$ ) のデータ(黒塗りの中で最上部に位置するデータポイント)だけは、圧縮による密度増加の影響が大で、室内締固め曲線をシフトアップしたような形を取る]。さて、室内締固め曲線およびJIS1倍動的締固め一圧縮試料のデータには、従来から言われているように最適含水比付近において明確なピークが認められる。

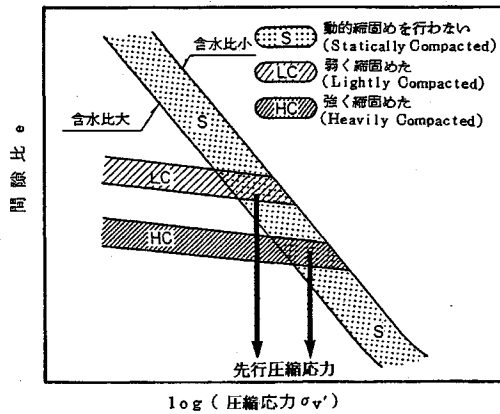


図-5 先行圧縮応力の概念

一方、弱く締めた JIS 0.5 倍の動的締め一圧縮試料（半塗りの点）では、この曲線がほぼフラットとなる。JIS 1 倍の動的締め一圧縮試料のデータや通常の室内締固め曲線とは定性的にもかなり異なっており、最適含水比を規定することができない。この違いは重要な意味をもつ。すなわち、我々は通常、ある基準のエネルギーで締固めを行う。そして得られた室内締固め曲線のピークをもって最適含水比と最大乾燥密度を定め、粘性土の締固め特性を把握しようとする。ところがこのデータに示されるように、最適含水比や最大乾燥密度は締固め方法によって容易に変化する。このことはすでによく知られている（例えば久野<sup>7)</sup>）。裏返せば、本来の目的である現場締固め特性把握のためには、現場と全く同一の締固め状態（締固めエネルギーや拘束・境界条件）を再現して室内締固め試験を行う必要があることになる。実際これは不可能で、この矛盾点が長い間未解決のままであった。本研究は、この締固め曲線の考え方を念頭から取り去るところから始まる。図-4 については、この論文の最後で改めて論じたい。

### 5. 室内締固め土の圧縮特性

まず、室内締固め土の圧縮特性に注目してみよう。

『建物やタンクなどの構造物や走行する列車・車などによる荷重を支持するための基盤をつくる』これは、粘性土を締固める目的の1つである。このような目的をもつ締固め地盤には、付加的な荷重に対する支持力や変形への抵抗性といった品質が要求される。『締固めによりどこまで密度が高まったか』ではなく、『どこまでの荷重に耐えられ、どれ程の変形に収まるようになったのか』が重要となる。締固められた土の圧縮特性は、締固め地盤の機能を左右する重要な工学的性質となる。

締固められた粘性土の圧縮特性を調べた伊勢田・水野<sup>8)</sup>の研究を参考にしたい。彼らの提唱した『先行圧縮

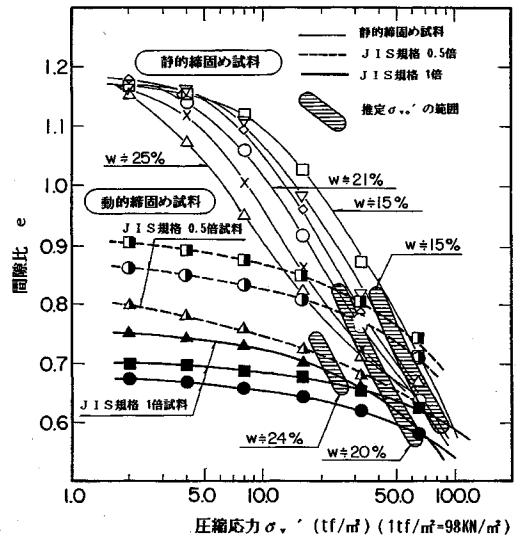


図-6 締固め土の圧縮試験結果

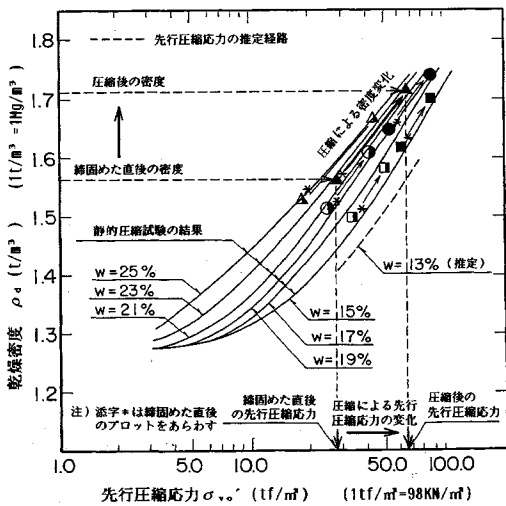
応力の概念』を図-5 により紹介する。転圧を受けて締固まった粘性土を、一種の過圧縮土と見なしてみる。締固められた粘性土が新たな載荷を受けた際の挙動が、『静的な圧縮後に応力解放を受けた土』の載荷時の挙動に似ているからである。締固め土の圧縮時における挙動を、次のように考える。

① 『ある圧縮荷重』に至るまでは顕著な変形を示さず、膨潤曲線に似た過圧縮の経路をとる（HC または LC の経路）。

② これを越える荷重を加えると、締固めによる先行効果が消失して変形が急増する。圧縮時の経路は正規圧縮曲線（静的締固めによる圧縮曲線）上へと遷移する（先行圧縮応力を境として S の経路へ移る）。

①と②の境界を与える『ある圧縮荷重』をもって締固められた粘性土の『先行圧縮応力』と称す（太田・梶<sup>9)</sup>らによる等価先行圧縮圧力もこれと同等である）。さて、このような挙動を確認するために図-6 を準備した。図-6 は、静的および動的締固め土に対する圧縮試験の結果を示す。白抜きデータの静的締固め土の、黒塗りおよび半塗りのデータは、各々 JIS 規格 1 倍、JIS 規格 0.5 倍の動的締固め土の圧縮試験結果を示す。静的・動的締固め土のいずれも、試料をリング内にセットした後、 $\sigma_v' = 2.0 \sim 64.0 \text{ tf/m}^2$  (19.6 ~ 627.2 kPa) まで段階的に荷重を加えた。白抜きのデータは図-5 の S に、黒塗りおよび半塗りのデータは各々 HC および LC に対応している。実測データは図-5 に示した概念図に類似した傾向を示していることが認められる。締固め土を一種の過圧縮土とみなすことに問題はなさそうである。

次に、『締固め土の先行圧縮応力をどう求めるか』を考える。そのためにもう一度図-5 の概念図に戻ってみ



図一七 締固め土の先行圧縮応力の推定

る。ここでは、締固め土の先行圧縮応力は、締固められた粘性土の圧縮曲線が折れ曲がる点、すなわち、SとHC、あるいはLCとの交点として規定されている。つまり、『先行圧縮応力は、締固められた粘性土の圧縮曲線が、これと同じ含水比状態にある粘性土の正規圧縮曲線（静的締固め土の圧縮曲線）と交わる点として確定される』。別の言いかたをすれば次のようになる。『動的締固め土の圧縮曲線（LC、HC）上で、これが折れ曲がる点での状態（間隙比（密度）・含水比）が判ったとしよう。静的な締固めにおいて、この組み合わせと全く同じ土の状態を（結果的に）もたすような静的荷重が、動的に締固められた粘性土の先行圧縮応力に等しい』。さて、この仮定が正しいかどうかを再び図一六で確かめてみたい。JIS 1倍、0.5倍動的締固め土の各々で圧縮曲線の変曲点を概略的に求め、各含水比ごとにこれを連ねてみた（図一六のデータを両対数グラフにプロットするとバイリニアの関係が得られる。この折れ点を概略的な変曲点とした）。これが図一六中のハッチ部分である。実測された動的締固め土の圧縮曲線すべてに明確な折れ曲がりを見出すことは難しい。よって厳密な議論はできないが、ハッチングの位置は、同じ含水比での静的締固め土の圧縮曲線の上に概ね重なっているといえよう。図一六で見る限り、少なくとも定性的には前出の仮定に大きな誤りはなさそうである。この仮定を用いれば、動的に締固められた粘性土の先行圧縮応力を、静的な圧縮試験の結果から簡易に決定することができる。その手法を示すために、図一七のチャートを準備した。図一七は、図一六の縦軸を  $\rho_d = G_s / (1 + e)$  によって乾燥密度  $\rho_d$  に変換しただけのものである（締固めの現場では、間隙比よりも乾燥密度が多用されるからである）。図一六における静的締固め土の圧縮曲線群（白抜きデータの）は、

図一七においてはこれを上下さかさまにしたような形状の、含水比ごとにほぼ平行な曲線群となる。前述のように、動的に締固められた粘性土の圧縮曲線が折れ曲がる点での密度・含水比と全く同じ組合せの点を、静的締固め土の圧縮曲線群上で探す。その交点を横軸に下した点がこの動的締固め土の先行圧縮応力である。図一七中の記号  $\triangle^*$ 、 $\circ^*$ 、 $\square^*$ 、 $\blacktriangle^*$ 、 $\bullet^*$ 、 $\blacksquare^*$  がこれらの交点を示す。静的な圧縮試験を行っておけば、締固められた粘性土の密度と含水比を知ることによって（新たに圧縮試験を行わなくても）その先行圧縮応力を推定することができるわけである。ただし、留意点が2つある。次の2点である。

① 実際には、動的締固め土の圧縮曲線が折れ曲がる際の密度・含水比が正確にわからない。なぜなら、図一六に示されるように、粘性土を締固めた直後から先行圧縮応力に相当する圧縮荷重に至るまでに、圧縮によって密度が増加するからである。現場では通常、締固め直後の密度・含水比のみが計測可能である。

② 先行圧縮応力を越えるような荷重が加わった場合（例えば締固め地盤上に高盛土を行った際）、粘性土の状態は正規圧縮領域へ遷移し、密度が急増する。これに伴い、先行圧縮応力＝新たな上乗荷重となる。

①については、膨潤指数  $C_c$  に相当する圧縮量を微少なものと無視したとする。この方法だと、推定された先行圧縮応力の値は、実際の値よりも過少に評価されることになる。太田・畠の等価先行圧縮力は、このような圧縮による影響を考慮せず、締固めた直後の密度・含水比を用いて決定している。そのため、若干の誤差が生ずる。本文では以降、このような誤差をできるだけ避けるために、すべて圧縮終了後の実測密度値をプロットした。

②については、荷重増加に伴う粘性土の密度変化を計算して、これを図一七中にプロットすればよい（先行圧縮応力  $p_p$  は①の方法で概略推定できるし、また圧縮指数  $C_c$  については、静的締固め土の圧縮曲線を用いればよからう）。図一七に、このようなプロットの例を示した。図中\*をつけた記号から\*をつけていない記号の位置まで、矢印に示すような圧縮による密度増加が生じた。この場合、先行圧縮応力についても横軸に矢印で示したような変更を行えばよい。

ここで得られた結果をもう一度まとめると次のようになる。

締固められた地盤の先行圧縮応力を推定するためにまず、室内で同じ粘性土を用いて圧縮試験を行っておく。一方、原位置では締固め直後に密度と含水比の計測を行うだけでよい（RI法を用いれば簡易で迅速な現場計測が可能となる）。この値を室内での圧縮試験結果上へプロットすれば、締固め地盤の先行圧縮応力を推定できる。ただし、締固め後に大きな荷重増加が生じる場合は、

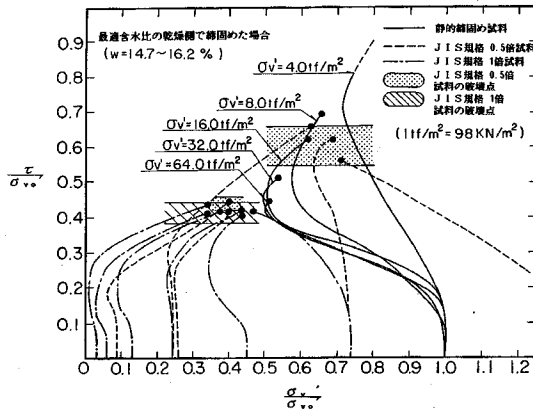


図-8 正規化応力経路 ( $w=14.7\sim 16.2\%$ )

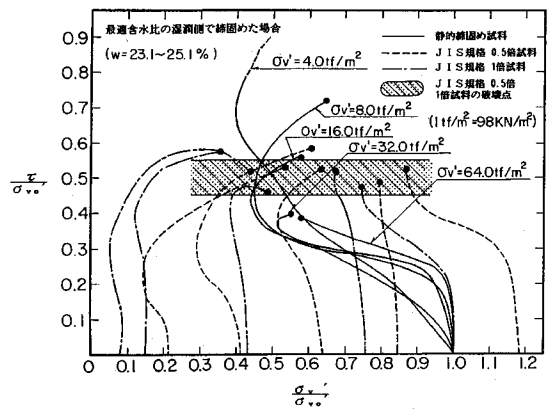


図-9 正規化応力経路 ( $w=23.1\sim 25.1\%$ )

それに応じて先行圧縮応力を求め直す必要がある。

### 6. 室内締固め土の強度特性

室内締固め土の強度特性に注目してみたい。粘性土を締固めて作った構造物にはさまざまな外力が作用する。これらの外力に対して盛土が十分な安定性を保つためには、締固めによって粘性土に所定の強度を与えてやる必要がある。この場合重要となるのは『どこまで締固めれば、どれだけの（密度ではなく）強度が発揮されるか』を知ることである。このような目的を達成するために、ここでは次のことを追求してみよう。『締固められた粘性土の先行圧縮応力とその粘性土のもつ強度とはどのような相関性があるのか』。これが判れば原位置強度を推定できることになる。なぜなら、前節で述べたように『締固め地盤の先行圧縮応力』は、締固めた後の密度・含水比の値を計測することによって推定できるからである。このことを調べるために図-8, 9を準備した。これらの図面はいずれも、圧縮後に行った等体積一面せん断試験の結果を示す。図-8は、含水比  $w=14.7\sim 16.2\%$  の粘性土の、図-9は  $w=23.1\sim 25.1\%$  の粘性土のストレスパスを示している。これらの図はいずれも、前節に示した方法を用いて推定した各々の先行圧縮応力によって正規化されている。

各含水比における正規化ストレスパスに注目してみよう。これらのデータは『粘性土の締固めの本質』を解明しようとする立場からも極めて有力な情報となる(註)。しかし同時に、ここに示された現象は極めて複雑である。締固められた粘性土のせん断特性には密度・含水比、締

固めの方法、締固めの強さ、応力状態など多くのファクターが介在し、その1つ1つを詮索することは、むしろ本文の目的からは離れるものとなる。従って、ここでは締固め土の『強度』のみに注目する。本文においては、水平変位 6 mm において発揮されるせん断抵抗によって、等体積せん断強度を定義した。図中に黒丸で示した点がこれにあたるが、以下のような傾向を認めることができる。

① 動的に締固められた粘性土の黒丸の点の高さに注目してみる。この高さは、締固められた粘性土の先行圧縮応力値とその粘性土のもつ強度との比率をあらわす。以後、便宜的にこの値を『締固め土の強度増加率』と呼ぼう。図より、締固められた粘性土における黒丸の点の高さ、すなわち強度増加率は、JIS 1 倍、JIS 0.5 倍動的締固め試料のそれぞれのグループ内でほぼ等しいことがわかる（図中に強度増加率の範囲を斜線および点々でハッチングして示した。これらの高さは各々の締固め試料ごとにほぼ等しい）。

② 粘性土を dry 側で締固めた場合（図-8,  $w=14.7\sim 16.2\%$ ）、JIS 1 倍試料と JIS 0.5 倍試料では強度増加率がやや異なっている。ただし、図-9に示すように粘性土を wet 側で締固めた場合 ( $w=23.1\sim 25.1\%$ )、両者はほぼ等しい値をとる（図中、斜線と点々部のハッチングがほぼ重なっている）。

③ 一方、静的に締固めた粘性土（先行圧縮応力=圧縮荷重）では、等体積せん断強度が圧縮荷重の増加と共に増大するが、必ずしも比例的ではなく圧縮荷重が小さい程強度増加率が大きくなる。平均的に見れば、静的締固め土の強度増加率は、JIS 1 倍、JIS 0.5 倍の動的締固め試料における強度増加率の中間的な値（黒丸の高さ）をとる。

この節における論点をもう一度明確にするために図-10を準備した。図は、静的および動的に締固めた粘性土の先行圧縮応力と強度とを直接比較した結果である。

(注) 締固め土に見られる過圧縮の挙動は、前節で示した圧縮時のみならず、せん断時においても顕著である。ダイレイタンスー特性は、先行圧縮応力と上載荷重との比、いわば『締固めによる過圧縮比』に対応して変化しているようである。この挙動は一般的な過圧縮土に類似している。締固め土の強度-変形特性は『締固めによる先行圧縮応力の概念』を導入することにより、従来の過圧縮土に対する考え方を用いて統一的に解釈できるのではなかろうか。詳細な議論については別報に譲りたい。

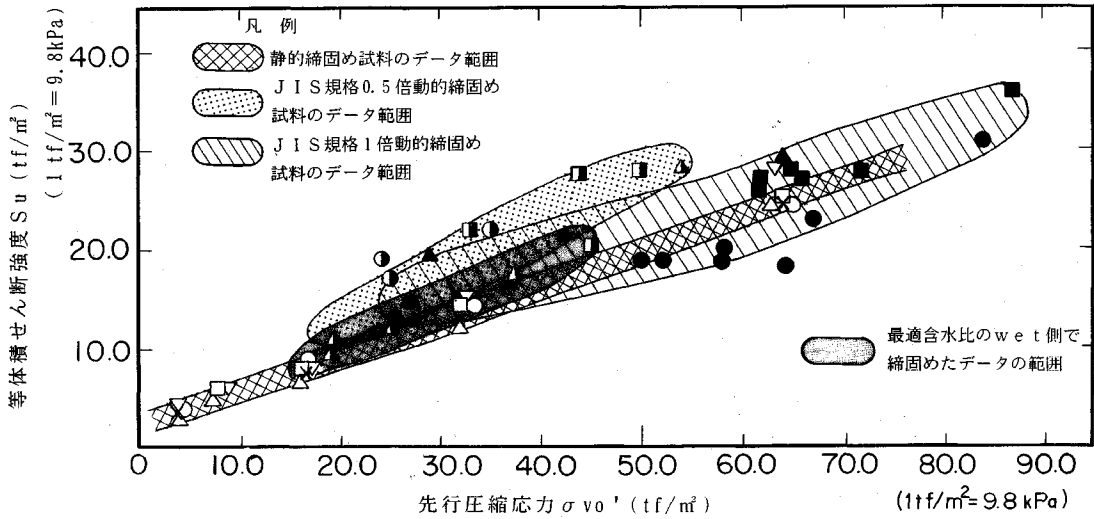


図-10 締固め土の先行圧縮応力と強度の関係

静的締固め試料, JIS 1 倍・0.5 倍動的締固め試料の各々のデータ範囲をハッチングで示したが, これらはかなりの部分で重複している。静的に締固め(圧縮)した粘性土の強度増加率と動的に締固められた粘性土の強度増加率とは, 大差のない値をとることがわかる(ただし, JIS 0.5 倍の動的締固め土のデータ範囲は, その一部がやや上方に位置する傾向が認められる)。一方, 実際の締固め施工を思い返してみよう。現場締固めはそのほとんどが最適含水比の wet 側で行われている(これは, 強度・変形性や遮水性といった粘性土の品質が, 水浸後に激変することを防ぐうえからも重要である)。そして, これに対応する図-9 ( $w=23\sim 25\%$ ) のデータが, 図-10 中では 3 つのハッチングが最も重なる部分に集中していることは興味深い。すなわち, 実際の現場締固めは, 静的および動的締固め土の両者の強度増加率がかなり一致するゾーンにて行われていることになる。

さて, ここまでに得られた結果をもういちどまとめてみる。

『締固められた粘性土の強度増加率(強度/先行圧縮応力)は静的に圧縮した粘性土と動的に締固めた粘性土とで大差がなく, 締固め方法の影響をあまり受けない。特に, 最適含水比の wet 側で締固めた粘性土ではその傾向が強く, 等体積せん断強度は先行圧縮応力によってきまる』

ところで, この先行圧縮応力は締固めた直後の密度・含水比の値から推定できる。この 2 つの結論から次のことが言える。

ある粘性土を静的に圧縮し, さらにせん断試験を行って強度を求め, 強度増加率を算定しておく(強度/圧縮荷重として容易に求まる)。この粘性土を任意の方法で

締固めたとしよう。この際, 締固めた直後の密度・含水比の値を計測しておく。この値をまず, 静的な圧縮試験のグラフにプロットして先行圧縮応力を推定する。次に, 推定した先行圧縮応力にあらかじめ求めた強度増加率を掛け合わせれば, この土の等体積せん断強度が求まる。すなわち, 次の結論が導かれることになる。

『ある粘性土を任意の方法で締固めた時, この粘性土の持つ先行圧縮応力および強度は, この粘性土を締固めた直後の密度・含水比の値を計測することによって推定できる。ただし, 同一試料を用いた一連の圧縮-等体積せん断試験のデータを準備しておくことが必要である』

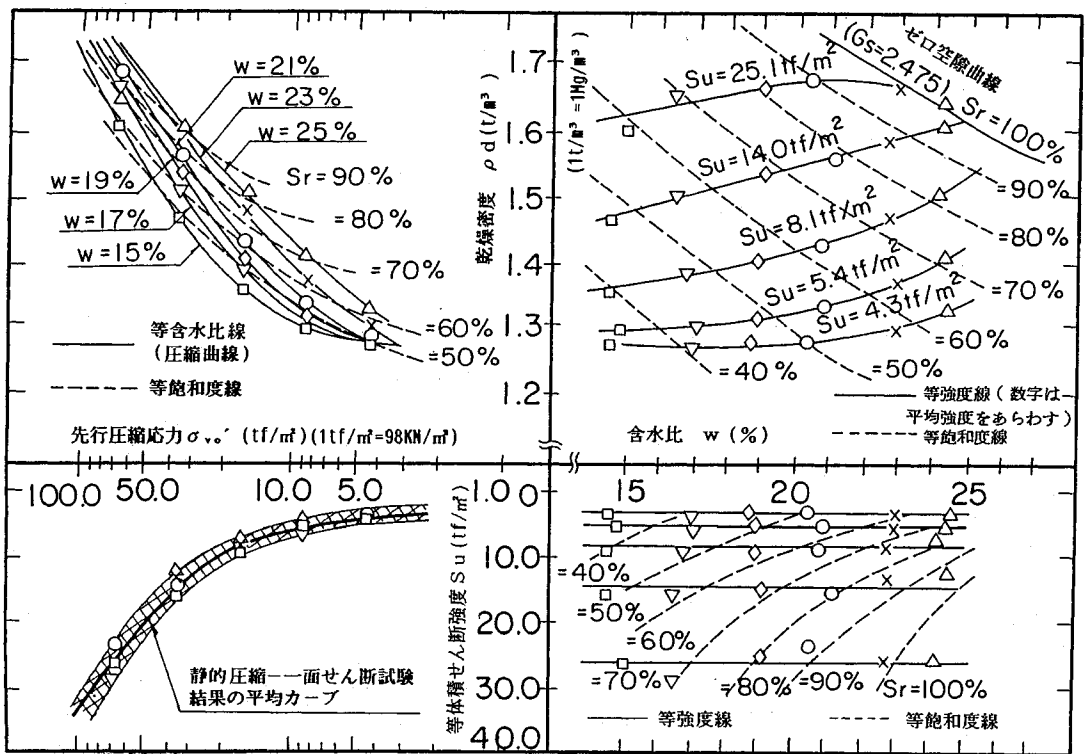
### 7. 室内締固め土の先行圧縮応力・強度推定法

これまで, 粘性土の締固め特性・締固められた粘性土の圧縮特性・せん断特性を別個に論じてきた。そこで, 最後にこれらを総合し, 締固め土の先行圧縮応力・強度を推定するための具体的なフローとしてまとめておくことにする。

#### 室内締固め土の先行圧縮応力・強度推定フロー

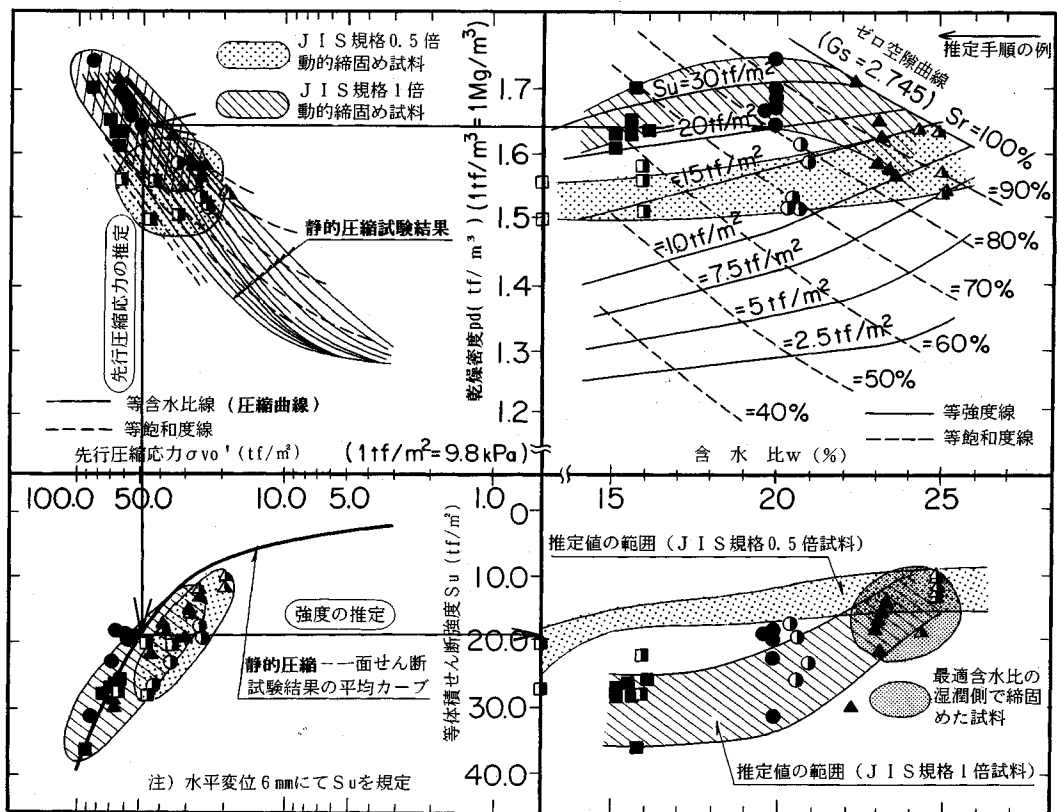
① 図-1 に概念図で示したようなチャートを準備する。これを具体化したものが図-11 である。第 1 象限は密度と含水比からなり, 従来, 締固め曲線をプロットしていた座標である。第 2 象限は密度と先行圧縮応力から, 第 3 象限は先行圧縮応力と等体積せん断強度からなる。

② 静的荷重による一連の圧縮-等体積せん断試験を行う。圧縮後の密度・含水比を第 1 象限に, 圧縮曲線を第 2 象限に, せん断試験結果を第 3 象限にプロットする。図-11 中の白抜きのデータが本研究で得られた結果である(記号は表-1 を参照)。



注) 凡例は表1を参照

図-11 締固め土の先行圧縮応力・強度推定用チャート



注) 凡例は表1を参照

図-12 動的締固め土の先行圧縮応力と強度の推定



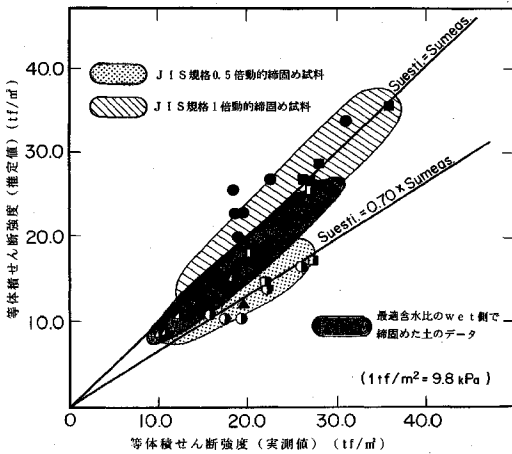


図-13 推定値と実測値の比較

③ 各象限における静的締固め土のデータにより、この粘性土の密度・含水比～先行圧縮応力～強度の相互関係が規定される。これは、図中に示すような曲線群となる。この曲線群が任意に締固められた粘性土の先行圧縮応力・強度を推定するための基礎的データとなる。

④ この図の第1象限に、この粘性土を任意の方法で締固めた後の密度・含水比の組合せをプロットする。この結果を図-12に示す。この点を高さ一定（乾燥密度一定）のまま第2象限へ平行移動し、③で作製した曲線群のところまで持って行く。この曲線群は含水比により何本かに分かれているが、その中で、締固めた後の含水比（第1象限のプロットの横軸の値）と同じ含水比に相当する曲線を探し交点を求める。

⑤ この交点を横軸（先行圧縮応力軸）へ下す。横軸との交点がこの締固め土の先行圧縮応力を与える。

⑥ この点をさらに第3象限へ下す。そして、静的締固め試料の平均強度カーブとの交点を求める<sup>(注)</sup>。この点を縦軸（せん断強度軸）へ向けて平行移動し、縦軸との交点を求める。この点が締固め土の等体積せん断強度を与える。

このような推定経路の例を図-12中に矢印で示した。他のプロットも同様の手法によるものである。図-12に示した第1～第3象限は、実は、すでに説明に用いた図-4, 7, 10と全く同じである。

さて、本手法によって推定したせん断強度と実測値とを比較するために図-13を準備した。JIS 1倍試料では

(注) 今回用いた試料では、含水比が違っていても同一の先行圧縮応力（静的締固め土では＝圧縮荷重）を与えてやれば、その土の強度はほぼ等しいものとなった（太田・西田・国安・金子<sup>12)</sup>の結果と一致）。従って第3象限は1本の平均カーブとして表現されている。ただし、材料によっては含水比によって強度線が異なり、曲線群となるものもある。この場合、同じ含水比を持つ強度線を探し、交点を求めてやる必要がある。

概ね良好な整合性を示す。ほぼ1対1に対応するものと言ってよからう。一方JIS 0.5倍試料では、含水比が低い場合推定値は強度をやや過少に見積もる。現実的には安全側の評価を与えることになる。ただし、前述したように、粘性土をwet側で締固めた場合には、本手法による推定精度はかなり高いものと言ってよい。

## 8. 結 論

本研究にて得られた結論を以下に示す。

(1) 締固められた粘性土は過圧縮土に類似した圧縮一せん断特性を示す。そして締固めによる過圧縮効果を表わす先行圧縮応力は、締固めた後の密度・含水比の値から概略推定される。ただし、同じ材料を用いた静的締固め（＝圧縮試験）の結果が必要である。

(2) 締固められた粘性土の強度増加率（等体積せん断強度／先行圧縮応力）は、静的に締固めた粘性土（圧縮一せん断試験の結果）と動的に締固めた粘性土とで大差がなく、締固め方法の影響をあまり受けない。

(3) 従って、ある粘性土を用いた静的圧縮一等体積せん断試験の結果が準備されていれば、この粘性土を任意の方法で締固めた時の先行圧縮応力と等体積せん断強度は、締固めた後の密度・含水比の値を計測することによって推定できる。この結果は、原位置で締固めた地盤の工学的性質を簡便・安価かつ迅速に求める手法を示唆するものである。

本論文で提案された手法を現場へ適用するためには尚、検討すべき問題が数多く残されている。それらを提示し、研究の今後の方向性を明らかにすることによって本論文の結びとしたい。

① 本研究で取扱った等体積せん断強度と現場における代表的なせん断強度との関係を明らかにしなければならない。

② 試験室で圧縮一せん断試験に用いた粘性土と、現場の粘性土とが同一の材料であることが本手法の前提となる。現場で明らかに材料が変化した場合、直ちに室内試験をやり直さなければならない。本研究ではこの問題に対処すべく簡易な一面せん断試験を採用した。

③ 締固められた粘性土が水浸した場合、畠・建山・藤本<sup>11)</sup>の研究成果を準用することによって、水浸による粘性土の工学的性質の変化を考慮する必要がある。

④ 現場の材料は通常、礫分を含んでいる。本手法はこれをふるいかけた細粒分試料に対して得られたものであるため、今後、混礫材料に対する本手法の妥当性を検証していく必要がある。

謝 辞：本研究を進めるにあたり、前田建設技術研究所杉浦研五・上出 厚両研究員には実験面での御援助を頂いた。末筆ながら謝意を表するものである。

参 考 文 献

- 1) Proctor, R.R. : Four articles on the design and construction of rolled-earth dams (Fundamental principles of soil compaction, Description of field and laboratory methods, Field and laboratory verification of soil suitability, New principles applied to actual dam-building), Engineering News Record, Vol.111, pp.245 ~ 248, 286 ~ 289, 348 ~ 351, 372 ~ 376, 1933.
- 2) Bishop, A. W. : The measurement of pore pressure in the triaxial test. Proc. Conf. Pore Pressure and Suction in soils, pp.39 ~ 46, 1960.
- 3) 川上 浩・阿部廣史：不飽和粘土の強度と変形，不飽和土の工学的性質研究の現状シンポジウム発表論文集，pp. 1 ~ 10, 1988.
- 4) 綿引恵一：不飽和土の力学的挙動に関する研究，不飽和土の工学的性質研究の現状シンポジウム発表論文集，pp. 35 ~ 44, 1988.
- 5) 軽部大蔵：不飽和土の構成式，不飽和土の工学的性質研究の現状シンポジウム発表論文集，pp. 59 ~ 68, 1988.
- 6) Lamb, T.W. : The engineering behaviour of compacted clay, J. SMFD ASCE. SM2, pp.1 ~ 35, May, 1958.
- 7) 久野悟郎：締固めと力学特性の相関，土と基礎，22-4, pp. 5 ~ 10, 1974.
- 8) 伊勢田哲也・水野正憲：締固めた土の圧縮特性に関する研究，土木学会論文報告集，第188号，pp. 45 ~ 52, 1971.
- 9) Ohta, H. and Hata, S. : Strength of Dynamically Compacted Soils, Proc. 9th Int. Conf. Soil Mech. Found. Engrg., Vol.1, pp.239 ~ 242, 1977.
- 10) 西原 晃・平川修治・大野 勲：静的・動的締固め土の圧縮・強度特性，不飽和土の工学的性質研究の現状シンポジウム発表論文集，pp. 155 ~ 160, 1988.
- 11) 島 昭治郎・建山和由・藤本直昭：水浸時挙動を考慮した土の締固め施工基準の決定方法について，土木学会論文報告集，第382号，pp. 227 ~ 235, 1987.
- 12) 太田秀樹・西田義親・国安逸朗・金子義信：土の締固め—管理基準と品質検査—，土と基礎，34-5, pp. 43 ~ 48, 1986.
- 13) 岩崎好規・橋本 正・大西翼美・本郷隆夫：締固め特性と盛土施工管理，不飽和土の工学的性質研究の現代シンポジウム発表論文集，pp. 171 ~ 178, 1988.
- 14) 三笠正人：三軸圧縮と一面せん断試験機および試験法について，第12回土質工学シンポジウム発表論文集，pp. 117 ~ 123, 1967.
- 15) 松尾 稔・軽部大蔵：室内せん断試験結果の設計への適用に関する2, 3の問題点，第11回土質工学シンポジウム発表論文集，pp. 91 ~ 100, 1966.

(1990. 6. 1 受付)

## PRECOMPACTION PRESSURE AND STRENGTH OF COMPACTED COHESIVE SOILS

Hideki OHTA, Masao ITOH, Takeshi ISHIGURO and Satoshi YONETANI

Proposed is methods of specifying the precompaction pressure and shear strength of compacted cohesive soils. The precompaction pressure of a compacted cohesive soil is estimated based on preliminary compaction tests. The strength gain due to the increase in precompaction pressure is not influenced by the method of compaction. Then, the strength of a dynamically compacted cohesive soil is found to be successfully estimated by knowing the unit weight and the water content of the compacted soil if data of a series of preliminary compaction-constant volume shear tests are available.