

締固め土の圧縮・強度特性

平川 修治*・西原 晃*

Compressive and strength characteristics of compacted soils

Shuji Hirakawa and Akira Nishihara

ABSTRACT

The compression and strength characteristics of compacted soils was investigated experimentally. The compression characteristics of dynamically compacted soils is similar to that of statically compressed soils and depends on the precompression stress. The strength of compacted soils can be estimated by the equivalent precompression stress. The construction standard in soil compaction was also discussed on the basis of the compression and strength characteristics of compacted soils.

1. はじめに

土を締固めると固くなり強度が増加することは古くから経験的に知られている。しかし、土をどの程度締固めれば必要な固さや強度が得られるかという問題に関しては、いまだ明らかになっていない部分が多い。現在、現場における土の締固め（compaction）の施工管理は、室内における突固め試験によって得られる含水比・密度・飽和度などのデータに基づいて行われている。しかし、これらの諸量は土の変形・強度・透水性などの力学特性と直接結びつけられていないため、設計時に締固め地盤の力学特性をどのように評価すべきか困ることが多い。締固めの目的は、本来、土の力学特性の改善であり、これらの力学特性を考慮した合理的な締固めの施工管理が望まれている。

現場における締固めの方法の多くは衝撃・転圧・振動など動的な方法によるものである。一方、強度や変形などの力学特性に関する研究の多くは静的な応力履歴を受けた試料を用いたものであり、それらの研究成果を締固め施工に利用するためには、応力によって静的に締固め

た土の力学特性と、現場で動的に締固められた土の力学特性を関係づけることが重要である。本研究では、このような観点から、静的および動的に締固められた土の圧縮・強度特性を実験によって明らかにするとともに、これら力学特性を考慮した締固めの施工管理について検討する。

実験に用いた試料は、福山市で採取したマサ土の2mmフルイ通過試料（比重＝2.651）で、その粒径分布を図-1に示す。マサ土は西日本に広く分布する風化花こう岩で、路盤材料としてよく用いられている。

2. 締固め土の圧縮特性

2.1 不飽和土の静的圧縮特性

締固めは、基本的には不飽和土の圧縮であり、その圧縮特性は、土に含まれる水の量すなわち含水比に関係する。そこでまず、不飽和土の基本的な圧縮特性を調べるために、いろいろな含水比に調整した試料に対し、図-2に示すような標準圧密試験機を用いて、荷重による静的な圧縮試験を実施した。試料は所定の含水比に調整し

* 土木工学科

密閉状態で一日以上放置した後、圧密リングの中にできるだけゆるい状態でつめた。試料の乾燥重量は60gで一定である。なお、乾燥試料と飽和試料についても圧縮試験を行っている。

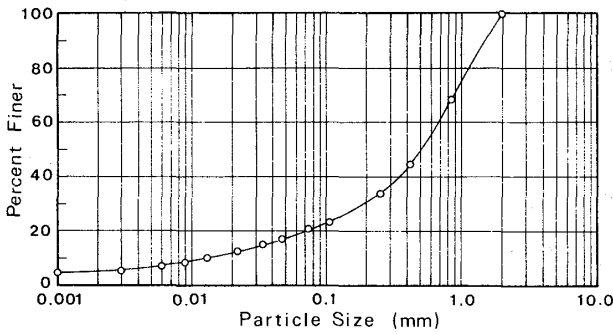


Fig.1 Grain size distribution

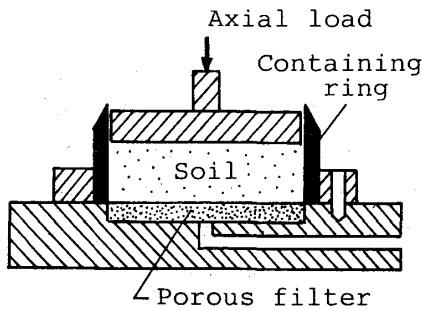


Fig.2 Compression test apparatus

図-3は、それぞれの含水比について、間隙比と圧縮応力の対数の関係を示したものである。飽和した粘性土の場合、間隙比と圧縮応力の対数の関係すなわち、 $e \sim \log \sigma$ 関係は直線で表されることが知られている。不飽和土においても、圧縮応力が大きくなるにつれて、 $e \sim \log \sigma$ 関係は直線となり、それぞれの含水比についてはほぼ

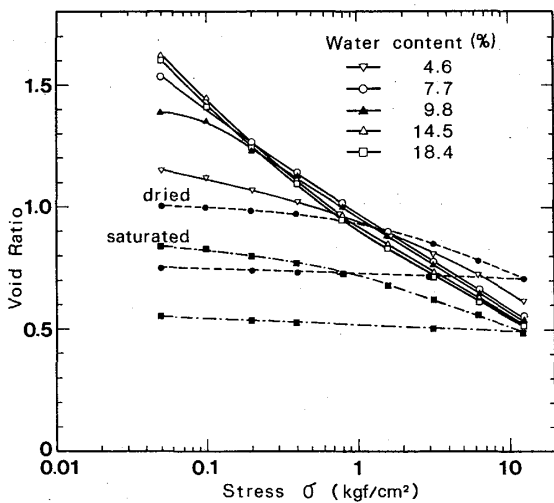


Fig.3 Relationship between void ratio and compression stress

平行となっていることがわかる。また間隙比は含水比が高い試料ほど小さくなっている。一方、圧縮応力が小さい領域では、 $e \sim \log \sigma$ 関係は直線とならず、また、間隙比は低含水比および高含水比の試料で小さく、中間の含水比で間隙比が最大となる。このように低応力領域と高応力領域で異なる圧縮特性が得られた原因は次のように考えることができる。

不飽和土に含まれる水は、図-4に示すように吸着水として土粒子間の接点に存在し、その表面張力によって粒子間に接点力が生ずる。このような状態の土に外力が作用するとき、間隙水は、粒子間力として構造の変化に抵抗すると同時に、土粒子間の摩擦抵抗を低減しすべりやすくする働きをする。この表面張力に起因する粒子間力の大きさは間隙の飽和度に関係している。すなわち、乾燥状態(乾燥土)および間隙が水で満たされた状態(飽和土)においては表面張力は作用せず、適当な含水状態で表面張力が最大となる。したがって、外力すなわち圧縮応力が小さい領域では、表面張力に起因する粒子間力の影響が大きく、中間の含水比で間隙比が最大となるが、圧縮応力が大きくなるにつれて粒子間力の影響は相対的に小さくなり、含水比の高い試料ほど土粒子がすべりやすく間隙比が小さくなる結果となったものと考えられる。

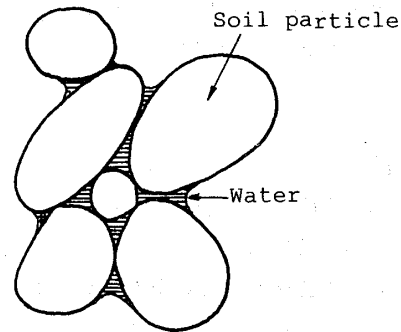


Fig.4 Water in partly-saturated soil

図-3には、乾燥試料と飽和試料についてのみ、除荷時の $e \sim \log \sigma$ 関係を示しているが、不飽和土の除荷時の $e \sim \log \sigma$ 関係は、含水比にかかわらず飽和土の除荷時とほぼ平行な直線となった。

2. 2 動的に締固めた試料の圧縮特性

現場における締固め方法としては、ローラーによる転圧がよく用いられる。また、締固めの管理基準としては、Proctorの室内突固め試験が採用されている。そこで、これら動的な方法によって締固めた試料の圧縮特性を調べるため、1) 模型ローラーによる転圧、2) Proctorの突固め試験、3) 小型のランマーによる突固めの3種類の方法で締固めた試料を用いて圧縮試験を行った。

模型ローラーによる転圧は、土槽内で、直径7cm、長

さ44cm、重量14.12kgの真ちゅう製の丸棒をころがし、30回転するものである。Proctorの突固め試験は、JIS A 1210の第1法の規格に準じて、直径10cm、高さ12.7cmの円形モールド内で、重量2.5kg、落下高さ30cmのランマーを用いて、各層10回ずつ3層に分けて突固めるものである。模型ローラーによる転圧およびProctorの突固め試験においては、含水比がほぼ15%となるように調整して締固めた後、図-2に示す圧密リングを押し込んで試料を採取した。小型ランマーによる突固めは、図-2に示す圧密リング内で、重量1.1kg、落下高さ2.5cmのランマーを用いて5回および10回突固めるものである。小型ランマーによる突固めでは、試料の含水比がほぼ15%と20%になるよう調整している。以上の各方法で締固めた試料を標準圧密試験機に移し、荷重により静的に圧縮した。载荷方法は静的圧縮試験と同様である。

図-5は含水比15%の試料について、いろいろな方法で締固めた試料の圧縮試験の結果を示したものである。締固められた土は、さまざまな外力の作用を受けて圧縮した後、外力が除かれた状態にある。そこで図-5には比較のために、静的に载荷・除荷履歴を与えた試料の圧縮曲線も示している。

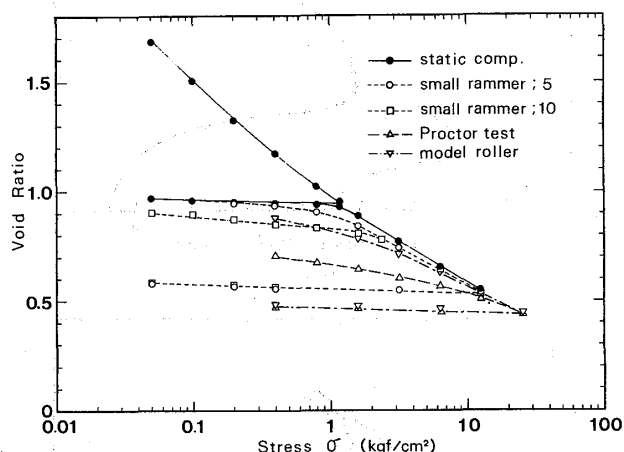


Fig.5 Result of compression test on dynamically compacted samples

締固めた土の圧縮特性は、締固め方法に関係なく、飽和した過圧密粘土の圧縮特性によく似ている。すなわち、図-6に示すように、圧縮応力がある値 σ_p を越えると圧縮量が急に増大し、その後の $e \sim \log \sigma$ 関係は直線となる。静的な除荷履歴を受けた試料においては、この応力 σ_p は除荷時の応力、すなわちその試料が過去に受けた最大の圧縮応力に等しい。締固め土の圧縮特性が急変するような応力 σ_p が存在することは伊勢田・水野¹⁾、鶴飼・花里・榎戸らによっても報告されており、彼らはこの応力 σ_p を、飽和粘土の場合にならって、先行圧縮応力(pre-compression stress)あるいは圧縮降伏応力と呼んでいるが、本研究では、 σ_p を伊勢田・水野にしたがって、

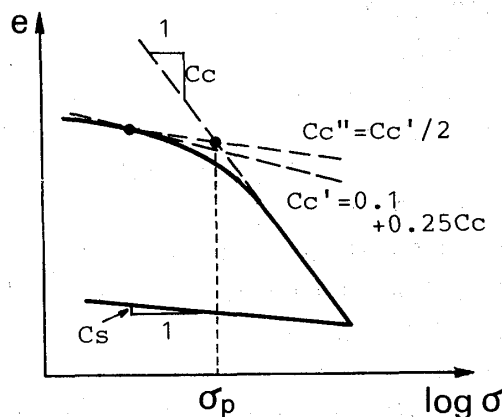


Fig.6 Precompression stress

先行圧縮応力と呼ぶことにする。また、先行圧縮応力以下の応力状態を過圧縮(overcompressed)状態、先行圧縮応力を越える応力状態を正規圧縮(normally compressed)状態と呼ぶことにする(後注1)。

表-1は、いろいろな方法によって締固めた試料の先行圧縮応力をまとめたものである。圧縮試験の結果から、先行圧縮応力を求めるには、三笠の方法を用いた(図-6参照)。先行圧縮応力は、試料の締固め方法によってその値が異なり、また同じ締固め方法でも試料の含水比によって異なる。しかし、小型ランマーによる突固め試料の同じ含水比のものを比較すると、先行圧縮応力は突固め回数にほぼ比例する結果が得られており、先行圧縮応力は締固めの効果に相当する応力と考えることができる。

Table 1 Precompression stress of compacted soils

Method of compaction	Water content (%)	σ_p (kgf/cm ²)
Small rammer (5 drops)	14.62	1.20
	19.10	1.68
Small rammer (10 drops)	14.26	2.47
	19.20	3.55
Proctor's compaction test	14.65	6.30
model roller	14.49	1.90

締固め土の圧縮特性は先行圧縮応力を境として変化し、正規圧縮領域においては、図-5に見られるように、静的に圧縮した試料の圧縮特性に等しい。したがって、動的に締固めた土の圧縮特性を予測する場合、先行圧縮応力が有効な指標となりうるということがわかる。

3. 締固め土の強度特性

3. 1 実験方法

土の力学特性は土粒子接点において直接伝達される有効応力 (effective stress) によって支配されると考えられている。土のような粒状体をせん断すると、粒子の移動により間隙の体積変化 (ダイレイタンス) が生じ、不飽和土のように間隙に水と空気を含む場合には間隙空気圧と間隙水圧が発生する。したがって、不飽和土の有効応力は次式で表される。⁴⁾

$$\sigma' = \sigma - u_a + \alpha (u_a - u_w)$$

ここで、 σ' は有効応力、 σ は外力による全応力である。 u_a および u_w はそれぞれ間隙空気圧と間隙水圧であり、 α は飽和度などに関係する係数である。せん断時における不飽和土の有効応力を求めるには、間隙水圧と間隙空気圧を直接測定する方法もあるが、特殊な実験装置を必要とし、また実験も容易ではない。そこで、本研究では等体積一面せん断によりせん断時の有効応力を求めた。試験機の概要を図-7に示す。等体積一面せん断試験は土の体積変化が生じないよう、垂直力を調整しながらせん断する方法で、体積変化がないため間隙水圧および間隙空気圧が発生せず、垂直方向の全応力はそのま有効応力となる。また等体積せん断強度は飽和土の非排水強度に相当するものであり、土の間隙比や応力履歴が強度に及ぼす影響を調べるのに適している。

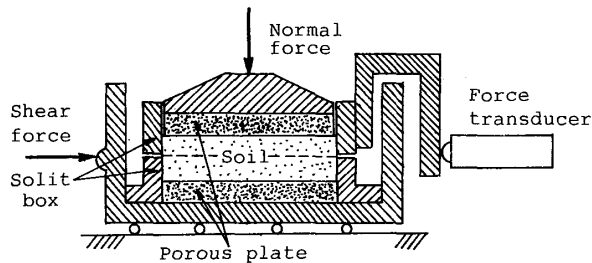


Fig.7 Direct shear test apparatus

せん断試験は、静的に圧縮した試料および小型ランマーによる突固め、Proctorの突固め試験、模型ローラーによる転圧の各方法で締固めた試料に対して行った。

静的圧縮試料に対しては、応力履歴の影響を調べるため、いろいろな応力で圧縮した後、同じ応力でせん断するもの (正規圧縮試料) と、 3.2 kgf/cm^2 で圧縮した後除荷して過圧縮状態でせん断するもの (過圧縮試料) の2シリーズのせん断を行った。正規圧縮試料の試験は、含水比5、10、15、20%の試料および飽和試料に対して行った。また、過圧縮試料の含水比は、15、20%である。

動的締固め試料の作成方法および採取方法は圧縮試験と同様であり、試料を一面せん断試験機にセットした後いろいろな垂直応力のもとでせん断した。試料の含水比は、小型ランマーによる突固め試料については15、20%

Proctorの突固め試験、模型ローラーによる転圧試料については15%である。

3. 2 せん断時の有効応力経路

図-8(a),(b)はそれぞれ静的圧縮試料の正規圧縮状態および過圧縮状態におけるせん断時の有効応力経路を示したものである。正規圧縮試料の場合、せん断にともなって有効垂直応力は減少し、その後増加に転ずる。有効垂直応力の減少および増加はダイレイタンスによる土の圧縮および膨張に対応し、正規圧縮試料はせん断初期に大きな圧縮を示す。また正規圧縮試料の有効応力経路はせん断開始時の垂直応力に関係なく相似形である。一方、図-8に示す過圧縮試料の有効応力経路はせん断開始時の応力によってかなり形状が異なり、過圧縮比 (over-compression ratio; OCR) すなわち先行圧縮応力 σ_p とせん断時の垂直応力 σ_c の比、 σ_p/σ_c が大きくなるにつれて体積の膨張傾向が強くなる。このように、静的圧縮試料の有効応力経路は除荷履歴の影響を強く受けることがわかる。

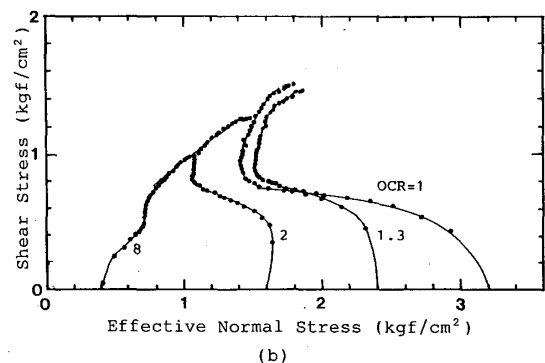
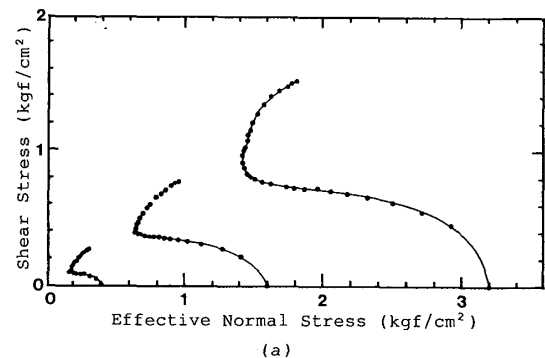


Fig.8 Effective stress paths for equivolumetric direct shear test on (a) normally compressed samples and (b) overcompressed samples

図-9は小型ランマーによる突固め試料のせん断時の有効応力経路を示したものである。なお、図中の過圧縮比は表-1に示す先行圧縮応力より求めたものである。ローラー転圧試料およびProctorの突固め試料においても図-9とほぼ同様の有効応力経路が得られる。突固め試料においても、過圧縮比が大きくなるにつれて体積の

膨張傾向が現れているが、図-8に示す静的圧縮試料に比べて、過圧縮の程度が有効応力経路に及ぼす影響は小さい。

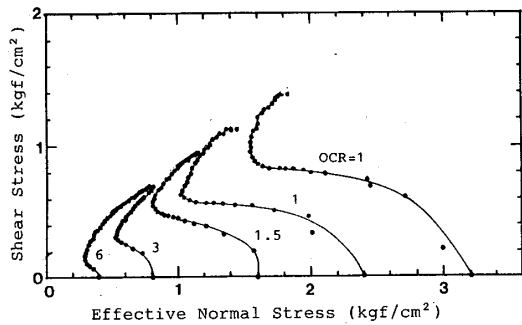


Fig.9 Effective stress paths for equivolumetric direct shear test on compacted samples

3. 3 等体積せん断強度

等体積せん断強度 (equivolumetric strength) は、飽和粘土の非排水せん断強度 (undrained strength) に相当し、有効垂直応力が減少から増加に転ずる点のせん断応力の値で定義される。また、等体積せん断強度 τ_u とせん断開始時の垂直応力 σ_c の比 τ_u/σ_c は飽和粘土の強度増加率に相当する値である。正規圧縮試料の場合、有効応力経路が相似であることから、 τ_u/σ_c は一定値となり、今回の実験では、正規圧縮試料の τ_u/σ_c は含水比に関係なくほぼ 0.25 であった。

過圧縮土の有効応力経路は過圧縮の影響を受けるため、 τ_u/σ_c も過圧縮比によって異なる。図-10は、いろいろな方法で締固めた試料の τ_u/σ_c を過圧縮比に対してプロットしたものである。飽和した過圧密粘土の場合、 τ_u/σ_c の対数は過圧密比 (過圧縮比) の対数と直線関係にあることが知られている⁵⁾ が、静的圧縮試料においては飽和土と同様の関係が見られる。太田・西原⁶⁾ は、弾塑性構成式を用いて、飽和過圧密粘土の τ_u/σ_c が、

$$(\tau_u/\sigma_c)_{OCR} = (\tau_u/\sigma_c)_{nc} \times OCR^A$$

で表されることを導いている。ここで、 $(\tau_u/\sigma_c)_{OCR}$ 、 $(\tau_u/\sigma_c)_{nc}$ はそれぞれ過圧縮試料および正規圧縮試料の τ_u/σ_c 、また、

$$A = 1 - C_s/C_c$$

である。ここで、 C_c 、 C_s は、それぞれ、圧縮時および除荷時の $e \sim \log \sigma$ 関係を表す直線の傾きを表し (図-6 参照)、圧縮指数 (compression index) および膨潤指数 (swelling index) と呼ばれる。係数 A は図-10の直線の傾きに対応するが、図-3に示す圧縮試験の結果 ($C_c = 0.36$, $C_s = 0.028$) を用いると $A = 0.93$ となり、図-10の直線の傾きにほぼ等しくなる。したがって、静的に圧縮した不飽和土の強度特性は飽和粘土の強度特性によく似ていることがわかる。

一方、動的に締固めた試料の τ_u/σ_c と過圧縮比の関係

は締固め方法で異なり、また、過圧縮比が大きくなっても τ_u/σ_c の増加はあまり見られない。したがって、同じ過圧縮土であっても、動的に締固めた土と静的に圧縮した試料では、せん断特性がかなり異なることがわかる。

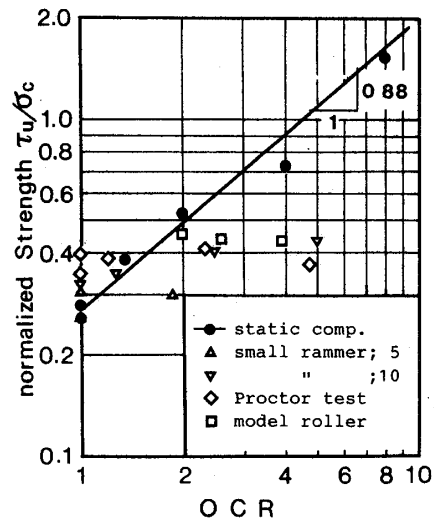


Fig.10 Relationship between normalized strength τ_u/σ_c and overcompression ratio

3. 4 等価先行圧縮応力

圧縮特性に関しては、動的に締固めた土の特性は静的な過圧縮土の特性と同じであり、締固めの効果は先行圧縮応力により評価することができる。しかし、強度特性に関しては、動的に締固めた土の等体積せん断強度を先行圧縮応力 (過圧縮比) から予測するのは困難である。

太田・西原⁷⁾ は等価先行圧縮応力 (equivalent pre-compression stress、後注2) を用いて締固め土のせん断強度の予測を行っている。等価先行圧縮応力とは「締固め土と同じ含水比、同じ間隙比に締固めるに必要な静的応力」のことである。すなわち、図-11に示すように、 w_1 という含水比で締固めを行った結果、間隙比が e_1 (点A) となったとすれば、その土の等価先行圧縮応力は、同じ含水比の静的圧縮曲線上で、同じ間隙比に対応する点Eの圧縮応力 σ_e として求められる。また、この

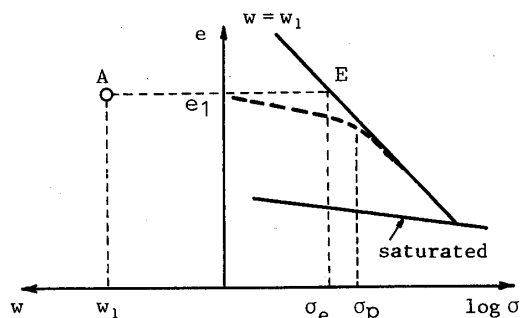


Fig.11 Equivalent precompression stress

土の圧縮試験を行い、図の点線で示されるような圧縮曲線が得られたとすれば、先行圧縮応力は図の σ_p で与えられる。したがって等価先行圧縮応力は先行圧縮応力より小さく、過圧縮領域での圧縮量が小さい土では、両者はほぼ等しい値となる。なお正規圧縮試料では、圧縮応力はそのまま等価先行圧縮応力となる。

図-12は、含水比15%の試料について、いろいろな方法で締固めた試料の等体積強度 τ_u をその試料の等価先行圧縮応力 σ_e に対してプロットしたものであり、図中の実線は静的圧縮試料(正規圧縮試料)の等体積強度と圧縮応力の関係を示している。この図より、締固め土の等体積強度は、締固め方法によらず等価先行圧縮応力に比例し、その比は正規圧縮試料の τ_u/σ_c にほぼ等しいことがわかる。したがって、締固めた土の強度は、

$$\tau_u = (\tau_u/\sigma_c) nc \times \sigma_e \quad \dots\dots\dots (1)$$

で求められる。ここで、 $(\tau_u/\sigma_c) nc$ は正規圧縮試料の τ_u/σ_c で、含水比によらずほぼ一定の値となる。したがって、締固め土の強度は等価先行圧縮応力と正規圧縮試料の τ_u/σ_c を用いて予測することができる。

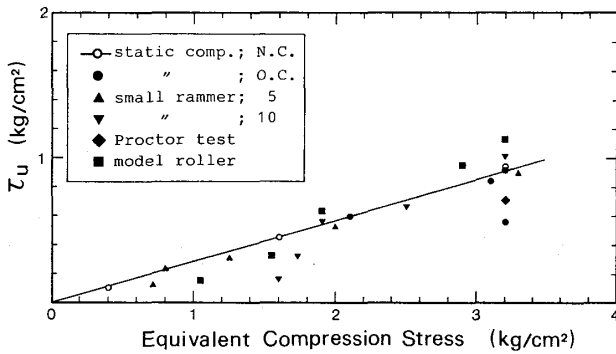


Fig.12 Relationship between equivolumetric strength and equivalent precompression stress

4. 締固めの施工管理

締固めた地盤の上に構造物を築造する場合、地盤の沈下および破壊が問題となる。地盤の圧縮特性は先行圧縮応力を境に変化するため、構造物の沈下の予測に関しては先行圧縮応力が有効なパラメーターとなる。一方、破壊に関しては、地盤の強度を等価先行圧縮応力を用いて予測することができる。

図-11からもわかるように、等価先行圧縮応力 σ_e は先行圧縮応力 σ_p よりも小さくなるが、過圧縮領域での圧縮性が低い土では両者はほぼ等しい値となり、地盤の沈下に関しても先行圧縮応力かわりに等価先行圧縮応力を考えることができる。過圧縮領域での圧縮性が高い土では、等価先行圧縮応力は先行圧縮応力よりかなり小さくなるが、地盤の沈下量を考えれば、安全率を見込んで等価先行圧縮応力を考えるほうがよからう。したがって、締固めた地盤の沈下と破壊を考える上で、等価先行圧縮

応力は有効な指標となりうる。ここでは、等価先行圧縮応力を締固めの施工管理に用いる方法について検討する。

図-3からわかるように、間隙比が小さい領域では、不飽和土の $e \sim \log \sigma$ 関係はほぼ平行な直線群で表される。締固めによって得られる間隙比は大体この領域にある。今、図-13に示すように、不飽和土および飽和土の $e \sim \ln \sigma$ 関係が直線で表されるとして、その傾きをそれぞれ λ 、 λ_s とする。 λ は圧縮指数 C_c と $\lambda = 0.434C_c$ の関係がある。また、不飽和土の圧縮曲線と飽和土の圧縮曲線の交点の応力および間隙比をそれぞれ σ_0 、 e_0 とし、また、圧縮応力が 1 kgf/cm^2 のときの飽和土の間隙比を \bar{e} とすれば、図より次の関係が成り立つ。

$$e - e_0 = \lambda (\ln \sigma_0 - \ln \sigma_e)$$

$$e - e_0 = \lambda_s \ln \sigma_0$$

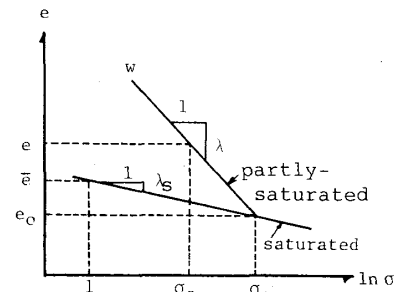


Fig.13 An idealization for the compression of partly-saturated and saturated soils

これらの式より、

$$\ln \sigma_e = \frac{\bar{e}}{\lambda_s} + \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_s} \right) e_0 - \frac{e}{\lambda} \quad \dots\dots (2)$$

が得られる。 e_0 は飽和状態での間隙比であり、含水比と次の関係にある。

$$e_0 = W \cdot G_s$$

ここで、 G_s は土粒子の比重である。したがって、等価先行圧縮応力は、式(2)より、次のように表される。

$$\sigma_e = e \times p \left[\frac{\bar{e}}{\lambda_s} + \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_s} \right) W G_s - \frac{e}{\lambda} \right] \quad \dots\dots (3)$$

したがって、地盤の含水比 W と間隙比 e がわかれば、式(3)より等価先行圧縮応力を求めることができる。等価先行圧縮応力を計算するには、 λ 、 λ_s 、 \bar{e} の3個の定数が必要であるが、 λ_s 、 \bar{e} は飽和試料の圧縮試験から求められ、また λ を求めるには、不飽和試料の圧縮試験を1つの含水比について行えばよい。したがって、飽和試料および不飽和試料の2つの圧縮試験のみから等価先行圧縮応力を求めることができる。表-2はいろいろな方法で締固めた試料の等価先行圧縮応力の実験値と式(3)によって求めた値を比較したものである。計算値は実験値より若干小さめの値であるが両者はよく一致していると言える。

締固め土の含水比と間隙比がわかれば、式(3)を用いて等価先行圧縮応力を求めることができ、さらに式(1)を用

いて、等体積せん断強度を計算することができる。図-14はこのようにして計算した締固め土の等体積せん断強度を実験結果と比較したものである。実験値と予測値はよく対応しており、式(1)、(3)を用いて締固め土のせん断強度をかなり予測することができることがわかる。

Table 2 Comparison of predicted and measured equivalent precompression stress

Method of compaction	Water content (%)	σ_e (kgf/cm ²)	
		measured	predicted
Small rammer (5 drops)	14.62	1.02	0.82
	19.10	0.94	0.92
Small rammer (10 drops)	14.26	1.38	1.22
	19.20	3.15	2.64
Proctor's compaction test	14.65	3.38	3.38
model roller	14.49	1.40	1.15

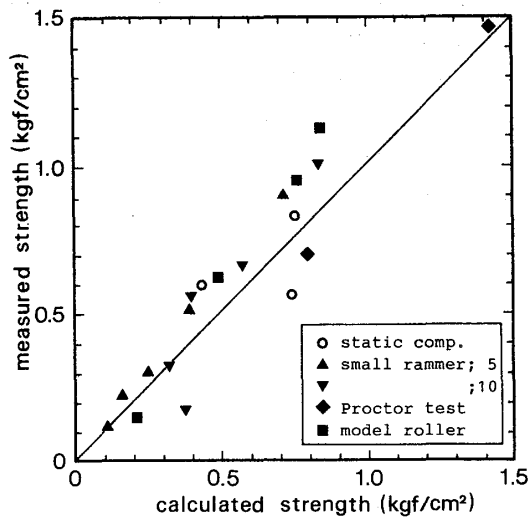


Fig.14 Comparison of predicted and measured equivalent volumetric strength

現場での締固めの施工管理には乾燥密度が用いられることが多い。そこで、式(3)を用いて、いろいろな等価先行圧縮応力に対する含水比と乾燥密度の関係を求めると、図-15のようになる。なお、乾燥密度 r_d は間隙比を用いて、

$$r_d = G_s r_w / (1 + e)$$

で求められる。ここで、 r_w は水の密度である。

図-15は、締固めの施工計画を立てるうえでも、また施工管理を行ううえでも重要な役割を果たすことができる。たとえば、締固めた地盤の上に構造物を築造する場合を考えると、地盤の許容支持力から強度の目標値が設定され、その強度を得るために必要な等価先行圧縮応力が式(1)より求められる。また、構造物の接地圧と許容沈下量から必要とされる等価先行圧縮応力がある程度推測

することができる。許容支持力と許容沈下から求められるこれらの等価先行圧縮応力のうち小さい方を等価先行圧縮応力の目標値とすれば、図-15を用いて、その目標値を得るための含水比と乾燥密度を求めることができる。また、現場での施工中は、地盤の含水比と乾燥密度を測定すれば、等価先行圧縮応力の目標値が達成されているかチェックすることができる。

現行の締固めの施工管理の基準としては、標準突固め試験 (JIS A 1210) によって求められる最大乾燥密度 r_{dmax} の90%がよく用いられる。図-15には、標準突固め試験の結果も示しているが、最大乾燥密度の90%以上の乾燥密度に対応する等価先行圧縮応力は2~18 (kgf/cm) と広範囲にわたり、強度では10倍ちかひ差がでることになる。この点から見ても、等価先行圧縮応力による施工管理がより合理的であることがわかる。

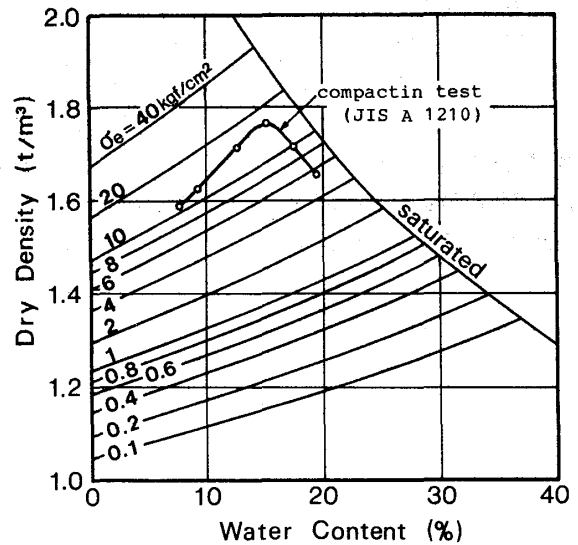


Fig.15 Relationship between dry density and water content for various equivalent precompression stress

5. おわりに

現行の締固めの施工管理基準は密度・含水比など土の物理的性質で表され、設計に必要な変形・強度といった力学特性と直接関係づけられていないことが多い。そのため、「どこまで締固めればよいか」はわかるが、「なぜそこまで締固めなければならないか」あるいは「なぜそれで十分なのか」は分かりにくい。地盤の上に民家を建てる場合とビルを建てる場合とでは、締固めの程度に差があって当然であり、多くの場合、現行の締固めの基準は過大な要求をしているように思われる。

本研究では、施工管理の1方法として、等価先行圧縮応力を用いる方法を提案した。しかし、ここで提案した方法を実際の地盤に適用するには、まだ多くの問題が残っている。実際の地盤で締固めに用いられる土は本研究

で用いた試料よりかなり粒径の大きいものである。また、実際の地盤では、降雨などによる水浸の影響なども考慮に入れる必要がある。これらの問題に関しては、今後さらに検討が必要である。

最後に、本研究で示した実験結果は、羽原靖博（吉本組）、福原大伸（相原組）両君の卒業研究で得られたものである。ここに記して謝意を表します。

【後 注】

- 1) これらの用語は、飽和粘土の場合に用いられている先行圧密応力、正規圧密、過圧密に対応するものであるが、「圧密」は通常、飽和土の場合の間隙水の排出をともなう圧縮を意味するので、それと区別するために、「圧縮」の言葉を用いる。
- 2) 太田ら⁹⁾の論文では等価先行圧密応力と呼ばれているが、本論文では、用語を統一するために等価先行圧縮応力と呼ぶ。また、等価先行圧縮応力は飽和粘土における等価応力と同じものである。

【参考文献】

- 1) 伊勢田哲也・水野正憲：締固めた土の圧縮性状に関する研究、土木学会論文報告集、第188号、pp.

45-52、1971

- 2) 鶴飼恵三・花里利一・榎戸源則：締固めた土の圧縮特性に関する基礎的検討、土と基礎、Vol. 34、No. 5、pp. 31-36、1985
- 3) 三笠正人：圧密試験法の整理法について、土木学会第19回年次学術講演会講演概要、第3部、pp. 71-72、1964
- 4) Bishop, A. W., Alpan, I., Blight, G. E. and Donald I. B.: Factors controlling the strength of partly saturated cohesive soils, Proc. Colorado Conf., pp. 503-532
- 5) Ladd, C. C., Foott, R., Iahihara, K., Schlosser, F. and Poulos, H. G.: Stress-deformation and strength characteristics, Proc. 9th ICSMFE, Vol. 2, pp. 421-494, 1977
- 6) 太田秀樹・西原 晃：Anisotropy of undrained shear strength of clays under axis-symmetric loading condition, Soils Foundations 25, No. 3, pp. 73-86, 1985
- 7) 太田秀樹・西田義親・国安逸郎・金子義信：土の締固め — 管理基準と品質検査 —、土と基礎、Vol. 34、No. 5、pp. 43-48、1985