

締固めた土の圧縮性状に関する研究

STUDY ON COMPRESSIBILITY OF COMPACTED SOIL

伊勢田 哲也*・水野 正憲**
By Tetsuya Iseda and Masanori Mizuno

1. 概 説

土の締固め程度を表示する方法には、土の密度（密度比較法いわゆる締固め度、飽和度、空気間げき率）や強度（ K 値、CBR 値、コーン指数など）による方法があるが、これから直接盛土などに必要な締固めの程度を求めることは困難である。

それはこれらの表示法が、直接力学的応力と変形に関する index ではないからである。

そこで静的に締固めた試料を用いて多くの圧縮試験を行なった結果、先に加えられた応力が一つの指標として考えられ、その値を先行圧縮応力値と定義づけると、締固められた土に荷重が作用するとき、この先行圧縮応力値を界にして、応力-ひずみの関係が急変することがわかり、同時に圧縮特性値を用いることにより締固めと関連した盛土の力学的取り扱いが可能となった。

次いでタイヤローラやブルドーザなど、実車により締固めた土の先行圧縮応力値がいかなるものであるかを実測することにより、これら締固め機械が果たす締固め効果を検討するとともに、従来から用いられている密度、飽和度、空気間げき率などとの関係についても検討を加えた。

2. 静的に締固めた土の圧縮試験

(1) 静的に締固めた土の圧縮試験

土の圧縮特性を確かめるために、表-1 に示すような土質の試料を、表-2 に示すような条件のもとで静的に圧縮成形し、図-1 に示すような大型圧縮試験機（ $\phi 30$ cm, 高さ 3.75 cm）で、周辺拘束の条件で載荷と除荷を行ない、そのひずみ量の測定を行なった。

試験の結果、成形荷重 $P=2$ kg/cm² と $P=4$ kg/cm²

表-1 使用した土の性質

統一分類による分類	土粒子重	液性限界 (%)	塑性限界 (%)	塑性指数 (%)	自然含水比 (%)
MH (関東ローム)	2.6~2.7	140~100	70~100	50~90	110~130
CH (関東ローム)	2.68	50~80	30~40	25~30	70~80
SM (砂質ローム)	2.64				14~18

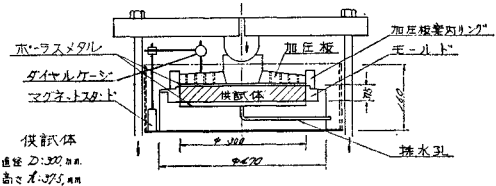


図-1 変形量測定装置と圧縮支持台

表-2 載荷荷重ならびに含水比の条件

試 料		載 荷 試 験	摘 要
成形荷重 P kg/cm ²	含水比 w %	載荷荷重 σ kg/cm ²	
0.5, 1.0, 2.0	$w_1=94, w_2=110$ $w_3=78, w_4=飽和$	0.5	<ul style="list-style-type: none"> 含水比を変えての試験は表-1のMHのみ行ない、CH, SMについては自然状態で行なった。 含水比94%は試験を行なった時の自然状態、78%は成形上きわめて乾燥した状態、110%は不飽和土としてきわめて湿った状態。 成形に当って成形荷重 P kg/cm² をプレロードとして7時間加えた。 載荷荷重 σ は1時間載荷しひずみ量を観測した後除荷し、それぞれ1時間のひずみ量を観測した。
4.0		1.0	
"		2.0	
"		4.0	
"		8.0	
"			

* 正会員 建設省土木研究所施工研究室長

** 正会員 建設省土木研究所施工研究室

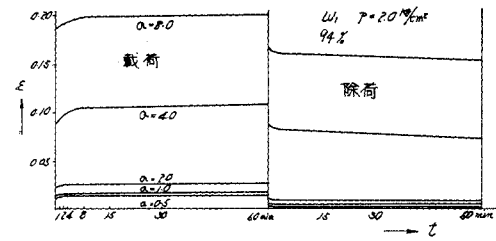


図-2 圧縮試験 (ひずみと時間の関係, 成形荷重 $P=2.0 \text{ kg/cm}^2$)

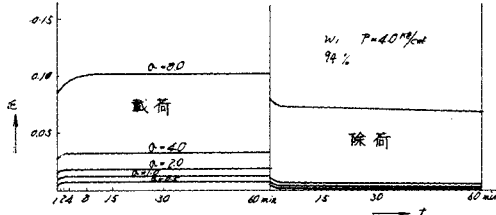


図-3 圧縮試験 (ひずみと時間の関係, 成形荷重 $P=4 \text{ kg/cm}^2$)

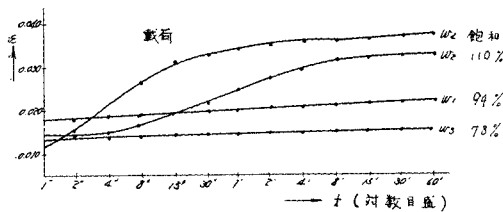


図-4 圧縮試験 (含水比を変えた場合のひずみと時間の関係)

の場合における ϵ (ひずみ), t (時間, min) と σ (載荷荷重, kg/cm^2) の関係を 図-2, 図-3 に例示する。図からわかるように成形荷重 (P) 以下の載荷荷重 (σ) を加えると, 粘弾性的変形を行ない, それ以上の載荷荷重になると永久変形量が残る。

すなわち,

$$\sigma \leq P \text{ 粘弾性的変形}$$

$$\sigma > P \text{ 塑性的変形}$$

また, 含水比の影響については, 図-4 に示すとおり含水比が少ない状態 (不飽和状態) では, ひずみ ϵ は時間 t の対数に直線的な関係を示す (このことについては, 村山・柴田の研究など^{2),3)} がある)。

含水比が飽和状態に近くなると, きわめて短い時間 (この実験では 4~8 分間) の経過後に直線関係となる⁴⁾。

すなわち,

$$\epsilon = a + b \cdot \log t$$

ただし, a, b : σ によって定まる定数

t : 時間

上式左辺の第 1 項目 (a) の値は, 荷重載荷直後に生

ずるひずみ量を表わし, 第 2 項目 ($b \cdot \log t$) の値は時間の経過に従って生ずるひずみ量である。この第 2 項目の値が盛土竣工後の変形として重要となる。

いま, $P=4 \text{ kg/cm}^2$ で締固めた試料について, 載荷応力 σ をパラメーターとして, 時間 t の対数とひずみ ϵ の関係を 図-5 (a) に示す。この図は, $\epsilon = a + b \cdot \log t$ の関係が成立する載荷後 0.1 時間以降について表わしたものである。

そこで $t=0.1$ 時間を起点としたひずみ量を ϵ_c として, 時間 t をパラメーターとした $\sigma \sim \epsilon_c$ の関係を求め

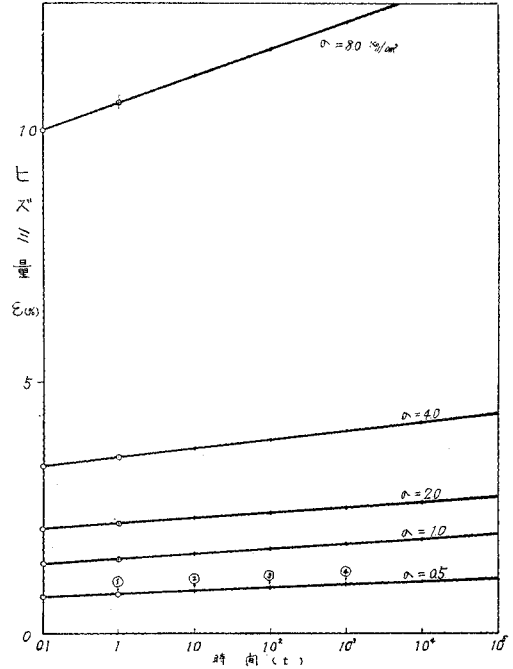


図-5 (a) $\epsilon-t$ の関係 (パラメーター: σ)

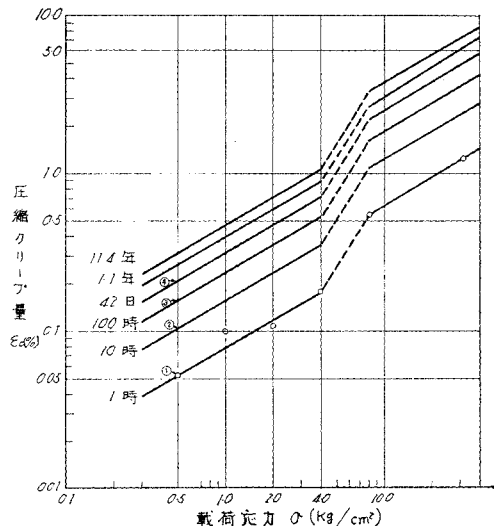


図-5 (b) $\sigma-\epsilon-t$ 曲線

たのが 図-5 (b) である。両図でひずみの進行を示す ①②③④の点は互いに対応している。また図からもわかるとおり、載荷応力 4 kg/cm^2 の前後で ϵ_c の値は不連続となり、この P に対して載荷荷重 $\sigma = 4 \text{ kg/cm}^2$ 以下である場合には、ひずみ ϵ_c は少なく、 $\sigma = 4 \text{ kg/cm}^2$ 以上の場合のひずみは大きくなる。

かくて、土の圧縮変形を考えると、土を締固めた状態における P の値と 図-5 (b) に示されるような $\sigma - \epsilon_c - t$ 曲線が重要な役割を果たす。

(2) 先行圧縮応力値

先に述べた圧縮試験におけるひずみと時間との関係で

$w_0, P = 2.0 \text{ kg/cm}^2$
94 %

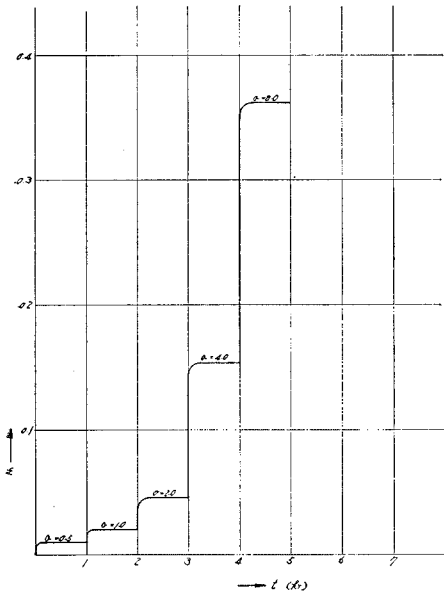


図-6 圧縮試験におけるひずみと時間との関係を累加した曲線

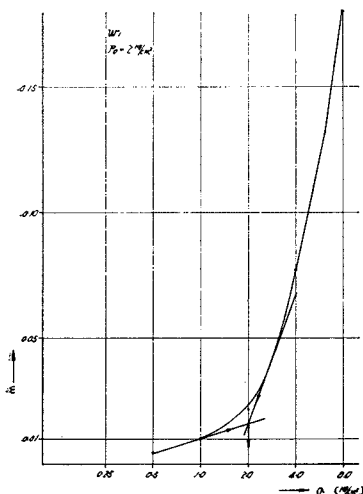


図-7 各1時間後のひずみ量と載荷重との関係

載荷の直後に大きなひずみを生じ、それ以降は時間の対数に比例したひずみ量の増加がある。

図-6 は、図-2 で得られたひずみと時間との関係を1時間ごとに連続して、次々重ねていったものである。次いで、各1時間後のひずみの量と載荷荷重の対数を軸として、整理したものが 図-7 である。図-6、図-7 からわかるように、載荷荷重 (σ) が成形時に試料に与えた荷重 (P) を越えると、ひずみが急に増大している。これは、 P の値が前もって試料に与えられたエネルギーに相当するものと考えられ、この P の値を先行圧縮応力値 P_0 と定義づけることにする。 σ が P_0 を越えるとそれまでの応力-ひずみの関係が急変することから、このような特性を利用して、逆に P_0 を 図-7 のようにちょうど圧密試験における $e \sim \log P$ 曲線において求めるのと同様の方式で図式的に求めることができる。

(3) 増加荷重試験

単一の圧縮試験の結果を紙上で累加させてゆくのではなく、ちょうど圧密試験で行なうように、試料に対して荷重を1時間ごとに順次増加させるを試みた。

$P = 2 \text{ kg/cm}^2$ で静的に締固めた試料に、1時間ごとに0.5, 1, 2, 4, 8 kg/cm^2 と逐次荷重を増加させていき、

$P = 2 \text{ kg/cm}^2$

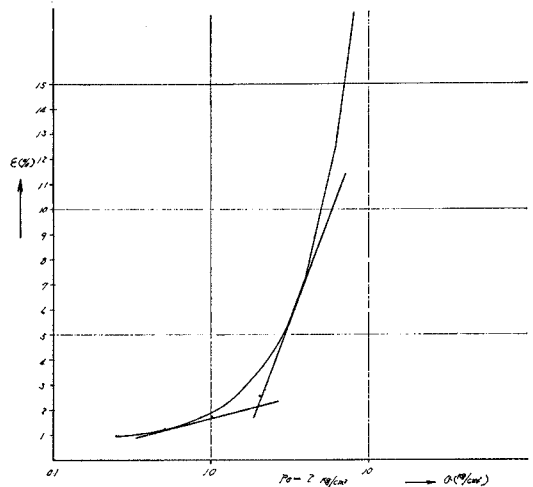


図-8 土質 (MH) の $\epsilon - \sigma$ 曲線 (時間 $t = 2 \text{ hr}$)

ひずみ量を求めたのが 図-8 である。この場合も図解により先行圧縮応力値 $P_0 = 2 \text{ kg/cm}^2$ を得、先の締固め荷重 $P = 2 \text{ kg/cm}^2$ と一致を見た。

(4) 土質の変化による影響

先行圧縮応力値を考える場合、土質の変化に対してどの程度の影響があるかを調べてみた。

試料は表-1 に示す3種類で、それぞれ自然状態における含水比で静的に $P = 2 \text{ kg/cm}^2$ で圧縮締固めたもの

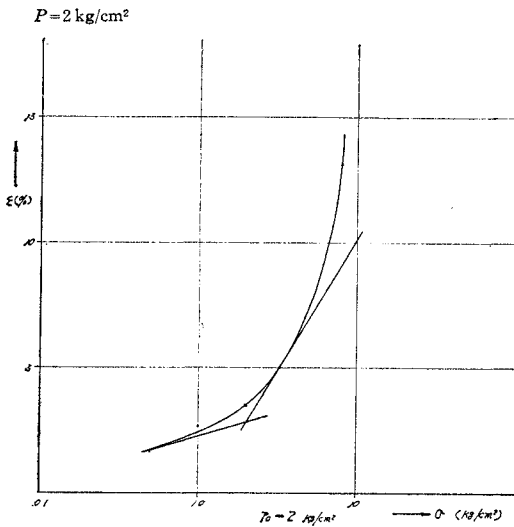


図-9 土質(CH)のε-σ曲線(時間t=1hr)

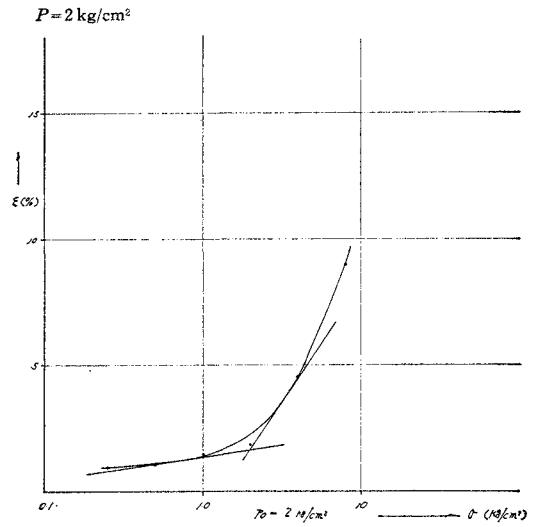


図-10 土質(SM)のε-σ曲線(時間t=1hr)

に、載荷荷重 $\sigma=0.25, 0.5, 1, 2, 4, 8 \text{ kg/cm}^2$ の1時間載荷を行なった。

結果は 図-8, 図-9, 図-10 に示す。

この場合も P_0 と P との一致をみた。

(5) 含水比の変化による影響

土質の変化と同様に、含水比の変化による影響を検討した。ただし検討に用いた試料は表-2 に示すもので、たとえば、図-2 の結果を紙上で累加させていき、図上で P_0 を求めたものである。その結果を整理したものが表-3 であり、表から成形時の締固め荷重 P と先行圧縮応力値 P_0 は含水比には影響されずに、ほぼ一致している。

表-3 先行圧縮応力値と含水比

含水比 (%)	応力 (kg/cm ²)	試料成形時締固め荷重 P kg/cm ²	求められた先行圧縮応力値 P ₀ kg/cm ²
	w ₁ 94	1.0	1.0
2.0		2.0	2.1
4.0		4.0	4.2
w ₂ 110	1.0	1.0	1.4
	2.0	2.0	1.9
	4.0	4.0	3.5
w ₃ 78	1.0	1.0	1.0
	2.0	2.0	2.1
	4.0	4.0	3.8
Sat 飽和	1.0	1.0	1.6
	2.0	2.0	2.6
	4.0	4.0	3.9

3. 実車によって得られた先行圧縮応力値

盛土を築造する場合、タイヤローラや、場合によってはブルドーザで締固めが行なわれる。これら締固め機械がいかなる先行圧縮応力値を与えるような作用を行なうかを、以下実車を用いて実測を行なった。

(1) 屋内転圧試験

- i) 試験場：幅 4m, 長さ 10m, 深さ 2m の屋内テストピット
- ii) 締固め機械：タイヤローラ自重 9t (自走式水バラスト 12t), 湿地ブルドーザ自重 9t
- iii) 材料：千葉県成田市, 関東ローム MH, 自然含水比 $w=100\%$
- iv) まき厚：ピット内 2m 程度まで土をまき出し, 上記材料を仕上がり厚 30cm

程度にまき出した。

- v) 締固め回数：各機種とも 1, 3, 5, 8, 12, 20 回, ただしゼロの状態は人力でまき出した後軽く踏み固めて表面仕上げを行なったものである。
- vi) 試料採取：φ10cm, 高さ 10cm 極薄刃のカッターでいねいに圧入して採取した。
- vii) その他：RI 計器による密度, 含水比の実測, 土圧実測

(2) 圧縮試験

コアカッターによって採取した試料を図-1の圧縮試験機により増加荷重試験(載荷荷重 0.25, 0.5, 1, 2, 4, 8 kg/cm², 載荷時間それぞれ1時間)を行なった。

(3) 試験結果ならびに考察

試験は、実車を用いての P_0 の値を求めるための試験

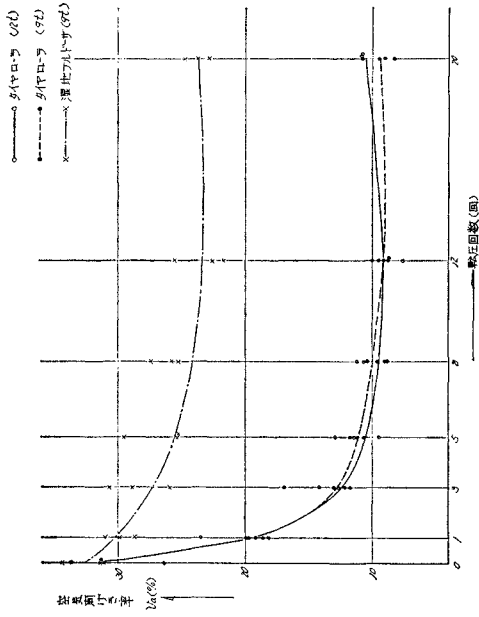


図-13 空気間げき率と転圧回数との関係

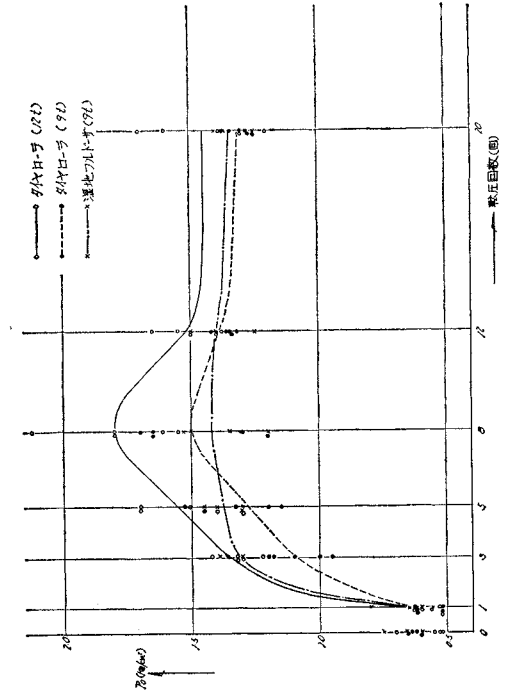


図-14 先行圧縮応力値 (P₀) と転圧回数との関係

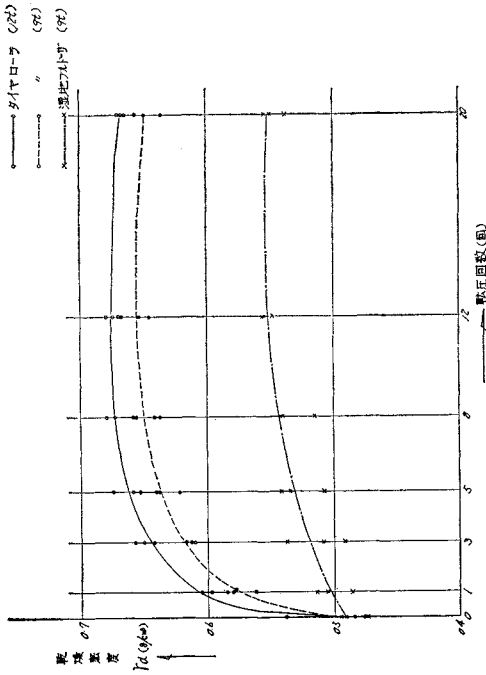


図-11 乾燥密度と転圧回数との関係

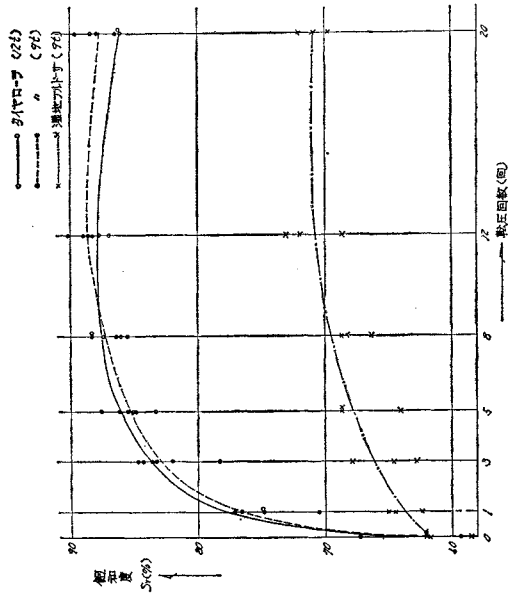


図-12 飽和度と転圧回数との関係

と、従来用いられている土の締固めに関する表示とを比較するための試験ならびに突固めた試料に対する P_0 の値を求めた。

a) 実車試験

RI 計器により測定した乾燥密度、飽和度、空気間げき率と転圧回数との関係を 図-11, 12, 13 に示す。また、2.(3) で述べた圧縮試験により求めた P_0 値と転圧回数との関係を 図-14 に示す。図-11, 12, 13 では転圧回数 5~8 回で締固め密度は最大となり、その後回数が増すと、密度はわずかに減少する傾向を示す。

これは、過転圧により、土にこね返し効果が与えられ、締固め効果よりも、周辺へ土を移動させることにエネルギーが費されることによるものと考えられる。この最も締固まった時点の状態を表-4 に示す。JIS 突固め試験に対する締固め度は締固め機種順に、92%, 89%, 75% である。

表-4 締固め効果最大時の土の状態

機種	乾燥密度 r_d (g/cm ³)	飽和度 s_r (%)	空気間げき率 v_a (%)	備考
タイヤローラ (12t)	0.675	87.8	9.0	JIS 突固め試験の結果では $r_{dmax} = 0.733$ その時の $w = 91\%$ $s_r = 90.5$ $v_a = 7.02$
タイヤローラ (9t)	0.655	88.6	9.0	
湿地ブルドーザ	0.552	70.9	23.2	

図-14 でもわかるとおり、 P_0 の値は転圧回数 8 回程度で最大値を示し、その値は、自重 12t のタイヤローラで 1.8 kg/cm²、自重 9t では 1.5 kg/cm²、自重 9t の湿地ブルドーザで 1.42 kg/cm² 程度であり、タイヤローラに関しては、ほぼ自重の比によって P_0 の値も増加する。また、タイヤローラ (9t) と湿地ブルドーザ (9t) の P_0 の値がほぼ等しいことから、先行圧縮応力値は、車体重量と転圧回数に大きく影響されることがわかった。図-11, 12, 13 と 図-14 とを比較してみると、乾燥密度等の締固めに関する諸数値と、 P_0 値という力学的数値との間に必ずしも相関性があるといえないことは注意すべきである。

なお、土圧計による計測結果を表-5 に示す。ただし、土圧計は 30 cm 深さに、受圧面を鉛直方向と進行方向に設置した。同表の値は P_0 値と比較すれば、小さな値となっているが、車体重量に応じて土圧は増加し、タイヤローラに関しては、ほぼ自重の比で増えている。

P_0 値と異なるのは、締固め機種による締固め機構の影響と、転圧回数の増加ともなって、エネルギーの蓄積が行なわれる

表-5 土圧測定結果

	タイヤローラ (12t)	タイヤローラ (9t)	湿地ブルドーザ
受圧面鉛直 (kg/cm ²)	0.70~0.75 (0.72)	0.44~0.67 (0.57)	0.20~0.49 (0.29)
車両進行方向 (kg/cm ²)	0.18~0.20 (0.19)	0.17~0.18 (0.18)	0.05~0.11 (0.09)

* () は測定結果の平均値

ことが考えられる。

b) 突固め試験と実車試験との比較

突固め試験と実車試験との結果を、乾燥密度を尺度にとって比較した。実車試験に用いた試料の含水比は $w = 100\%$ であった。突固め試験を行なうにあたり、同等の含水比の試料 (実際には $w = 96\%$) を用いた。試験の結果、突固め回数と乾燥密度との関係を 図-15 に示す。

本図と 図-11 を用いてそれぞれの乾燥密度をパラメーターにとって、突固め試験における突固め回数と実車における締固め回数を対比させて考えてみる。いま、図-11 について、各機械で締固めた場合の達しうる最大の乾燥密度はタイヤローラの場合、0.675 g/cm³、0.635 g/cm³、湿地ブルドーザの場合 0.552 g/cm³ である。次に 図-15 におけるこれら乾燥密度に対応する突固め回数はそれぞれほぼ 12 回、10 回、5 回に当り意外に低い値を示している。

しかし、これは対応する突固め回数が小さな領域に属するので、正確に対応づけるには、突固めエネルギーを更に吟味する必要があると思われる。

次に実車試験に用いた試料と同様な関東ロームについて行なった突固め試験と、静的に圧力を加えて、試料を成形した静的締固め試験との比較を 図-16 に示す。同図によれば、各機種に対する静的締固めエネルギーは、タイヤローラで 4~5 kg/cm² 程度、湿地ブルドーザで

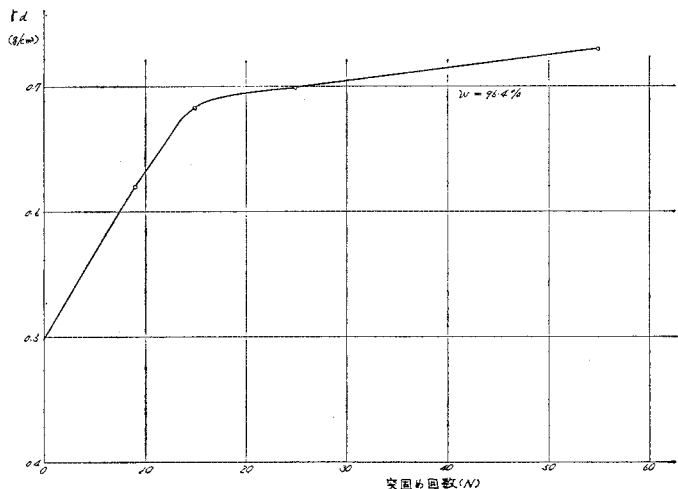


図-15 試料の自然含水比近くにおける突固め回数と乾燥密度との関係

1~2 kg/cm² 程度であり、図-14 で得られた P₀ 値と比較すると相違が生ずる。これは a) で述べたように、密度を基準として比較した結果生じた相違である。

c) 突固め試験で得られた試料の P₀ 値

JIS モールドで突固めた試料における P₀ 値を求める試験を行なった。結果は図-17 のごとくである。b) で述べた突固め回数 12 回, 10 回, 5 回に対応する P₀ の値はそれぞれ 1.2 kg/cm², 1.1 kg/cm², 0.5 kg/cm² でありかなり小さい値である。しかしながら実車による実測値は図-14 からわかるように P₀ 値は大きい。これは前項 b) でも述べたように乾燥密度をパラメーターに取った所に問題があるように思われる。

4. 先行圧縮応力値の応用

盛土における土の締固め、特に道路盛土では、完成後の舗装の破壊を伴う沈下や、不等沈下が問題となる。

また、構造物と盛土の接続部では、盛土の沈下を防止するため種々な対策がとられているが、これらは設計画面上困難なことが多い。この沈下や、不等沈下の発生を考えると、先に述べた荷重が、先行圧縮応力値を超過すれば変形が大きくなるので、超過しないような先行圧縮応力値を土の締固めの際に与えれば、かかる沈下や、不等沈下を少なくさせることができるものと考えられる。

これらの具体例について多少述べる。

(1) 盛土高と締固め機械

粘性土を材料とする低い盛土の施工に、自重 9t の湿地ブルドーザが一般的に用いられている。自重 9t の湿地ブルドーザの場合、図-14 から、先行圧縮応力値 P₀ は、5 回転圧の場合 1.4 kg/cm² である。この場合、土の密度 (r) は、ほぼ 1.4 g/cm³ であるので P₀ ≥ rH (H: 盛度高) を考えると

$$H \leq \frac{P_0}{r} \quad H \leq 10 \text{ m}$$

となる。

このことにより、盛土高 10 m 程度までは、自重 9t の湿地ブルドーザの施工で、大きな沈下変形は生じないものと考えられる。また、同様にして、タイヤローラ 12t の場合を考えると、図-14 によれば P₀ = 1.8 kg/cm² (転圧回数 8 回) であるので H ≤ 13 m となる。

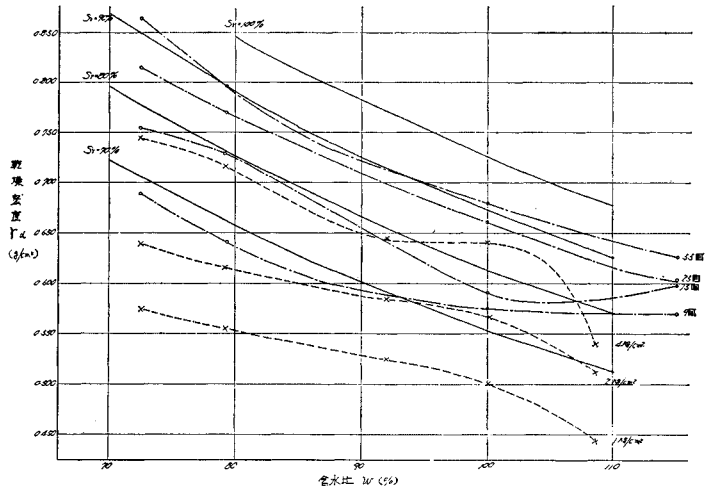


図-16 突固め試験と静的締固め試験との比較

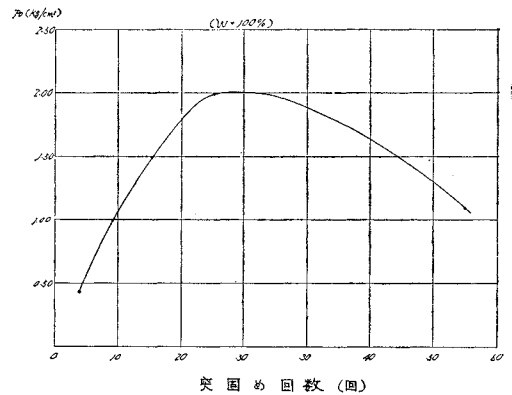


図-17 突固め試験の突固め回数と P₀ 値との関係

実例として、大清水ダムの場合 (土質: 関東ローム)、堤高 14 m, 締固めには自重 12t の湿地ブルドーザの施工⁵⁾を行なっている。

残念なことに施工後の沈下記録が不十分なので検討できなかったが、かかる堤高に対する締固め機械の自重としては限界的なものと推察される。

(2) 締固め不足の盛土

上記のことから、高盛土の場合は、それ相当の重い締固め機械で施工すると良いことになるが、実際には、盛土材料が高含水比の粘性土の場合、トラフィカビリティなどの関係から、重い機械の投入が困難な場合が生ずることが多い。

そこで、考えられることは、あらかじめ 2 m 程度のかき上げを行ない、1~2 か月放置し、路床、路盤の施工時に除去する方法で、これはかき上げを行ない、かき上げによって先行圧縮応力値を高め、その後かき上げた土を取りのぞくことによって、計画の高さに適合した強

さをもった盛土を築造せんとするような工法である。

(3) 構造物との接続部

前例の考え方と同様な考え方で、構造物を築造した時点で、接続部に当たる区間の裏込めのかさ上げを先行させる。

路床、路盤の施工時、または接続する盛土の施工時にかさ上げ部分の盛土を削去する。

以上述べたようなことがらは、施工計画、施工管理に適用できる面で、この先行圧縮応力値の活用面での意義は大きいものと思う。

5. 結 論

本研究により、次のことがらが明らかになった。

(1) 土の締固めに、先行圧縮値 P_0 の考えを導入することにより、力学的な取扱いが可能である。

(2) 締固めの程度は締固め機械の自重による影響がきわめて大きい。

自重 9 t の湿地ブルドーザもタイヤローラもほぼ P_0

の値は等しく、12 t のタイヤローラでは P_0 の値は、ほぼ自重に比例して大きい。

(3) 静的に締固めた圧縮試験からの P_0 の値は、土質、含水比とはほとんど無関係であった。

(4) P_0 の値と密度、飽和度、空気間げき率とは、特に関係は認められない。

(5) 土の締固めで、締固め機種、締固め回数によって規定する方式を選ぶ場合の施工計画上的方針を得た。ただし、この規定を行なう場合、土質、含水比のあまり変わらない現場で用いることが必要とされている¹⁾が、(3)と関連して、今後の問題点となる。

参 考 文 献

- 1) 日本道路協会：道路土工指針，昭和 41 年。
- 2) 村山朔郎・柴田 徹：粘土のレオロジー的特性について，土木学会論文集第 40 号，昭和 31 年 12 月。
- 3) Singh, A. & Mitchell, J.K.：“General Stress-Strain-Time Function for Soils” Proc. of ASCE, Vol. 94 (SMI), 1968.
- 4) 伊勢田・嶋津・宮崎：不飽和粘性土の圧縮特性試験について，第 4 回土質工学研究発表会。
- 5) 藤田組：大清水アースダム工事報告書，昭和 45 年。

(1970. 10. 12・受付)