

マサ土の締固め特性に及ぼす粒子破碎の影響

(Influence of Particle Breakage on the Compaction Characteristics
of Decomposed Granite Soil)

松 尾 新 一 郎* (Shinichiro Matsuo)

福 本 武 明** (Takeaki Fukumoto)

キーワード：含水量／砂質土／締固め／マサ土／
密度／粒子破碎／粒径（分布）
IGC： D9/D3

1. 序 言

マサ土は今日、アースダム用土として、道路盛土や路床・路盤材料として、あるいはその他の土木工用材料として、各方面に盛んに使用されている。しかし、マサ土は“特殊土”と呼ばれ、顕著な破碎性を示す材料である。土粒子の破碎は、粒度や粒子構造に変化をもたらすばかりでなく、タイ積構造にも変調をきたしその結果、圧縮性や透水性のような力学的諸特性に気付きな影響を与える。つまり、従前の土質ではなくなってしまうことを意味する。

このような厄介な現象は、土構造物の巨大化と施工機械の大型化の動向の中で、ますます人目を引き見過ごしできない問題として指摘され、重視されるようになってきた。とくに、この現象は構造物の施工中だけに限らず完成後においても環境・条件の変化に即応して生起するものだけに油断できず、土構造物の恒久的な安全性と関連して重要である。

このようなマサ土のもつ不安感を一掃して健全な使用を促すためには、マサ土の特殊性に対する深い認識はもちろんのこと、粒子破碎の現象とそれが工学的諸性質に及ぼす影響についての根本的な解明が必要である。

土構造物を安全に合理的に設計・施工・管理するうえで、使用土の締固め特性に関して確実な知識が入用なことは言うまでもない。マサ土の締固め特性についての調査・研究は、使用ひん度の増大につれて一段と活発になり、有益な情報が豊富に集積されつつある²⁾。しかし、残念ながら土粒子の破碎現象と締固め特性の関係を、その根源にさかのぼって突き止めようとする研究は少ない。

そこで、著者らは締固め過程で生起する粒子破碎の影

響が、マサ土の最大乾燥密度や最適含水比に、ひいては締固め曲線にどのような形で反映され、どの程度内蔵されているか、その姿を明らかにしようと試みた。このアプローチのために採択した方法論は次のとおりである。

マサ土の乾燥密度 γ_d は、次の三つの部分から成り立つと考えられる；すなわち、 $\gamma_d = \gamma_{dmin} + \gamma_{dr} + \gamma_{df}$ 。ここに、 γ_{dmin} は最小密度、 γ_{dr} は土粒子の再配列による密度増加量、そして γ_{df} は粒子破碎による密度増加量である。このうち第三項の影響はとりわけ有意³⁾、その内容についての検討が中心課題となる。その場合、マサ土の破碎機構を鮮明に露呈させて規則性の追究を容易にする工夫が望まれる。それには、粒子が強健で非破碎性土と見なせるような材料と対比させることが手短かで良策と思われる。ここでは、石英質河川砂を選び、マサ土と同一粒度、同一試験条件下で締固め試験(JIS A 1210)を行ない、両材料で得られた締固め特性をよりどころに、主として純物理学的視点から粒子破碎の影響を分析する。

2. マサ土と石英質河川砂の比較実験

2.1 試料の物理的性質

使用したマサ土は滋賀県産のものである（原土の性質は文献4）を参照）。試料は原土をフルイ分けたのち、表-1 および 図-1 に示す粒度に調合して用いた。試料Sは原土の 4.76mm フルイ通過分であり、試料A, B, Cは 50% 径をほぼ同じにして分布の広がりを変えて調

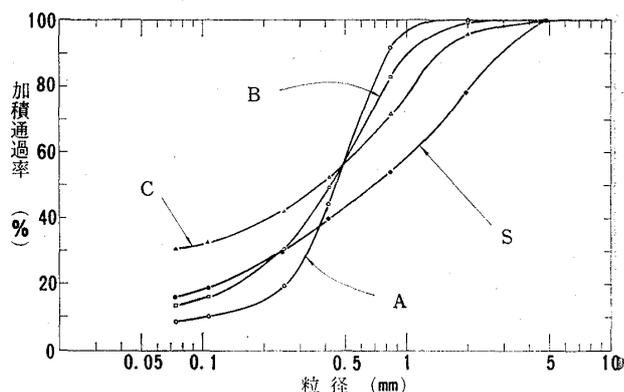


図-1 試料の粒径加積曲線

* 京都大学工学部 教授（京都市左京区吉田本町）

** 立命館大学理工学部 助教授（京都市北区等持院北町）

• この論文に対するディスカッションは昭和52年10月1日までにご投稿下さい。

表-1 試料の物理的性質

試料・記号	土粒子比重 G_s	吸水量 w_{ab} (%)	粒度組成			50%径 d_{50} (mm)	均等係数 U_s	日本統一 土質分類	
			レキ(%)	砂(%)	細粒分(%)				
自然粒度	S	2.643	4.73	22.02	62.01	15.97	0.71	54.5	(SM)
粒度調整	A	2.643	4.73	0.14	90.92	8.94	0.46	5.5	(S-M)
	B			0.58	85.67	13.75	0.43	26.5	(S-M)
	C			4.39	64.80	30.81	0.38	—	(SM)

製している。

一方、比較実験のための河川砂としては、淀川砂 ($G_s=2.644$) と加古川砂 ($G_s=2.657$) を選び、前者は試料 S と同じ粒度に、後者は試料 A, B, C とそれぞれ同じ粒度に調節して用いた。ただし、細粒分 (74μ 以下) については、粒度の不一致を防ぐためと水に対する性質を配慮して、河川砂は使わずマサ原土から採取した細粒分を用いた。なお、 74μ 以下のマサ土は、破碎に鈍感であるから⁴⁾、比較の目的に対してとくに支障をきたすおそれはないと考えられる。

試料の最小密度は、締固め用モールド (10cm 径) を用い、低い位置から少しずつ静かに落下させる方法で測定した。結果の一例を図-2 に示す。

2.2 実験方法

同一粒度に配合したマサ土と河川砂に対して、同一条件下で締固め試験を実施した。突固めは、JIS A 1210 の 1.1-b 法に準じ自動突固め装置を用いて行なったが、その際、突固め回数は試料 S について 10, 25, 50, 100, 200, 400, 800 回の 7 通り、試料 A, B, C については一律に 100 回とした。なお、使用したモールドは突固め

時のモールド上下端からの水の流出を防ぐため、ゴムパッキンを施したものである (文献 4) 中の図-2 を参照)。

粒度分析は突固め前・後で実施し、 74μ フルイで水洗いし炉乾燥させたのち正味 7 分間、電動式ロータップ型振トウ機にかける方法によった。なお、文中で用いる粒子破碎量は、次式⁵⁾ で求めた値である。

$$\left(\frac{S'_w}{S_w}\right) = \left(\frac{3}{2}\right)^{S.I.} \quad (1)$$

$$S.I. = 2(P_2' - P_2) - (P_1' - P_1) \cdot (P_1' + P_1 - 2) \quad (2)$$

ここに、 S_w と S'_w はそれぞれ破碎前・後の土粒子の比表面積 (cm^2/g) であり; P_1 と P_2 は破碎前の 1 回目と 2 回目の加積通過率和の百分の 1, 同様に P_1' と P_2' は破碎後のものである。

2.3 実験結果

実験結果は図-3~6 に示す。図-3 と図-4 は、粒度一定で突固め回数を変えたときの結果であり、図-5 と図-6 は突固め回数 $N=100$ 回で粒度分布を三種に変えたときの結果である。いずれも、同じ試験条件下でマサ土と河川砂の対比を可能にしている。

比較の結果、次の事柄が容易に認められる。まず第一に、両材料で締固め曲線の形状が異なる。とくに、含水比が約 4% 以下の範囲で歴然とした差異が認められる。この原因は定かでないが、試料の吸水量が 4.73% (表-1 参照) であることを考えると、その一因として水の吸着性の違いが挙げられる。本報では、このような吸水量以下の含水状態は一応、不安定な領域とみなして厳密な比較を避けることにする。次に最適含水状態に注目すると、最大乾燥密度は河川砂のほうが、最適含水比はマサ土のほうが大きいことがわかる。このことは、次節以降の考察の過程で重要な意義をもつことになる。さらに、破碎曲線 [(b) 図] に目を転じれば、土粒子比表面積 (S'_w/S_w) の値がマサ土で大きいことから、破碎性の顕著な土であることがうかがえる。しかし、図-4(b) によれば河川砂の場合でも突固め回数が 400 回以上になると、相当な粒子破碎を生起することになり、もはやマサ土との純粋な比較は困難になる。したがって、次節以降では突固め回数 $N \leq 200$ 回のエネルギーの範囲を考察の対象とする。

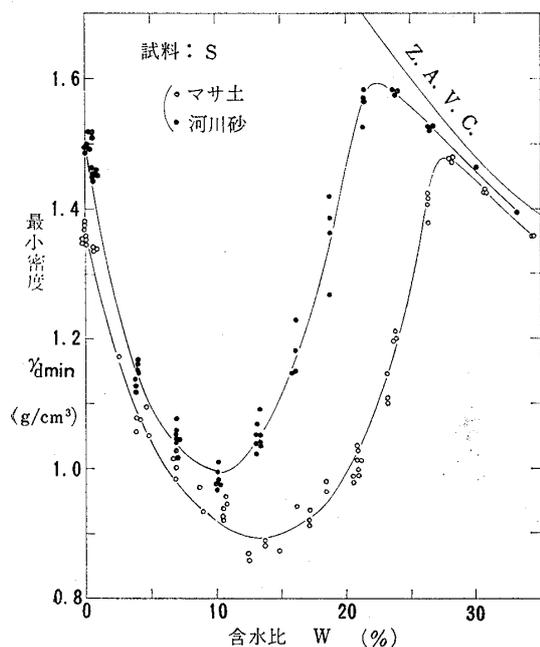


図-2 最小密度の測定結果

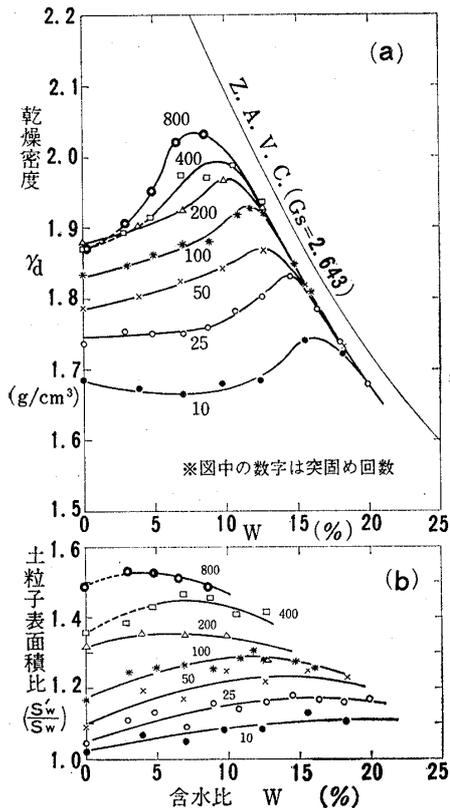


図-3 試料S (マサ土) の締固め特性

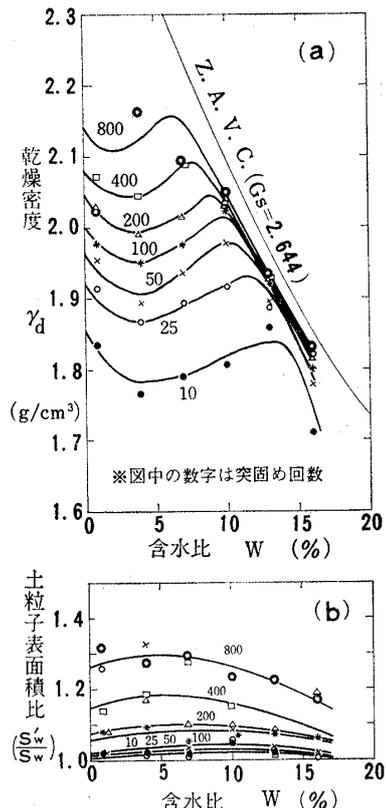


図-4 試料S (河川砂) の締固め特性

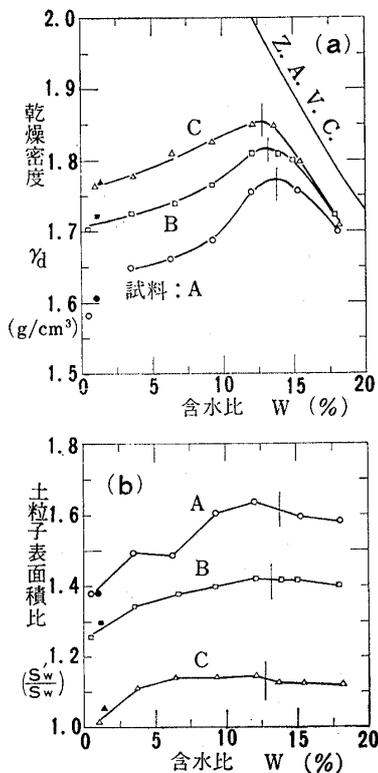


図-5 試料 A, B, C (マサ土) の締固め特性

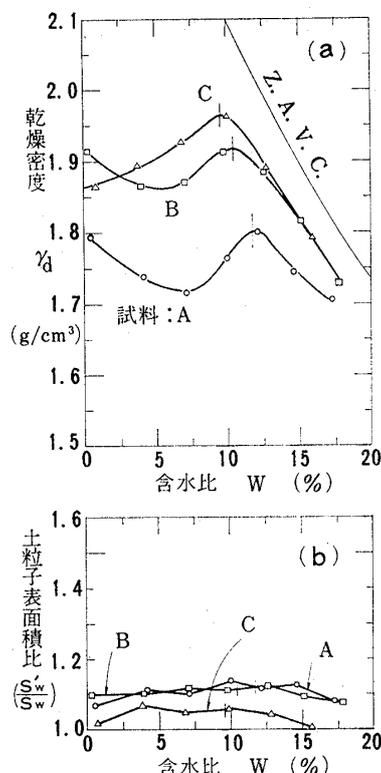


図-6 試料 A, B, C (河川砂) の締固め特性

なお、上記以外の事柄については、直接文中の議論に
関与しないから割愛する。

3. 粒子破碎に伴う密度増加量 γ_{df} の推定

マサ土の乾燥密度 γ_d と河川砂の乾燥密度 γ_{ds} を比較
する場合、まず河川砂を非破碎性土と考える必要があ
る。この仮定は、前述の実験結果から突固め回数 $N \leq$
200 回の範囲で一応、認めてよいと思われる。

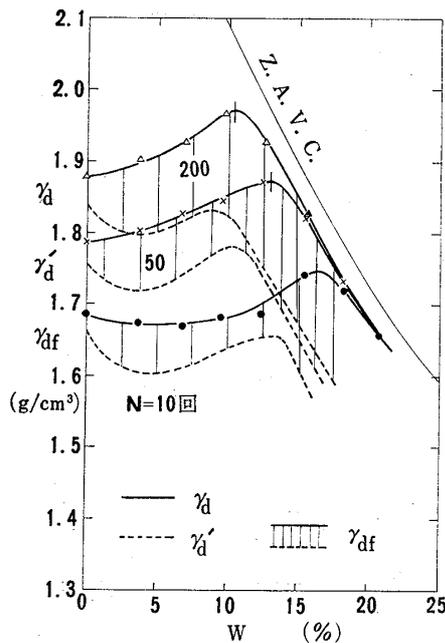


図-7 試料Sの $\gamma_d \sim w$, $\gamma_d' \sim w$ 関係

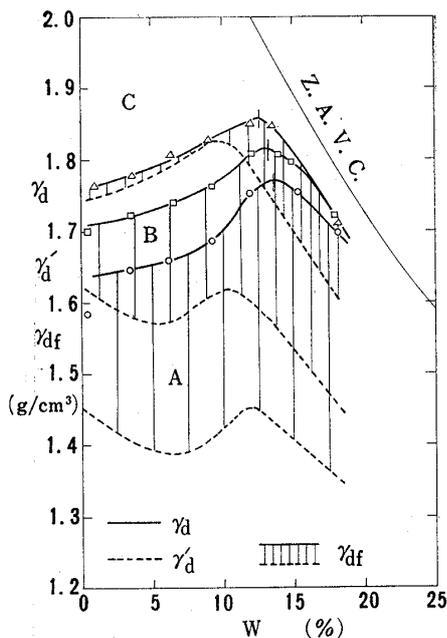


図-8 試料 A, B, C の $\gamma_d \sim w$, $\gamma_d' \sim w$ 関係

つぎに、マサ土と河川砂では比重や粒子形状あるいは粒子内空ゲキ構造のような粒子物性が異なる点に留意する必要がある。この点については、粒子破碎を生じない状態で諸物性の差異を包括的に、かつ顕著に呈示してくれる量として最小密度を起用し、絶乾状態において測定したマサ土の最小密度 γ_{dmin} と河川砂の最小密度 γ_{dsmin} との比によって補正できるものと考え⁶⁾。つまり、次式の M を粒子物性に対する補正 (修正) 係数と見なすの

$$M = \left(\frac{\gamma_{dmin}}{\gamma_{dsmin}} \right)_0 \quad (3)$$

である。各試料について求めた M の値は表-2に示す。なお、図-2 から明らかなように、両材料の最小密度は含水比によって大きく変化し、両者の比もまた含水比の

表-2 M の値

試料	$\gamma_{dmin,0}$ (g/cm ³)	$\gamma_{dsmin,0}$ (g/cm ³)	M
S	1.370	1.520	0.901
A	1.170	1.450	0.807
B	1.250	1.480	0.845
C	1.400	1.500	0.933

関数と考えられるにもかかわらず、絶乾状態のみを対象に (3) 式のような形で処理している根拠は、このような含水比依存の現象が上記諸物性以外の性質、たとえば土粒子表面の吸着特性や界面化学的な性質によって誘起されるものと理解されるからである。

さて、上述の仮定に基づけば、河川砂で得られた乾燥

表-3 γ_{df} の算定

Sample	N (回)	w (%)	γ_d (g/cm ³)	$\left(\frac{S'_w}{S_w} \right)$	S.I.	γ_{ds}^* (g/cm ³)	M	γ_d' (g/cm ³)	γ_{df} (g/cm ³)
S	50	0	1.787	1.086	0.357	1.960	0.901	1.766	0.021
	50	3.941	1.802	1.191	0.756	1.908	◇	1.719	0.083
	50	6.811	1.823	1.167	0.669	1.934	◇	1.743	0.080
	50	9.804	1.842	1.247	0.958	1.975	◇	1.779	0.063
	50	12.604	1.868	1.218	0.854	1.930	◇	1.739	0.129
	50	15.592	1.819	1.248	0.960	1.814	◇	1.634	0.185
	50	18.305	1.733	1.227	0.887	—	◇	—	—
A	100	0.505	1.581	1.379	1.391	1.791	0.807	1.445	0.136
	100	3.486	1.647	1.492	1.731	1.745	◇	1.408	0.239
	100	6.222	1.661	1.483	1.704	1.721	◇	1.389	0.272
	100	9.317	1.687	1.605	2.046	1.747	◇	1.410	0.277
	100	11.956	1.754	1.635	2.128	1.800	◇	1.453	0.301
	100	15.232	1.757	1.593	2.016	1.737	◇	1.402	0.355
	100	17.979	1.699	1.584	1.989	1.680	◇	1.356	0.343

* 図-4 と 図-6 のならした曲線より読み取った値

密度 γ_{ds} に材質補正 M を施すことによって、マサ土と同一物性を保有しながら粒子破碎を生起しない場合に相当する乾燥密度 $\gamma_{d'}$ が推測できる。すなわち、

$$\gamma_{d'} = M \cdot \gamma_{ds} \quad (4)$$

したがって、粒子破碎に伴う密度増加量 γ_{df} は、次式で算定できることになる。

$$\gamma_{df} = \gamma_a - \gamma_{d'} \quad (5)$$

表-3 に γ_{df} の計算過程の一例を示す。また、このような手法で推定した $\gamma_{d'}$ および γ_{df} を図化すると 図-7 と 図-8 が得られる。

これらの図から、 γ_{df} の大きさは、突固めエネルギー (図-7) と粒度配合 (図-8) のいずれにも左右され、とりわけ後者の影響は鋭敏であることが知られる。さらに、 γ_{df} は含水比 w によっても変動するので、その様子を 図-9 に示す。一見して、 $\gamma_{df} \sim w$ 関係と $\gamma_a \sim w$ 関係 (締固め曲線) との間にはまったく対応がなく、湿潤側に向かうと急激に増大して、やがて一定値におさまるような特異な性状を呈することがわかる。

なお、上記の方法で推定した密度増加量 γ_{df} は、今後マサ土の透水性や強度・変形特性などに与える粒子破碎の影響を具体的に見積もる場合に、重要な働きをすることが予想される。

4. 締固め曲線についての考察

マサ土に対する通常の締固め曲線、つまり $\gamma_a \sim w$ 関係は、土粒子の破碎効果を内包しているのに対して、前

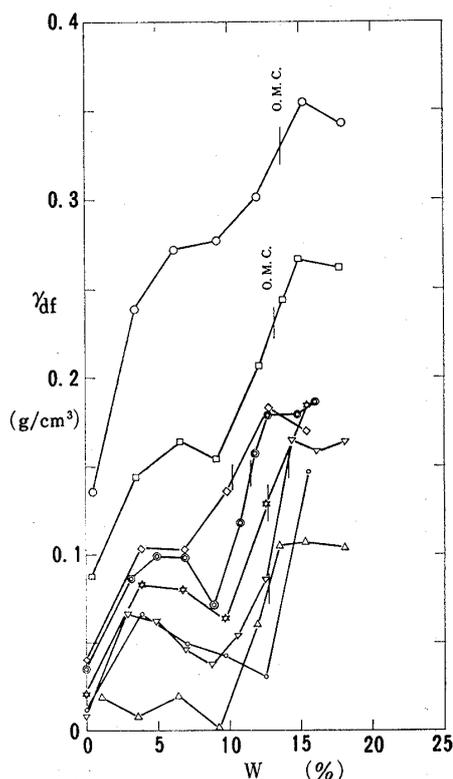


図-9 $\gamma_{df} \sim w$ 関係

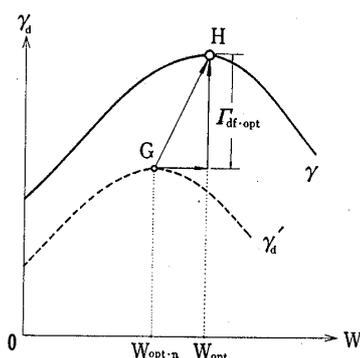


図-10 説明図

節の考察から引き出された $\gamma_{d'} \sim w$ 関係は、同一物性・同一試験条件下であっても土粒子の破碎を生じない状態で得られる仮想上の締固め曲線である。ここでは、後者を“無破碎状態での締固め曲線”と呼び、“通常の締固め曲線”との関連性について検討する。

4.1 最適含水状態

内容の違い 2 曲線を見比べて直感的にわかることは、曲線形状に大差はないが、ピークの位置つまり最適含水状態がずれることであろう (図-7, 8 参照)。このことは、図-10 に示すように G 点から H 点へ、換言すれば、座標値が土粒子の破碎に起因して γ_d 軸方向に Γ_{df-opt} だけ変化し、 w 軸方向に w_{opt-n} から w_{opt} まで移動することを意味する。このように、最適含水状態は、粒子破碎のため高密度化し高含水比化する傾向にあるが、なぜそうなるのか、そのメカニズムを考えてみよう。

まず、高密度化については、突固めによる土の組織化が進む過程で、破碎粒子は粒子間の間キ容積を埋めてゆく形で構造の形成に寄与することが推察される。この見方は、別途実施した透水試験の結果 (未発表) からも穏当なものと思われる。

一方、高含水比側への移動傾向については、土粒子の破碎に伴って粒子表面積が増加することに注目しなければならない。土粒子の表面積が増大すれば、それに見合う水の増加が最適含水状態を招来するのに必要となる。この点をもっと詳しく調べてみよう。いま、“無破碎状態”での最適含水比 w_{opt-n} と、破碎を伴う状態での“通常”の最適含水比 w_{opt} を対比する場合、どちらも最適含水状態に達している限り土粒子を取り巻く水膜の厚さは同じであると仮定する。そうすれば、

$$\frac{(\text{“通常”の状態の土粒子全表面積}) \times (\text{水膜の厚さ})}{(\text{“無破碎状態”の土粒子全表面積}) \times (\text{水膜の厚さ})} = \frac{\text{“通常”の状態の全表面水量}}{\text{“無破碎状態”の全表面水量}}$$

と考えられるから結局、次式⁷⁾が得られる。

$$\left(\frac{w_{opt}}{w_{opt-n}} \right) = \left(\frac{S'_w}{S_w} \right)_{opt} \quad (6)$$

(6) 式は、粒子破碎によって比表面積比 $(S'_w/S_w)_{opt}$

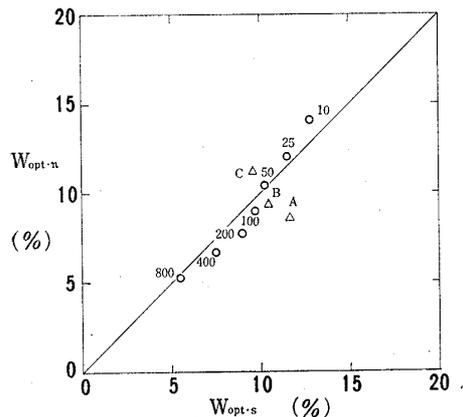


図-11 w_{opt-n} と w_{opt-s} の相関

倍の水の増加が見込まれることを指示しているが、その是非については単純な仮定から出発しているだけに照査の必要がある。

そこで、マサ土の最適含水比 w_{opt} とそのときの比表面積比 $(S_w'/S_w)_{opt}$ を図-3 と図-5 から読み取り、(6)式に代入して“無破碎状態”の最適含水比 w_{opt-n} を算定する。一方、図-4 と図-6 から河川砂の最適含水比 w_{opt-s} を読み取って、両者の関係をプロットすると、図-11 が得られる。この図から、(6)式で推定した値と河川砂における測定値とが適度に一致していることが知られる。したがって、(6)式は工学的に十分許容できるものと見て差し支えないように思われる。

以上のことから、最適含水状態の座標値は、土粒子の破碎によって Γ_{df-opt} だけ高密度化し、 $(S_w'/S_w)_{opt}$ 倍高含水比側に移動することになる。

4.2 粒子破碎に伴う締固め曲線の移動

前項で述べた最適含水状態における考察を、含水比の全域に拡張して考えることが許されるならば、締固め曲線上の任意の点の移動量を計算することができる。表-4

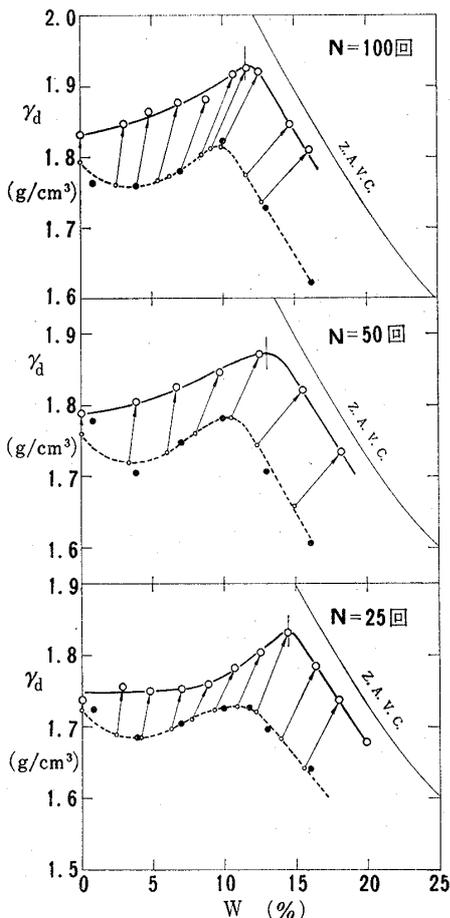


図-12 粒子破碎による締固め曲線の移動 (試料S)

に計算過程の一例を示す。また、計算結果を図化すると図-12 と図-13 のようになる。これらの図は、“無破碎状態における締固め曲線”上の各点が、土粒子の破碎に伴って矢線の方向に移動し、その結果として“通常の締固め曲線”が得られることを示唆している。ここに、矢線の大きさと向きは当然のことながら、粒子破碎の程度

表-4 Γ_{df} の算定

Sample	N (回)	w (%)	γ_d (g/cm ³)	$(\frac{S_w'}{S_w})$	S.I.	$w' = w \left(\frac{S_w'}{S_w} \right)$	γ_{ds}^* (g/cm ³)	M	γ_d' (g/cm ³)	Γ_{df} (g/cm ³)
S	50	0	1.787	1.086	0.357	0	1.960	0.901	1.766	0.021
	50	3.941	1.802	1.191	0.756	3.309	1.910	〃	1.721	0.081
	50	6.811	1.823	1.167	0.669	5.836	1.920	〃	1.730	0.093
	50	9.804	1.842	1.247	0.958	7.856	1.952	〃	1.759	0.083
	50	12.604	1.868	1.218	0.854	10.348	1.975	〃	1.779	0.089
	50	15.592	1.819	1.248	0.960	12.494	1.940	〃	1.748	0.071
	50	18.305	1.733	1.227	0.887	14.919	1.840	〃	1.658	0.075
A	100	0.505	1.581	1.379	1.391	0.366	1.794	0.807	1.448	0.133
	100	3.486	1.647	1.492	1.731	2.336	1.759	〃	1.420	0.227
	100	6.222	1.661	1.483	1.704	4.196	1.735	〃	1.400	0.261
	100	9.317	1.687	1.605	2.046	5.805	1.722	〃	1.390	0.297
	100	11.956	1.754	1.635	2.128	7.313	1.722	〃	1.390	0.364
	100	15.232	1.757	1.593	2.016	9.562	1.755	〃	1.416	0.341
	100	17.979	1.699	1.584	1.989	11.350	1.797	〃	1.450	0.249

* 図-4 と 図-6 のならした曲線より読み取った値

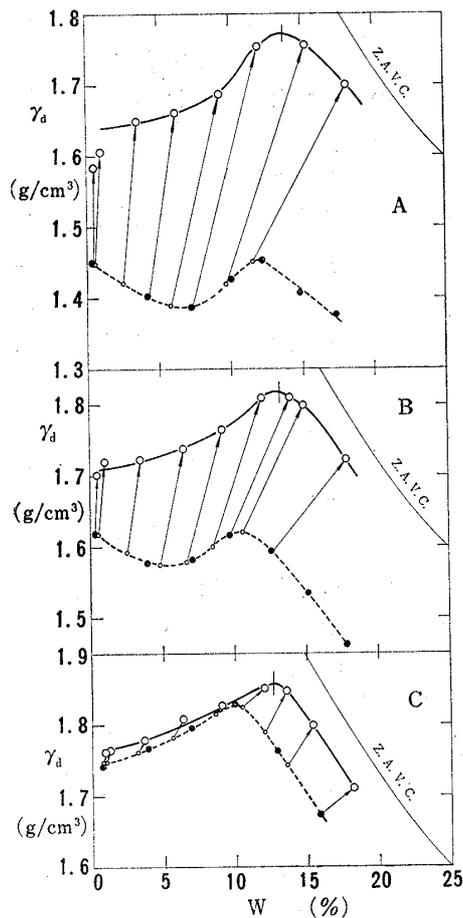


図-13 粒子破碎による締固め曲線の移動 (試料A, B, C)

によって決まる。

このように、最適含水状態での考察を全含水領域に拡張することによって、締固め曲線の移動パターンをベクトル的にとらえることができる。この見解は、無理なくイメージとも符合するように思われる。

4.3 含水比 w による密度軸方向の移動量 Γ_{df} の変化
 締固め曲線上の任意の点における γ_a 軸方向の移動量 Γ_{df} は、表-4 および 図-12, 13 から知れるように含

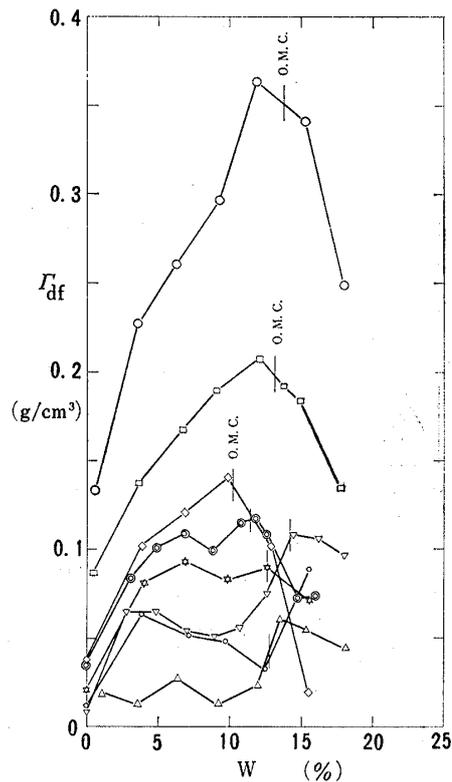


図-14 $\Gamma_{df} \sim w$ 関係

水比 w によって変化する。その様子を 図-14 に示す。図から明らかなように、 $\Gamma_{df} \sim w$ 関係にはピーク $\Gamma_{df,max}$ が現われ、その位置が“通常”の最適含水比付近にすることは興味深い。このことは、前述の最適含水比時での移動量 $\Gamma_{df,opt}$ (図-10) を、近似的に

$$\Gamma_{df,opt} \approx \Gamma_{df,max} \quad (7)$$

と見なして差し支えないことを意味する。

このように、 $\Gamma_{df} \sim w$ 関係が締固め曲線の性状とよく呼応している点は見逃せず、そこが第3節で取り扱った $\gamma_{df} \sim w$ 関係 (図-9 参照) と大きく相異なる点である。

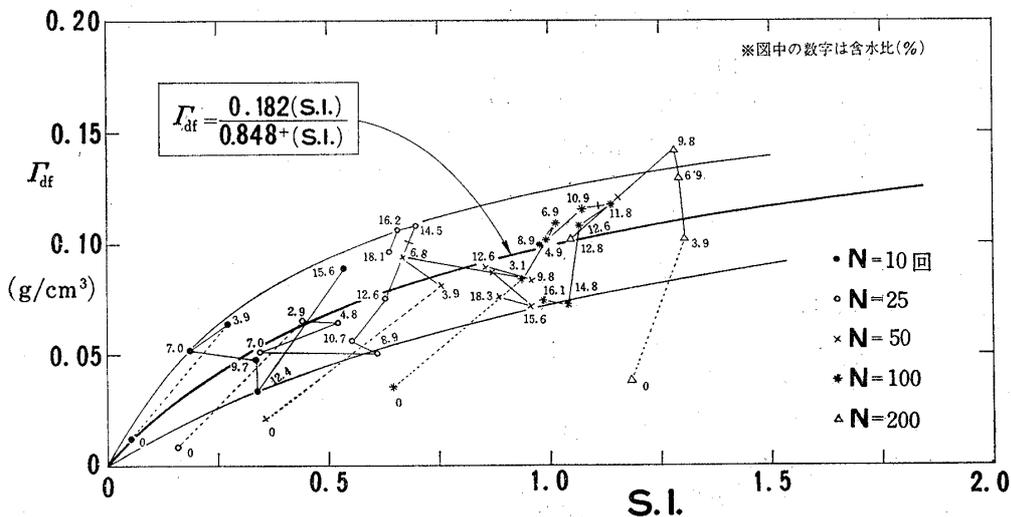


図-15 $\Gamma_{df} \sim S.I.$ 関係 (突固めエネルギーの影響)

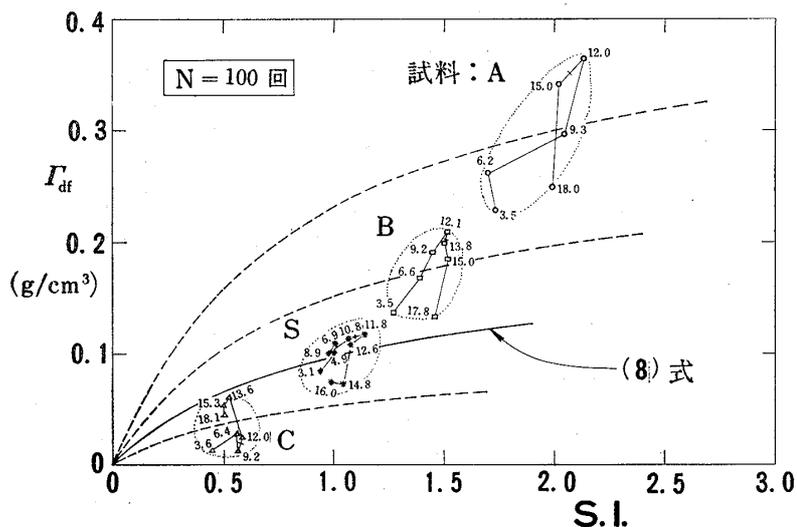


図-16 $\Gamma_{df} \sim S.I.$ 関係 (粒度の影響)

5. 密度軸方向の移動量 Γ_{df} と粒子破砕量 $S.I.$ との関係

前節で述べた締固め曲線上の任意点における座標値の r_d 軸方向の移動量 Γ_{df} が、粒子破砕量 $S.I.$ とどのような関係にあるかを調べてみよう。図-15 と 図-16 は、表-4 に示すような手順で計算した Γ_{df} の値を、 $S.I.$ の実測値に対してプロットした総括的な図である。

まず、図-15 は主として突固めエネルギーの影響を表わしている。この図から明らかなのは、突固め回数 $N \leq 200$ 回、すなわち河川砂を非破砕性土と仮定できる範囲では(第2節参照)、絶乾状態のマサ土で成り立つ関係⁶⁾と同じ関係が認められることである。

$$\Gamma_{df} = \frac{\alpha \cdot (S.I.)}{\beta + (S.I.)} \quad (8)$$

式中の2係数は、この場合、 $\alpha = 0.182$ 、 $\beta = 0.848$ である。

この関係は、含水比によってかなりの幅をもつことから、式中の係数は厳密には含水比 w の関数と考えられる。とくに、絶乾状態のマサ土では図中に細い点線で示したように、そのゾーンを越えて下方に位置する傾向にある。しかし、これは実験結果のところでは述べたように、含水比が吸水量より小さい範囲での出来事であるから重要視しないことにすれば、含水比によって生ずるゾーン幅は工学的判断を大きく狂わすほどのものでないと思なしてよさそうに思われる。したがって、(8) 式中の係数 α 、 β は突固めエネルギーや含水比には事実上無関係なものと解釈して支障ないことになる。

一方、図-16 は主として粒度の影響を調べるためのもので、この図から同じ突固めエネルギー ($N = 100$ 回) の条件下でも、粒度配合によって図上の位置関係が大きく異なることがわかる。この場合にもやはり、図中の破

線で示したように (8) 式の関係の成立は十分予想され、そして式中の2係数が粒度の支配を大きく受けることも確認される。

以上のように、 r_d 軸上の座標値の移動量 Γ_{df} と粒子破砕量 $S.I.$ との間には工学的にみて (8) 式の関係が成り立ち、式中の係数 α 、 β は突固めエネルギーや含水比のような試験条件にはよらず、もっぱら粒度配合と土質によって左右されるものといえる。なお、土の種類による差異については別の機会に公表したい。

ところで、 Γ_{df} におよぼす粒度の影響を図-16 の関係から再整理して示すと、図-17 が得られる。図中の I 印は含水比による Γ_{df} の変化幅を、そして粒度配合の影響をここでは細粒分 (74 μ 以下) の含有量で表わしている。この図は細粒分を多量に含む土ほど粒子破砕が起こりにくいことを示しており、周知の事実と合致する。

6. 粒子破砕の影響量の推定法

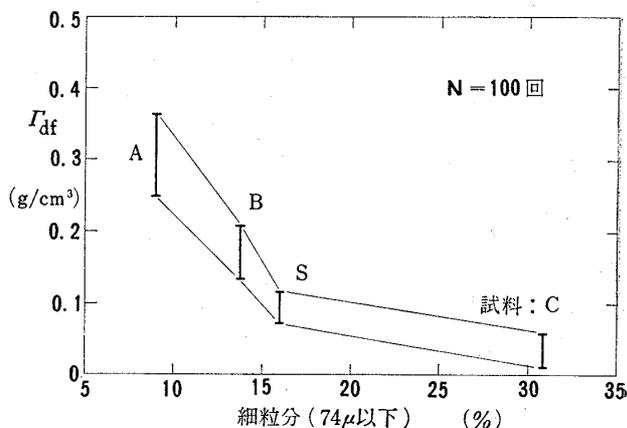


図-17 粒度配合による Γ_{df} 値の変化状況

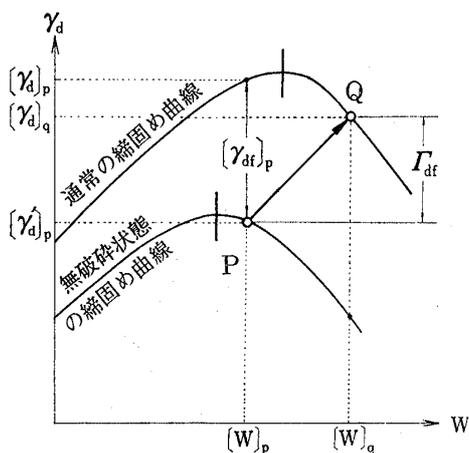


図-18 説明図

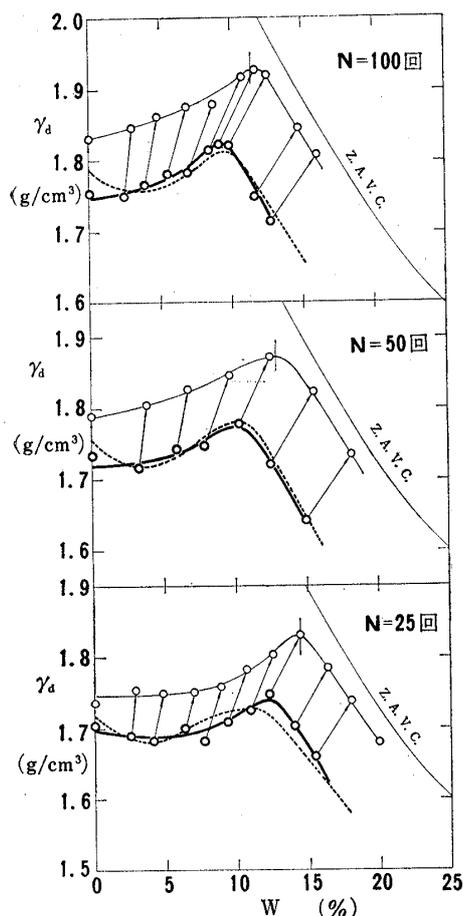


図-19 “無破砕状態の締固め曲線”の照合

前節までの考察結果をつないで、粒子破砕の影響量を推測する手順を示すと、つぎのようになる。

まず、図-18 より “通常の締固め曲線” 上の任意点Qにおける座標値は $[\gamma_d]_q$, $[\gamma_a]_q$ であり、そのときの粒子破砕量 $(S.I.)_q$ と土粒子表面積比 $(S_w'/S_w)_q$ も既知であるとする。

つぎに、“無破砕状態における締固め曲線” 上の点Pの座標値を知るには、含水比軸方向に次式で求まる $[w]_p$ をとり (第4節参照)。

$$[w]_p = \left[\frac{w}{(S_w'/S_w)} \right]_q \quad (9)$$

密度軸方向には、(8) 式の関係 (第5節参照) よりきまる Γ_{df} だけ低密度側へ移動させればよい。すなわち、

$$[\gamma_a']_p = [\gamma_a - \Gamma_{df}]_q \quad (10)$$

このように、P点の位置は、(8) 式の係数 α , β さえわかれば、Q点における状態量のみによって定まることになる。図-19 は、上記の手順にしたがって推測した “無破砕状態の締固め曲線” の位置を示している。太い実線がそれで、点線は図-12 の $\gamma_a' \sim w$ 曲線の位置 (第4節参照) を重ね合わせて示したものである。両者の不一致は (8) 式の関係を採用したこと由来するが、低い含水比 (吸水量以下) の領域を除いては重大視されるほどのものではないと思われる。したがって、締固めに

よる粒子破砕の影響は図中の矢線の大きさと向きによって表現され、推量され得る。

なお、図-18 より求まる次式の関係は、

$$[\gamma_a - \gamma_{df}]_p = [\gamma_a - \Gamma_{df}]_q \quad (11)$$

現象の解釈に必要な座標値の移動量 Γ_{df} と工学的に重要な密度増加量 γ_{df} とを結びつけるものとして有用であるので付記する。

7. 結 言

同一粒度、同一試験条件下でのマサ土と石英質河川砂に対する比較実験の結果に基づいて、マサ土の締固め特性におよぼす粒子破砕の影響について基本的で原理的な考察を行なった。得られた主な事柄を要約すると、つぎのようになる。

(1) 粒子破砕に伴う密度増加量 γ_{df} は、マサ土の乾燥密度 γ_d と河川砂の乾燥密度 γ_{ds} とを、物性の差異を補正して比較することによって、 $\gamma_{df} = \gamma_d - M \cdot \gamma_{ds}$ なる式で算定できる。式中の M は、粒子物性に対する補正係数で含水比には依存しない。

(2) 粒子破砕に起因して最適含水状態の座標値が、 Γ_{dfmax} だけ高密度化し、土粒子表面積比 $(S_w'/S_w)_{opt}$ 倍だけ高含水比側に移動する。

(3) 上記 (2) の結果を全含水領域に拡張して適用すれば、締固め曲線の移動パターンがベクトルのとらえられる。すなわち、締固め曲線上の任意点の座標値 (w, γ_d) は、無破砕状態で締固めた場合と仮想した場合に相当する座標値 $[w/(S_w'/S_w), (\gamma_d - \Gamma_{df})]$ からの移行の果てと見ることができる。

(4) その際、締固め曲線上の任意点における座標値の密度軸方向の移動量 Γ_{df} は、粒子破砕量 $S.I.$ と (8) 式に示す関係にある。この関係は、工学的にみて突固めエネルギーや含水比のような試験条件には無関係で、粒度と土質によって式中の2係数がきまるものと思われる。

(5) 上記 (3), (4) の見解から、粒子破砕の影響量を推定するための一つの方法が提示できる。

以上の知見は、いくつかの仮定に準拠して得られたものであることを明記しておきたい。併せて、これらの知見が今後「マサ土の透水性に及ぼす粒子破砕の影響」(次報参照)などを考究する場合、基本的に重要な役割を果たすものであることも付記しておく。

記号説明

d_{50} = 50% 径 (mm)

G_s = 土粒子比重

M = 粒子物性に対する補正 (修正) 係数

N = 突固め回数 (回)

P_1, P_1' = 突固め前・後における1回目加積通過率和の百分の

一

P_2, P_2' = 突固め前・後における2回目加荷通過率和の百分の一

$S.I.$ = 粒子破砕量

S_w, S_w' = 土粒子の破砕前・後の表面積 (cm^2/g)

U_c = 均等係数

w = 含水比 (%)

w_{ab} = マサ土粒子の吸水量 (%)

w_{opt} = マサ土の最適含水比 (%)

$w_{opt.s}$ = 石英質河川砂の最適含水比 (%)

$w_{opt.n}$ = “無破砕状態”での最適含水比 (%)

α, β = Γ_{df} と $S.I.$ の関係を結びつける係数

Γ_{df} = 締固め曲線上の任意点における座標値の r_d 軸方向の移動量 (g/cm^3)

$\Gamma_{df.opt}$ = 最適含水状態における座標値の r_d 軸方向の移動量 (g/cm^3)

$\Gamma_{df.max}$ = $\Gamma_{df} \sim w$ 曲線上のピーク時の値 (g/cm^3)

r_d = マサ土の乾燥密度 (g/cm^3)

r_{ds} = 石英質河川砂の乾燥密度 (g/cm^3)

r_{dmin} = マサ土の最小密度 (g/cm^3)

r_{dmin} = 石英質河川砂の最小密度 (g/cm^3)

r_d' = マサ土と同じ物性を持ちながら土粒子の破砕が起こらない場合に相当する乾燥密度 (g/cm^3)

r_{dr} = 土粒子の再配列による密度増加量 (g/cm^3)

r_{df} = 粒子破砕による密度増加量 (g/cm^3)

参考文献

- 1) 土質工学会編 (1969): 「土質試験法」, pp. 515~542.
- 2) たとえば, 土質工学会編 (1974): 「日本の特殊土」, pp. 85~140.
- 3) 松尾新一郎・福本武明 (1975): マサ土の締固め特性におよぼす粒子破砕の影響, 「第10回土質工学研究発表会講演集」, pp. 373~376.
- 4) 松尾新一郎・福本武明 (1976): マサ土の破砕性に影響する諸要因, 「土質工学会論文報告集」, Vol. 16, No. 4, pp. 85~92.
- 5) 福本武明 (1971): 粒子破砕量の表現法に関する一考察, 「第6回土質工学研究発表会講演集」, pp. 77~80.
- 6) 福本武明 (1972): 締固めたマサ土の密度に関する粒子破砕の影響, 「土質工学会論文報告集」, Vol. 12, No. 3, pp. 55~63.
- 7) 松尾新一郎・福本武明 (1976): マサ土の締固め特性に関する一考察, 「第11回土質工学研究発表会講演集」, pp. 439~442.

(原稿受付, 1976. 3. 1)