The Japanese Geotechnical Society

動的締固め工法による地盤の改良効果の評価

Evaluation of Ground Improvement by a Dynamic Compaction Method

中岡時春（なかおか ときはる）
大末建設㈱土木本部生産管理部技術課 課長

望月秋利（もちづき あきとし）
大阪市立大学助教授 工学部土木工学科

阪口 理（さかぐち おさむ）
近畿大学教授 理工学部建築学科

1. まえがき

ゆるい粗粒材を含む盛土地盤や残土，産業廃棄物の処分地等を宅地や工場用地として利用する事例が増えている。本報文は，このような問題の多い盛土地盤等の改良を目的に開発した動的締固め工法による締固め効果について，模型実験を行いその評価と現場実験との関連性について検討した結果をまとめたものである。

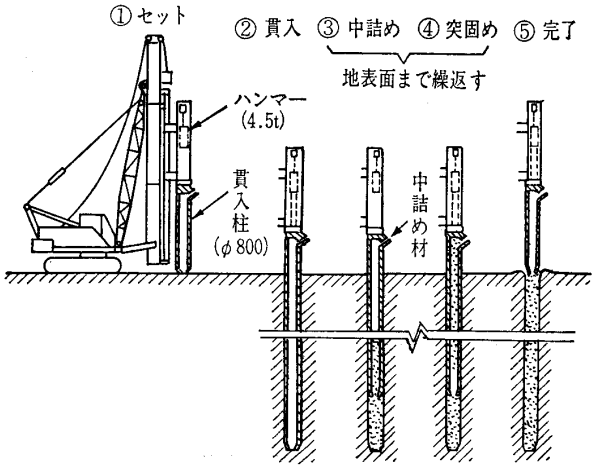
このような粗粒材を含んだ材料の特性の把握は難しく，小型の模型実験では地盤の応力レベルが実物よりも低いため，実物の挙動を正確に再現できない。また材料をいかに縮小粒径に調整するかという問題もある。一方現場では，現場密度試験やサウンディング試験も難しく，地盤の適切な評価ができないばかりではなく，経済的にも容易ではない。

このように，粗粒径の材料を含む地盤に対しては，模型実験，現場実験，原位置試験のいずれにもそれぞれ問題を抱えている。

本報文ではこのような問題点を認識した上で，模型実験と現場実験との関連を，動的コーン貫入試験や新しく定義した“地盤反発係数”等を用いて，検討，評価し，ある程度定量的な関連を見い出すことができたので，その主な結果をまとめたものである。

2. 動的締固め工法の概要

図—1は，工法の概要を示したものである。施工は，まず地盤内に鋼製の貫入柱をハンマーにより打撃貫入させ，所定の深さまで地盤を強制的に締固める。次に貫入柱を少し引上げ，貫入柱内を通して砂・砕石等を投入し，突固めるという作業を繰返して，地表面までを改良するものである。



図—1 動的締固め工法（DDCOM）の施工手順

3. 室内模型実験

3.1 模型地盤および装置

現場における締固めに伴う地中部の変形挙動および強度増加の程度を評価，推定する目的で，実物の1/20スケールの模型実験を行った。用いた試料は，瀬戸珪砂5号と7号の2種類を2：1の質量割合で混合したもので，表—1に試料の主な物理的性質を示す。

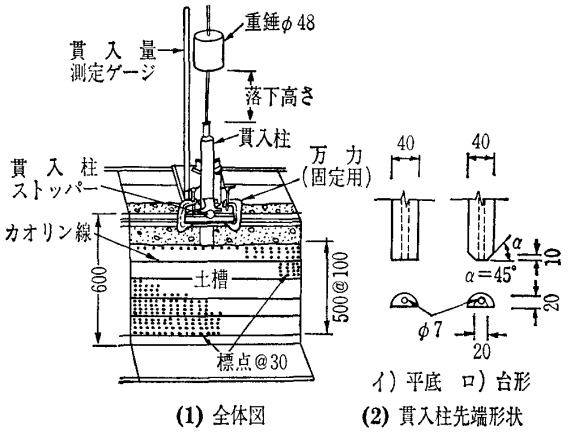
実験土槽はL 128×H 60×W 30cmの大きさで，地盤の変形が観察できるように土槽の側面はガラス張りにしてある。模型地盤は緩い締固め状態を想定

表—1 試料の主な物理的特性

統一分類名	G_s	d_{max}	U_c	f_{min}	f_{max}	試料密度 ρ_d(t/m³)	相対密度 D_r(%)	w_0 (%)
SP	2.63	0.83	5.79	1.555	1.944	1.48	42.9	7

NII-Electronic Library Service

The Japanese Geotechnical Society



図—2 貫入実験装置

表—2 動的貫入装置の主な諸元

	模型	実物
貫入柱径 D (cm)	4	80
同断面積 A (cm²)	6.28	5026.6
ラム重量 W (kgf)	0.839	4.5×10^3
同落下高 H (cm)	20	60
打撃エネルギー E (kgf·cm)	16.78	2.7×10^5
E/A E_0(kgf·cm/cm²)	2.67	53.71
エネルギー比	1	20

*$E=W\cdot H$

表—3 小型コーン貫入試験機諸元

	小型コーン
先端径 d (cm)	0.80
先端面積 a (cm²)	0.503
重錘重量 w (kgf)	1.465
重錘落下高 h (cm)	20
$w=h/a$ e_0(kgf·cm/cm²)	58.25

*単位面積に対する1回の打撃エネルギーは，標準貫入試験の1/4倍である。

して $D_r=43\%$ とし，また貫入柱引抜き時の孔壁破壊を防ぐ目的で，試料の含水比を7%に調整して用いた（**口絵写真—9**）。

図—2(1)は貫入実験装置の概要を，**図—2**(2)は貫入柱の先端形状を示す。貫入柱の先端形状は平底型と台形型の2種類（径=4cmの半断面）で，貫入柱のほぼ中央に $\phi7$ mmの中詰め材供給用の孔が設けてある。**表—2**に実験装置の諸元を示す。地盤強度の測定は，試作した小型動的コーン貫入試験機を用いた。**表—3**にその諸元を示したが，この試験から換算N値（N値と同じエネルギー密度に換算した時の，30cm貫入に要する打撃回数；以下 N' という）を式(1)[1] で求める。

$$N'\text{値}=n\cdot k\cdot m \quad \cdots\cdots(1)$$

ここに

n：30cm貫入に必要な落下回数

k：先端シュー閉塞係数（=1/3）

m：エネルギー補正係数；N値相当に換算する場合は $m=1/4$，模型実験相当に換算する場合は $m=5$

3.2 実験方法

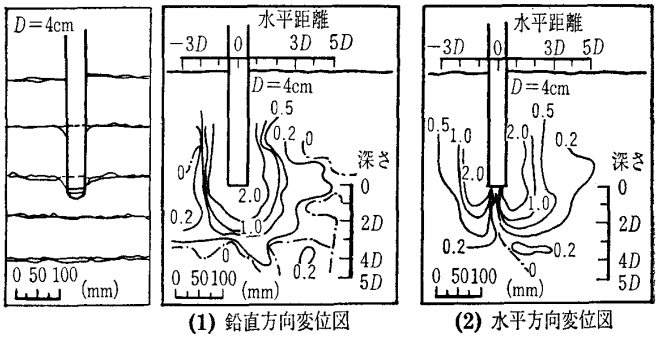
重錘を20cmの高さから落下させて貫入柱を $6D$（=24cm，D：貫入柱の径）の深さまで，打撃1回ごとの貫入量を測定しながら貫入させる。その後，貫入柱を $1D$ 分だけ引き上げて，その空隙部分に中詰め孔を通して珪砂を投入し，その深さで $1D$ 分貫入するのに要したと同じ打撃回数で突固める，という操作を地盤表面まで繰り返す。この方法は，「貫入により生じた空隙部を締固められた周辺地盤と同等の締固め状態にする」という条件で選んだものである。

地盤の変形の観察は，①実験土槽ガラス面内側にグリスを薄く塗布し，約3cmの間隔で貼付けた標点の動きと，②締固め層厚10cmごとに薄敷きしたカオリン層の変形を適宜撮影した写真を図化して解析する，という方法で行った。地盤の改良効果は，貫入柱の貫入前後に測定した N' 値の変化から評価した。

3.3 実験結果

(1) 地盤の変形挙動

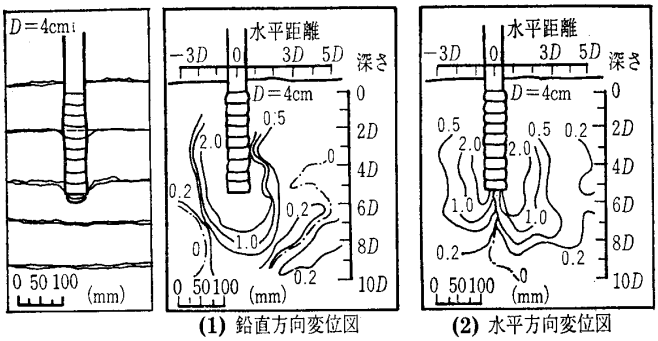
図—3(1)，(2)は，平底型貫入柱の $6D$ 貫入時の標点の変位を読み取って（読み取り精度=1/100 mm）図化した鉛直方向と水平方向の等変位図である。鉛直変位域は貫入柱を取り囲むように，また水平変位域は貫入柱を中心としてほぼ左右対象に発達し，貫入柱の周辺地盤で圧縮が生じていることを示している。「変位量≧0.5 mm（貫入柱径に対して1.25%）」



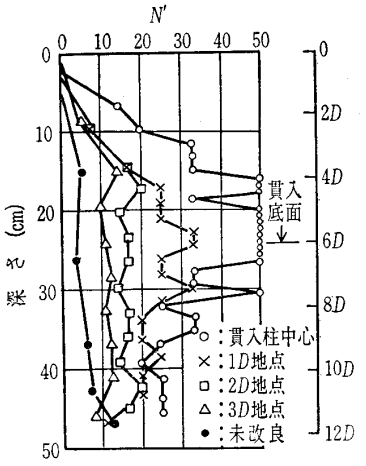
図—3 6D貫入時の標点変位図（平底型）

NII-Electronic Library Service

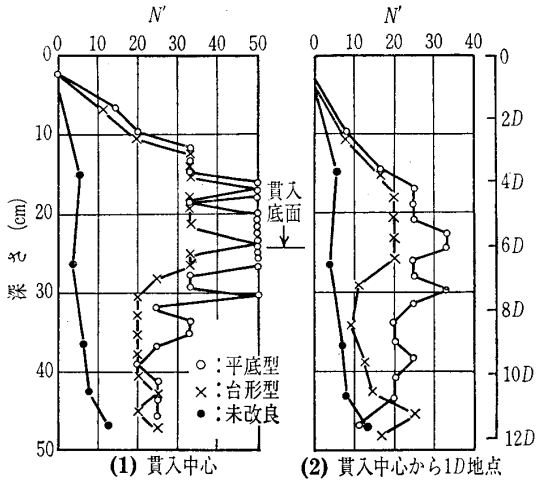
The Japanese Geotechnical Society



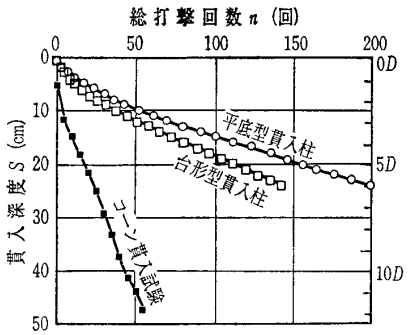
図—4　中詰め・突固め後の変位図（平底型）



図—5　地盤強度の増加（平底型）



図—6　地盤強度の増加比較



図—7　貫入量と総打撃回数（模型）

を影響範囲とすると，変位域は水平および鉛直方向とも貫入柱周辺および下端からおよそ$2D$～$3D$の範囲で，貫入柱が punching shear 的な破壊形態で地盤に貫入したものと解釈できる。貫入柱先端付近の変形特性は，高田ら[2]，大島ら[3]の行った遠心力場での動圧密模型実験の結果と比較的よく類似している。

図—4 (1)，(2)は，同じ貫入柱で行った「中詰め・突固め」を表層まで行った段階の変位分布図である。鉛直，水平変位分布形とも，$6D$ 貫入時の状態とあまり変わってはいないが，中詰め材による柱は明らかに貫入柱よりも太く，「中詰め・突固め」によっても地盤改良が行われていることが示されている。

(2)　動的コーン貫入試験による改良効果の評価

図—5は，平底型貫入柱の貫入前後の貫入中心および貫入中心から$1D$，$2D$，$3D$の位置で測定したN'値の分布を示したものである。深さ方向に対して，地表面から$9D$（貫入底面$+3D$）の範囲で強度増加が認められ，$3D$～$8D$の範囲で特に顕著である。また強度増加は貫入柱中心付近ほど大きい。

図—6 (1)，(2)は貫入柱先端形状の違いによる強度の増加比較を行ったものである。平底型の方が，いずれの地点でも強度の増加が大きく，締固め効果が大きかったことを示している。

(3)　貫入特性と地盤反発係数による評価

図—7は，2種類の貫入柱とコーンの総打撃回数（n）と貫入深度（S）の関係を比較したものであるが，平底型の方が貫入しにくかったことを示している。しかし，この関係からは，直接地盤の硬さを評価することができない。そこで，地盤の硬さの評価基準を“地盤反発係数(k_n)”で定義し，地盤の改良効果の評価を試みた。以下にその方法を示す。

図—7に示したn～S関係は式(2)で，さらにそれを微分して1回打撃ごとの貫入量を式(3)で表すことができる。

$$n=aS^b \quad \cdots\cdots(2)$$

$$dS/d_n=n^{(1-b)/b}/(a^{1/b}\cdot b) \quad \cdots\cdots(3)$$

ここに

n：総打撃回数（回）

S：貫入量（cm）

a, b：実験定数

NII-Electronic Library Service

The Japanese Geotechnical Society

一方，ある深さでの地盤反発係数を k_n とし，1回打撃した時のエネルギーの釣合から（ただし，エネルギー損失＝0）式(4)を得る。

$$E=W\cdot H=\int_0^s k_n\cdot A\cdot x\cdot dx \quad \cdots\cdots(4)$$

ただし

s：1回打撃後の貫入量

式(4)を1回打撃当たりの貫入量（s）に対して整理して式(3)と等しいとおくと，式(5)を得る。

$$k_n=(2W\cdot H/A)\cdot(a\cdot b\cdot s^{b-1})^2 \quad \cdots\cdots(5)$$

ここに

k_n：地盤反発係数（kgf/cm²/cm）：k_n の次元は式(4)で考える。（式(2)が実験式であるため，それを用いた式(5)の次元は一致しない。）

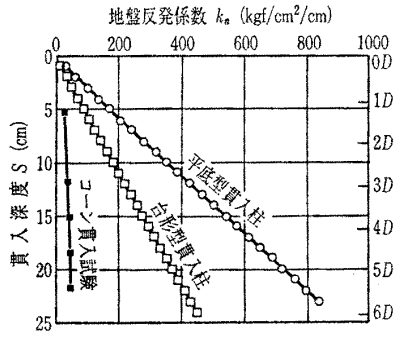
W：重錘重量（kgf）

H：落下高さ（cm）

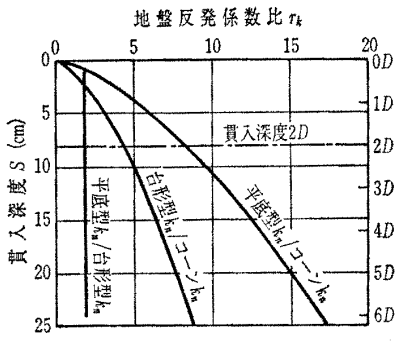
A：貫入量の断面積（cm²）

図—8は，式(5)で求めた地盤反発係数(k_n)を貫入深度(S)に対してプロットしたものである。2種類の貫入柱およびコーンとも k_n 値は貫入深さとともに増加する。図—9は k_n 値の比（r_k）を深さに対して示したものである。「平底 k_n/台形 k_n」r_k＝1.89で，深度に関係なく一定である。

すなわち貫入メカニズムがどの深さにおいても相対的に同じであれば，このような結果になるはずである。これに対して「平底 k_n/コーン k_n」，あるいは「台形 k_n/コーン k_n」のように，コーン k_n 値で正規化した値は曲線を示す。コーンの貫入抵抗よりも貫入柱の k_n 値の増加割合が大きかったこと，すなわちコーン貫入のメカニズムが排土であったのに対して，貫入柱の場合は締固めと排土が同時に混在しながらの貫入であったことが推測できる。



図—8　貫入量と地盤反発係数（模型）



図—9　貫入量と地盤反発係数比（模型）

4.　現場締固め実験

4.1　地盤と試験方法

現場は岐阜県南部の宅地造成地で，試験ヤードはブルドーザーで転圧して仕上げた礫を含む盛土地盤（平均盛土厚＝5 m，D_r＝約50%，最大粒径＝30 cm，母材は新第3紀層に属する堆積岩）とN値が5以下の残土処分地（層厚5 m；同材料を含む残土処分地）の2箇所である。

盛土地盤に対しては，貫入柱を深さ2D(＝1.6 m)まで貫入させ，その間の貫入の記録のほか，動的コーン貫入試験，密度試験を実施した。残土処分地に対しては，貫入柱の貫入深さを1.5m までとし，試験前後に標準貫入試験を実施した。

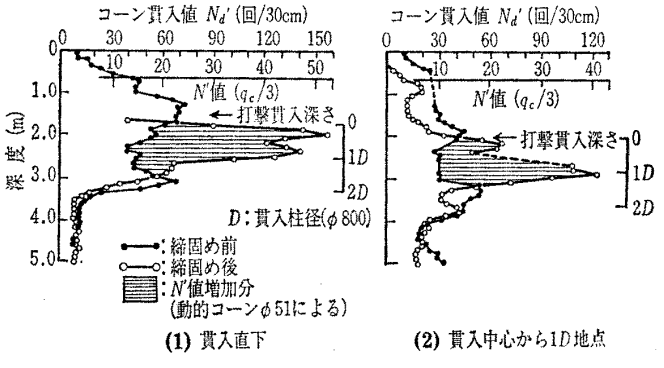
締固めの施工には，杭打ち用の油圧ハンマー（ラム重量4.5 tf）を使用した。装置の諸元はすでに表—2に示してある。なお，この実験では，中詰め装置が完成していなかったので，貫入柱引抜き後の打撃孔を重機で砂礫材を埋戻し・突固めるという作業を数回にわけて行った（口絵写真—10，11）。

4.2　盛土地盤での試験結果

(1)　動的コーン貫入試験による地盤評価

この盛土には最大粒径30 cm の巨礫が含まれているので，標準貫入試験は困難であると予想された。

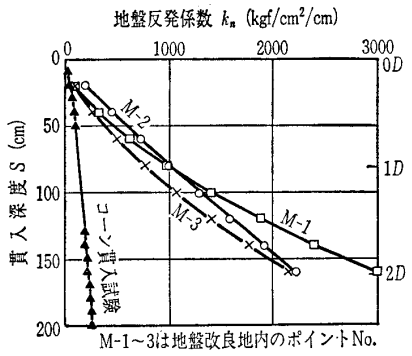
そこで今回は ϕ 51 mm コーン（先端角60°，コーンは貫入後孔底に残す）を用いることにした。



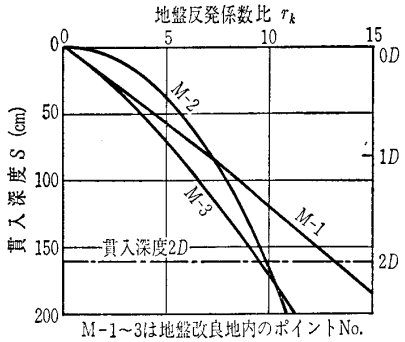
図—10　コーン貫入値による強度評価（盛土地盤）

NII-Electronic Library Service

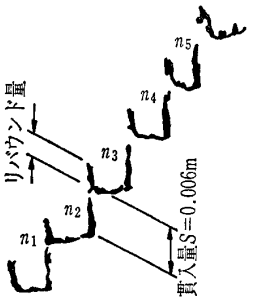
The Japanese Geotechnical Society



図—11 貫入量と地盤反発係数（盛土地盤）



図—12 貫入量と地盤反発係数比（盛土地盤）



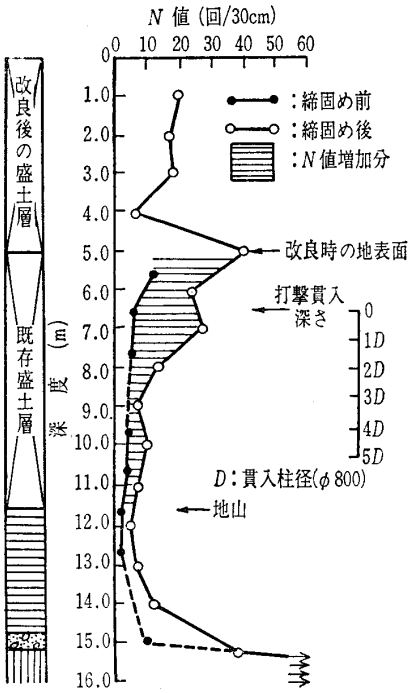
図—13 貫入柱の貫入量およびリバウンド量

図—10は貫入柱貫入位置および1D離れた位置で，貫入の前後に測定した結果であるが，いずれも「貫入深さ+1.5D」までの深さに対して大幅な強度増加が認められ，その範囲は，模型実験の結果とほぼ対応している。

(2) 地盤反発係数による評価

図—11は地盤反発係数（k_n）と貫入量（S）の関係を示したものである。やや締固められた礫の多い盛土地盤であったため，地盤反発係数は非常に大きい。

図—12は，反発係数比（r_k）とSの関係をまとめたものである。r_k値が深さとともに増加しているので，コーンk_n値よりも貫入柱k_n値の増加の割合の方が大きく，模型実験の場合と同様に貫入柱によって地盤が締固められたことを示している。更に2D貫入時のr_k値は8～10で，模型実験の平底型のr_k値（**図—9**中に位置を示す）にほぼ対応する。



図—14 施工前後のN値変化（残土処分地）

(3) リバウンド量による地盤評価

図—13は約2D貫入した時に測定した貫入柱のリバウンドを示したものである。建設省告示式[4]に基づき許容支持力（R_a）および単位面積当たりの支持力（Q_a）を計算すると，

$$R_a = 41.5 \sim 60\,(\mathrm{t})$$

$$Q_a (= R_a / A_0) = 82 \sim 120\ \mathrm{tf/m^2}$$

で，この値からも十分地耐力を有する地盤に改良されていることがうかがえる。またこの結果では，盛土地盤のk_n値は，Q_a値の約20倍であった。

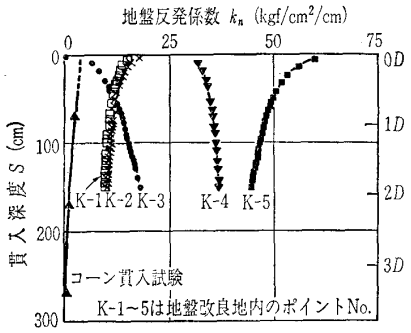
4.3 残土処分地での結果

約1 haの残土処分地を宅地として利用することになったが，残土や大きな礫を含む盛土地盤は十分締固められていなかったので，動的締固め工法（貫入深さは1.5m，施工ピッチは2 m）による地盤改良を実施し，その上に約5 mの盛土を行うことを計画した（**口絵写真—12**）。

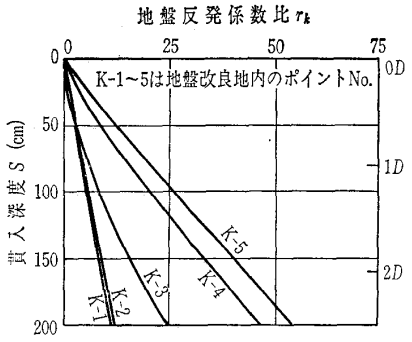
図—14は施工前，後のN値を比較したものである。改良が必要な層厚は約5 mであるが，施工機の能力と能率から貫入深さを1.5m とした。模型実験では単柱の貫入による改良域がせいぜい「貫入底面+3D(=3.9m)」であったので，改良必要層厚に対して十分であるかどうかについては懸念されていた。結果はほぼ全層厚に対して改良効果があったことが

NII-Electronic Library Service

The Japanese Geotechnical Society



図—15 貫入量と地盤反発係数（残土処分地）



図—16 貫入量と地盤反発係数比（残土処分地）

認められる。貫入柱の群貫入効果によるものと理解している。

図—15はk_n～S関係を示したものである。模型地盤，盛土地盤の結果とは異なり，深度に対してk_n値は逆に減少，あるいは増加してもわずかで，地盤が良くないことを示している。またk_n値に差が有り，地盤の状態が変化していることを示している。

図—16はr_k～S関係を示したものである。この関係は，おおむね図—12で得られたと同様な結果となっている。したがって特性の異なる地盤であっても，r_k値（k_nの比）で比較するとあまり大きな差ではない。本来，r_k～S関係は，地盤の材料や密度によっても変わるものと予想されるが，ここでは模型地盤も含め，むしろ同じような結果が得られている。

すなわち，この結果はコーン貫入試験によって，ある程度その地盤の貫入柱貫入時のk_n値の予想がつくことを示しており，k_n値は施工計画に対して有効な指標になり得ると考えている。

5. まとめ

この研究は，既に盛土が完了している地盤の改良の必要性から開発した動的締固め工法の締固め効果の評価法の検討に始まる。ここで実施した模型実験は，単位面積当たりの打撃エネルギーを実物の1/20とし，改良効果についても模型に対応させて評価することで，実際の地盤との関連性について検討した。得られた主な結果は，①改良効果域は，コーン貫入による強度増加から判定して，模型実験，現場実験とも貫入柱周辺の$1D$～$2D$（D：貫入柱の径）域であった，②地盤の強度判定や改良効果の判定に地盤反発係数（k_n）は有効である，③コーンによるk_n値を基準に正規化した反発係数比（r_k）の貫入深さに対する分布は，模型，現場実験ともおおむね同じで，コーン強度試験を実施すれば貫入柱貫入時のk_n値が推定できる可能性がある，等である。

本研究は，必ずしも正面から模型実験と実物の相似則の問題に取組んだものではないが，コーン貫入で得られる地盤反発係数を基準に正規化した反発係数比が，模型実験結果と実物でほぼ同じ分布を示したので，コーン貫入試験を行えば，施工時の貫入抵抗や改良後の地盤の評価をある程度定量的に行えるのではないかと考えている。

謝辞：実験に際して現場を提供していただいた大末建設㈱名古屋支店西可児作業所および実験協力していただいた坂本隆之（現五洋建設），市平一馬（現セキスイハウス）の両君に，感謝の意を表します。

参考文献

1) 望月ほか：締固めた硬質粘土の水浸沈下特性と動的コーン貫入強度，土質工学会，不飽和土の工学的性質研究の現状シンポジウム，pp. 109～116，1987.
2) 高田ほか：重錘落下締固め工法の遠心力模型実験（第1報），土木学会，第42回年次学術講演概要集，PSⅢ, pp. 16～17，1987.
3) 大島ほか：重錘落下締固め工法の遠心力模型実験（第2報），土質工学会，第23回土質工学研究発表会概要集，pp. 2049～2052，1988.
4) 土質工学会編：クイ基礎の調査・設計から施工まで，p. 321，1977.

（原稿受理 1992. 2. 3）

NII-Electronic Library Service