

重錘落下締固め工法の打撃点間隔と改良深度 —砂質地盤に対する運動量に基づく設計法—

大島昭彦¹・高田直俊²

¹正会員 工修 大阪市立大学助手 工学部土木工学科 (〒558 大阪市住吉区杉本 3-3-138)

²正会員 工博 大阪市立大学教授 工学部土木工学科 (〒558 大阪市住吉区杉本 3-3-138)

重錘落下締固め工法の単点打撃における締固め半径を基に打撃点間隔を設定して、シリーズ施工をシミュレートした遠心模型実験を行った。打撃後に測定したコーン貫入抵抗から求めた密度増加域によって打撃点間隔と改良深度の関係を求め、これらから打撃の重ね合わせ効果を調べた。密度増加域は打撃点間隔が狭いほど深く、同じ打撃点間隔でもシリーズ施工により改良深度が深くなった。打撃の重ね合わせ効果によって、対象領域の改良深度が単点打撃による深度以上に得られる最大の打撃点間隔を調べることによって、シリーズ毎の適切な打撃点間隔を決めた。最後にこれらの結果を用いて、砂質地盤に対する重錘運動量に基づく設計法を提案し、現行の設計法と比較した。

Key Words : heavy tamping, centrifuge model, cone penetration test, sandy ground, design procedure

1. はじめに

重錘落下締固め工法は、重錘を高所から落下させ、その衝撃力と振動によって地盤を動的に締固める地盤改良法である。その設計法はエネルギー管理手法に基づく経験則から成り立っているが、エネルギーに直接関わる重錘質量、落下高および打撃回数が締固め効果に同じ水準で関わる保証はなく、その締固め機構や打撃効率は必ずしも明確でない。

筆者らは遠心模型実験や現場実験により、この工法の締固め機構の解明と最適な施工条件の究明を目的とした研究を行っている。これまでに主として地盤の1ヶ所を打撃（単点打撃と呼ぶ）した場合の重錘貫入量、地盤面沈下量、地盤変形およびコーン貫入抵抗を測定し、この工法における地盤圧縮量、地盤変形域および強度増加域は打撃エネルギーよりも重錘運動量に強く依存すること^{1)~3)}、地盤変形と強度増加から求めた締固め範囲（締固め深度と締固め半径）は総運動量から推定できることを報告した⁴⁾。

ところで、この工法の施工は、対象とする地盤をある打撃点間隔でまず格子状に打撃し、次にその打撃点の中間を打撃し、さらにその間を打撃するといういわゆるシリーズ施工法が採られ、打撃の重ね合わせ効果を期待している。この打撃点間隔は施工効率と締固め効果を左右する重要な要因であるが、やはり経験的に決められているのが実情である。

本論文では、まずこの工法の現行の設計法を整理し、その問題点をまとめた。次に、単点打撃における締固め範囲を総運動量から推定する方法を複数点打撃の場合に拡張するため、打撃点間隔を幾通りに変えたシリーズ施工をシミュレートした遠心模型実験を行い、打撃後に測定したコーン貫入抵抗を基に求めた密度増加域から打撃点間隔と改良深度の関係を求めた。これらから打撃の重ね合わせ効果を調べ、シリーズ毎の適切な打撃点間隔の設定方法を検討し、最後にこれらの結果を用いて、砂質地盤に対する運動量に基づく設計法を提案した。

2. 現行の設計法とその問題点

(1) 設計項目

砂質地盤を対象とした現行の設計法の設計項目は主として以下のものである。

- ① 改良深度 D (m), 改良目標（主として N 値の増加量）
- ② 重錘重量 W (tf), 落下高 H (m)
- ③ 打撃エネルギー量 E_v (tfm/m³)
- ④ 打撃点間隔 L (m), シリーズ施工数 n
- ⑤ 打撃点毎の打撃回数 N

まず現場の地盤条件と改良目的に応じて、改良深度 D と改良目標が決められる。次に改良目標を達成するために、以下の手法で②~⑤の項目を決める。

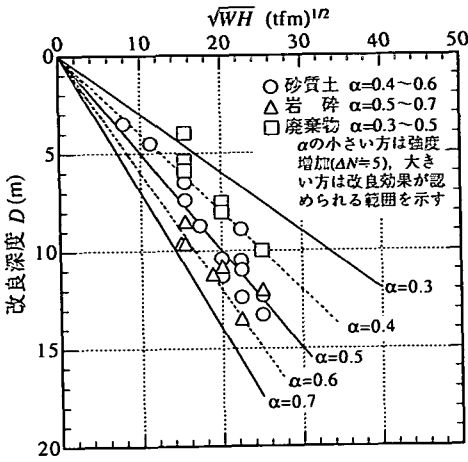


図-1 改良深度と \sqrt{WH} の関係⁵⁾

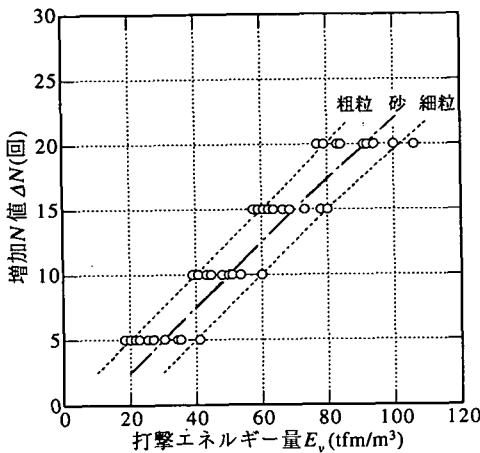


図-2 増加N値 ΔN と打撃エネルギー量 E_v の関係⁵⁾

(2) 改良深度 D

改良深度 D と 1 打撃当たりのエネルギー $W \cdot H$ (W : 重錘重量, H : 落下高) の間には, 経験的に次式の関係があるとされている⁵⁾.

$$D = \alpha \sqrt{WH} \quad (1)$$

ここに, α は改良深度係数で, その値は施工実績に基づく図-1 から土質に応じて決められている. 砂質地盤では通常, $\alpha=0.5$ が採られる.

式(1)は現行設計法の基幹をなすもので, エネルギー管理手法に基づいているが, 筆者らはこの工法のような衝撃締固めは重錘運動量 mv (m : 重錘質量, v : 衝突速度) が支配因子であることを既に報告している³⁾. すなわち締固めに与える重錘質量と落下高の効果は同一水準にはなく, 落下高の効果は平方根 ($v = \sqrt{2gH}$) として現れる. また D が 1 打撃当たりのエネルギー $W \cdot H$ で決まるなら, 打撃回数 N が D に与える効果を見逃していることにもなる. さらに D を定義する改良効果を何で, また平面的にどの位置

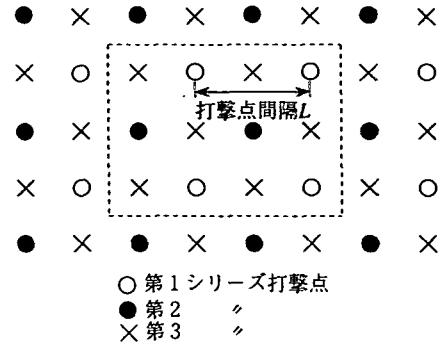


図-3 シリーズ施工における打撃点配置

で評価するのが曖昧で (最近では, 打撃点中間位置で N 値が 5 以上増加する深度で定義している⁵⁾), この手法が必ずしも適切な手法とは思えない.

(3) 打撃エネルギー量 E_v と打撃点間隔 L

対象地盤に与える単位体積当たりの打撃エネルギー量 E_v は, これまでの施工実績から作られた図-2 を用いて改良目標とする N 値の増加量 (増加 N 値) から決められる. 砂質地盤では通常, 増加 N 値 $\Delta N = 5 \sim 10$ に対して $E_v = 30 \sim 50 \text{ tfm/m}^3$ が採られる.

実際の打撃は通常, 図-3 に示すように, 対象とする地盤をある打撃点間隔 L でまず格子状に打撃し (○: 第 1 シリーズ), 次にその打撃点の間を打撃し (●: 第 2 シリーズ), さらにその間を打撃する (×: 第 3 シリーズ) といういわゆるシリーズ施工法が採られる. L は施工効率と締固め効果を左右する重要な要因であるが, 次式のように経験的に改良深度 D に等しく採られる⁵⁾.

$$L \doteq D \quad (2)$$

シリーズ施工数を n とすれば, 打撃点の最小間隔 L_{min} は次式となり,

$$\begin{aligned} n=1: L_{min} &= L \\ n=2: L_{min} &= L/\sqrt{2} \\ n=3: L_{min} &= L/2 \end{aligned} \quad (3)$$

各打撃点毎の打撃回数 N は次式によって得られる.

$$N = \frac{E_v \cdot D \cdot L_{min}^2}{W \cdot H} \quad (4)$$

以上で先の①~⑤の設計項目が決まるが, いずれもこれまでの施工実績に基づく経験的手法となっている. 筆者らはこれまでに単点打撃における締固め範囲を地盤に与える総運動量から推定する方法を示した⁴⁾. 以下ではその手法をシリーズ施工を考慮した複数点打撃に拡張するため, シリーズ施工をシミュレートした遠心模型実験を行い, 適切な打撃点間隔の設定方法とそれの場合の改良深度を求めた.

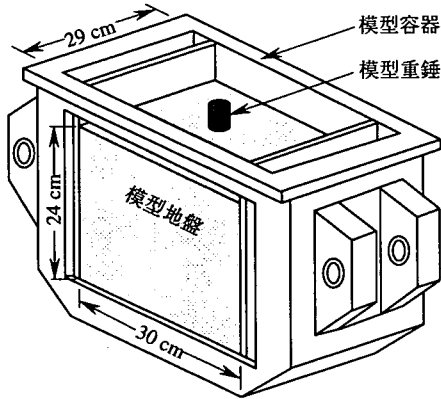


図-4 模型地盤

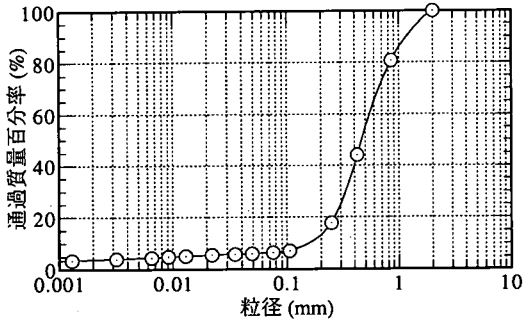


図-5 模型材料の粒度

表-1 模型材料の物理性質

ρ_s (g/cm ³)	D_{max} (mm)	F_c (%)	U_c	ρ_{dmin} (g/cm ³)	ρ_{dmax} (g/cm ³)	w_{opt} (%)
2.67	2.0	6.4	3.4	1.397	1.742	14.4

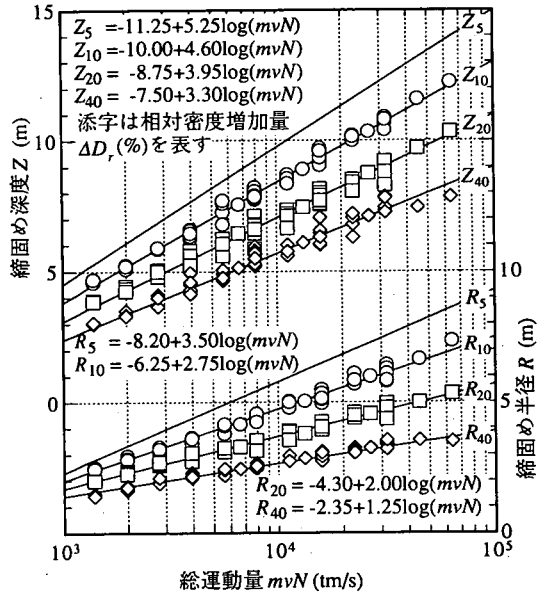


図-6 単点打撃における締固め範囲と総運動量の関係⁴⁾

3. シリーズ施工の遠心模型実験^{6),7)}

(1) 実験方法

a) 模型地盤

模型地盤は、図-4に示す幅30cm、奥行き29cm、層厚24cmの四角柱模型で、円柱形の模型重錘で打撃する。遠心加速度を100gに設定したので、幅30m×奥行き29m×層厚24mの原型地盤に相当する。

模型材料は、文献4)と同じ京都府城陽市産の川砂である。粒度分布を図-5に、物理性質を表-1に示した。材料の細粒分含有率 F_c が5%以上あり、JGS T161の最大・最小密度試験は適用できないので、最大乾燥密度 ρ_{dmax} は締固め試験(JIS A 1210 A-a法)の最大乾燥密度で、また最小乾燥密度 ρ_{dmin} は気乾状態の試料を内径10cmのモールドに漏斗から落下高0.5cmで層厚7.5cmにまきだし、直径10cm、質量775gの鋼板を静かに載せ、底面からゆっくり水浸させて沈下が収まったときの密度で定義した。

模型地盤は初期含水比 $w_0=4\%$ (予備実験で求めた100g場で間隙水が移動しない含水比)に調整した試料を8層に分けて締固め、100g場で1時間自重沈下させた後に相対密度 $D_{r0}=35\%$ となるように、模型容器の幅、奥行きと等しい底板を持つ質量12.8kgのランマーを用いて(一次元圧縮手法)、落下高7.5cm、

1層当たりの打撃回数10回で締固めた。実験装置、実験方法の詳細は文献4)を参照されたい。

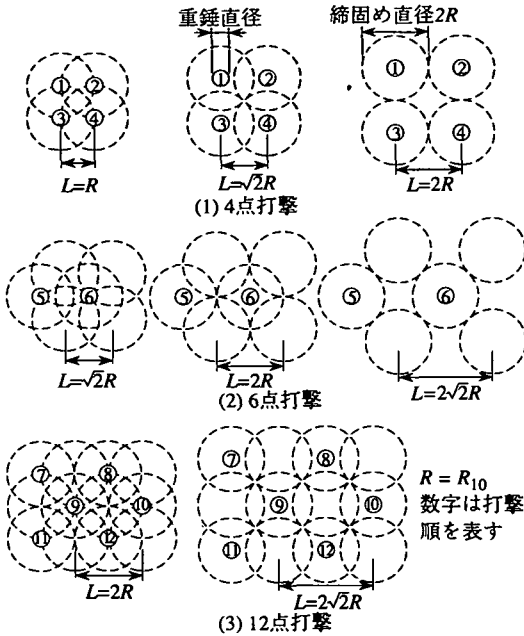
b) 実験条件

打撃位置は、図-3に示す3シリーズ施工における打撃点のうち、基本パターンとなる点線で囲った領域を対象とし、4点(○を打撃:第1シリーズに相当)、6点(○打撃後、●を打撃:第2シリーズに相当)および12点(○、●を打撃後、×を打撃:第3シリーズに相当)を打撃した。単点毎の打撃仕様は、[重錘質量 m , 落下高 H , 打撃回数 N]=[20t, 20m, 20回], [40t, 20m, 20回]の2種類で、いずれも重錘底面積 $A=4\text{m}^2$ (直径2.26m)である。

模型実験で設定した打撃点間隔は文献4)で求めた図-6から決めた。これは本研究と同じ材料、同じ密度の地盤を用いて行った単点打撃における地盤変形から求めた締固め深度 Z 、締固め半径 R と総運動量 mvN の関係である。この図では締固めの度合いを相対密度増加量 ΔD_r で定義し、 Z 、 R の添字は $\Delta D_r(\%)$ の値を表す。図中に算定式も示した。ただし、各 $Z-\log(mvN)$ 、 $R-\log(mvN)$ 関係が等間隔となったので、 $\Delta D_r=5\%$ の Z_5 、 R_5 を外挿によって求めている。これはコーン貫入抵抗の増加から求めた Z_5 、 Z_{10} 、 Z_{20} と R_5 、 R_{10} 、 R_{20} とほぼ一致すること⁴⁾を確認した整理である。また、この図は細粒分含有率 $F_c=6\sim44\%$ の

表一 2 単点打撃における締固め範囲

打撃仕様	20t, 20m, N20	40t, 20m, N20
総運動量 mvN	7,920 t m/s	15,840 t m/s
$\Delta D_r=5\%$ Z_5 R_5	9.2 m 5.5	10.8 m 6.5
$\Delta D_r=10\%$ Z_{10} R_{10}	7.9 4.5	9.3 5.3
$\Delta D_r=20\%$ Z_{20} R_{20}	6.7 3.5	7.8 4.1



図一 7 打撃点間隔 L

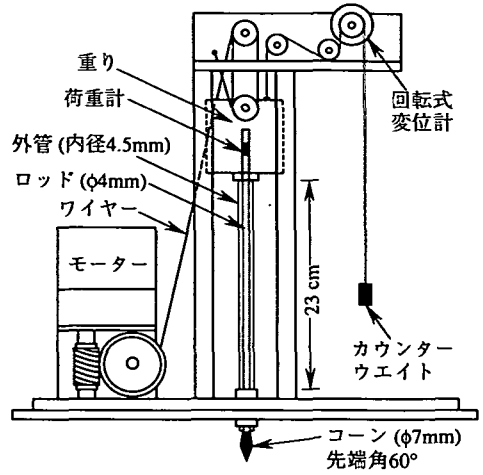
表一 3 実験条件

打撃点数	打撃点間隔 L	打撃点間隔の実距離		最小間隔 L_{min}
		20t, 20m, N20	40t, 20m, N20	
4点打撃 (第1シリーズ)	R	4.5 m	5.3 m	R
	$\sqrt{2}R$	6.4	7.5	$\sqrt{2}R$
	2R	9.0	10.6	2R
6点打撃 (第2シリーズ)	$\sqrt{2}R$	6.4	7.5	R
	2R	9.0	10.6	$\sqrt{2}R$
	$2\sqrt{2}R$	12.8	15.0	2R
12点打撃 (第3シリーズ)	2R	9.0	10.6	R
	$2\sqrt{2}R$	12.8	15.0	$\sqrt{2}R$

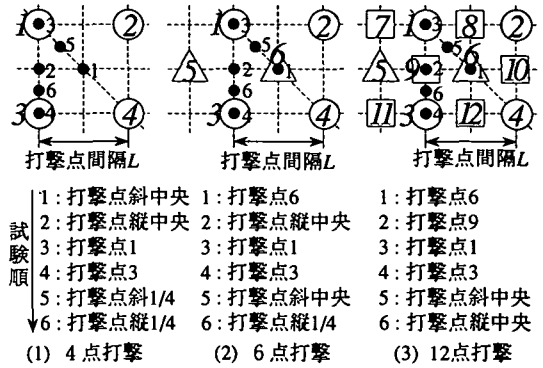
R: 単点打撃における締固め半径 R_{10}

砂質地盤で、初期地盤密度 $D_{r0}=25\sim 50\%$ の範囲でほぼ成立すること⁴⁾、さらに地下水位の影響はあまりないこと^{8), 9)}を確認している。

表一 2 に図一 6 から求まる 2 種類の打撃仕様における $\Delta D_r=5, 10, 20\%$ の Z と R をまとめた。本論文では、後述するように現行の設計法における増加 N 値 5 以上に相当すると考えられる $\Delta D_r=10\%$ 以上を改良目標とし、打撃点間隔 L は、締固め半径 R (= 単点



図一 8 コーン貫入試験機



図一 9 コーン貫入試験位置

打撃における締固め半径 R_{10}) を基にして、図一 7 に示す配置を採った。図の破線の円が締固め直径 2R を、実線の小円が重錘直径を、その中の数字は打撃順を表す。

表一 3 に実験条件をまとめた。6 点、12 点打撃における第 2、第 3 シリーズの打撃は、前シリーズ打撃点の中間を打撃するが、現行の設計法に従ってここでは第 1 シリーズにおける間隔を打撃点間隔 L と呼ぶ。表には打撃点の最小間隔 L_{min} も示したが、6 点打撃では $L/\sqrt{2}$ が、12 点打撃では $L/2$ が L_{min} となる。

c) コーン貫入試験方法

所定の打撃を行った後、コーン貫入試験を行い、打撃後の地盤の強度増加を調べた。図一 8 にコーン貫入試験機を示した。コーンは直径 7mm、先端角 60° で、直径 4mm のロッド (ピアノ線) を介して上部の荷重計で貫入抵抗を、回転式変位計で貫入量を計測する。コーンロッドは内径 4.5mm のアルミパイプを通して二重管形式として地盤との周面摩擦を切っている。貫入力は荷重計上部に取り付けた質量 1kg の重り (100g 場で 100kg) をワイヤーで吊り上げてお

き、小型モーターでワイヤーを繰り出すことによって貫入速度0.5mm/secで与える。

図-9に4点、6点、12点打撃におけるコーン貫入試験位置を示した。打撃仕様 [20t, 20m, N20] の4点打撃では試験位置が近くなるために4ヶ所(図の1~4位置)で、その他では6ヶ所で行った。

(2) コーン貫入試験結果

a) コーン貫入抵抗の分布

図-10に打撃仕様 [20t, 20m, N20] における4点、6点、12点打撃(それぞれ第1, 第2, 第3シリーズ打撃後)のコーン貫入抵抗 q_c と深度 z の関係を打撃点間隔 L 毎に示した。図の右上がり斜めの並びは L が同じ、縦の並びは打撃点の最小間隔が同じである。打撃点およびその近傍では打撃によって地盤面が沈下するが、 z は打撃前の地盤面を基準にしているため、ある深度から q_c が現れる。各図とも L が狭いほど q_c は大きく、極大値を示す深度が深い。

図(1a)~(1c)の4点打撃では、それぞれの打撃点1, 3の q_c (図中の Δ , ∇)はほぼ等しい。打撃点の中間位置の q_c (\bullet , \diamond)は、 L が狭いほど大きく、 $L=\sqrt{2}R$ 以下では打撃の重ね合わせ効果により打撃点と同等の値を示している。

図(2a)~(2c)の6点打撃では、第1シリーズ打撃点1, 3の q_c (Δ , ∇)は、第2シリーズ打撃点6(\bullet)よりも大きい。この傾向は L が広くなると弱まる。打撃点の中間位置(\diamond , \circ , \square)の q_c は、やはり L が狭いほど大きく、 $L=2R$ 以下では打撃点6と同等の大きさを示す。

図(3a), (3b)の12点打撃では、第2シリーズ打撃点6の q_c (\bullet)が最も大きく、第1シリーズ打撃点1, 3(Δ , ∇)がこれに次ぐ。第3シリーズ打撃点9(\diamond)はやや小さい。これからみて第2, 第3シリーズの打撃はその前シリーズの打撃点近傍をも強く締固めていると考えられる。また打撃点の中間位置の q_c (\circ , \square)は、やはり L が狭いほど大きく、深い位置でピークが現れている。

図(1c), (2b), (3a)は、 $L=2R$ の3シリーズ施工におけるそれぞれ第1, 第2, 第3シリーズ打撃後の q_c - z 関係に対応する。同じ試験位置の q_c を比較すると、シリーズ施工に伴って強度が増加し、かつ強度増加が深部に及んでいくことがわかる。図(1b)と(2a), (2c)と(3b)についても同様である。以上の傾向は打撃仕様 [40t, 20m, N20] においても共通して見られた。

b) 貫入抵抗から求めた相対密度増加量

文献4)には、打撃後の q_c から D_r を推定する方法を示した。その方法は初期地盤密度 $D_{r0}=35, 50, 65, 75\%$ に変えた未打撃地盤の q_c の深度分布を求

め、これらから深度毎に q_c と D_r の関係を関数近似しておき、打撃後の q_c の増加量から D_r の増加量に変換する方法である。これによって、先のコーン貫入抵抗 q_c と深度 z の関係から相対密度増加量 ΔD_r と深度 z の関係を求めた。

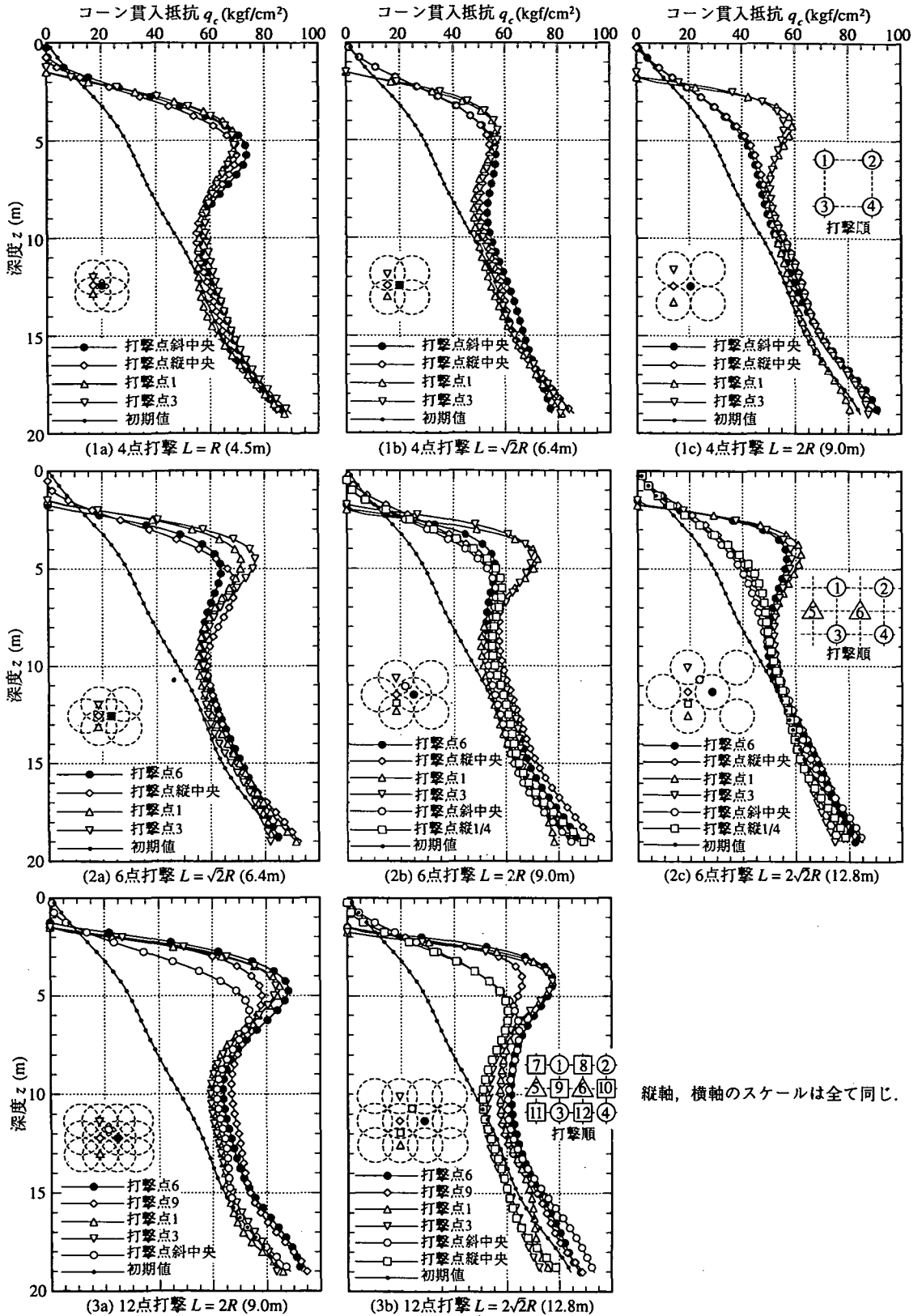
図-11に打撃仕様 [20t, 20m, N20] における4点、6点、12点打撃の ΔD_r - z 関係を打撃点間隔 L 毎に示した。各図とも深度10m以深で、 $\Delta D_r=0\%$ に収束していくが、少し幅があるのはコーン試験位置における貫入抵抗のばらつきによるものである⁴⁾。打撃点の ΔD_r は深度3m程度でピークを示す。例えば $\Delta D_r=20, 10\%$ の生じる深度を比較すると、 L が狭いほど深く、また $L=2R$ の図(1c)→(2b)→(3a)をみると、シリーズ施工によって深部まで密度が増加している。これまでシリーズ施工による締固めの考え方は、第1シリーズで地盤の深部を、第2, 第3シリーズで中間層以浅を締固める⁵⁾とされていたが、今回の結果から適切な打撃点間隔を採れば、第2, 第3シリーズの打撃の重ね合わせ効果によって、より深部まで締固められることがわかる。この傾向は打撃仕様 [40t, 20m, N20] においても共通して見られた。

(3) 相対密度増加量分布

ΔD_r - z 関係から $\Delta D_r=10, 20\%$ を生じる深度を読み取って相対密度増加量分布を求めた。図-12は打撃仕様 [20t, 20m, N20] における4点、6点、12点打撃(それぞれ第1, 第2, 第3シリーズ打撃後)の縦列と斜列打撃点間の $\Delta D_r=10, 20\%$ の分布域である。図は第1シリーズの打撃点3~1を縦列、3~2を斜列として表し、打撃点間是对称になるとして描いている。図の太実線が $\Delta D_r=10\%$ の、太破線が $\Delta D_r=20\%$ の分布を示す。参考として文献4)による単点打撃における $\Delta D_r=10, 20\%$ の分布を細実線と細破線で書き入れた。各図とも打撃の重ね合わせ効果によって、単点打撃よりも深い位置まで密度増加が見られ、その傾向は L が狭いほど著しい。図(1c)や(2c)のように L が広い場合には、打撃点の中間点で密度増加域が浅く(特に $\Delta D_r=20\%$ で)、締固めの均一性に欠ける。シリーズ施工によって $L=2R$ の図(1c)→(2b)→(3a)や $L=2\sqrt{2}R$ の図(2c)→(3b)のように地盤全体が均一に締固められていく。

図-13に打撃仕様 [40t, 20m, N20] における4点、6点、12点打撃の相対密度増加量分布を示した。図-12と同じ傾向が見られる。

今回の実験で4点、6点打撃をそれぞれ1, 2シリーズ施工と考えることもできるが、3シリーズ施工(12点打撃)と打撃点数が異なるため、シリーズ施工間の比較は直接できない。しかし文献10)で、同じ



図一〇 打撃点間隔を変えたシリーズ施工におけるコーン貫入抵抗の深度分布 (20t, 20m, N20)

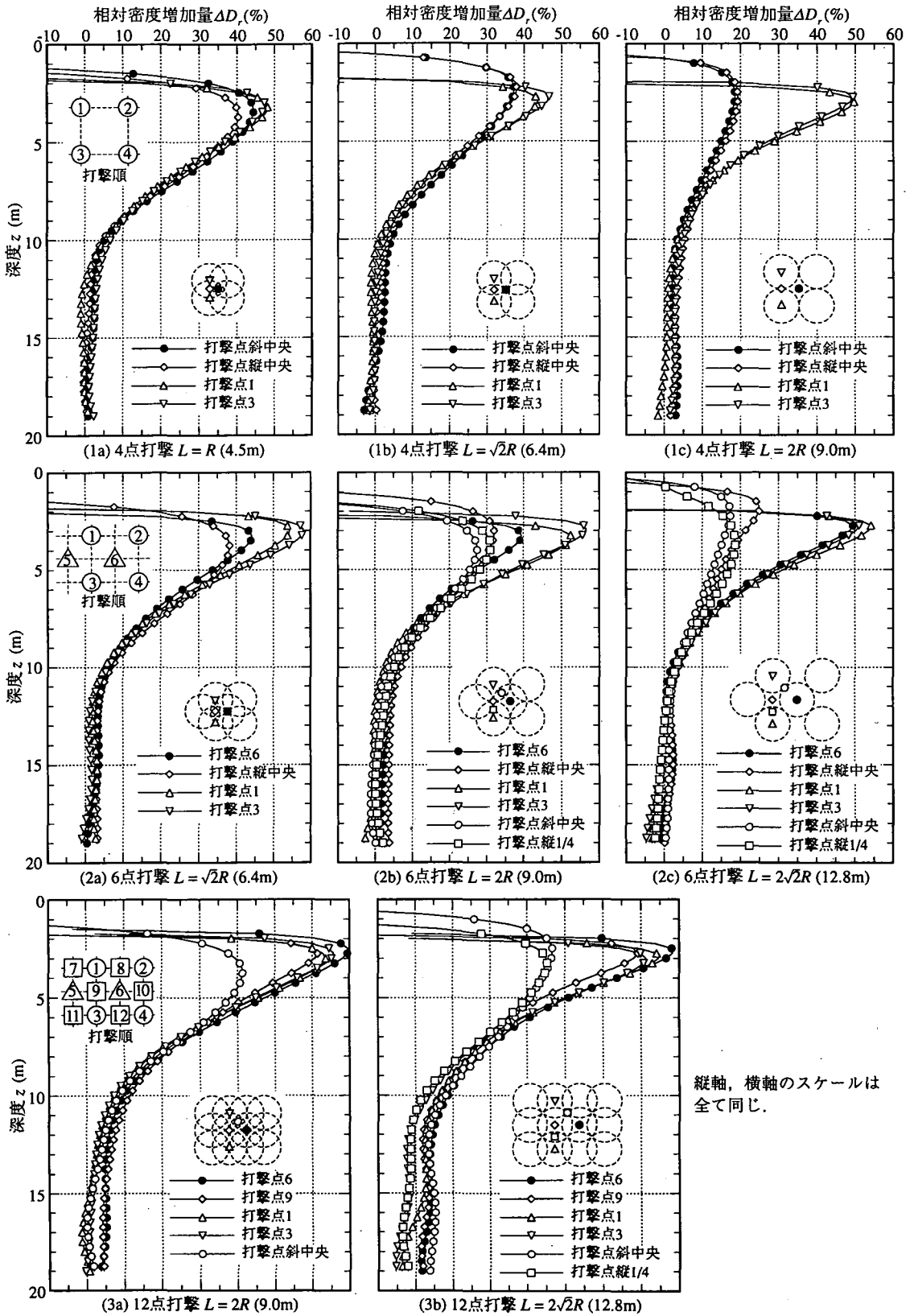


図-11 打撃点間隔を変えたシリーズ施工における相対密度増加量の深度分布 (20t, 20m, N20)

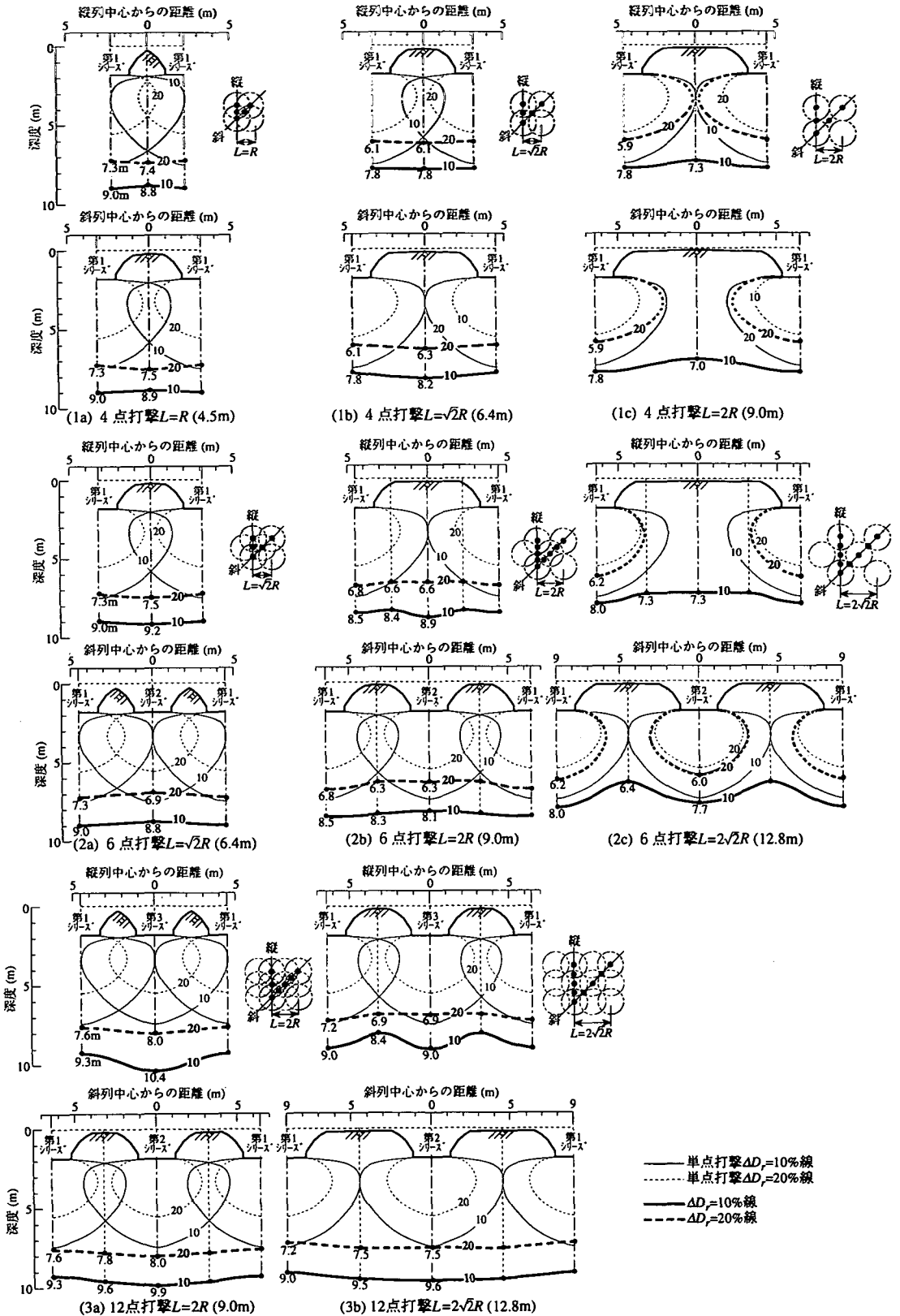


図-12 打撃点間隔を変えたシリーズ施工における相対密度増加量分布 (20t, 20m, N20)

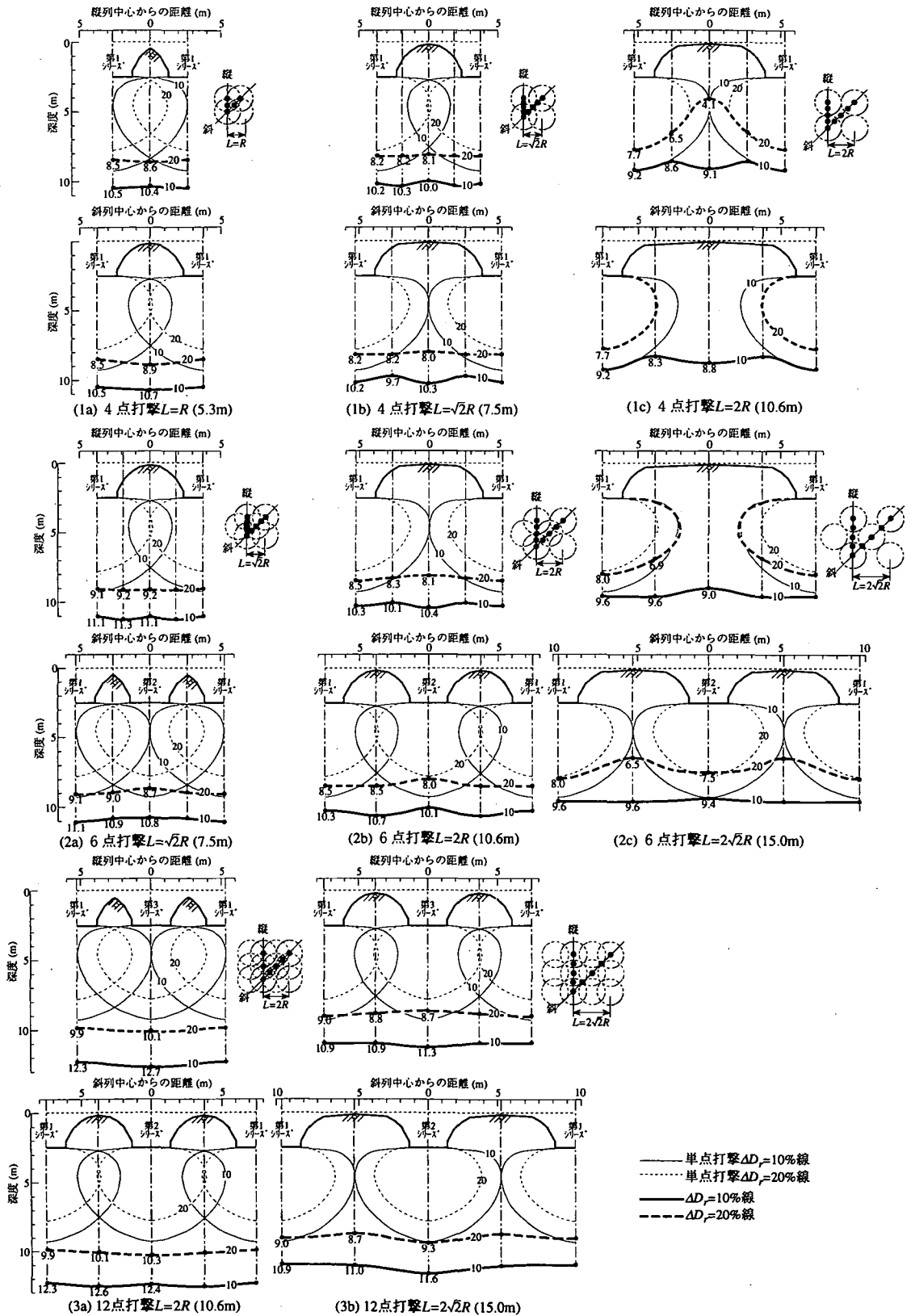


図-13 打撃点間隔を変えたシリーズ施工における相対密度増加量分布 (40t, 20m, N20)

表-4 シリーズ施工による改良深度 D_{10} (m)

打撃点数	打撃点 間隔 L	最小間 隔 L_{min}	20t, 20m, N20			40t, 20m, N20		
			範囲	平均	Z_{10} Z_5	範囲	平均	Z_{10} Z_5
4点打撃 (第1シリーズ)	R	R	8.8~9.0	8.9		10.4~10.7	10.6	
	$\sqrt{2}R$	$\sqrt{2}R$	7.8~8.2	8.0	7.9 9.2	9.7~10.3	10.0	9.3 10.8
	$2R$	$2R$	7.0~7.8	7.4		8.3~9.2	8.8	
6点打撃 (第2シリーズ)	$\sqrt{2}R$	R	8.8~9.2	9.0		10.8~11.3	11.1	
	$2R$	$\sqrt{2}R$	8.3~8.9	8.5	7.9 9.2	10.1~10.7	10.4	9.3 10.8
	$2\sqrt{2}R$	$2R$	6.4~8.0	7.2		9.0~9.6	9.3	
12点打撃 (第3シリーズ)	$2R$	R	9.3~10.4	9.9		12.3~12.6	12.5	
	$2\sqrt{2}R$	$\sqrt{2}R$	8.4~9.6	9.0	7.9 9.2	10.9~11.3	11.3	9.3 10.8

Z_{10}, Z_5 : 単点打撃における $\Delta D_r=10, 5\%$ の締固め深度

表-5 シリーズ施工による改良深度 D_{20} (m)

打撃点数	打撃点 間隔 L	最小間 隔 L_{min}	20t, 20m, N20			40t, 20m, N20		
			範囲	平均	Z_{20} Z_{10}	範囲	平均	Z_{20} Z_{10}
4点打撃 (第1シリーズ)	R	R	7.3~7.5	7.4		8.5~8.9	8.7	
	$\sqrt{2}R$	$\sqrt{2}R$	6.1~6.3	6.2	6.7 7.9	8.0~8.2	8.1	7.8 9.3
	$2R$	$2R$	0~5.9	-		0~7.7	-	
6点打撃 (第2シリーズ)	$\sqrt{2}R$	R	6.9~7.5	7.2		8.7~9.2	9.0	
	$2R$	$\sqrt{2}R$	6.3~6.8	6.6	6.7 7.9	8.0~8.5	8.3	7.8 9.3
	$2\sqrt{2}R$	$2R$	0~6.2	-		0~8.0	-	
12点打撃 (第3シリーズ)	$2R$	R	7.6~8.0	7.8		9.9~10.3	10.1	
	$2\sqrt{2}R$	$\sqrt{2}R$	6.9~7.5	7.2	6.7 7.9	8.7~9.3	9.0	7.8 9.3

Z_{20}, Z_{10} : 単点打撃における $\Delta D_r=20, 10\%$ の締固め深度

打撃点最小間隔で12点打撃における1, 3シリーズ施工の比較を行った結果、平均的な改良深度はあまり変わらないが、1シリーズ施工の方がやや不均一な改良深度となることを調べている。

ここに、 R は単点打撃における $\Delta D_r=10\%$ の締固め半径 R_{10} である。いずれも最小間隔 L_{min} は $\sqrt{2}R$ で、図-7(3)の右のように、対象領域を締固め直径 $2R$ が覆う最大の間隔に相当する。

(4) 適切な打撃点間隔と改良深度

ここでシリーズ施工における等相対密度増加量 ΔD_r を改良度と呼び、これが地盤内で現れる深さを改良深度 $D_{\Delta D_r}$ と定義する。打撃点間隔 L は締固め範囲の均一化を、改良深度 $D_{\Delta D_r}$ は締固め範囲の深さを決める指標である。

表-4, 5にそれぞれ $\Delta D_r=10, 20\%$ に対する改良深度 D_{10}, D_{20} の範囲と平均値をまとめた。同じ L でも、また同じ打撃点の最小間隔 L_{min} でもシリーズ施工によって D が深くなる。12点打撃(3シリーズ施工)の $L=2\sqrt{2}R$ の改良深度 D_{10}, D_{20} の平均値と単点打撃における締固め深度 Z_5, Z_{10} を比較するとほぼ等しい。また12点打撃の $L=2R$ の改良深度は、さらに1m程度深くなっている。これらは複数点打撃による打撃の重ね合わせ効果に起因する。

L が狭いほど打撃の重ね合わせ効果で D は深くなるが、単位面積当たりの打撃量が多くなり、不経済となる。対象領域の改良深度が単点打撃以上に得られる最大の打撃点間隔を適切な打撃点間隔と定義すれば、今回の結果から、次のように決められる。

- 1シリーズ施工: $L_1=\sqrt{2}R$
 - 2シリーズ施工: $L_2=2R$
 - 3シリーズ施工: $L_3=2\sqrt{2}R$
- (5)

4. 運動量に基づく設計法

(1) 設計手法

3.(4)で示したように、適切な打撃点間隔 L はシリーズ施工数 n に応じて式(5)のように求められた。また複数点打撃による打撃の重ね合わせ効果により、 $\Delta D_r=10, 20\%$ の改良深度 D_{10}, D_{20} は、単点打撃における締固め深度 Z_5, Z_{10} に対応することがわかった。そこで、シリーズ施工における打撃点間隔 L は図-6の単点打撃における締固め半径 R_{10} を基にして式(5)から決定した。改良深度 D は図-6の単点打撃における Z_5, Z_{10}, Z_{20} を D_{10}, D_{20}, D_{40} に読み変えることによって決定した。

図-14, 15にそれぞれシリーズ施工における改良深度 D 、打撃点間隔 L と総運動量 mvN の関係を算定式と合わせて示した。これが設計改良深度から打撃仕様と打撃点間隔を求めるチャートとなる(図-14の D は、図-15の L を採ることが前提で成立する関係である。また各 D は等間隔にあるので、さらに細かく分割することも可能である)。

まず、改良目的に応じて改良度 ΔD_r を選ぶ。例えば通常の目的であれば $\Delta D_r=10\%$ に、特に締固めの程度を大きく採りたい場合には $\Delta D_r=20\%$ に選ぶ。次

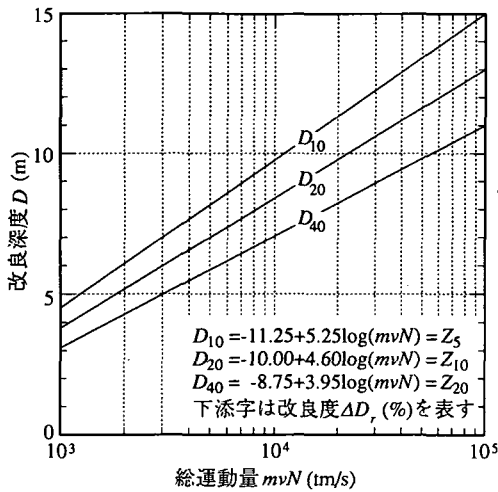


図-14 シリーズ施工における改良深度と総運動量の関係

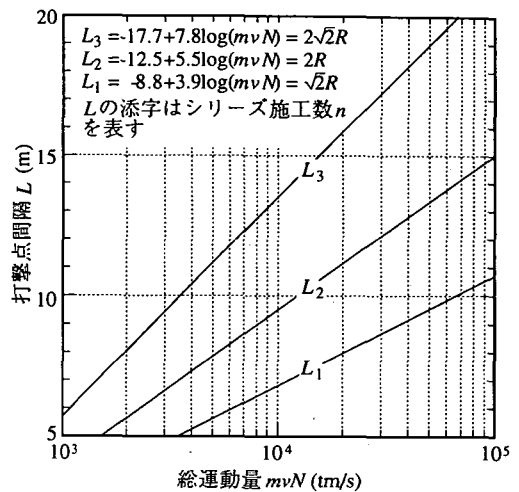


図-15 シリーズ施工における打撃点間隔と総運動量の関係

に、設計改良深度 $D_{\Delta D_r}$ を決め、図-14 から地盤に与える総運動量 mvN を決定する。これからクレーン容量や現場状況を考慮して重錘質量 m 、落下高 H 、打撃回数 N を決定する。

次に打撃点間隔 L は、シリーズ施工数 n に応じて図-15 によって、与える mvN から決定する。いずれも L は第1シリーズの打撃点の間隔を表しており、2シリーズ、3シリーズ施工を採る場合も打撃点の最小間隔 L_{min} は、1シリーズ施工の場合の打撃点間隔 L_1 に等しい。

シリーズ施工に関する考え方は、基本的には1シリーズ施工でも適切な打撃点間隔を設定すれば、平均的な改良深度はシリーズに分けた場合と大きく変わらないが、打撃点間隔が狭いために隣り合う打撃点の効果が常に干渉し合うため締固め効率が悪く、また初めに打撃した位置と最後の位置では締固め効果が異なり、不均一な改良深度となる¹⁰⁾。シリーズに分ければ、第1シリーズは単点打撃の効果がそのまま発揮され、第2、第3シリーズは中間層を締固めると同時に、打撃の重ね合わせ効果によって地盤全体をより深部まで均一に締固める効果があると考えられる。

単に改良深度を深くする目的であれば、打撃点の最小間隔 L_{min} を R に選ぶことも有効で、前述したように改良深度をさらに1m程度深くできる。この場合には3シリーズ施工で $L_3=2R$ (図-15の L_2 に一致) となる。ここで図-14の D_{10} と図-15の L_2 を比較すると、ほぼ等しくなっている。この関係は現行の設計法(式(2)参照)に対応するもので、改良深度が深くなる反面、打撃点数が増えて単位面積当たりの打撃量が多くなり、不経済となる。

(2) 現行の設計法との比較

現行の設計法と本論文で提案した設計法を具体的に比較した。表-5に両設計法の打撃仕様と打撃点間隔の決定方法、および敷地面積 $10,000\text{m}^2$ 、シリーズ施工数 $n=3$ で、改良深度 $D=8, 10, 12\text{m}$ に設定した場合の設計値の比較をまとめた。改良目標は現行設計法で増加 N 値 $\Delta N \geq 5$ (図-2より $E_v=30\text{tfm/m}^3$) に、提案設計法で $\Delta D_r \geq 10\%$ に設定した。これは、一般に N 値と D_r の対応は土被り圧の影響を受けるが、藤田¹¹⁾や吉田ら¹²⁾による N 値と D_r の関係図から、初期地盤密度 $D_{r0}=35\%$ に対して $\Delta D_r=10\%$ は $\Delta N=5$ に対応すると判断した。また打撃仕様は、現行設計法では $W \cdot H$ が決定されるので、 W を通常現場で使われる重錘に選び、それにより H を決定した。提案設計法はそれに合わせた。

結果は、単点当たりの打撃回数 N は D が大きいほど提案設計法の方が多くなるが(本来なら W または H を大きく設定して N を減らす方が効率が良い)、打撃点間隔 L は提案設計法の方が広がるため、総打撃点数はほぼ半減する。総打撃回数と単位面積当たりの打撃エネルギー E は、 D が小さいほど現行設計法では大きくなり、 $D=12\text{m}$ 以上になると逆に提案設計法の方が大きくなる。

現行設計法による $D=8, 10, 12\text{m}$ の打撃仕様から総運動量 mvN を求めて提案設計法による改良深度を逆算すると、それぞれ $7.5, 9.1, 10.2\text{m}$ となる。ただし前述したように、この場合の打撃点間隔は改良深度を1m程度深くする効果があるので、改良深度はそれぞれ $8.5, 10.1, 11.2\text{m}$ と推定される。したがって現行設計法による設計改良深度は、提案設計法に対照させると、 $D < 10\text{m}$ では過小に、 $D > 10\text{m}$ では過大

表-6 現行設計法と提案設計法の比較

設計法	現行設計法			提案設計法		
打撃仕様の決定方法	図-1より, 改良深度 $D = \alpha \sqrt{W \cdot H}$ 図-2 (目標 ΔN 値) より, 打撃エネルギー量 E_v (tfm/m ³) 打撃回数 $N = \frac{E_v \cdot D \cdot L_{min}^2}{W \cdot H}$			図-14より, 改良度 ΔD_r と改良深度 D によって総運動量 mvN を決定 $\Delta D_r = 10\%$: $D_{10} = -11.25 + 5.25 \log(mvN)$ $\Delta D_r = 20\%$: $D_{20} = -10.00 + 4.60 \log(mvN)$		
打撃点間隔 L の決定方法	$L \approx D$ $n=1: L_{min} = L$ $n=2: L_{min} = L/\sqrt{2}$ $n=3: L_{min} = L/2$			図-15より, mvN から次式で決定 $n=1: L_1 = -8.8 + 3.9 \log(mvN)$ $n=2: L_2 = -12.5 + 5.5 \log(mvN)$ $n=3: L_3 = -17.7 + 7.8 \log(mvN)$		
設計条件	敷地面積: $100 \times 100 \text{m} = 10,000 \text{m}^2$ 改良目標: $\Delta N \geq 5$ ($\rightarrow E_v = 30 \text{tfm/m}^3$) シリーズ施工数 $n = 3, \alpha = 0.5$			敷地面積: $100 \times 100 \text{m} = 10,000 \text{m}^2$ 改良目標: $\Delta D_r \geq 10\%$ シリーズ施工数 $n = 3$		
改良深度 D	8 m	10 m	12 m	8 m	10 m	12 m
打撃仕様	$W \cdot H = 256$ \Downarrow $W = 12 \text{tf}$ $H = 21 \text{m}$ $N = 15 \text{回}$	$W \cdot H = 400$ \Downarrow $W = 20 \text{tf}$ $H = 20 \text{m}$ $N = 19 \text{回}$	$W \cdot H = 576$ \Downarrow $W = 25 \text{tf}$ $H = 23 \text{m}$ $N = 23 \text{回}$	$mvN = 4,640$ \Downarrow $W = 12 \text{tf}$ $H = 21 \text{m}$ $N = 19 \text{回}$	$mvN = 11,160$ \Downarrow $W = 20 \text{tf}$ $H = 20 \text{m}$ $N = 28 \text{回}$	$mvN = 26,830$ \Downarrow $W = 25 \text{tf}$ $H = 23 \text{m}$ $N = 51 \text{回}$
打撃点間隔 L (最小間隔 L_{min})	8 m (4 m)	10 m (5 m)	12 m (6 m)	10.8 m (5.4 m)	13.8 m (6.9 m)	16.8 m (8.4 m)
総打撃点数	625点	400点	278点	343点	210点	142点
総打撃回数	9,375	7,500	6,250	6,517	5,880	7,242
E (tfm/m ²)	240	300	360	164	235	416

E : 単位面積当たりの打撃エネルギー

に評価される。

提案設計法は、細粒分含有率 40%以下、地盤の初期密度 $D_{r0} = 50\%$ 以下の砂質地盤（地下水位の有無に関わらず）で適用可能で、改良度 ΔD_r に応じて設計でき、かつ適切な打撃点間隔を採るため、締固め効率が良く、合理的な手法であると考えられる。

5. まとめ

重錘落下締固め工法のシリーズ施工における改良深度を遠心模型実験によって調べた。その結果、以下の結論が得られた。

1) シリーズ施工による打撃の重ね合わせ効果によって、コーン貫入抵抗の増加は大きくなり、地盤の深部にまで及ぶ。

2) 貫入抵抗から推定した相対密度増加量は、適切な打撃点間隔を採れば、シリーズ施工によって地盤の深部まで均一に生じる。

3) 打撃の重ね合わせ効果によって対象領域の改良深度が単点打撃以上に得られる最大の打撃点間隔を適切な打撃点間隔と定義すると、単点打撃における締固め半径の $\sqrt{2}$ 倍、すなわち対象領域を単点打撃による締固め直径で覆う最大の間隔に相当する。

4) 3 シリーズ施工の改良度 10, 20%の改良深度は、それぞれ単点打撃における 5, 10%の深度にほぼ等しくなった。

以上の結果を基にして運動量に基づく設計法を提案した。現行の設計法との比較結果から以下の結論が得られた。

5) 単点当たりの打撃回数は、改良深度が大きいほど提案設計法の方が多くなる。

6) 打撃点間隔は提案設計法の方が広くなるため、総打撃点数はほぼ半減する。

7) 総打撃回数と単位面積当たりの打撃エネルギーは、改良深度が 12m 未満の場合には、提案設計法の方が少なくなる。

8) 現行設計法による設計改良深度は、提案設計法に対照させると、深度 10m 以下では過小に、10m 以上では過大に評価される。

9) 重錘落下締固め工法の締固め効果は運動量に強く依存するため、打撃エネルギーに基づく現行設計法は必ずしも適切な手法とはいえない。

本論文では、締固め効果の指標を相対密度増加量にしている。これを用いたのは、土の締めり方の指標として適切で、かつ力学定数との関連をつけ易いためである。一方、現場の施工管理は N 値が多用さ

れているが、 N 値自体は土の種類で評価が異なる定性的な指標と見なせる。いずれの指標も現状では現場の施工管理に必ずしも精度よく適用するのは困難である。現在、施工管理に用いる指標として、打撃によって生じる打撃孔の体積を相対密度増加量に代わるものとして考えているが、この点については今後の課題としたい。

本論文では、砂質地盤に対する運動量に基づく設計法を提案したが、岩砕、廃棄物地盤でも単点打撃における締固め深度、締固め半径が求められれば、同様な手法が適用できると考えている。今後、提案設計法の妥当性を現場で確かめたい。

謝辞：遠心模型実験に協力された深井晴夫氏（基礎地盤コンサルタント(株)、元大阪市立大学学生）、住武人氏（大阪市立大学大学院生）に謝意を表します。また、本論文をまとめるにあたり有益な助言を頂いた海洋工業(株)鳴海直信氏、池田通陽氏に謝意を表します。

参考文献

- 1) 高田直俊, 大島昭彦, 池田通陽, 竹内功: 重錘落下締固め工法の遠心力模型実験—重錘貫入量と地盤変形—, 土木学会論文集, No.475/III-24, pp.89~97, 1993.
- 2) 大島昭彦, 高田直俊: 遠心模型実験による重錘落下締固めにおける打撃条件と地盤の圧縮・変形量, 土木学会論文集, No.481/III-25, pp.135~143, 1993.
- 3) 大島昭彦, 高田直俊: 重錘落下締固めにおける地盤への重錘貫入と衝撃力, 土木学会論文集, No.487/III-26, pp.61~67, 1994.
- 4) 大島昭彦, 高田直俊, 田中善広: 重錘落下による締固め範囲と運動量の関係—単点打撃における密度と強度の増加域—, 土木学会論文集, No.554/III-37, pp.185~196, 1996.
- 5) 例えば, 大倉卓美: 動圧密工法, 土木・建築技術者のための実用軟弱地盤対策技術総覧, pp.733~744, 1993.
- 6) 深井晴夫, 大島昭彦, 高田直俊: 重錘落下締固め工法のシリーズ施工における打撃点間隔と強度増加, 土木学会第50回年次学術講演会, III-380, 1995.
- 7) 大島昭彦, 高田直俊, 深井晴夫: 重錘落下締固め工法のシリーズ施工における打撃点間隔と改良範囲, 土木学会第50回年次学術講演会, III-381, 1995.
- 8) 大島昭彦, 高田直俊, 田中善広: 重錘落下締固め工法における地下水位の影響, 土木学会関西支部平成3年度年次学術講演会, III-20, 1991.
- 9) 大島昭彦, 高田直俊, 住武人・栃尾健: 重錘落下締固めに与える地下水位の影響と埋戻し打撃の効果, 土木学会第51回年次学術講演会, III-B344, 1996.
- 10) 大島昭彦, 高田直俊, 栃尾健, 住武人: 重錘落下締固め工法の改良深度に与えるシリーズ施工数の影響, 第31回地盤工学研究発表会, pp.2329~2330, 1996.
- 11) 藤田圭一: 標準貫入試験, 土質調査試験結果の解釈と適用例, 土質工学会, pp.29~76, 1968.
- 12) 吉田保夫, 国生剛治: 砂礫地盤への貫入試験の適用法の提案, 電力中央研究所報告, U87080, 1988.

(1996.2.20 受付)

RELATION BETWEEN DISTANCE OF TAMPING POINTS AND IMPROVED DEPTH BY HEAVY TAMPING — DESIGN PROCEDURE ON THE BASIS OF RAM MOMENTUM FOR SANDY GROUND —

Akihiko OSHIMA and Naotoshi TAKADA

This paper presents the centrifuge model tests of heavy tamping to investigate the relation between distance of tamping points and improved depth. The model material was sandy soil. The surface was tamped at several points by a model ram under centrifugal acceleration field of 100g. Then the cone penetration test was carried out at several locations. The improved depth was evaluated by the increase of relative density converted from the increase of cone penetration resistance. The depth of the increase of cone penetration resistance and the increase of relative density were deeper than single point tamping. The optimum distance between tamping points was decided. Finally, a design procedure of heavy tamping on the basis of ram momentum was proposed.