

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—

大島昭彦¹・高田直俊²・田中善広³

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)

³正会員 工修 (株)大林組 土木技術本部技術第一部 (〒113 東京都文京区本郷 2-2-9)

重錘落下締固め工法の設計・施工に当たって最も重要な改良範囲を調べるために、重錘質量、落下高、打撃回数を変えた単点打撃における遠心模型実験を行い、打撃孔を中心とした地盤変形とコーン貫入抵抗から地盤の密度増加域と強度増加域を調べて締固め効果の及ぶ範囲を判定した。さらに締固め範囲と打撃エネルギー、運動量の関係、および地盤の初期密度と土の種類の影響を調べた。その結果、地盤変形および強度増加から求めた密度増加域はよく一致し、かつその大きさは総打撃エネルギーよりも総運動量に依存した。一定の相対密度増加量を生じる深度と半径を締固め範囲で定義すると、両者とも総運動量の対数に比例した。締固め範囲に与える初期地盤密度や土の種類の影響は今回扱った範囲内では小さかった。

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

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工法で、砂・礫質地盤、岩屑盛土の締固めに、また廃棄物埋立地盤の減容化・安定化に優れた効果を発揮し、経済的にも優れている。しかしその締固め機構や打撃効率は必ずしも明確でなく、実際の設計・施工は経験則に基づいて行われているのが実情である。

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と最適な施工条件の究明を目指した研究を行っている。これまでに現場実験によって打撃孔周辺の地盤変形を測定し、これが遠心模型実験で再現できること、この工法における地盤圧縮量や地盤変形の生じる範囲は重錘の打撃エネルギーよりも運動量に強く依存し、これが地盤への重錘貫入現象の機構からも導けることを報告した^{1)~4)}。しかし、これまでの研究成果ではこの工法の設計・施工に当たって最も重要な「改良範囲」を明確化するには至っていない。

そこで本論文では、この工法の改良範囲を調べるために、地盤の1ヶ所を打撃(単点打撃と呼ぶ)する遠心模型実験を新たに行い、打撃孔を中心とした地盤内の地盤変形とコーン貫入抵抗から地盤の密度

増加域と強度増加域を調べて締固め効果の及ぶ範囲を特定した。さらにこの締固めの及ぶ範囲と総打撃エネルギー、総運動量の関係、およびこれに与える地盤の初期密度と土の種類の影響を調べた。

2. 実験方法

(1) 模型地盤

この工法による単点打撃は軸対称三次元条件となる。地盤変形の測定を主目的とした図-1に示す半断面半円柱模型(直径38cm×層厚20cm)、および打撃中心とその周辺地盤のコーン貫入抵抗測定を主目的とした図-2に示す四角柱模型地盤(幅30cm×奥行き29cm×層厚24cm)を用いた。前者は半円柱地盤の中心を同じく半円柱の模型重錘で打撃し、後者は地盤中央を円柱の模型重錘で打撃する。遠心加速度を100gに設定したので、それぞれの模型地盤は直径38m×層厚20m、幅30m×奥行き29m×層厚24mの原型に相当する。

模型材料は、京都府城陽市産の川砂(京都川砂と呼ぶ)を主材料に選び、土の種類の影響を調べる実験には、細粒分含有率 F_c が異なる3種類のまさ土(奈良県生駒市産、京都府亀岡市産、兵庫県猪名川町産のまさ土で、それぞれ生駒まさ土、亀岡まさ土、猪名川まさ土と呼ぶ)を加えた。いずれも最大粒径を

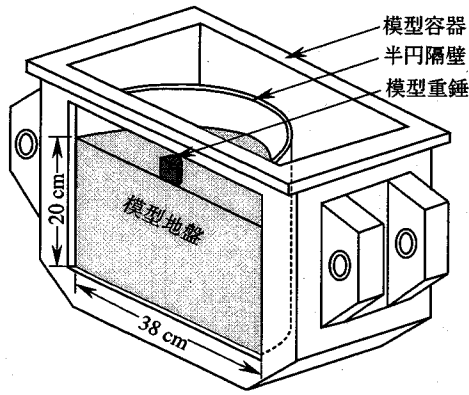


図-1 半円柱模型地盤

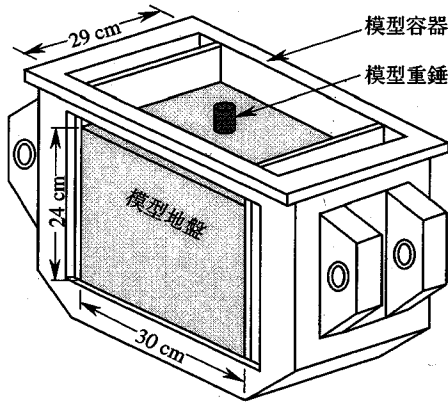


図-2 四角柱模型地盤

2mm に調整している。各材料の粒度分布を図-3 に、物理性質を表-1 に示した。いずれも細粒含有率が5%以上あるため、JGS T 161 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) から、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から定義した。

模型地盤は初期含水比 w_0 (予備実験で調べた 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 $D_{r0}=35\%$ となるように設定した。締固め方法は半円柱模型地盤では半径 19cm、中心角 45° の扇型の底板を持つ質量 2.5kg のランマーを用いて、四角柱模型地盤では模型容器の幅、奥行きと等しい底板を持つ質量 12.8kg のランマーを用いた (一次元圧縮手法)。表-2 に締固め方法をまとめた。表には半円柱模型で地盤密度の影響を調べた実験の $D_{r0}=25, 50\%$ の場合と、後述する四角柱模型地盤で

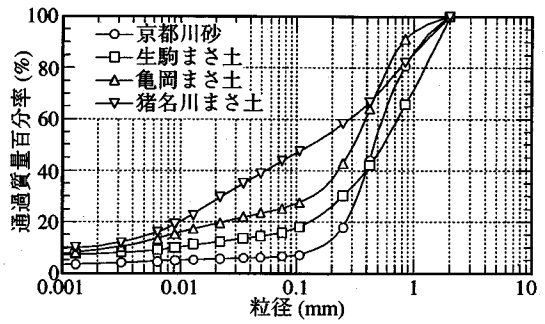


図-3 模型材料の粒度分布

表-1 模型材料の物理性質

模型材料	ρ_s (g/cm ³)	D_{max} (mm)	F_c (%)	U_c	ρ_{dmin} (g/cm ³)	ρ_{dmax} (g/cm ³)	w_{opt} (%)
京都川砂	2.67	2.0	6.4	3.4	1.397	1.742	14.4
生駒まさ土	2.71	2.0	15.7	77	1.325	1.918	11.8
亀岡まさ土	2.67	2.0	25.1	130	1.348	1.906	12.2
猪名川まさ土	2.69	2.0	43.7	190	1.241	1.718	19.7

表-2 模型地盤の締固め方法

模型地盤	土の種類	w_0 (%)	D_{r0} (%)	ランマ ー質量	落下高	打撃 回数	分割 層数
半円柱	京都川砂	25	35	1.25kg	3cm	8	8
		50	50	2.5	9	8	8
		75	75	9	8	8	
	生駒まさ土	8	35	3	12	8	
	亀岡 猪名川	8 13	8 13	5 9	16 8	8	
四角柱	京都川砂	35	35	12.8kg	7.5cm	10	8
		50	50	15.0	8	8	
		65	65	22.5	20	8	
		75	75	30	8		

コーン貫入抵抗と相対密度の関係を調べた $D_{r0}=50, 60, 75\%$ の場合も示している。模型材料はいずれも京都川砂である。なお、実験装置、実験方法の詳細は文献 2), 3) を参照されたい。

(2) 地盤変形の計測方法

半円柱模型地盤の前面のガラス面に塗布した厚さ 1mm の寒天膜上に直径 2mm の標点 234 個 (不動点 4 個) を格子状に設置し、実験中に打撃回数 $N=0$ (初期状態)、5、10、20、40、80 回時に写真撮影した。撮影した写真を実寸大に印画紙に焼付け、座標読み取り装置 (読み取り精度 0.01mm) で標点の座標を読み取った。4つの不動点を基準にして、測定した座標を初期 ($N=0$) の座標系に変換し、軸対称条件を考慮して打撃中心軸からの座標系に変換し、初期状態からの各標点の変位量を求める。次に標点で構成される 204 個の四角形要素を打撃中心軸を回転軸とした円環要素として、その体積変化から体積ひずみ ϵ_v を算出する。さらに ϵ_v を相対密度増加量 ΔD_r に換算

表-3 相対密度増加量と体積ひずみの関係

模型材料	相対密度増加量 ΔD_r (%)		
	10	20	40
京都川砂	2.1%	4.3%	8.5%
生駒まさ土	3.7	7.5	14.9
亀岡まさ土	3.3	6.7	13.3
猪名川まさ土	3.1	6.2	12.3

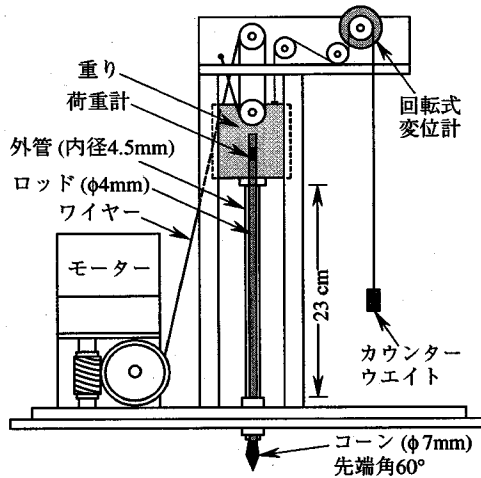


図-4 コーン貫入試験機

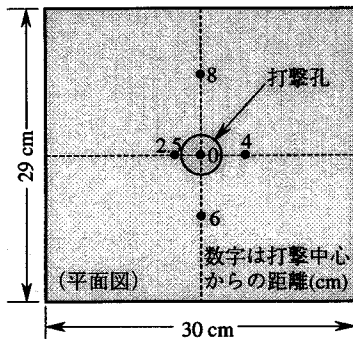


図-5 コーン貫入試験位置

して密度増加域を求めた。

表-3に各材料毎の初期相対密度 $D_{r0}=35\%$ に対する相対密度増加量 ΔD_r と体積ひずみ ϵ_v の対応関係を例示した。密度幅(最大, 最小密度の差)が大きい材料ほど同じ ΔD_r を得るための ϵ_v は大きい。

(3) コーン貫入試験方法

四角柱模型地盤では打撃終了後, 図-4に示すコーン貫入試験機を用いて貫入抵抗を調べた。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

表-4 実験条件

模型地盤	模型材料	D_{r0} (%)	m (t)	A (m^2)	H (m)	N_f (回)	E_1 (tfm)	mv (tm/s)	備考
半円柱 四角柱	京都川砂	35	10	4	20	80	200	198	H 一定 m 変化
			20	4	40*	400	396		
			40	4	40	800	792		
			80	4	20	1,600	1,584		
			20	4	5	80	100	198	m 一定 H 変化
			10	80	200	280			
			40	40*	400	396			
			28.656	572	474				
			20	4	20	40*	400	396	E_1 一定
			40	10	560	792			
80	5	792							
25	10	2	40	40	400	280	E_1 一定		
35	20	4	20	*	396				
50	40	8	10	*	560				
35	80	16	5	*	792				
京都川砂	25	10	2	40	40	400		280	
生駒まさ土	35	40	8	10	*	560			
亀岡	35	80	16	5	*	792			
猪名川	35	80	16	5	*	792			

*: 京都川砂, $D_{r0}=35\%$, $m=20t$, $A=4m^2$, $H=20m$ は同一実験
 m : 重錘質量, A : 重錘底面積, H : 落下高, N_f : 最終打撃回数
 E_1 : 1打撃のエネルギー, mv : 運動量($v=\sqrt{2gH}$)

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。試験位置は図-5に示すように打撃中心から0, 2.5, 4, 6, 8cmの位置である。

(4) 実験条件

表-4に実験条件と物理量をまとめた(表の数値は重力場の原型換算値で, 以降は原型換算値で表す)。半円柱と四角柱模型に対して, ①落下高 H 一定($=20m$)で重錘質量 m を変化させるシリーズ, ② m 一定($=20t$)で H を変化させるシリーズ, ③1打撃のエネルギー E_1 一定($=W \cdot H=400tfm$, W は重錘重量(tf))で m と H を変化させるシリーズ, を共通の条件で行った。さらに半円柱模型に対して, ④初期地盤密度を変化させるシリーズ, ⑤土の種類を変化させるシリーズを行った。①~③シリーズの重錘底面積 A は一定($=4m^2$)とし, ④と⑤シリーズは $m/A=5t/m^2$ となるように A を重錘質量毎に変化させた。

3. 地盤変形から求めた密度増加域

(1) 密度増加域の大きさと打撃仕様⁵⁾

図-6に各シリーズに共通する $D_{r0}=35\%$ の京都川砂地盤の標準仕様としている条件 [$m=20t$, $H=20m$, $A=4m^2$, $N_f=40$]の打撃に伴う相対密度増加量 ΔD_r 分布の伝播状況(累積値)を示した。図中の+記号が体積ひずみ ϵ_v の大きさを, 曲線は等 ΔD_r 線($=10, 20, 40\%$)を表している。また図中には総打撃エネ

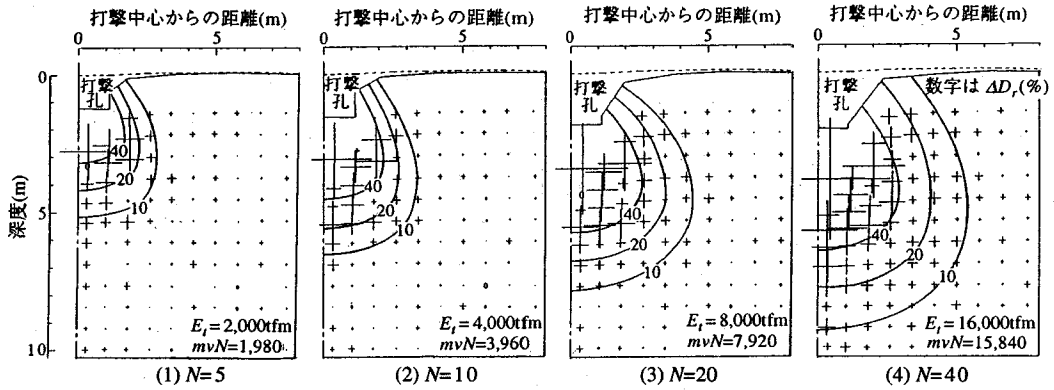


図-6 相対密度増加量分布の伝播の例 (京都川砂 $D_{r0}=35\%$, $m=20t$, $H=20m$, $A=4m^2$)

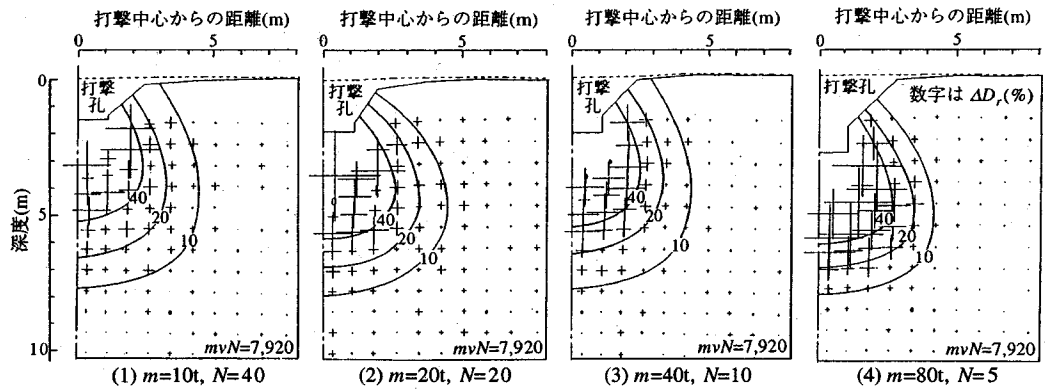


図-7 H 一定・ m 変化シリーズの相対密度増加量分布 (京都川砂 $D_{r0}=35\%$, $H=20m$, $A=4m^2$, $E_i=8,000tfm$)

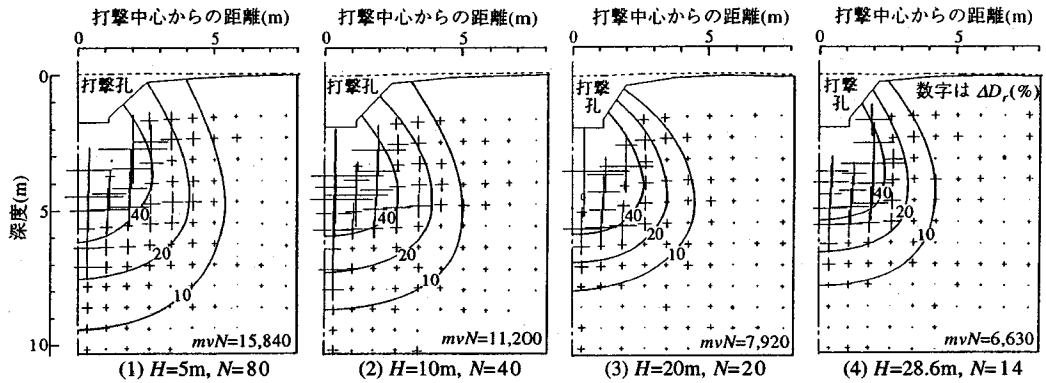


図-8 m 一定・ H 変化シリーズの相対密度増加量分布 (京都川砂 $D_{r0}=35\%$, $m=20t$, $A=4m^2$, $E_i=8,000tfm$)

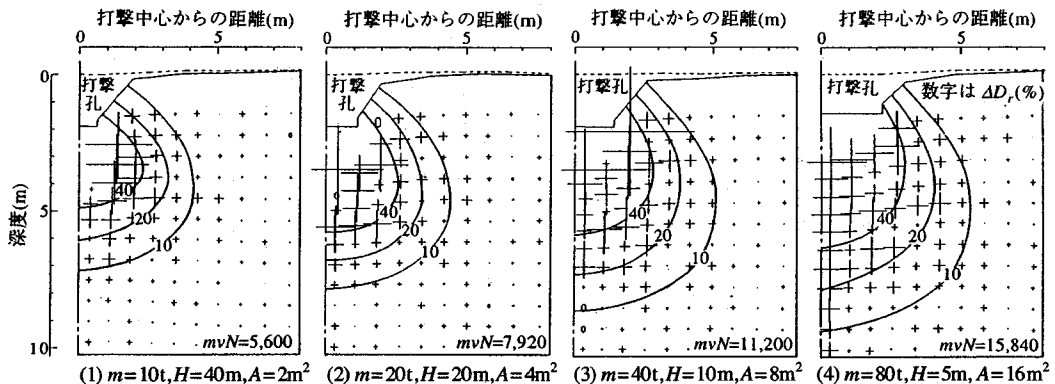


図-9 E_i 一定シリーズの相対密度増加量分布 (京都川砂 $D_{r0}=35\%$, $N=20$, $E_i=8,000tfm$)

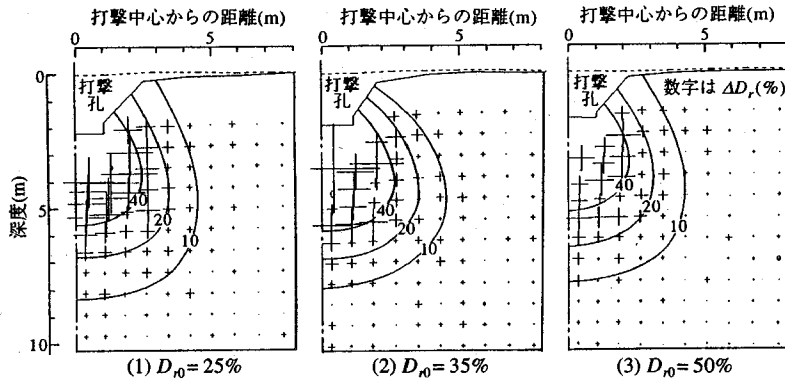


図-10 初期地盤密度と相対密度増加量分布の関係 (京都川砂, 20t, 20m, 4m², N20, E₁=8,000tfm)

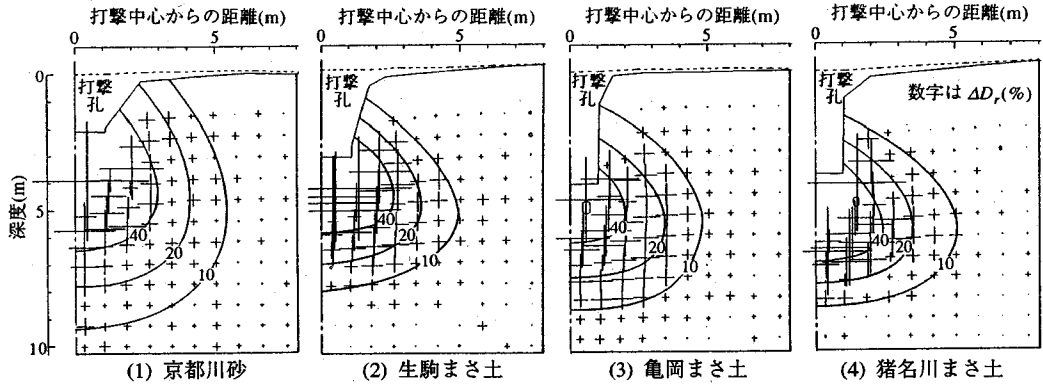


図-11 土の種類と相対密度増加量分布の関係 (D_{r0}=35%, 20t, 20m, 4m², N40, E₁=16,000tfm)

ルギー $E_i (=E_1 \cdot N)$ の値と総運動量 mvN の値を書き入れている。打撃回数 N の増加とともに等 ΔD_r 線は、打撃孔底から球根状に拡がっていく。各等 ΔD_r 線の最大深度、最大半径はほぼ等間隔となっている。この傾向は他の打撃仕様においても同様であった。

図-7~9に $D_{r0}=35\%$ の京都川砂地盤に対する H 一定・ m 変化、 m 一定・ H 変化および E_1 一定の3つのシリーズで総打撃エネルギーが $E_i=8,000\text{tfm}$ における相対密度増加量分布を比較した。図中には総運動量 mvN の値を書き入れている。図-7の H 一定・ m 変化シリーズでは、各ケースの mvN は等しい。この場合は m が大きくなると等 ΔD_r 線が拡がる傾向が見られるが、あまり大きな違いはない。図-8の m 一定・ H 変化シリーズでは、 mvN が大きい(H を小さくして N を大きくする)ケースは等 ΔD_r 線の拡がり大きい。図-9の E_1 一定シリーズにおいても、 mvN が大きい(H を小さくして m を大きくする)ケースは等 ΔD_r 線の拡がり明らかに大きい。

(2) 密度増加域の大きさと初期地盤密度

図-10に初期地盤密度別の相対密度増加量分布を示した。打撃仕様は[20t, 20m, 4m², N20, ($E_i=8,000\text{tfm}$)]である。初期地盤密度 D_{r0} が低いものほど打

撃孔近傍の体積ひずみ ϵ_v は大きい、 $\Delta D_r=10\%$ 線的位置(後述の締固め効果の及ぶ範囲)には大きな差はない。これは他の打撃仕様でも同様であった。

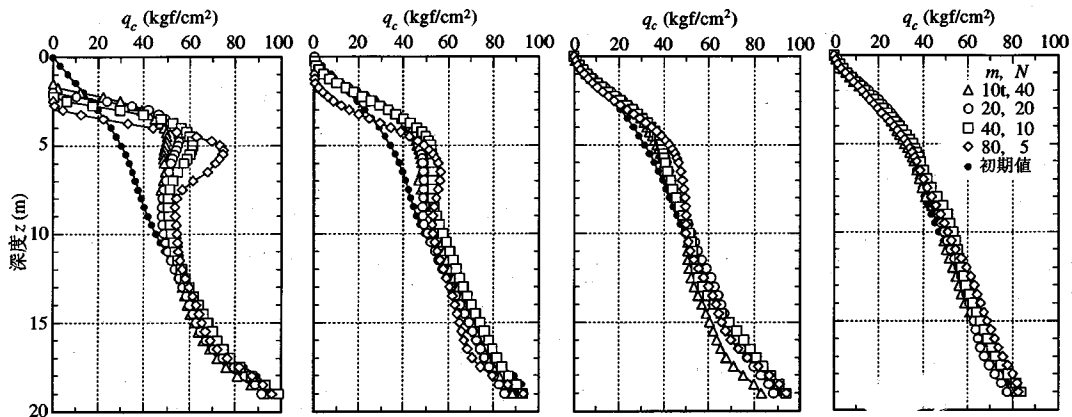
(3) 密度増加域の大きさと土の種類⁶⁾

図-11に土の種類別の相対密度増加量分布を示した。打撃仕様は[20t, 20m, 4m², N40, ($E_i=16,000\text{tfm}$)]である。等 ΔD_r 線は深度方向、側方向ともに京都川砂が最も広く、亀岡、猪名川まさ土はやや狭く、生駒まさ土は深度がやや浅い。これは密度幅が小さい京都川砂(表-1)では打撃による衝撃が地盤に広く伝わりやすいのに対し、密度幅が大きい他の材料は打撃孔が深くなり、衝撃力が打撃孔近傍で吸収されやすいためと考えられる。

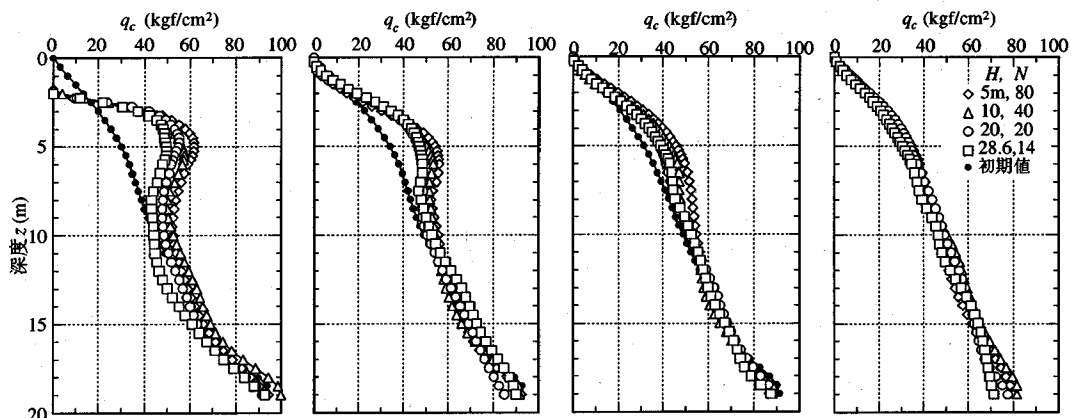
4. コーン貫入抵抗と密度増加域⁷⁾

(1) 打撃後のコーン貫入抵抗分布

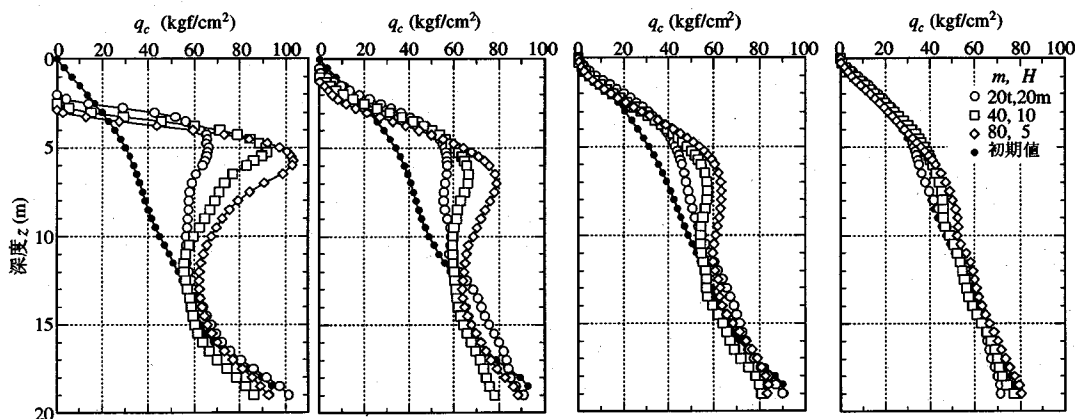
図-12~14にそれぞれ H 一定・ m 変化、 m 一定・ H 変化、 E_1 一定シリーズの E_i が等しいケースの打撃後のコーン貫入抵抗 q_c を測定位置毎に示した。深度 z は打撃前の地盤面を基準にしているため、打撃中心およびその近傍では打撃による地盤面の沈下で、あ



(1) 打撃中心(0m) (2) 打撃中心から2.5m (3) 打撃中心から4m (4) 打撃中心から6m
 図-12 H 一定・ m 変化シリーズのコーン貫入抵抗と深度の関係 (京都川砂, $H=20\text{m}$, $E_i=8,000\text{tfm}$)



(1) 打撃中心(0m) (2) 打撃中心から2.5m (3) 打撃中心から4m (4) 打撃中心から6m
 図-13 m 一定・ H 変化シリーズのコーン貫入抵抗と深度の関係 (京都川砂, $m=20\text{t}$, $E_i=8,000\text{tfm}$)



(1) 打撃中心(0m) (2) 打撃中心から2.5m (3) 打撃中心から4m (4) 打撃中心から6m
 図-14 E_1 一定シリーズのコーン貫入抵抗と深度の関係 (京都川砂, $N=40$, $E_i=16,000\text{tfm}$)

る深度から q_c が現れる。 q_c が顕著に増加する深度は
 いずれも打撃中心から離れるほど深くなり、打撃効
 果が打撃孔底から放射状に伝わっていることがわか
 る。これは土谷が現場で測定したコーン貫入抵抗分
 布と同様である⁸⁾。

図-12の H 一定・ m 変化シリーズでは m が大きい
 ほど、また図-13の m 一定・ H 変化シリーズでは H
 が低いほど、さらに図-14の E_1 一定シリーズでは m
 が大きいほど q_c の増加は大きく、かつ打撃中心から
 より遠い位置まで q_c は増加している。

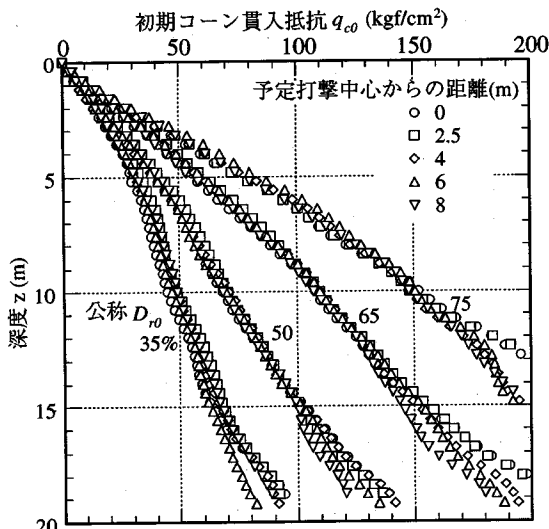


図-15 相対密度の異なる未打撃地盤のコーン貫入抵抗 (京都川砂)

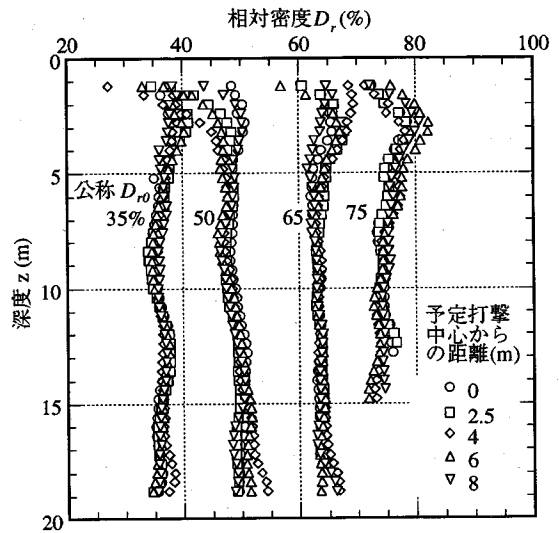


図-17 コーン貫入抵抗から求めた初期相対密度分布

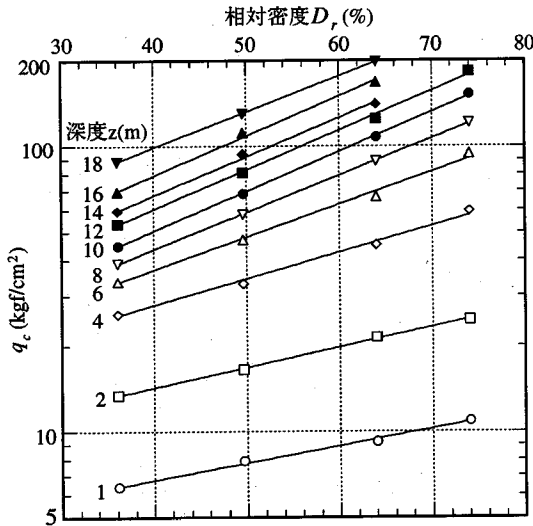


図-16 コーン貫入抵抗と相対密度の関係 (予定打撃中心)

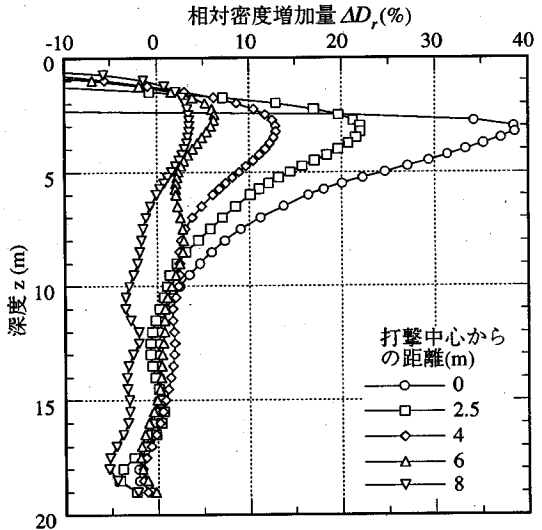


図-18 打撃点からの距離と相対密度増加量分布の関係 (20t, 20m, N20)

(2) 初期コーン貫入抵抗と相対密度算出方法

図-15に初期相対密度 $D_{r0}=35, 50, 60, 75\%$ に作成した京都川砂の未打撃地盤のコーン貫入抵抗 q_{c0} を示した。図-5の5点の試験位置で q_{c0} を求めている。 $q_{c0}-z$ 関係はやや上に凸な曲線で、試験位置によって少し差が見られるので、以下に述べる相対密度の算出は試験位置毎の $q_{c0}-z$ 関係を用いた。

図-15から深度 $z=1, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18$ m位置の q_{c0} 値を読み取り、試験位置毎に $\log q_c$ と D_r の関係に整理する。図-16に代表例として打撃予定点(0m)における $\log q_c-D_r$ 関係を示した。これはほぼ直線関係にあり、深い位置ほどその傾きは大きい。これは他の試験位置でも同様であった。そこ

で、この関係を c_1 と c_2 を定数として次式で表す。

$$c_1 D_r = \log(q_c - c_2) \quad (1)$$

深度 z をパラメーターにして定数 c_1, c_2 を最小2乗法によって決定した。図-15の q_{c0} 値から式(1)によって求めた D_r-z 関係を図-17に示した。浅い部分で少しばらつきはあるが、かなり良く各 D_{r0} 値を再現している。この手法を用いて打撃後に測定した q_c の分布から D_r の分布を求め、初期値 D_{r0} を差し引いて相対密度増加量 ΔD_r を算出した。

(3) コーン貫入抵抗から得られた密度増加域

(2)で示した手法で求めた打撃仕様 [20t, 20m, N20]における相対密度増加量 ΔD_r の深度分布と打撃

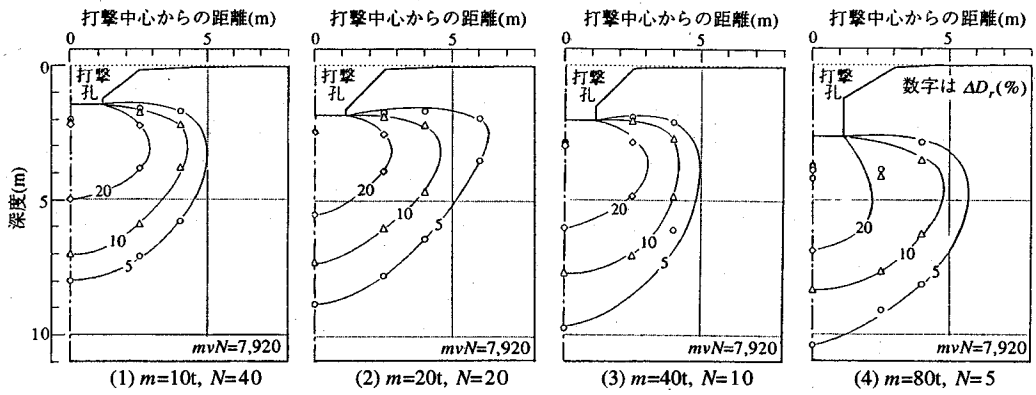


図-19 H 一定・ m 変化シリーズの q_c から求めた相対密度増加量分布 ($H=20\text{m}$, $A=4\text{m}^2$, $E_f=8,000\text{tfm}$)

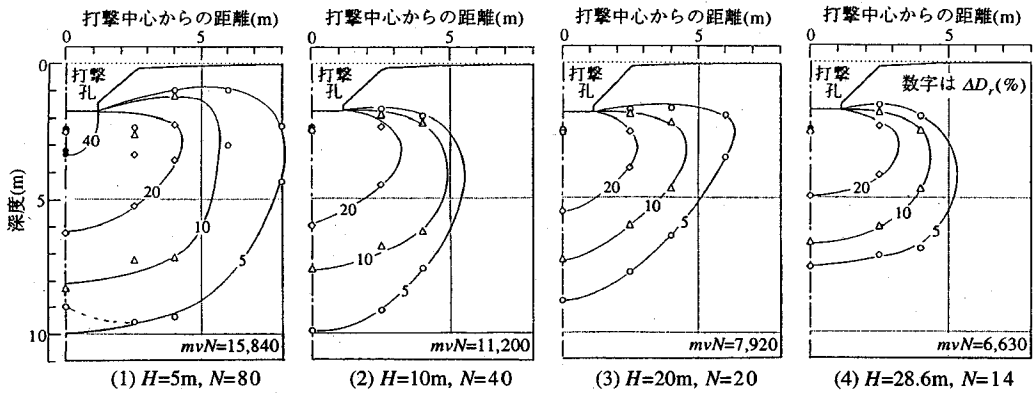


図-20 m 一定・ H 変化シリーズの q_c から求めた相対密度増加量分布 ($m=20\text{t}$, $A=4\text{m}^2$, $E_f=8,000\text{tfm}$)

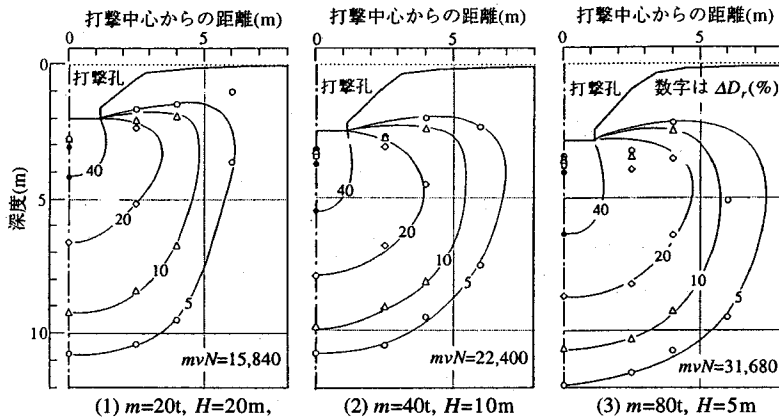


図-21 E_f 一定シリーズの q_c から求めた相対密度増加量分布 ($N=40$, $A=4\text{m}^2$, $E_f=16,000\text{tfm}$)

点からの距離の関係を図-18に示した。各試験位置とも ΔD_r-z 関係は $z=10\text{m}$ 以深ではほぼ0に収束している。浅い部分で ΔD_r が負値となっているのは、打撃による地盤面の沈下によって q_c 値が同じ深度の初期地盤よりも小さくなるためである（深度 z は打撃前の地盤面を基準にしている）。各ケースともこのような整理を行い、コーン貫入試験位置毎の ΔD_r-z 関係から $\Delta D_r=5, 10, 20\%$ の出現する深度を読み取って密度増加域を求めた。

図-19~21に各シリーズの E_f が等しいケースの相対密度増加量分布を示した。図中には総運動量 mvN を書き入れている。いずれのケースにおいても打撃孔底を上面にしたおわん型の分布形となっている。図-7~9に示した地盤変形から求めた相対密度増加量の分布形とやや異なるのは、前述したように浅い部分で ΔD_r が過小評価されるためである。

図-19の H 一定・ m 変化シリーズの4ケースは mvN が等しいが、 m の大きい場合に等 ΔD_r 線の深度方向

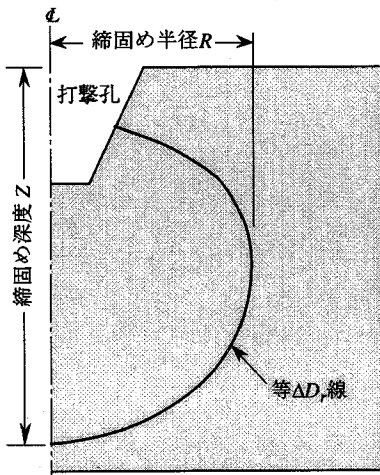


図-22 締固め範囲の定義

の拡がり大きい。側方への拡がり方には一定の傾向が見られない。図-20の m 一定・ H 変化シリーズでは、 mvN が大きくなる (H を小さくして N を大きくする) 仕様ほど等 ΔD_r 線の拡がり大きい。図-21の E_i 一定シリーズにおいても、 mvN が大きくなる (H を小さくして m を大きくする) 仕様ほど等 ΔD_r 線の拡がり大きい。これらの傾向は3.(1)で示した地盤変形から求めた ΔD_r の分布傾向と同じである。

5. 締固め範囲と運動量の関係

図-22に示すように、単点打撃における締固めの及ぶ範囲を等相対密度増加量 ΔD_r 線の最大深度と最大半径で定義し、それぞれ締固め深度 Z 、締固め半径 R と呼ぶ⁹⁾。また、締固め度合いを $\Delta D_r=5, 10, 20, 40\%$ に選び、地盤変形および貫入抵抗から求めた ΔD_r 分布からそれぞれ (Z_5, R_5) 、 (Z_{10}, R_{10}) 、 (Z_{20}, R_{20}) 、 (Z_{40}, R_{40}) を読み取った。ただし、地盤変形からの (Z_5, R_5) と貫入抵抗からの (Z_{40}, R_{40}) は求められなかった。

(1) 締固め範囲に与える打撃仕様の影響

図-23に京都川砂 $D_{r0}=35\%$ の全ケースの地盤変形から求めた締固め範囲と総打撃エネルギー E_i の対数の関係を示した。 $\log E_i$ に対して Z, R とも直線関係が成り立つものの、 E_i が同じでも打撃仕様により Z, R に1~2mの幅がある。これは前述した m 一定・ H 変化シリーズ (図-8, 図-20) や E_i 一定シリーズ (図-9, 図-21) のように、 E_i が同じでも密度増加域が異なるためである。

図-24は同じ京都川砂 $D_{r0}=35\%$ の全ケースの地盤変形から求めた締固め範囲と総運動量 mvN の対数

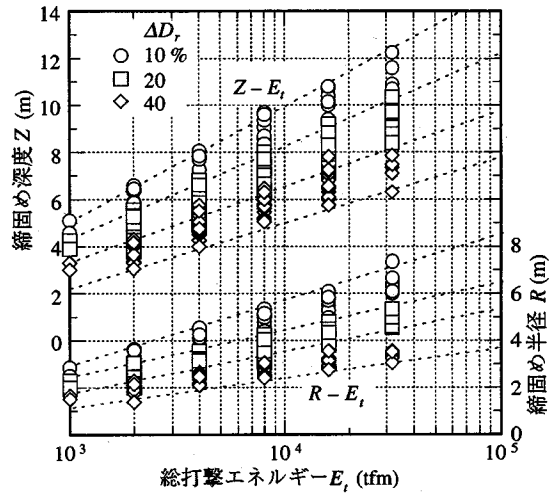


図-23 地盤変形から求めた締固め範囲と総打撃エネルギーの関係 (京都川砂 $D_{r0}=35\%$)

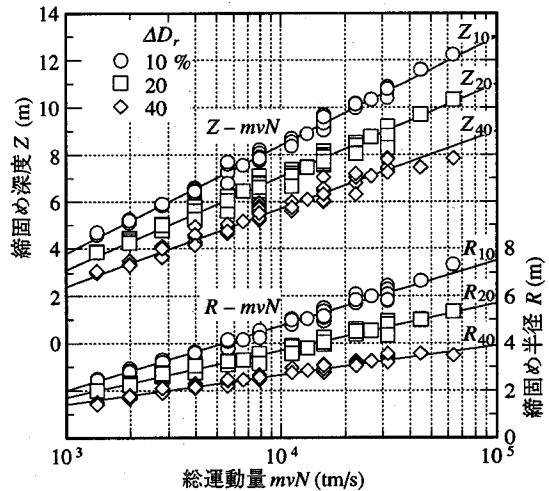


図-24 地盤変形から求めた締固め範囲と総運動量の関係 (京都川砂 $D_{r0}=35\%$)

表-5 式(2), (3)の定数の値

締固め度合い ΔD_r (%)	締固め深度 Z		締固め半径 R	
	a_z	b_z	a_R	b_R
(5)	(-11.25)	(5.25)	(-8.20)	(3.50)
10	-10.00	4.60	-6.25	2.75
20	-8.75	3.95	-4.30	2.00
40	-7.50	3.30	-2.35	1.25

$\Delta D_r=5\%$ の()内の定数は推定値

の関係で、 $\log(mvN)$ に対して Z, R とも ΔD_r 毎に直線関係にあり、打撃仕様によらず狭い幅に収まっている。図には次式による近似直線を書き入れている。

$$Z = a_z + b_z \log(mvN) \quad (2)$$

$$R = a_R + b_R \log(mvN) \quad (3)$$

ここに a_z, b_z, a_R, b_R は定数である。表-5に ΔD_r

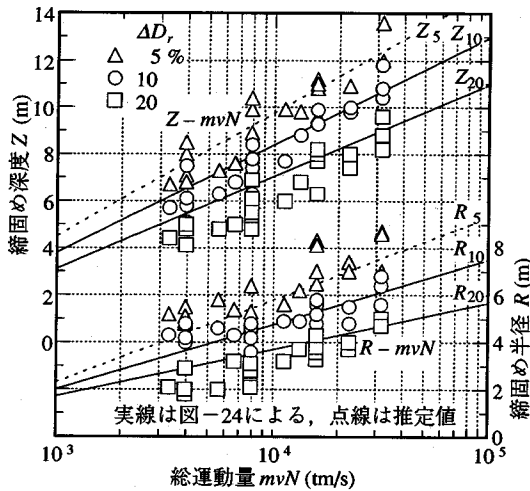


図-25 コーン貫入抵抗から求めた締固め範囲と総運動量の関係 (京都川砂 $D_{0}=35\%$)

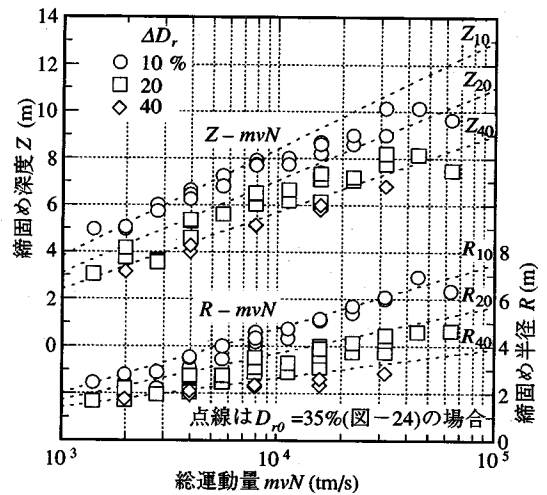


図-27 初期地盤密度 $D_{0}=50\%$ に対する締固め範囲と総運動量の関係 (京都川砂)

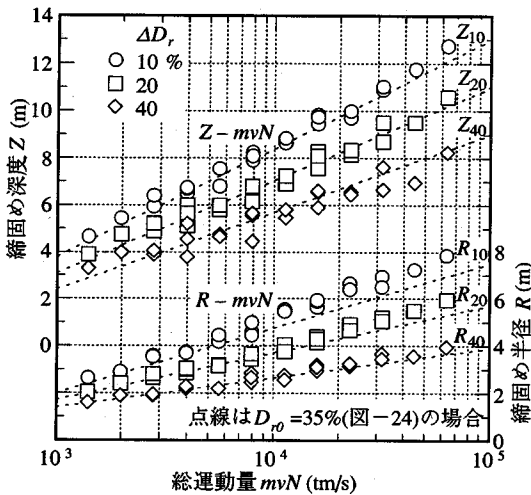


図-26 初期地盤密度 $D_{0}=25\%$ に対する締固め範囲と総運動量の関係 (京都川砂)

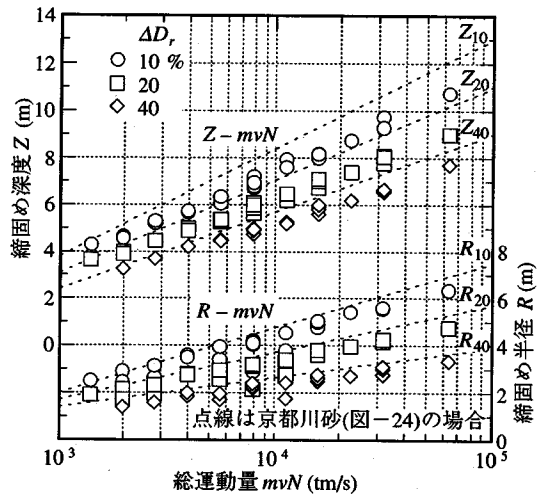


図-28 生駒まさ土に対する締固め範囲と総運動量の関係 ($D_{0}=35\%$)

別の定数をまとめた。 ΔD_r 毎に $Z-\log(mvN)$, $R-\log(mvN)$ が等間隔となったので、 $\Delta D_r=5\%$ の場合の外挿値を推定値として表に加えた。

図-25 に京都川砂 $D_{0}=35\%$ の全ケースの貫入抵抗から求めた締固め範囲と $\log(mvN)$ の関係を示した。 図には図-24 の近似直線を書き入れている ($\Delta D_r=5\%$ の場合は上記の推定値)。 地盤変形から得たものに比べてばらつきが大きい、両者は比較的良く一致している ($\Delta D_r=20\%$ における値がやや低いのは前述した浅い部分における ΔD_r の過小評価によるものと考えられる)。

以上から、文献 3) で示した地盤圧縮量と同様に、打撃仕様によらず締固め範囲は総運動量に強く依存するといえる。 図-24 によって、与える総運動量が

ら締固め度合いに応じて締固め範囲を推定することが可能である。

(2) 締固め範囲に与える地盤密度の影響

図-26, 27 に京都川砂のそれぞれ $D_{0}=25, 50\%$ 地盤に対する締固め範囲と $\log(mvN)$ の関係を示した ($D_{0}=50\%$ 地盤の Z_{40}, R_{40} の一部は求められなかった)。 図中には図-24 における $D_{0}=35\%$ 地盤の近似直線を書き入れている。 $D_{0}=25, 50\%$ 地盤の場合も、 ΔD_r 毎の Z と R は $\log(mvN)$ に対して直線関係にあり、打撃仕様によらず狭い幅におさまっている。 $D_{0}=25\%$ 地盤の Z と R を $D_{0}=35\%$ 地盤と比較すると、 Z はあまり変わらないが、 R はやや大きい。 $D_{0}=50\%$ 地盤では $D_{0}=35\%$ 地盤に比べて R はあまり

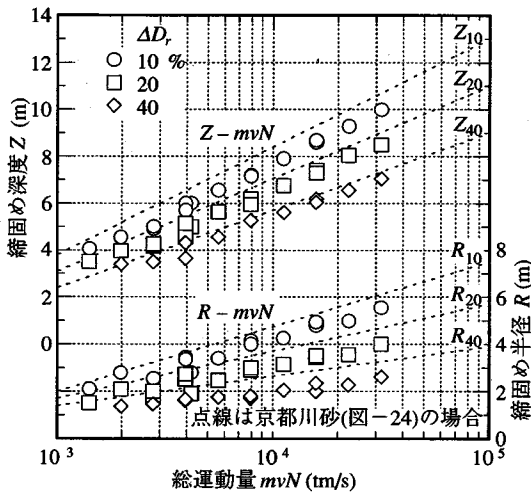


図-29 亀岡まさ土に対する締固め範囲と総運動量の関係 ($D_{r0}=35\%$)

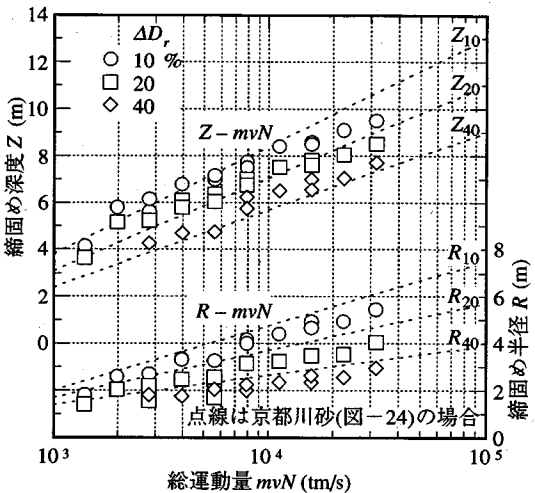


図-30 猪名川まさ土に対する締固め範囲と総運動量の関係 ($D_{r0}=35\%$)

変わらないが、Z はやや小さい。したがって、今回行った初期地盤密度 $D_{r0}=25\sim 50\%$ の範囲では締固め範囲に与える地盤密度の影響はあまり大きくないといえる。

(3) 締固め範囲に与える土の種類の影響

図-28~30 にそれぞれ生駒、亀岡、猪名川まさ土に対する締固め範囲と $\log(mvN)$ の関係を示した。図中には図-24 における京都川砂の近似直線を書き入れている。これらの土に対しても ΔD_r 毎の Z と R は $\log(mvN)$ に対して直線関係にあり、打撃仕様によらず狭い幅におさまっている。京都川砂に比べると、Z は猪名川まさ土が同程度、亀岡、生駒まさ土はやや小さい。R は生駒まさ土が同程度で、猪名川、亀岡まさ土はやや小さい。しかし Z、R ともに 1m 程度の幅に収まっている。したがって地盤密度を相対密度で評価すれば、今回の用いた土の種類の間では締固め範囲に与える土の種類の影響はあまり大きくないといえる。

6. まとめ

重錘落下による締固め範囲を遠心模型実験により地盤変形とコーン貫入抵抗変化から調べた。その結果、以下の結論が得られた。

1) 半円柱模型による地盤変形から求めた密度増加域は、打撃とともに打撃孔底から球根状に拡がり、総打撃エネルギーが同じでも総運動量がいほど拡がり大きい。

2) 四角柱模型によるコーン貫入抵抗から算出した密度増加域も同様に、総打撃エネルギーが同じで

も総運動量がいほど拡がり大きい。

3) 締固め範囲を一定の相対密度増加量を生じる深度と半径で定義すると、両者とも打撃仕様によらず、総運動量の対数に対して直線的に増加する。

4) 今回扱った初期地盤の相対密度 $D_{r0}=25\sim 50\%$ の範囲においては、締固め範囲に与える初期地盤密度の影響は小さい。

5) 今回扱った土の種類の間では、同じ初期相対密度であれば、締固め範囲に与える土の種類の影響は小さい。

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、打撃エネルギーによる管理を基本とする現在の設計法は必ずしも適切な手法とはいえない。本論文では単点打撃における締固め範囲を総運動量によって推定する方法を示したが、実際の施工は複数の打撃点を有するものであり、より複雑な条件となる。今後、打撃の重ね合わせ効果を調べ、一般的な改良範囲の推定方法にまとめていきたい。

謝辞：遠心模型実験に協力された山崎康弘氏（元大阪市立大学大学院生，現(株)大成建設），岩崎哲氏（元大阪市立大学大学院生，現(株)西松建設），川出幸司氏（元大阪市立大学学生，現東急建設(株)），住武人氏（大阪市立大学大学院生）に謝意を表します。

参考文献

- 高田直俊，大島昭彦，渡辺篤，池田通陽：重錘落下締固め工法の現場実験と遠心模型実験 - 地盤変形，土圧，強度増加 -，土木学会論文集，No.469/III-23, pp.127~134, 1993.
- 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 田中善広, 大島昭彦, 高田直俊, 山崎康弘: 重錘落下締固め工法における打撃仕様と密度増加域 (第2報), 土木学会第48回年次学術講演会, III-331, 1993.
- 6) 大島昭彦, 高田直俊, 岩崎哲, 川出幸司: 重錘落下締固め工法における土の種類と改良範囲, 土木学会第50回年次学術講演会, III-379, 1995.
- 7) 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打撃仕様と密度増加域, 第28回土質工学会研究発表会, pp.2355~2358, 1993.
- 8) 土谷尚: 動圧密工法による砂質土地盤の締固めに関する研究, 東京大学学位請求論文, 1995.
- 9) 大島昭彦, 高田直俊, 山崎康弘, 田中善広: 重錘落下締固めにおける密度増加域と運動量の関係, 土木学会第48回年次学術講演会, III-330, 1993.
- (1996.1.26 受付)

**RELATION BETWEEN COMPACTED AREA AND RAM MOMENTUM
BY HEAVY TAMPING
- DENSITY AND STRENGTH INCREASES DUE TO SINGLE POINT TAMPING -**

Akihiko OSHIMA, Naotoshi TAKADA and Yoshihiro TANAKA

This paper presents model tests of heavy tamping focusing on the compacted area and strength increase by ram blows in the 100g centrifugal acceleration field in relation with the governing factors: ram mass, blow height and number of blows. The model materials are sandy soil passing the 2 mm sieve. The compacted area is evaluated both by the increases of volumetric strain and cone penetration resistance. Main conclusions are: 1) the compacted area is governed by the total ram momentum rather than the total kinetic energy of the ram, 2) the depth and radius of the compacted area show linear relationships with the logarithm of the ram momentum, 3) the compacted area is not much influenced by the initial ground density and kind of soils used.