U.D.C 624.13

# 室内締固め供試体作製時における鋼製モールド内の締固め層別の撃力が供試体の鉛直密度分布に与える影響

冨田　佑一*

**要　約：** 筆者は鋼製モールド内に層別に土試料を投入し締固めエネルギーを規定して作製した室内締固め供試体の鉛直深度方向の乾燥密度および飽和度の違いを調べ，この違いが強度変形特性に影響を与えることを示唆する結果を得ている。本論文は室内で締固めエネルギーを規定して作製した供試体が有する物性の非一様性が複数の層を重ねて締め固める作製方法に起因することを仮定し，締固めランマーによる供試体の締固め層別の撃力測定と締固め供試体の鉛直深度別の乾燥密度分布評価を実施しそれらの関連を調べた。その結果，締固め供試体の締固め時のモールド下面で測定した平均撃力は，締固め層が上になる程小さくなることが確認された。これは締固め層が上になる程，締固め時にランマーが締固め層に貫入する時間が増加し，等しい力積で締め固めていても平均撃力が低下する為であり，層を積み重ねながら一定回数のランマーを落下させて締め固める供試体作製方法特有の傾向であることを示した。また，締め固めた供試体の鉛直深度方向の乾燥密度分布と締固め時の平均撃力の関係は同じ締固めエネルギーレベルにおいて含水状態が変わっても相関性があることを確認した。

**ｷｰﾜｰﾄﾞ：** 砂質土，締固め，非一様性，撃力

**目　次：**

1. はじめに
2. 使用材料と供試体作製方法
3. 撃力測定方法
4. 実験結果
5. まとめ

## 1. はじめに

筆者は現場で締め固めた土の鉛直深度方向の乾燥密度や飽和度の非一様性について調べてきた[1), 2)]が，この過程で一様に作製したと考えていた突固め法で5層に分けて作製する室内締固め供試体においても，締固めエネルギーが大きい程，供試体上部と下部の乾燥密度の差が生じる傾向にあることを確認している。図1に室内5層締固め供試体の密度分布の概念図，図2に供試体平均乾燥密度と上部と下部の局所乾燥密度の概念図を，表1に文献1），2）で得た締固めエネルギー別の供試体平均密度に対する上部と下部の密度の相対偏差を示す。この結果は5層に分けて同じランマーで同じ回数を締め固めても，作製した供試体の上部と下部で密度差が生じること，また締固めエネルギーが大きいほどこの密度差は大きくなることを示している。本論文はこの理由について突固め法の締固め機構に着目して考察する。

突固め法はモールド内の試料にランマーの重錘を鉛直方向に落下させ，ランマーが試料に与える撃力で各層を締め固める方法である。ここで，撃力とは衝突や打撃における力を指す。谷口ら[3)]は，釘打ち作業を科学的に分析することを目的に，打撃装置による自由落下打撃実験及び強度試験機による釘の押込み実験を行っている。その結果，打撃エネルギーと撃力及び釘の進入量との間には，正の相関性が認められることを確認している。また，打撃エネルギー一定条件で繰り返し打撃する場合，釘の進入に伴って母材との摩擦が増加するため撃力は増加するが，打撃により釘に作用した力積はほぼ一定であることを明らかにしている。そこでモールド内の締固め土も締固め層別に締め固め時の撃力が異なることを仮定し，締固め条件別に締固めモールドに生じる撃力測定を実施した。

## 2. 使用材料と供試体作製方法

試料に用いた稲城砂の粒径加積曲線及び物性を図3に示す。図4中の破線で示す曲線群は突固めによる土の締固め試験（JIS A1210）で得た締固め曲線である。締固め方法はE-c法（$4.5E_c$），A-c法（$1.0E_c$）及びA-c法の突き固め回数を1/5倍（突固め回数$N_B=5$）にした方法（$0.2E_c$）の3種類である。

撃力測定に用いる供試体は試料の含水状態及び質量を調整し，$\varphi$100 mm×$h$200 mmの鋼製モールド内に5層に均等に分けて投入し，所定の締固めエネルギーとなるよう突固め回数を調整して作製する。

図4中のプロットデータ（$w$, $\rho_d$）は，撃力測定試験に用いた$\varphi$100 mm×$h$200 mmの作製供試体の全体平均（ave）である。文献1）と同様に同図中には供試体の全体平均の各プロットに対して，上部（upper）と下部（lower）の局所的な土の状態（$w$, $\rho_d$）を示している。局所的な乾燥密度$\rho_d$は作製後の供試体を上部と下部の2分割にして得た供試体上部の乾燥密度$(\rho_d)_{upper}$と下部の乾燥密度$(\rho_d)_{lower}$の測定試験結果である。締固めエネルギーは

*技術研究所　社会基盤技術開発部　土木材料・地盤グループ

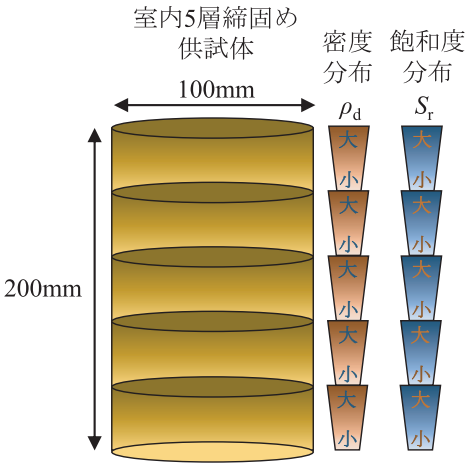


図 1　室内 5 層締固め供試体の密度分布概念図

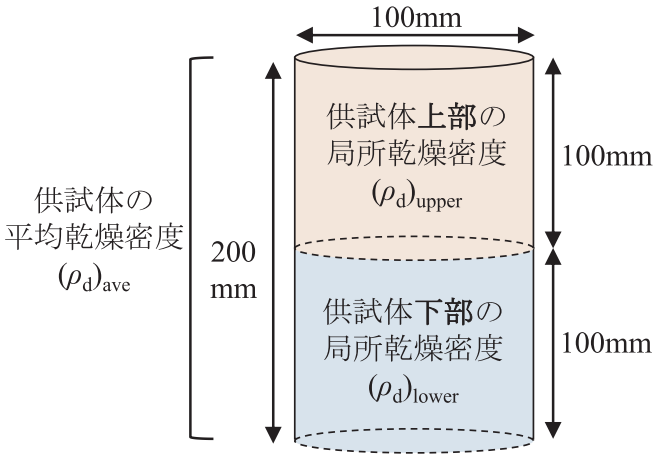


図 2　供試体平均乾燥密度と上部と下部の局所乾燥密度

表 1　供試体平均密度に対する上部と下部の相対偏差[1), 2)] を修正

| 締固めエネルギーレベル | | $4.5E_c$ | $1.0E_c$ | $0.2E_c$ |
|---|---|---|---|---|
| 密度の相対偏差 | 供試体上部 | -0.81% | -0.21% | -0.08% |
| | 供試体下部 | 0.78% | 0.18% | 0.04% |

※密度の相対偏差　上部：$(\rho_d)_{upper}/(\rho_d)_{ave}-1$，　下部：$(\rho_d)_{lower}/(\rho_d)_{ave}-1$

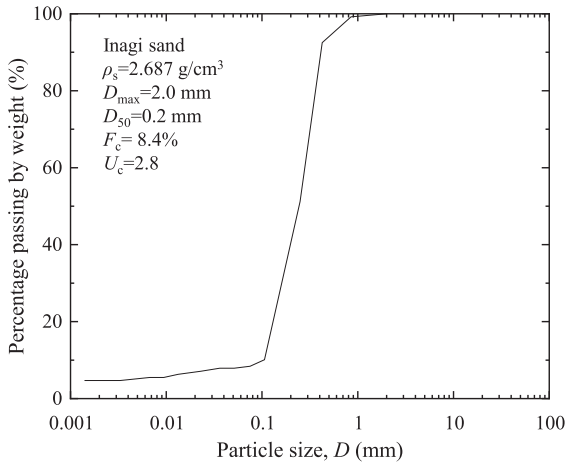


図 3　稲城砂の粒径加積曲線

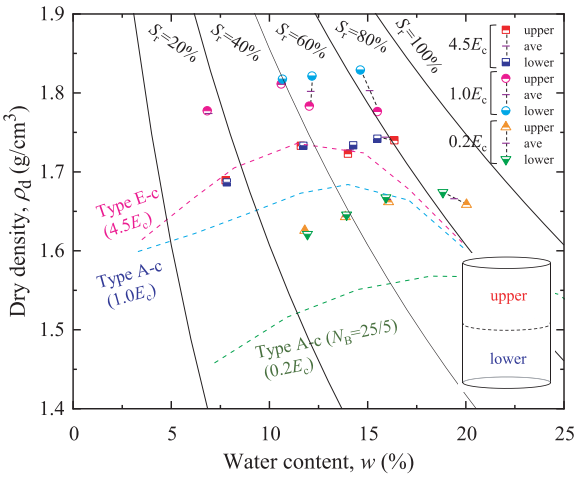


図 4　締固め曲線と供試体条件

$4.5E_c$，$1.0E_c$ 及び $0.2E_c$ である。作製した各供試体の平均乾燥密度の範囲は $(\rho_d)_{ave}$ = 1.623～1.803 g/cm³，平均飽和度 $(S_r)_{ave}$ = 34.8～83.5% である。

### 3. 撃力測定方法

突固め法で作製する室内締固め供試体は 5 層それぞれで，ランマーの重量，ランマーの落下高さ，1 層あたりの突固め回数が一定である。しかしながら，谷口ら[3)] が示した知見と同様に土においても締固め土の硬さは変化することが予想されるため，ランマーの落下時の撃力が常に一定であるとは考えにくい。そこで，図 5 に示すように，鋼製モールドの下にロードセル（容量：50 kN）を設置し，動ひずみアンプを通してデータロガー（サンプリング周波数 2.0 kHz）で締固め時の荷重を測定した。供試体作製時の

突き固めにより生じる鉛直荷重の時刻歴を測定し，締固め過程における荷重の変化を解析した。また締固め後の供試体の鉛直密度分布を測定することにより，締固め層の位置や突固め回数と締固め作製後の供試体の密度分布との関連を調べた。なお，本試験装置は平面的にモールド中心と荷重計の中心，をダブルナットで一軸線上に固定した構造であるため，締固め時のランマーと試料の接触する鉛直軸中心とモールド中心軸とのずれに伴う荷重の偏心の影響は評価出来ていない。また，本試験装置はおもり等で出来るだけ固定したが，締固め時の衝撃によるモールド及び固定した鉄板の多少のばたつきと，金属接合部間の接触に伴う衝突音が生じており，鋼製モールド下のロードセルがない標準的な室内締固め供試体に比べて多少の締固めエネルギー損失が発生している可能性がある。これらの影響は定量的に評価できていないが，本文ではこれらの影響評価を無視して議論する。

図 6 は試料を入れず，空の鋼製モールド底板を突固め回数 $N_B$＝20 で突き固めた時の鉛直荷重の時刻歴を示す。20 回の突固め中にばらつきはあるが，鉛直荷重 $P_v$＝1.5 kN～1.7 kN 程度を示しており，4.5 kg ランマー（≒44.1 N）が瞬間的に 34 倍～39 倍もの値を示している。締固め中の鉛直荷重のばらつきが生じているがこれは，JIS の規定に従って締固め 1 サイクルにおける突固め位置をモールドの内縁に沿って $N_B$＝5～6，モールドの中心で 1 回としている為，モールド中心からの偏心やランマーの傾斜による偏心等が影響している可能性がある。また，突固め回数の増加に伴い，無載荷時の鉛直荷重が 0 kN から－0.2 kN 程度ドリフトしていることが確認された。このドリフトは撃力に伴って生じており，詳しい原因は不明である。以降の試験に際しては，測定を複数回に分け，鉛直荷重を 0 kN に戻す（以降，ドリフト修正と称す。）ことにした。図 7 は空の鋼製モールド内で突固めして測定した鉛直荷重が最大となる波形の拡大図を示す。白抜きの記号は測定値であり，実直線で測定値間を結んでいる。波形はピーク付近でも緩やかな曲線を描いており，サンプリング周波数 2.0 kHz で問題なく測定出来ていることを確認した。

## 4. 実験結果

図 8 は，締固めエネルギー 4.5$E_c$ の供試体作製時の鉛直荷重の時刻歴で，締固め層数 $N_L$＝1st～5th 内の最下層の 1st を示している。また図 9 は 4 層目にあたる 4th を示している。いずれの締固め層のケースも突固め回数 $N_B$＝1～6，$N_B$＝7～20，$N_B$＝21～40 の三つのグループに分け，鉛直荷重のドリフト修正をしている。締固め層数 $N_L$＝1st，4th は共通して突固め回数 $N_B$＝1～6 は鉛直荷重が増加している。また，突固め回数 $N_B$＝7～40 はばらつきを含むが鉛直荷重が一定値に収束傾向である。これは投入した試料が締め固められて硬くなることにより，瞬間的な反力が大きくなっていることを意味する。また，$N_L$＝1st では図 6 と同様に $P_v$＝1.5 kN～1.7 kN 程度であるのに対し，$N_L$＝4th では $P_v$＝1.5 kN に達しておらず，各突き固め時の最大

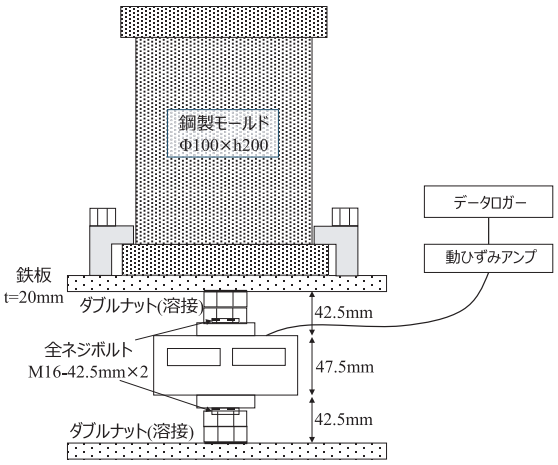


図 5　供試体締固め作製時の撃力測定システム

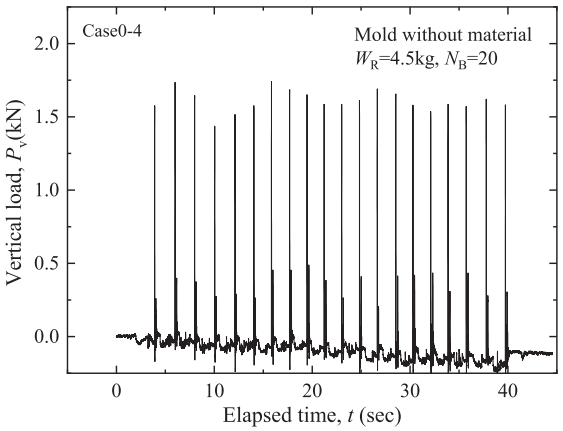


図 6　鋼製モールド内試料なしの締固め荷重時刻歴

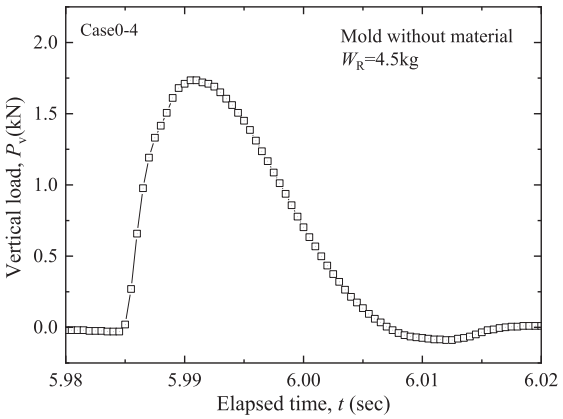


図 7　鋼製モールド内試料なしの締固め荷重時刻歴拡大

荷重が全体的に小さい傾向であった。

図 10 は，各層の鉛直荷重が最大時となる波形を重ねた時刻歴とその拡大図を示し，それぞれの載荷開始を $t=0$ sec として整理している。図 7 で示したモールドのみの波形も示しているが，鉛直荷重の最大値が最も大きいのはモールドのみのケースであった。鉛直荷重の最大値が大きいのは，モールドのみの次は，$N_L$＝1st（1 層目），それ以降は $N_L$＝2nd（2 層目），$N_L$＝3rd（3 層目），$N_L$＝4th（4 層目），$N_L$＝5th（5 層目）と層数の順番であった。また，鉛直荷重の最大値が小さい程，ピークまで要する時間が大きい傾向であることもわかる。大島，高田[4] は，重錘落下締固めにおける締固め機構の分析研究により，重錘落下による締固め貫入量を下式に基づいて整理することで，締固め効果は打撃エネルギーよりも重錘が打撃時に持っている運動量に依存することを示している。

質量 $m$ の重錘が落下高 $H$ から自由落下し，衝突速度 $v_0$ で地盤に衝突した後，地盤に貫入し，時間 $t_f$ 後に制止する場合を考えた時，運動量 $m_{v0}$ は重錘が静止するまでの力積 $I$ に等しく一定値であるから，次式が成り立つ。

$$I=\int_0^{t_f} F(t)\,dt=-mv_0 \qquad (1)$$

ここで，$F$（$t$）が撃力である。同じ重錘を使って同じ落下高で突固めた際に，締固め層数が増加すると鉛直荷重の最大値は減少している。しかし，それぞれの力積が等しいことからピークまで要する時間が大きくなっており，これは重錘が接触地盤へ貫入する時間が増加しているためである。この結果は締固め層の上層は下層に比べてわずかに軟らかいことを意味する。すなわち，下層は鋼製モールド底板上の薄層である為に比較的剛性が高く，上層ほど下層を含めた締固め層の剛性がわずかに低くなる為，締固め時に重錘が接触地盤へ貫入する時間が増加し，一定の力積で締め固めていても撃力は低下する。

図 11 は，締固め層 $N_L$＝1st～5th までそれぞれの鉛直荷重～突固め回数の関係を示す。記号はぞれぞれの締固め層における突固め毎のピーク値を示しており，破線はそれぞれの締固め層における全てのピークの平均値を示す。鉛直荷重のピーク値は $N_B$＝6～10 程度にかけて増加し，それ以降収束傾向にあることが確認されるが，上層になっても下層とほぼ同等の値であった。また，$N_B$＝6～10 以降は，ばらつきはあるが相対的に下層の方が上層に比べてピーク値が大きい傾向が確認された。ピークの平均値を比較しても，下層が上層に比べて大きい傾向を示している。平均鉛直荷重の最大値（$N_L$＝1st）と最小値（$N_L$＝5th）の差は 0.22 kN であった。これは，下層は下面が堅固なモールドに接して反力を得やすいのに対し，上層は下層の比較的軟らかい締固め土がクッション効果としてランマーの貫入を許し，鉛直荷重のピーク値を低下させていると考えられる。この差は締固めにより試料がある程度硬くなってから生じる差である為，締固め開始から $N_B$＝6～10 付近までは締固め層に関係なく同等のピーク値を示している。つまり，突固め法による締固めは，試料が締め固まるととも

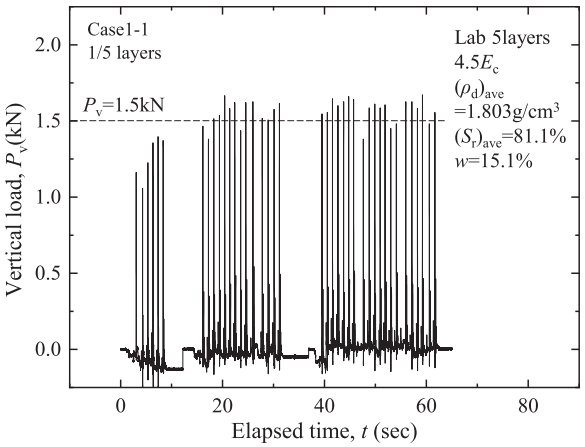


図 8　締固め層 1 層目の締固め荷重時刻歴（4.5$E_c$）

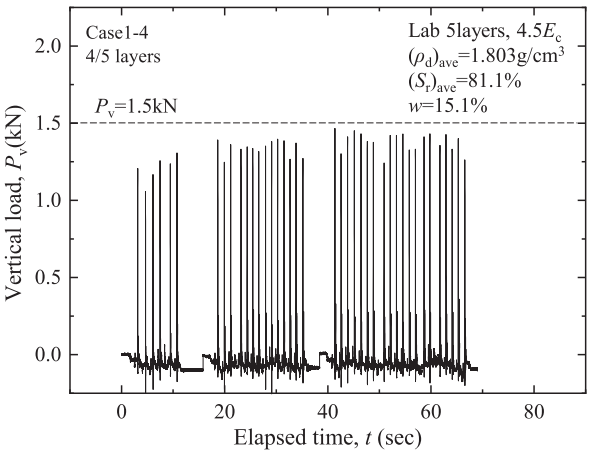


図 9　締固め層 4 層目の締固め荷重時刻歴（4.5$E_c$）

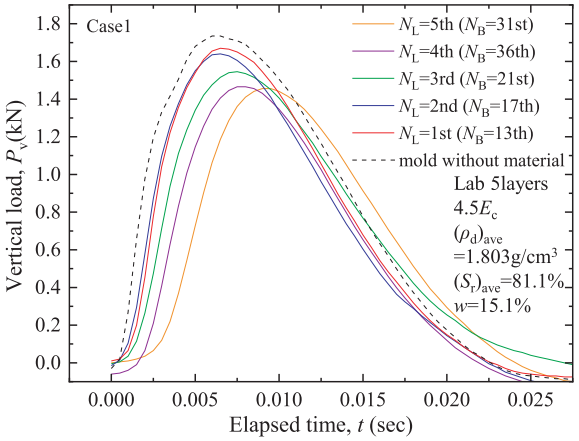


図 10　各締固め層の締固め荷重時刻歴拡大（4.5$E_c$）

に，上層及び下層それぞれの下面の境界条件の違いに起因する平均鉛直荷重（平均撃力）に違いが生じていると考えられる。

次に，供試体作製時の平均撃力と供試体の鉛直密度分布について考察する。上部，下部の 2 パートに分けた模式図を図 12 に示している。これに基づき，平均鉛直荷重は次のようにパート分けした。

$$[(P_v)_{ave}]_{upper}=\frac{40[(P_v)_{ave}]_{NL=1}}{100}+\frac{40[(P_v)_{ave}]_{NL=2}}{100}+\frac{20[(P_v)_{ave}]_{NL=3}}{100} \quad (2)$$

$$[(P_v)_{ave}]_{lower}=\frac{20[(P_v)_{ave}]_{NL=3}}{100}+\frac{40[(P_v)_{ave}]_{NL=4}}{100}+\frac{40[(P_v)_{ave}]_{NL=5}}{100} \quad (3)$$

上部，下部の 2 パートに分けた平均鉛直荷重～局所乾燥密度の関係を図 13 に示す。局所乾燥密度は下部が上部に比べて大きいことは表 1 でも説明したが，飽和度 $S_r$＝35.3% の乾燥側供試体の下部を除き，平均鉛直荷重～局所乾燥密度の関係は 1：2.3 の補助線に沿って比例関係にあることがわかる。乾燥側供試体の下部の乾燥密度が低い原因は詳細には不明であるが湿潤供試体に比べて土粒子が崩れやすく，測定時の誤差が多く含まれている可能性がある。これらのことから，4.5$E_c$ で作製した供試体は上部と下部の乾燥密度の差が大きい傾向であったが，これは突固め法による締固め時の層別の撃力の違いにより生じている可能性があることを確認した。

次に，2.5 kg ランマー（≒24.5 N）で締め固めた供試体の撃力と鉛直密度分布の関係について考察する。図 14 は，締固めエネルギー 1.0$E_c$ の供試体作製時の鉛直荷重の時刻歴で，締固め層数 $N_L$＝1st～5th 内の最下層の 1st を示している。また図 15 は 4 層目にあたる 4th を示している。いずれの締固め層のケースも突固め回数 $N_B$＝1～6，$N_B$＝7～12，$N_B$＝13～24 の三つのグループに分け，鉛直荷重のドリフト修正をしている。締固め層数 $N_L$＝1st～5th は共通して突固め回数 $N_B$＝1～6 は鉛直荷重が増加している。一方で突固め回数 $N_B$＝7～24 はばらつきを含むが鉛直荷重は一定値に収束する傾向を示しており，図 8 と同様に投入した試料が締め固められて，硬くなることにより，瞬間的な反力が大きくなっている。また，図 14 と図 15 の荷重を $P_v$＝0.6 kN を指標に比較すると $N_L$＝1st と $N_L$＝4th では全体的にやや $N_L$＝1st の荷重の方が大きいが，両者の差は明確ではない。

図 16 は，各層の鉛直荷重が最大時のみの波形を重ねた時刻歴の拡大図を示し，各層の波形の載荷開始を $t$＝0 sec として整理している。図中には 2.5 kg ランマーを空のモールド内で落下させた場合の波形も示しているが，鉛直荷重の最大値が最も大きいのはモールドのみのケースである。鉛直荷重の最大値が大きいのは，モールドのみの次に $N_L$＝1st（1 層目）であり，それ以降は $N_L$＝2nd（2 層目），$N_L$＝3rd（3 層目）の順番であり，$N_L$＝4th（4 層目）と $N_L$＝5th（5 層目）はほぼ同等であった。また，鉛直荷重の最大値が小さい程，ピークまで要する時間が大きい傾向であることも 4.5$E_c$ での測定結果と同じであった。

図 17 は，締固め層 $N_L$＝1st～5th までそれぞれの鉛直荷

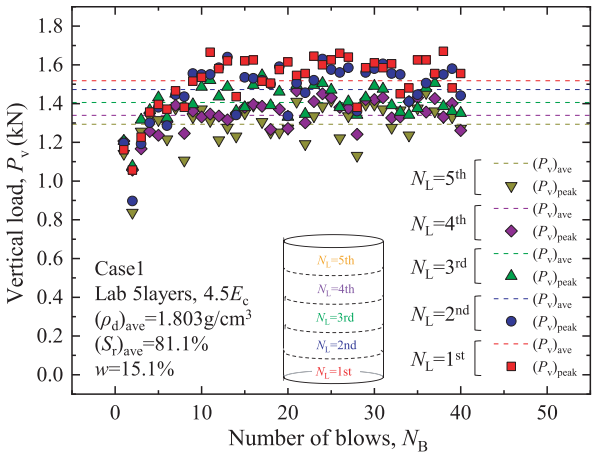


図 11　鉛直荷重～突固め回数の関係（4.5$E_c$）

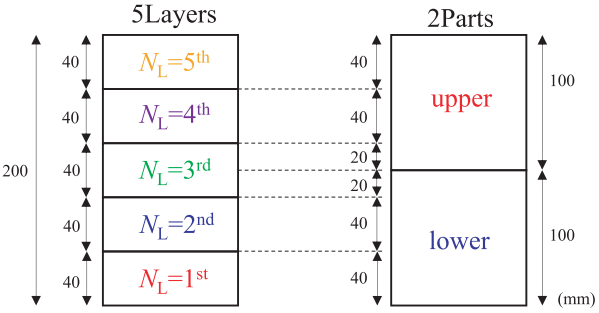


図 12　供試体作製時の締固め層と密度測定時の上下部模式図

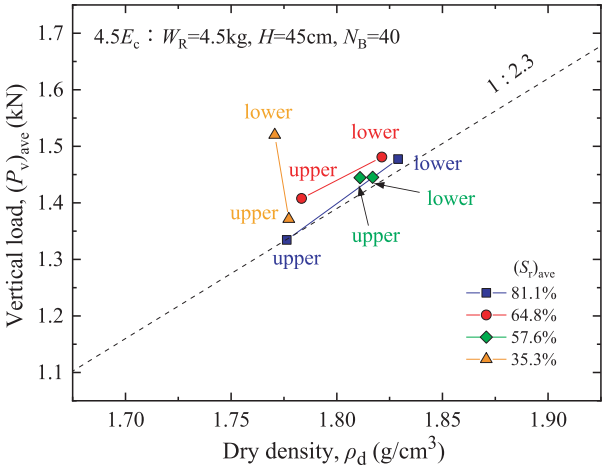


図 13　平均鉛直荷重～局所乾燥密度の関係（4.5$E_c$）

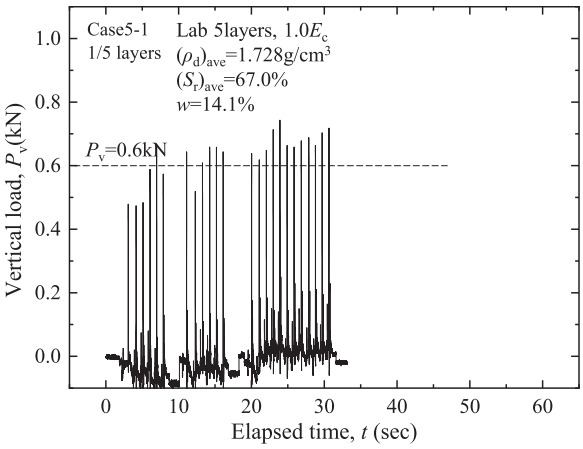


図 14　締固め層 1 層目の締固め荷重時刻歴（1.0$E_c$）

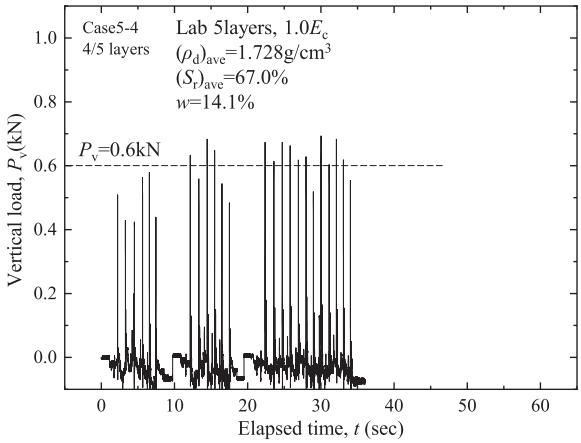


図 15　締固め層 4 層目の締固め荷重時刻歴（1.0$E_c$）

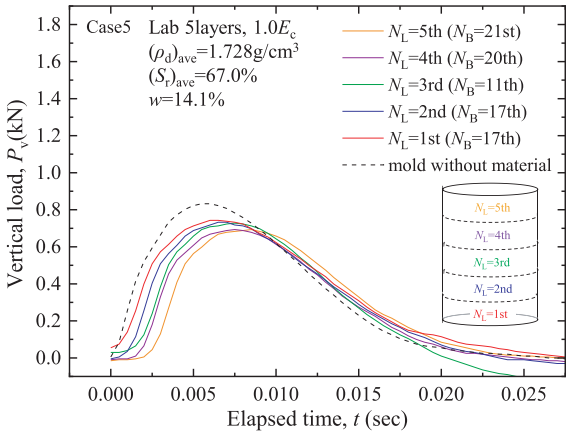


図 16　各締固め層の締固め荷重時刻歴拡大（1.0$E_c$）

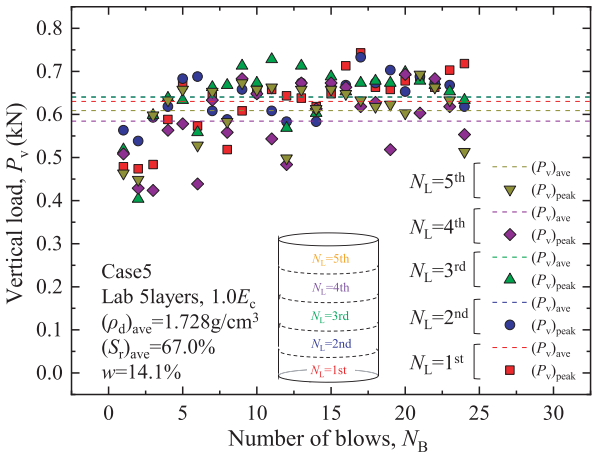


図 17　鉛直荷重～突固め回数の関係（1.0$E_c$）

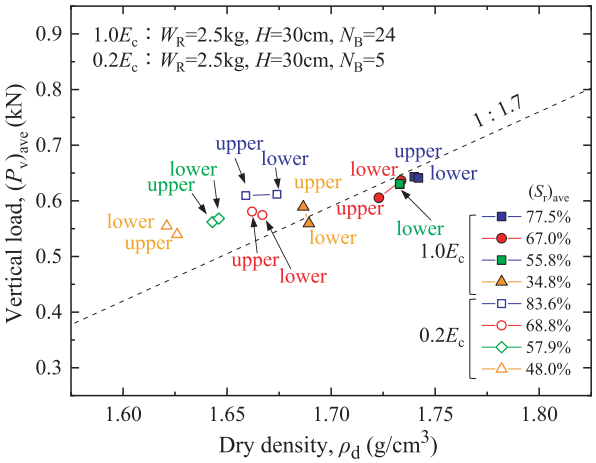


図 18　平均鉛直荷重～局所乾燥密度の関係（1.0$E_c$）

重～突固め回数の関係を示す。記号はぞれぞれの締固め層における突固め毎のピーク値を示しており，破線はそれぞれの締固め層における全てのピークの平均値を示す。鉛直荷重のピーク値は締固め開始から $N_B$=6～10 程度にかけて増加し，それ以降収束傾向にあることが確認されるが，上層と下層に関わらず同等の値であった。また，$N_B$=6～10 以降は，ばらつきはあるが下層の方が上層に比べてピーク値がやや大きい傾向が確認された。ピークの平均値を比較しても，下層が上層に比べてやや大きい傾向を示している。平均鉛直荷重の最大値（$N_L$=2nd）と最小値（$N_L$=4th）の差は 0.06 kN であった。これらの傾向は，4.5$E_c$ での締固め結果と同様に，試料が締め固まるとともに，上層及び下層それぞれの下面の境界条件の違いに起因する平均鉛直荷重（平均撃力）に違いが生じていることを意味するが，その差は 4.5$E_c$ での締固め時に比べて非常に小さいことが確認された。

締固めエネルギー $1.0E_c$ 及び $0.2E_c$ で締固めした供試体について，上部，下部の 2 パートに分けた平均鉛直荷重～局所乾燥密度の関係を図 18 に示す。局所乾燥密度は上下差が非常に小さいが，平均鉛直荷重～局所乾燥密度の関係は締固めエネルギー $1.0E_c$ 及び $0.2E_c$ で締め固めた供試体ともに 1：1.7 の補助線の付近に分布していた。締固めエネルギー $1.0E_c$ 及び $0.2E_c$ で締固めした供試体が近い値を示すのは，共通して同じ 2.5 kg ランマーを使用している影響が大きいと考える。このことから，$1.0E_c$ や $0.2E_c$ で作製した供試体は $4.5E_c$ で作製した供試体に比べて上部と下部の乾燥密度の差が小さい傾向であったが，これは突固め法による締固め時の層別の撃力の違いにより生じていることを示唆する結果を得た。

## 5. まとめ

室内で締め固めた供試体の非一様性について，モールド内の締固め土も締固め層別に締め固め時の剛性が異なることを仮定して締固め条件別に供試体作製時の締固めモールドに生じる撃力を測定し，作製した供試体の上部と下部のパート別に分けた乾燥密度の違いとの関連を調べた。

① 室内締固め供試体の締固め時のモールド下面で測定した平均撃力は，締固め層が上になる程小さくなる。
② 締固め層が上になる程，締固め時に重錘が締固め層に貫入する時間が増加し，等しい力積で締め固めていても平均撃力が低下する。
③ 下層の土は剛な鋼製モールド底板直上で薄く，突固め時の反力が得やすいために比較的撃力が高くなりやすい。その一方で締固め層が上になる程，下層の土が厚くなって突固め時の反力を得にくくなる為，比較的撃力が低くなる。
④ 鉛直深度方向の乾燥密度分布と締固め時の平均撃力分布関係は一定の傾きを有する相関性が認められる。特に $4.5E_c$ で締め固めた供試体は顕著である。

以上より，一様に作製しようとした室内 5 層締固め供試体の鉛直密度分布に締め固め時の層別の平均撃力が影響を与えていることを示した。これは層を積み重ねながら一定回数のランマーを落下させて締め固める供試体作製方法特有の性質であり，各層の土のわずかな密度や剛性の違いによる影響であることを示唆する結果を得た。

**謝　辞**

本論文は筆者が東京大学工学系研究科社会基盤学専攻に在籍し，東京大学古関潤一教授にご指導頂きながらまとめた成果の一部です。末筆ではございますが，感謝の意を申し上げます。

**参考文献**

1）Tomita, Y. and Koseki, J.：Evaluation of non-uniformity of sandy soil specimens compacted in the field and laboratory using triaxial tests, Proc. of 8th international conference on deformation characteristics of geomaterials, ISDCG2023-12, 2023.
2）冨田佑一，古関潤一：報文 現場と室内で締め固めた砂質土の強度変形特性と設計・締固め管理への反映，基礎工，Vol. 50 No. 4 pp. 61-64, 2022.
3）谷口義昭，櫻田航介，吉田誠：げんのうによる釘打ちに関する研究，教育実践研究指導センター研究紀要，第 6 巻，pp. 59-67, 1997.
4）大島昭彦，高田直俊：重錘落下締固めにおける重錘運動量と締固め効果，第 27 回土質工学研究発表会，pp. 2103-2106, 1992.

# EFFECT OF IMPACT FORCE ON VERTICAL DENSITY DISTRIBUTION OF SPECIMEN BY COMPACTION LAYER IN STEEL MOLD DURING PREPARATION OF SPECIMEN IN THE LABORATORY

Y. Tomita

The author has obtained the results of laboratory compaction specimens made by placing soil material in a steel formwork layer by layer and specifying the compaction energy. In this paper, the relationship between the compaction energy and the dry density distribution of the specimens in terms of vertical depth was investigated, assuming that the non-uniformity in the physical properties of specimens prepared in the laboratory at specified compaction energy is caused by the compaction method in which multiple layers of specimens are compacted on top of each other. As a result, it was confirmed that the average impact force measured at the underside of the mold during compaction of the compacted specimens decreased as the compaction layers increased. This is because the time required for the rammer to penetrate the compaction layer becomes longer as the compaction layer becomes upper, and the average impact force becomes smaller even if the same force product is used for compaction. It was also confirmed that, depending on the compaction energy, there is a correlation between the dry density distribution of the compaction sample in the vertical depth direction and the average impact force during compaction.