砂地盤における重錘落下締固め工法に関する室内模型実験

LABORATORY MODEL TESTS ON DYNAMIC CONSOLIDATION
METHOD IN SAND

下平祐司*, 山肩邦男**, 伊藤淳志***, 無津呂大輔****

Yuuji SHIMOHIRA, Kunio YAMAGATA, Atsushi ITO
and Daisuke MUTSURO

Laboratory model tests on Dynamic Consolidation Method in a loose sand was carried out to investigate the impact load - settlement characteristics. The main conclusions are summarized as follows.

- (1) The dynamic settlement characteristics of the ground are shown in the impact load-settlement curve.
- (2) The maximum impact load is proportional to the impact velocity at the first blow. But when blow is repeated, the maximum impact load increases in spite of a fixed impact velocity.
- (3) The maximum impact load is equivalent to the maximum pre-load in the static loading test.
- (4) The soil improvement effect is governed by the maximum impact load and the number of blows.

keywords : soil improvement, tamping, sand, model test, load-settlement curve

地盤改良, 締固め, 砂, 模型実験, 荷重～沈下量曲線

1. 序

軟弱な粗粒土地盤に対する地盤改良工法の一つに、重量数10tfの重錘を数10mの高さから繰り返し自由落下させることにより地盤を締固める重錘落下締固め工法がある。筆者らは、同工法に関する現場実験における地盤の締固め変形状況の観察結果に基づいて、重錘落下時の地盤内最大応力分布の解析法を提案し、現場実測値との比較検討を行った¹⁾。この解析法は、(衝撃荷重の最大値) = (静的極限支持力) という仮定の下で提案したものであるが、重錘落下締固め工法が対象とするようなゆるい砂質系地盤における動的支持力と静的支持力の比較検討を行った事例はみあたらない。また、重錘落下時の衝撃荷重については、衝撃荷重の経時変化に関する検討は文献²⁾などに報告されているが、衝撃荷重～貫入量関係について検討された事例はみあたらない。

以上のことから、重錘落下締固め工法の締固め変形機構を解明するには、衝撃荷重～貫入量関係の特性を把握することが重要と考え、室内模型実験を実施した^{3)～5)}。

実験には、一様なゆるい湿潤砂地盤を作製できる実験土槽を用い、衝撃荷重と貫入量を動的に計測する重錘落下実験ならびに平板載荷試験を実施することとした。本報では、これらの室内模型実験の結果を報告し、衝撃荷重～貫入量関係の特性、衝撃荷重と静的支持力との比較検討および締固め範囲の比較検討を行う。同様の研究として、大島ら^{6)～8)}は、室内実験および現場実験における衝撃荷重の測定を試みているが、検討対象が地表面の1打撃目のみに限られていること、重錘の貫入量を計測していないこと、静的載荷試験を実施していないことなどが本報の実験と異なる。

なお、本論文の内容は、文献5)で中間報告したものに、一部の加筆や修正を行ったものであることをお断りしておく。

2. 実験概要

(1) 実験土槽および実験地盤

* 日本建築総合試験所 研究員・工修

** 関西大学工学部建築学科 教授・工博

*** 関西大学工学部建築学科 専任講師・工博

**** 東急建設 工修

Research Engineer, General Building Research Corp., M. Eng.
Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Kansai Univ.,
Dr. Eng.
Lecturer, Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Kansai Univ.,
Dr. Eng.
Tokyu Construction Corp., M. Eng.

本研究で使用した実験土槽は、図-1に示す内径1480mm、高さ1800mmの鋼製容器のものである⁹⁾。実験地盤の作製は、下部に設けた送排水口から圧力水を送水することによって一旦砂をボイリングさせ、その後3時間自然排水するという方法によった。この方法によって作製した実験地盤の諸元および砂試料（淀川産の川砂）の諸元を表-1および図-2に示す。図-2に示すように、表層部の数mmはボイリングの影響で粒度が細くなっているが、表層部以深については粒度分布にほとんど差は認められない。

作製した実験地盤の強度性状を把握するため、図-3に示すステンレス製のコーンを5mm/secの速度で深度96cmまで貫入させ、コーン貫入抵抗 q_c を深度1cmごとに測定した。コーンの貫入位置は、図-4に示すように実験土槽中心から6cm（ $=0.5D$ ， D ：後述の重錘および平板の直径）ピッチで計21点である。 q_c ～深度 z 曲線群を図-5に、 q_c の分布図（等 q_c 線図）を図-6に示す。 q_c は深度方向に一樣に漸増しているが、水平方向にはほぼ均等とみなしてよからう。

(2) 载荷装置および载荷方法

重錘落下装置を図-7に示す。重錘は、直径 $D=120$ mm、高さ80mmの鋼製で、その底面は粗な表面になるように深さ約1mm、ピッチ約1.4mmの同心円状の溝が刻んである。ガイドロッドは、重錘底面が傾斜して打撃するのを防ぐとともに、非接触レーザー式変位計用のターゲットを取り付けるためのものであり、重錘と一体となって落下する。衝撃荷重 P_d は、重錘上面に垂直に貼付した加速度計（容量： ± 100 g，固有振動数：2kHz）の測定値を用いて以下の(1)式から求めた。

$$P_d = m \alpha(t) \quad \cdots (1)$$

ここに、 m ：重錘部の質量=10kg（重錘，ガイドロッド，ターゲットおよびハンドルの質量の合計）

$\alpha(t)$ ：加速度の測定値（単位：g，静止時を0gとする）

なお、図-7におけるガイドロッドとボールベアリングとの間の摩擦などによるエネルギーロスについては、後述の(2)式による衝突速度と $\alpha(t)$ を積分して求めた衝突速度との差が最大5%であったことから、無視しうるも

図-3 コーンの先端形状

表-1 実験地盤の諸元

湿潤単位体積重量 γ_t	1.488 gf/cm ³
含水比 w	4.2 %
乾燥単位体積重量 γ_d	1.428 gf/cm ³
間隙比 e	0.835
相対密度 D_r	34 %
飽和度 S_r	15 %

図-1 実験土槽

図-2 砂試料の諸元

図-4 コーン貫入試験位置

のと判断した。また、重錘の貫入量は、ガイドロッドに固定したターゲットの動きを非接触レーザー式変位計（容量：80mm，精度：0.18mm）により測定した。重錘の加速度および貫入量の経時変化は、0.5msecのサンプリング間隔で100Hzのローパスフィルターを施して記録した。

平板載荷装置を図-8に示す。平板載荷試験に使用した円形平板は、直径 $D=120\text{mm}$ ，厚さ19mmのステンレス鋼製であり、平板の底面には、先述の重錘底面と同様な溝を刻んでいる。載荷荷重および貫入量は、載荷用ロッド上部のロードセル（容量：2tf，精度：0.5kgf）および載荷用ロッドに固定したターゲットの動きを2本の変位計（容量：100mm，精度：0.05mm）により計測した。平板載荷試験は、1段階35kgfの荷重制御による多サイクル方式で行い、重錘落下実験の場合と同様に貫入量が所定の目標貫入量を越えるまで載荷することとした。荷重の保持時間は、処女荷重階で5分間、履歴荷重階で1分間とした。

なお、各実験終了後は、重錘あるいは平板を取り除いた後に(2)に示した要領でコーン貫入試験を実施した。

図-5 $q_c \sim z$ 曲線群

図-7 重錘落下実験装置図

図-8 平板載荷試験装置図

図-6 q_c の分布図

(3) 実験種類

重錘の落下高さとしては、実験開始時の地表面を基準G.L.としてのG.L.+25cmおよびG.L.+50cm，一打撃ごとに深くなる打撃孔底を基準として、これより+25cmおよび+50cmとする計4種類を設定した。重錘の落下高さがG.L.+25cmおよびG.L.+50cmの場合は、打撃を繰り返して重錘の貫入が進むにつれて衝突面までの落下高さが增大するのに対し、重錘の落下高さが打撃孔底+25cmおよび打撃孔底+50cmの場合は、全打撃を通じて衝突面までの落下高さは一定となる。また、それぞれの落下高さに対して全貫入量の目標を1D，1.5Dおよび2D（ $D=12\text{cm}$ ）と設定した。この全貫入量の目標は、実際の重錘落下締固め工法の現場施工における重錘の全貫入量が(1~2)D程度であることを考慮して設定したものである。

実験種類としては、表-2に示すように、上述の重錘の落下高さおよび目標貫入量を組み合わせた12種類（No.1~12）に加え、目標貫入量を1D，1.5Dおよび2Dとした平板載荷試験3種類（No.13~15），重錘を1Dまで打撃貫入させ、生じた打撃孔底において実施した平板載荷試験2種類（No.16，17）の計17種類である。

表-2 実験種類

実験No.	載荷方法	重錘落下高さ n (回)	目標貫入量 ($\times D$)	打撃回数 n (回)	実測貫入量	
					(cm)	($\times D$)
1	重錘落下	G.L.+50cm	1D	3	14.6	1.22
2			1.5D	5	19.5	1.63
3			2D	8	26.9	2.24
4		打撃孔底+50cm	1D	3	13.9	1.16
5			1.5D	6	19.2	1.60
6			2D	9	26.4	2.20
7		G.L.+25cm	1D	5	13.4	1.12
8			1.5D	8	19.1	1.59
9			2D	13	27.0	2.25
10		打撃孔底+25cm	1D	6	12.5	1.04
11			1.5D	13	19.6	1.63
12			2D	20	26.7	2.23
13	平板載荷	—	1D	—	12.3	1.03
14			1.5D	—	19.7	1.64
15			2D	—	24.5	2.04
16	重錘落下→	G.L.+50cm	1D (重錘) →	3	12.8→26.2	1.07→2.18
17	平板載荷	G.L.+25cm	2D (平板)	5	12.6→24.4	1.05→2.03

註) D：重錘および平板の直径（=12cm）

3. 衝撃荷重～貫入量関係の特性

図-9には、重錘落下実験(No.1～12)における打撃回数 n と貫入量 s との関係を示した。ただし、 n は平方根目盛上にプロットした。文献¹⁰⁾の遠心模型実験の場合と同様に、 $\sqrt{n} \sim s$ 関係には直線関係が認められる。また、落下高さの設定が同一の場合の $\sqrt{n} \sim s$ 関係はほぼ重なっており、実験地盤の再現性が確認できる。

図-10には、目標貫入量 $2D$ の場合の重錘落下実験(No.3, 6, 9, 12)における重錘の衝突速度 v_o と衝撃荷重の最大値 P_{dmax} との関係を示した。ここで、 v_o は次式によって求めた。

$$v_o = \sqrt{2gH} \quad \dots\dots(2)$$

ここに、 g :重力加速度(=980cm/sec²)

H :衝突面までの落下高さ(cm, 重錘落下高さがG.L.+50cmおよびG.L.+25cmの場合は1打撃前までの実測全貫入量を所定落下高さ[50cmおよび25cm]に加えた値)

同図より、①地表面における1打撃目については、大島²⁾が示したように P_{dmax} と v_o の関係は原点を通る比例関係(図中の実線)にあること、②打撃を繰り返した場合は、 $v_o(H)$ が一定の場合(実験No.6およびNo.12)でも P_{dmax} は次第に増大すること、③最終打撃時において、深度および $v_o(H)$ がほぼ相等しい実験No.6(落下高さ:孔底+50cm, $v_o=313$ cm/sec, $z=24.5$ cm)と実験No.9(落下高さ:G.L.+25cm, $v_o=314$ cm/sec, $z=25.3$ cm)では、 P_{dmax} はほぼ同等であることなどが指摘できる。

図-11には、目標貫入量 $2D$ の場合の重錘落下実験(No.3, 6, 9, 12)における1打撃ごとの衝撃荷重 P_d (加速度からの換算値)および貫入量 s の経時変化について、代表的な打撃回数を選んで重ね合わせて示した。同図より、以下のことが指摘できる。①打撃回数が増加するにしたがって、 P_d の作用時間が短くなり、 P_d の最大値 P_{dmax} が大きくなる。② P_d は P_{dmax} に達した後一旦

減少するが、その後再び増大し小さなピーク値(図-11中の↓, 以下"第2ピーク値"と称する)を示している。③第2ピーク値は、初期の打撃ほど明瞭に現れており、その発生時間は、 s が最大となる時間とほぼ一

図-9 $\sqrt{n} \sim s$ 関係図

(1)式による重錘の衝突速度 v_o (cm/sec)

図-10 $P_{dmax} \sim v_o$ 関係図

図-11 $P_d, s \sim t$ 関係図

致している。④打撃回数が増加するにしたがって、 s の最大値の発生時間が早くなり、かつ、リバウンドが大きくなる。

図-12には、目標貫入量2Dの場合の重錘落下実験（No. 3, 6, 9, 12）における衝撃荷重 P_d と貫入量 s との関係を示した。1打撃ごとの $P_d \sim s$ 関係についてみると、 P_d は比較的小さな s で P_{dmax} を示して一旦減少するが、その後再び s とともに増加する傾向にあり、この傾向は初期の打撃ほど明瞭に現れている。また、全体の $P_d \sim s$ 関係についてみると、各打撃時の P_{dmax} を包絡する $P_{dmax} \sim s$ 曲線と P_{dmax} 以後に現れる $P_d \sim s$ 曲線の2曲線が存在するようにみれる。前者の $P_{dmax} \sim s$ 曲線は、重錘の慣性力に対する地盤反力が、後者の $P_d \sim s$ 曲線は、衝撃力による地盤のゆりこみ沈下^(注)・10)に起因する地盤反力の増加傾向が現れたものと考えられる。この地盤のゆりこみ沈下に起因する地盤反力の増加傾向は、1打撃あたりの打撃エネルギーが大きいもの（衝突面までの落下高さが大きいもの）ほど明瞭に現れていることがわかる。

図-13には、図-12に示した4本の $P_d \sim s$ 関係曲線を重ねて示した。同図より、①ゆりこみ沈下に起因する地盤反力の増加傾向（図中の網掛け部分）は、重錘の落

下高さによらずほぼ同様であり、地盤の種類および状態（密度、含水比など）により一義的に決まるものと考えられること、②重錘の1打あたりの貫入量は、打撃が繰り返されるにしたがって次第に減少していることなどがわかる。

以上の図-11～13の傾向から、重錘落下時の衝撃荷重と貫入量の関係は以下であると推察される。打撃の初期においては、衝撃に伴う地盤のゆりこみ沈下が生じやすいため、衝撃荷重の作用時間が長く、また、地盤のゆりこみ沈下が収斂した時点における地盤反力がピーク値として比較的明瞭に現れる。打撃を繰り返すと、地盤が締まってくるため、衝撃荷重の最大値は次第に大きくなり、かつ、貫入量のリバウンドが大きくなっていく。また、ゆりこみ沈下が生じにくくなるため、衝撃荷重の作用時間が短くなり、第2ピーク値が明瞭に現れないようになる。なお、比較的密な地盤においては、 $P_d \sim s$ 関係曲線における上述のゆりこみ沈下の特性を現す部分が減少することを、筆者ら⁴⁾は確認している。

4. 衝撃荷重と静的支持力との比較

図-14には、目標貫入量2Dの場合の平板載荷試験（No.15）の荷重 $P_s \sim$ 沈下量 s 曲線（包絡線）ならびに、重錘落下実験（No. 3, 6, 9, 12）から得た衝撃荷重の最大値 $P_{dmax} \sim$ 貫入量 s 関係を重ねて示した。ここで、

図-12 $P_d \sim s$ 関係図

図-13 $P_d \sim s$ 関係図（一覧）

注) 振動や衝撃によって砂の粒状構造が一時的に破壊して間隙比が減少し、より密な粒状構造が再編成されることに起因する沈下

重錘落下実験における貫入量としては、図-12における各打撃時の P_{dmax} に対応する全貫入量を採用している。落下高さの影響については、打撃孔底+25cmの場合が他の場合と較べて同一貫入量に対する荷重が小さいが、他の落下高さの場合はあまり大きな差は認められない。

図-14 $P_s, P_{dmax} \sim s$ 関係図

また、平板載荷試験の $P_s \sim s$ 関係と比較すると、 s が1D程度までは重錘落下実験の衝撃荷重の最大値が平板載荷試験の荷重を上廻るが、 s が1D以上の範囲では衝撃荷重の最大値が若干下廻っており、両者の大小関係は貫入量により異なる。

図-15には、目標貫入量2Dの場合の重錘落下実験(No. 3, 6, 9, 12)および平板載荷試験(No. 15)終了後に行った地表面沈下量の測定結果を示した。測定値が小さくバラツキが大きい、いずれの場合も周辺地盤は沈下している。図-14の $P_d, P_s \sim s$ 曲線において明瞭な極限荷重が現れていないこと、図-15において全般せん断破壊型の特徴である周辺地盤の隆起が生じていないこと、後述の図-18における周辺地盤の締め固め範囲の分布形から判断すると、本実験の範囲では、載荷方法にかかわらずパンチングせん断破壊型で地盤が破壊したものと考えられる。

図-16には、重錘を1Dまで打撃貫入させ、生じた打撃孔底において平板載荷試験を実施した場合(実験No. 16, 17)の $P_d, P_s \sim s$ 関係を示した。また、図-17には、両実験における平板載荷試験での荷重 $P_s \sim$ 残留沈下量 s_R 、弾性戻り量 s_E 関係を示した。図-16および図-17中には、最終打撃時の P_{dmax} を $\downarrow$ で併記しているが、 s_R は $\downarrow$ 付近から増大しはじめる傾向にあるこ

図-15 地表面沈下量の分布図

図-16 $P_d, P_s \sim s$ 関係図

図-17 $s_R, s_E \sim P_s$ 関係図

と、 s_e も↓付近からわずかながら増大していることが読みとれる。この例から考えて、重錘落下による衝撃荷重の最大値は、静的な载荷における履歴最大荷重に相当するとみてよからう。

5. 締固め効果の比較

図-18には、各実験終了後に行ったコーン貫入試験により得られた q_c から、 q_c の初期値(原地盤での測定値、図-6)を減じて得られた増分 dq_c を、 q_c の初期値で除して得られた q_c の増大率 I_{dq_c} の分布図を示した。同図より、締固め範囲の分布は、文献¹⁾で仮定したように、

図-18 I_{dq_c} の分布図

重錘底面中心から半球状であることがわかる。なお、重錘および平板の底面周辺には q_c の増大がみられないが、この原因としては、重錘あるいは平板を取り除いた際にゆるみが生じた可能性があること、重錘あるいは平板の貫入量（沈下量）に相当する土被りがなくなっていることなどが考えられる。

図-18に基づいて、重錘の貫入の進行にともなう地盤の締固め効果（締固めの範囲および程度）の推移を以下に考察する。重錘の貫入が $1.5D$ から $2D$ に進んだ場合の締固め効果は、落下高さが打撃孔底+25cmの場合が

図-19 $I_{dqc} \sim \Sigma P_{dmax}$ 関係図

図-20 $R_{15} \sim \Sigma P_{dmax}$ 関係図

最も大きく、次にG.L.+25cmの場合が大きい。落下高さが打撃孔底+50cmおよびG.L.+50cmの場合は、明瞭な締固め効果の増大は現れていない。重錘が $1.5D$ から $2D$ まで貫入するのに必要な打撃回数 n は、落下高さが打撃孔底+50cmおよびG.L.+50cmの場合で3回、落下高さがG.L.+25cmの場合で5回、打撃孔底+25cmの場合で7回であって、締固め効果の大小関係と整合している。なお、平板載荷試験の場合は、根入れ長の増加による締固め効果の増大はほとんど現れておらず、ほぼ同等とみなせる。

一方、重錘の貫入が $1D$ から $1.5D$ に進んだ場合の締固め効果は、打撃孔底+25cmの場合が最も小さく、他の落下高さの場合はほぼ同等とみれる。重錘が $1D$ から $1.5D$ まで貫入するのに必要な n は、落下高さが打撃孔底+50cmおよびG.L.+25cmの場合で3回、G.L.+50cmの場合で2回、打撃孔底+25cmの場合で7回であって、締固め効果の大小関係との整合性は認められない。しかし図-14に示した衝撃荷重の最大値に着目すると、落下高さがG.L.+25cmの場合が最も小さく、他の落下高さの場合はほぼ同等であり、締固め効果の大小関係と整合している。なお、平板載荷試験の場合は、比較的大きな締固め効果が現れている。

以上のことから、重錘の落下による締固め効果は、衝撃荷重の最大値 P_{dmax} と打撃回数 n の2つの因子に支配されると考え、各打撃時の P_{dmax} の累計値 ΣP_{dmax} を求めて締固め効果との関係を検討する。締固め範囲の分布が重錘底面中心から半球状であることを考慮し、締固め程度を現す量としては重錘底面中心から $(1 \sim 3)D$ 間の q_c の増大率 I_{dqc} の平均値 I_{dqc} （後出の図-19参照）を、締固め範囲としては等 $I_{dqc}=15\%$ 線の重錘底面中心からの平均半径 R_{15} を採用することとした。 $I_{dqc} \sim \Sigma P_{dmax}$ 関係を図-19に、 $R_{15} \sim \Sigma P_{dmax}$ 関係を図-20に示す。両図とも、バラツキはあるが比較的高い相関性が認められ、締固め効果は ΣP_{dmax} で推定できると考えられる。

6. 結語

本論文では、ゆるい砂地盤における重錘落下締固め工法に関する室内模型実験の結果を報告し、衝撃荷重～貫入量関係の特性、衝撃荷重と静的支持力との関係および締固め効果について検討を加えた。これらの検討結果をまとめると、以下のとおりである。

1) 衝撃荷重～貫入量曲線には、地盤のゆりこみ沈下の特性が現れている。この特性は、重錘の1打撃あたりの打撃エネルギーの影響は受けず、地盤の種類および状態（密度、含水比など）により一義的に決まると考えられる。

2) 地表面における1打撃目の衝撃荷重の最大値は、重錘の衝突速度と原点を通る比例関係にある。しかし、打撃を繰り返した場合には、衝撃荷重の最大値と重錘の衝突速度とは比例せず、同一衝突速度で繰り返し打撃した場合でも衝撃荷重の最大値は次第に増大する。

3) 重錘落下による衝撃荷重の最大値と静的支持力との大小関係は、貫入量によって異なる。重錘落下により生じた打撃孔底（深さ $1D$ 、 D ：重錘および平板の直径）における平板載荷試験の結果からは、衝撃荷重の最大値は静的載荷における履歴最大荷重に相当すると考えられた。

4) 重錘落下による締固め効果（締固めの範囲および程度）は、衝撃荷重の最大値および打撃回数によって説明できる。この2つの因子を考慮し、衝撃荷重の最大値の累計値を求めて締固め効果と比較した結果、両者の間には比較的高い相関性が認められた。

謝辞

本実験を行うにあたり、多大のご協力を頂いた平成6年度の関西大学卒業研究生の下山尚毅、林圭一、藤裏和弘および水谷毅の諸氏に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 下平祐司，山肩邦男，森国夫：重錘落下締固め工法の現場実験結果ならびに地盤内最大応力分布の推定，日本建築学会構造系論文集，第461号，pp.55～64，1994年7月
- 2) 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/Ⅰ-26，pp.61～67，1994.3
- 3) 山肩邦男，伊藤淳志，下平祐司，無津呂大輔：重錘落下締固め工法に関する室内模型実験(その1：実験概要)，第29回土質工学研究発表会，pp.2063～2064，平成6年6月
- 4) 山肩邦男，伊藤淳志，下平祐司，無津呂大輔：重錘落下締固め工法に関する室内模型実験(その2：実験結果および考察)，第29回土質工学研究発表会，pp.2065～2066，平成6年6月
- 5) 山肩邦男，伊藤淳志，下平祐司，無津呂大輔：重錘落下締固め工法に関する室内模型実験(その3：重錘落下高さの影響)，第30回土質工学研究発表会，pp.2043～2046，平成7年7月
- 6) 大島昭彦，高田直俊，福本彦吉：地盤を重錘打撃するときの重錘挙動の測定-打撃条件と地盤条件の影響-，第29回土質工学研究発表会，pp.2057～2060，平成6年6月
- 7) 山崎康弘，大島昭彦，高田直俊，池田通陽，鳴海直信：重錘落下による衝撃加速度の現場測定実験（第1報），第30回土質工学研究発表会，pp.2035～2038，平成7年7月
- 8) 大島昭彦，高田直俊，山崎康弘，池田通陽，鳴海直信：重錘落下による衝撃加速度の現場測定実験（第2報），第30回土質工学研究発表会，pp.2039～2042，平成7年7月
- 9) 伊藤淳志，山肩邦男：枠基礎の模型実験結果ならびに枠内土の挙動に関する考察，日本建築学会構造系論文報告集，第409号，pp.123～132，1990年3月
- 10) 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模型実験-重錘貫入量と地盤変形-，土木学会論文集，No.475/Ⅰ-24，pp.89～97，1993.9

(1996年2月8日原稿受理，1996年3月12日採用決定)