

# 耐震機能基礎杭に関する基礎的研究

Model tests on mechanical behaviors of piles due to impact up-down earthquake motions

主任研究員名:玉野 富雄

分担研究員名:金岡 正信

## 1 研究の背景と目的

東京・大阪などの日本の大都市には、沖積軟弱地盤上に発達したところが多く、地震時には甚大な基礎杭被害が予測される。そのため、直下型地震生起時の基礎杭の耐震性能の確保は看過できない緊急課題である。

兵庫県南部地震では、震災後の現地調査により、基礎杭の衝撃上下動による衝撃せん断破壊や衝撃引張破壊が確認された。しかしながら、こうした衝撃破壊の力学挙動については不明な点が多く残された状況にあった。

こうした観点より、本共同研究では、地震時の衝撃上下動による杭や構造物の破壊現象に関連して、「耐震機能基礎杭に関する基礎的研究」と題する研究に取り組んだ。まず、最も基本となる地盤工学における衝撃力学現象である落下重錘実験に関する研究を、次に杭の衝撃支持力実験に関する研究を行った。

従来、国内外で基礎杭の衝撃実験に関する研究が進められ、貴重な成果が示されてきているが、研究手法の多くは数値解析に基づくものである。各種条件下での詳細なモデル実験を行い、基礎杭の衝撃破壊力学現象を明らかにしようとする研究は、その重要性にかかわらず国内外であまり見られず、基礎的かつ実験的研究事例が少ない状況である。特に、衝撃支持力発生時の基礎底面下の地盤変形挙動や基礎杭体に発生する力学状態の変化を $\mu$ のオーダーで議論する必要があり、実験装置の製作、計測手法、および実験データの解析手法そのものが研究課題となっている。

なお、実験においては、1秒間に100万コマ撮影でき、102枚のデータ保存ができる超高速ビデオカメラを導入し、超高速度で生じる重錘や杭の力学挙動を追跡した。また、ひずみ・加速度・土圧を1秒間に20万回計測できる計測システムを導入した。

また、衝撃载荷時の地盤の変形挙動の画像解析による可視化とそれを用いたPIV解析を行った。さらに、基礎杭にひずみゲージを貼り付け、超高速の条件で計測を行う計測手法の確立を行った。

本共同研究での研究成果を次に示すが、本研究を行うベースとなる 東大阪地域での地震時地盤防災に関する研究、ひずみ計測手法に関する研究、落下重錘接地時の地盤力学挙動に関する研究、杭の衝撃支持力に関する研究、の4点に大別できる。

## 研究成果

### 東大阪地盤の地震時地盤防災に関する研究

- 玉野富雄:地盤工学会編「全国 77 都市の地盤と災害ハンドブック」で東大阪市・大東市を分担執筆,丸善出版,pp.367-380,2012.1

### ひずみ計測に関する研究

- 西田一彦,大嶋和則,玉野富雄,山中稔,白石建,笠博義,西山秀哉,北園和憲;高松城天守台修復における地盤改良技術の適用について,日本材料学会誌「材料」, Vol.63, No.1,pp.2-7, 2014.1
- 玉野富雄, 金岡正信, 西形達明, 西田一彦 : 石垣構造物における力学安定評価時の「温度一ひずみ係数」, 地盤工学ジャーナル, 地盤工学会, Vol.9, No.4,pp.619-632, 2014.12

### 落下重錘接地時の地盤力学挙動に関する研究

- 金岡正信, 水谷夏樹, 小西秀明, 荒木重信, 竹原幸生, 玉野富雄:落下重錘接地時の地盤力学挙動, 第 10 回地盤改良シンポジウム論文集, 日本材料学会, pp.189-194, 2012.10
- M.Kanaoka, N.Mizutani, H.Matsukawa,B.Shrestha, K.Takehara, T.Tamano: Model Tests on Impact Bearing Capacity of Foundations during Impact Loading, PaperNo.2013-TPC-0195, Proceedings of the 23th International Offshore and Polar Engineering Conference, 2013.6

### 杭の衝撃支持力に関する研究

- T.Tamano, M.Kanaoka, H.Ishikawa, H. Tsuboi, K. Morikawa: Brittle Failure in Impact Tension Tests using Steel Wires, Proceedings of the 22th International Offshore and Polar Engineering Conference, PaperNo.TPC-0142, 2012.6
- 金岡正信, 水谷夏樹, 荒木重信, 竹原幸生, 玉野富雄:杭の衝撃支持力,第 10 回地盤改良シンポジウム論文集,日本材料学会, pp.239-246, 2012.10

## 2 落下重錘接地時の地盤力学挙動に関する研究

### 2.1 はじめに

本研究では、まず、落下重錘実験に関する模型実験に基づく基礎的研究を行った。重錘が接地し地盤中に貫入していく力学挙動について、2次元砂地盤実験装置を用い、重錘接地時の時間-沈下量関係を詳細に調べた。得られた地盤変位ベクトル画像解析による逐次的な地盤変形をもとに PIV 解析を行い、最大せん断ひずみ分布・体積ひずみ分布を求め、重錘と地盤との衝突現象の基礎的力学挙動についての考察を行った。

### 2.2 実験装置と実験結果

#### 2.2.1 実験装置

実験装置を図-1に示す。重錘質量は17.6kgである。実験は地盤高さ15cm・25cm・40cm・50cmと重錘落下高さ40cm・60cm・80cmを組み合わせで行った。

#### 2.2.2 実験結果

図-2に重錘沈下の重錘接地時から沈下終了時までの時間経過との関係を例示する。図-3に落下高さ80cm・地盤高さ40cmでの重錘沈下・加速度・衝撃力・土圧の重錘接地時から沈下終了時までの時間経過との詳細な関係を例示する。沈下と加速度および土圧の関係を図-4に例示する。図-5に地盤高さと最大加速度の関係および図-6に落下高さと最大土圧の関係を落下高さ40cm・60cm・80cmの場合について例示する。



図-1 落下重錘実験装置

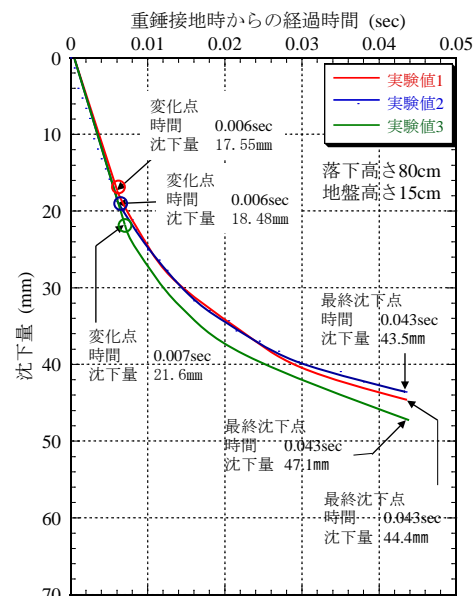


図-2 重錘接地時からの経過時間と沈下量

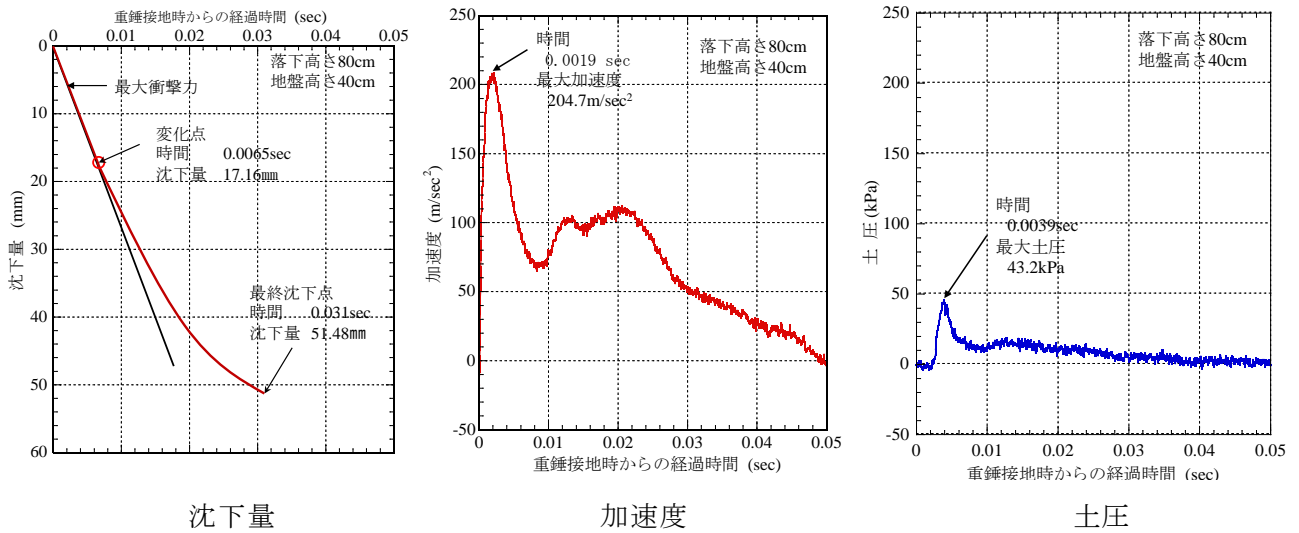


図-3 重錘接地時からの経過時間と沈下量・加速度・土圧の関係  
(落下高さ 80cm・地盤高さ 40cm)

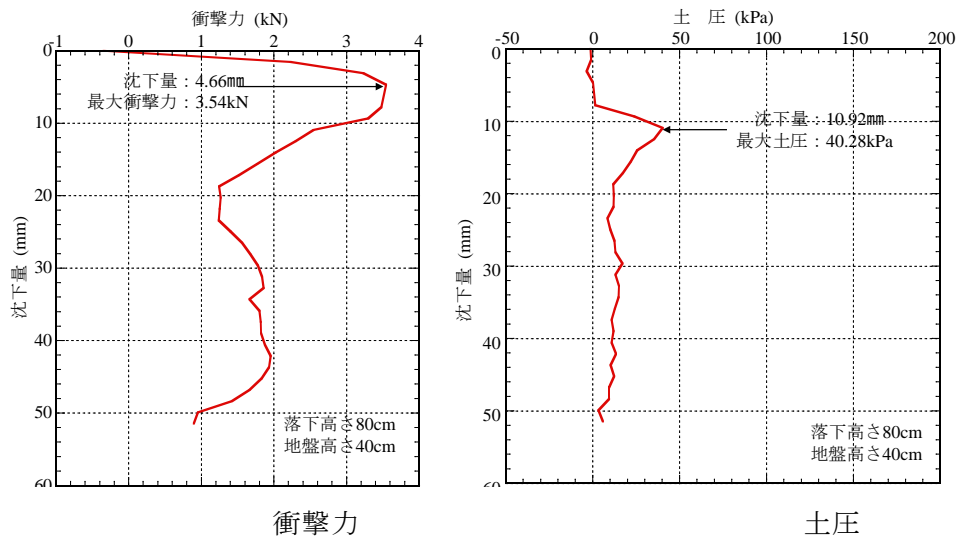


図-4 沈下量と衝撃力および土圧の関係 (落下高さ 80cm・地盤高さ 40cm)

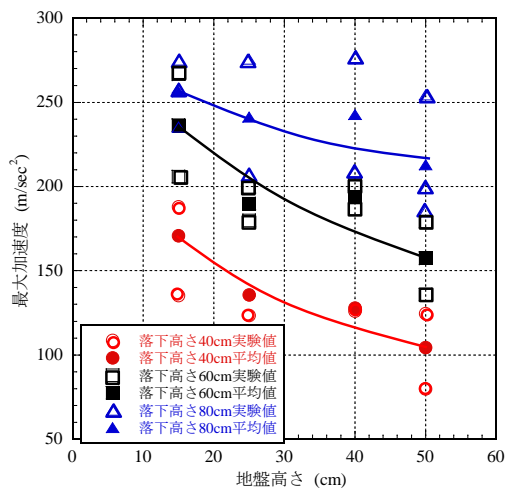


図-5 地盤高さと最大加速度の関係

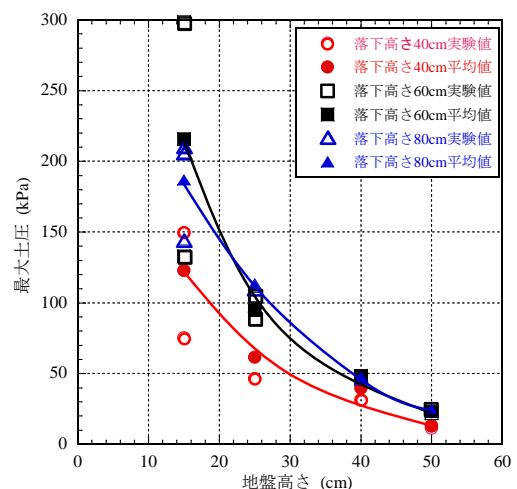


図-6 地盤高さと最大土圧の関係

### 3 杭の衝撃支持力実験

#### 3.1 はじめに

本研究では、地震時衝撃上下動を模擬した衝撃载荷による杭の模型実験を行った。すなわち、高精度な杭衝撃载荷実験装置を製作し、地震時衝撃上下動を模擬した各種の衝撃载荷実験を行った。

#### 3.2. 実験装置と実験結果

##### 3.2.1 実験装置

軸対称実験装置および半割実験装置の 30cm 径実験装置の写真を図-7 に説明図を図-8 に示す。半割実験装置は、軸対称実験装置を単純に半割にしたものである。アクリル製透過板を設け、特に杭と地盤の動きを前面よりビデオカメラで撮影し可視化できるように製作した。実験に使用した杭はアルミ製である。軸対称実験杭は、直径 2.83cm で高さ 30cm である。半割実験杭は直径 4cm で高さ 30cm である。軸対称杭と半割杭の断面積は同じである。杭は実験に際し、繰り返し使用は残留ひずみの影響が懸念されたため行わず、正確さを期するため 1 回使いとした。軸対称杭および半割杭におけるひずみゲージの設置位置を図-9 に示す。

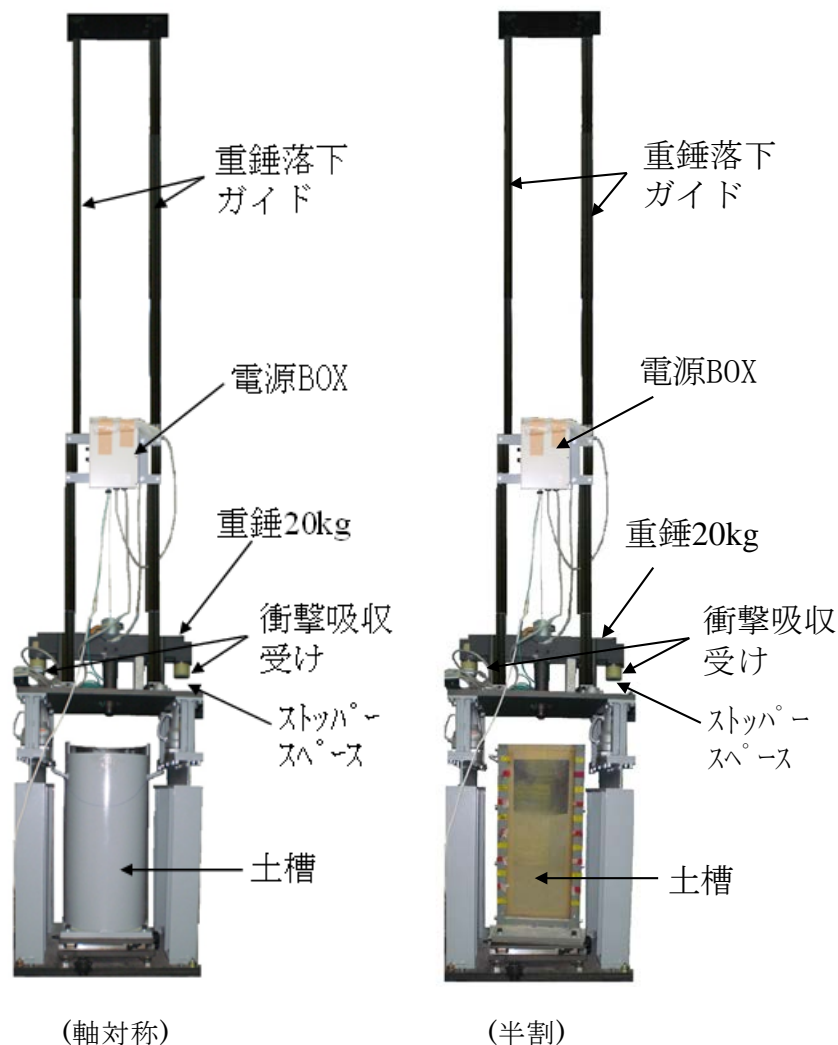


図-7 衝撃実験装置

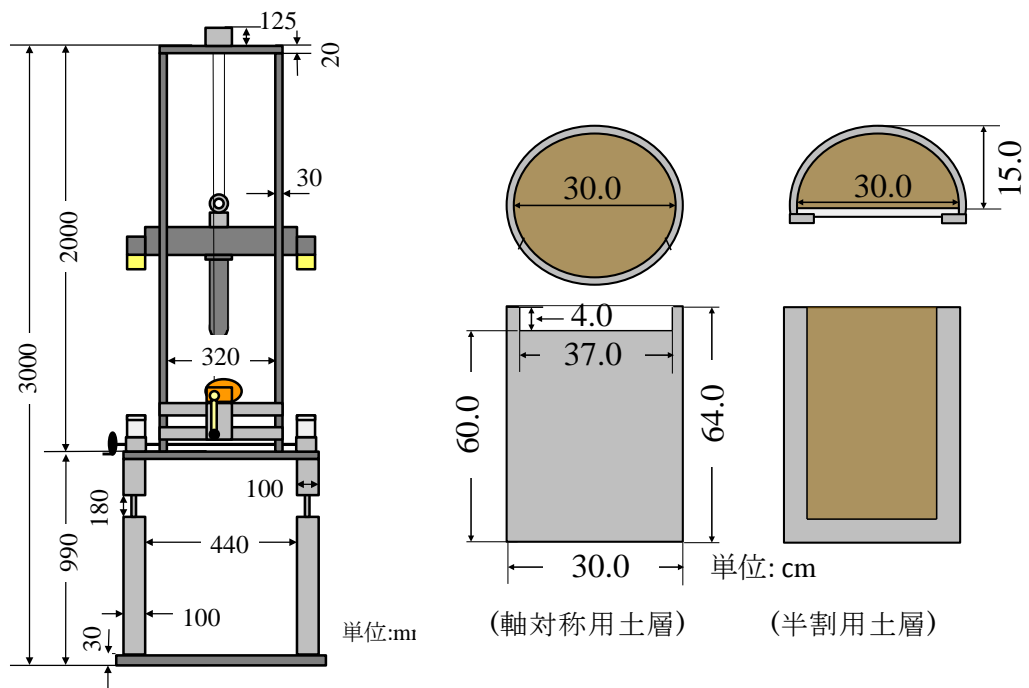


図-8 衝撃実験装置説明図

超高速ビデオカメラは、毎秒 25 万コマ、タテ 260 × ヨコ 360pixel の解像度で撮影を行い 102 枚の画像を PC へ取り込んだ。計測トリガーはレーザー法を用いた。杭上端面の沈下量とその時点で杭に生じている計測ひずみから杭下端の変位量を算定した。また、半割実験における杭下端における杭の時間一沈下関係については直接的に超高速ビデオカメラで撮影し算定した。測定結果をもとに画像解析と PIV 解析を行った。

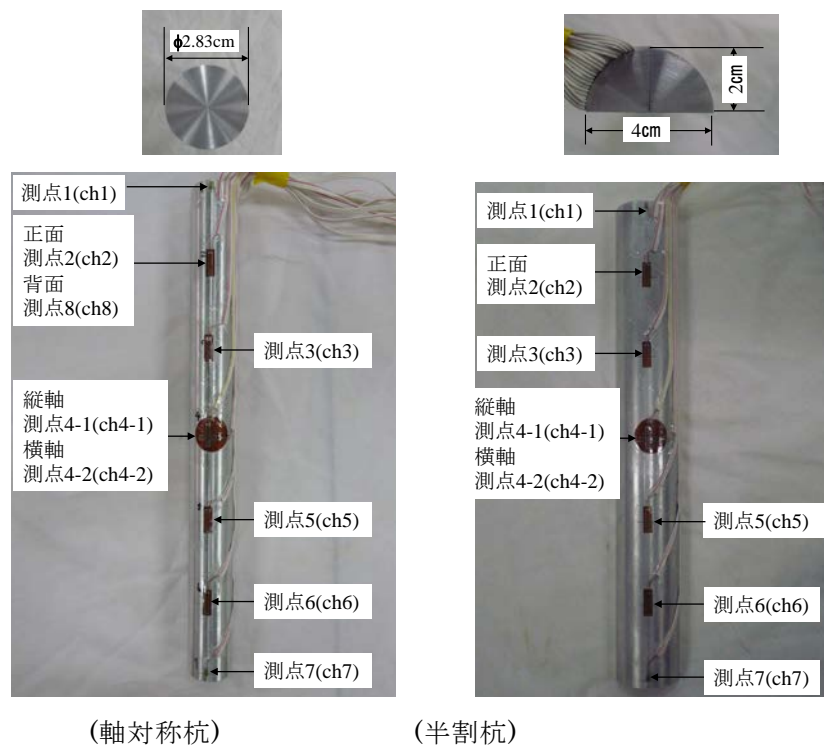


図-9 ひずみゲージ設置位置

### 3.2.2 実験結果

軸対称実験における実験条件は、水平地盤・杭の埋設深さ 0cm・20cm・質量 20kg・40kg の重錘・高さ 0.25m・1m・2m から落下を組み合わせて行った。

実験の結果を実験名 F-1: 重錘質量 20kg・落下高さ 2m・埋設 20cm の場合について図-10 に拡大図を図-11 に例示する。図-12 に時間一杭下端部沈下量関係を例示する。

#### 4 まとめ

落下重錘実験では、地盤高さが高くなれば（層厚が厚くなれば）最大加速度および最大土圧が減少する傾向を顕著に示すこと、地盤が衝撃をやわらげるクッションの働きをしていること、衝撃力の大きさにより地盤の材料物性が変化することを明らかにした。

次に、杭の衝撃支持力実験では、第1波応力波と第2波応力波が発生、その後、圧縮と引張を繰り返し減衰振動するという衝撃力学機構を実験的に確かめた。その過程で杭にコンクリートを引張破断させる  $200\mu$  を超える引張ひずみが生じることがわかった。兵庫県南部地震時や新潟県中越地震時での杭や構造物の引張破断現象を説明できる基礎的知見が得られた。

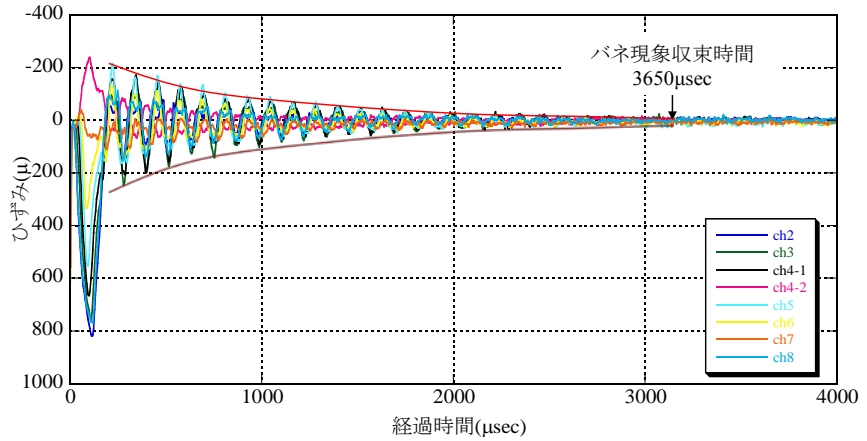


図-10 時間－ひずみ関係（重錘質量 20kg・落下高さ 2m・埋設 20cm）

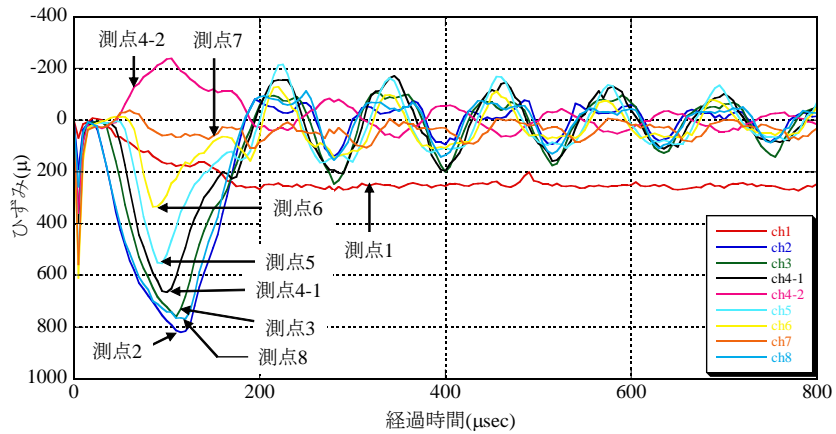


図-11 時間－ひずみ関係（図-10の拡大図）

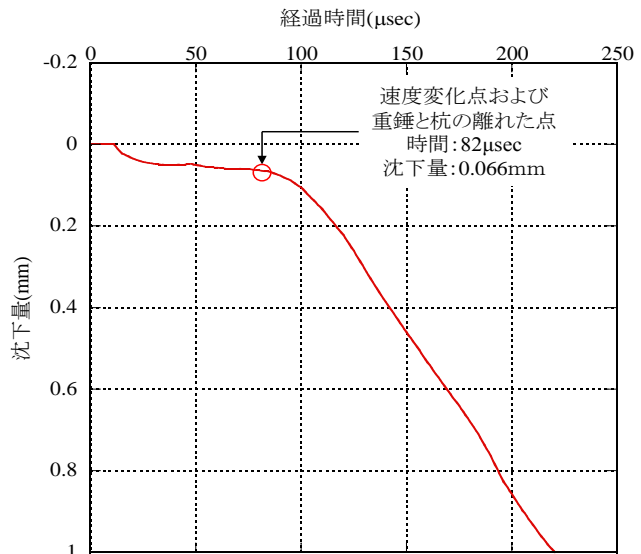


図-12 時間－杭下端部沈下量関係（重錘質量 20kg・落下高さ 2m・埋設 20cm）

# 杭の衝撃支持力実験に関する研究

玉野 富雄（工学部都市創造工学科）

杭の衝撃支持力実験での力学挙動を以下にまとめる。

- ① 第1波応力波による最大圧縮ひずみは  $5\sim 10\ \mu\text{sec}$  で発生し  $32.6\sim 678.6\ \mu$  であった。次に、 $30\sim 200\ \mu\text{sec}$  間で第2波応力波による最大圧縮ひずみは  $75\sim 125\ \mu\text{sec}$  で発生し  $14.2\sim 910.9\ \mu$  であった。それ以降では  $100\ \mu\text{sec}$  程度の周期をもつ圧縮と引張が繰り返す減衰振動が生じた。その時の杭上端の沈下量は  $0.02\sim 0.09\ \text{mm}$  であった。それ以降、圧縮と引張が繰り返される減衰振動が生じた。減衰率は  $10\sim 30\%$  で、時間経過とともに減衰率は上昇し、周期は  $115\ \mu\text{sec}$  程度であった。減衰振動は  $2815\sim 3960\ \mu\text{sec}$  でひずみはゼロとなり終了した。圧縮と引張が繰り返される弾性バネとして減衰振動が生じる理由は以下のように考察できた。杭上端の落下重錘より分離しての沈下以降では杭上端は自由端となる。また、杭と杭下端地盤のインピーダンス比が 55 であり、ほぼ自由端として機能し、結果として、両端自由条件のばね振動が生じた。
- ② 弾性抵抗の減少とひずみ伝播速度（応力波伝播速度と同じ力学的意味をもつ）を調べた。各ひずみ測点における時間-ひずみ関係から、最大圧縮ひずみの減少率を弾性抵抗、圧縮ひずみを示し始める時間の差からひずみ伝播速度を算定した。弾性抵抗の減少率は  $13\sim 32\%$  で、ひずみ伝播速度は毎秒  $5\text{km}$  でアルミ杭の密度と弾性係数より計算できる弾性波速度の毎秒  $4.68\text{km}$  とよく一致した。
- ③ 応力波の発生過程で杭に  $200\ \mu$  を超える過大な引張ひずみが作用し衝撃引張破壊が生じることがわかった。兵庫県南部地震時や新潟県中越地震時での杭を含む構造物の引張破断現象を説明できる耐震性評価のための基礎的な力学知見が得られた。
- ④ 半割実験での画像解析と PIV 解析結果を重錘重量  $20\text{kg}$ ・落下高さ  $1\text{m}$ ・埋設  $10\text{cm}$  の場合で例示すれば、最大の地盤変位量は  $0.176\text{mm}$ 、最大の最大せん断ひずみは  $11.35\%$ 、最大の体積ひずみは  $11.95\%$  であった。地盤変位は杭直下近傍のみで垂直方向に生じることが鮮明にわかった。



# 落下重錘接地時の地盤力学挙動に関する研究

金岡 正信(工学部都市創造工学科)

落下重錘実験での力学挙動を以下にまとめる。

- ① 地盤高さを 15cm から 50cm に増してゆくと土圧はほぼ 2 次曲線的に減少した。また、最大加速度については土層厚さ 15cm から 25cm まではほぼ直線的に減少した。地盤高さが高くなれば最大加速度も最大土圧も減少する傾向が顕著であった。土層が衝撃をやわらげるクッションの働きをしていることがわかった。
- ② 最大衝撃力は本研究での重要な力学値である。「土木学会振動便覧」で示されている落石による最大衝撃力の算定式の適用に際しては、地盤の弾性係数とポアソン比より求められるラーメの定数(Lame's constant) を適切に補正する必要がある。ラーメの定数を  $50\text{kN/m}^2 \cdot 100\text{kN/m}^2 \cdot 150\text{kN/m}^2 \cdot 200\text{kN/m}^2 \cdot 1000\text{kN/m}^2$  に変化させた計算値と計測値を例示すると、ラーメの定数は地盤高さおよび落下高さによって変化し、地盤高さが厚くなると小さくなり、落下高さが高くなると大きくなっていることが読み取れた。すなわち、衝撃力の大きさにより地盤の材料物性が変化し、地盤がより固くなることがわかった。
- ③ 画像解析で地盤変位ベクトルを求め、次に、PIV 解析より最大せん断ひずみ・体積ひずみを PIV 解析で求めた。超高速ビデオカメラは、毎秒 20 万コマ、タテ 260×ヨコ 312 pixel の解像度で撮影を行い 102 枚の画像を PC へ取り込んだ。ケース 1 での沈下直前から沈下終了時までの解析結果およびケース 2 の結果より次のことがわかった。最大衝撃力(最大加速度)発生時についての特性値を比較すると、力積比が 0.71 倍で地盤高さが 0.38 倍の条件で、沈下量は 1.7 倍、最大衝撃力の発生時間は 2.5 倍に長くなり、最大の最大せん断ひずみは 6.8 倍、最大の体積ひずみは 8.2 倍を示した。また、両実験とも、最大せん断ひずみと体積ひずみがほぼ同じ程度であることより、鉛直方向の地盤変位が卓越していることがわかった。画像解析・PIV 解析結果より締固めの範囲は重錘の径と同じ程度の深さ範囲であることがわかった。