

## 重錘落下式急速載荷試験法による既設鋼管杭の性能評価について

岸下 崇裕

### 概 要

再利用される既設鋼管杭の性能を評価することを目的として重錘落下式による急速載荷試験を実施した。重錘落下式による急速載荷試験法は、信頼性が高く、現場で迅速にかつ安価に実施できる杭基礎の性能評価試験法のひとつとして評価されている。載荷試験は、 $\Phi 600\text{mm}$ の杭を4本、 $\Phi 700\text{mm}$ の杭を6本、計10本の再利用されない杭に対して極限荷重まで実施し、既設鋼管杭が所定の支持力を有し健全であることを確認した。また、載荷試験結果の評価では、静的非線形解析や動的非線形解析を実施し、急速載荷試験の簡易評価法である除荷点法の有効性と動的非線形解析手法の妥当性について検証を行った。

### Performance Evaluation of Recycled Steel Piles using the Falling Mass Method

#### Abstract

A rapid pile load test examination using the falling mass method was applied in order to evaluate the performance of steel piles to be recycled. This test method is dependable and can be carried out rapidly and cheaply. The rapid load tests were implemented at ten piles ('6' for 700mm diameter piles and '4' for 400mm diameter piles) not to be reused in the future. The test results were equivalent to the design capacity of each pile, and it was verified that the existing piles were suitable for reuse.

To understand the mechanical behavior of the pile in the rapid load test, nonlinear static analysis and nonlinear dynamic analysis were performed. As a result, the validity of the simple evaluation technique and the effectiveness of the nonlinear dynamic analysis technique were confirmed.

キーワード：急速載荷試験，既設杭，  
性能評価，

## §1. はじめに

近年の基礎設計分野における大きな流れは、限界状態設計法の導入である。限界状態設計法では、施工された構造物の品質と信頼性を定量的に評価することが求められている。杭基礎構造物の品質や信頼性を評価する方法は、載荷試験が重要な役割を果たすことになる。しかし、従来の静的な載荷方法に限定される載荷試験では、このような目的で実施するには、費用や時間が制約され、十分な数の試験を実施することができていない。そこで、信頼性の高い方法であるとともに、現場で迅速かつ安価に実施できる新しい載荷試験方法が望まれている。

これらの要求を満たす載荷試験方法として、杭の急速載荷試験<sup>1)</sup>があげられる。急速載荷試験方法は、杭頭に動的な荷重を加える載荷試験の一つであり、油圧ジャッキなどによる静的な荷重を加える押し込み試験とハンマーなどで衝撃荷重を加える衝撃載荷試験の中間的な位置づけにある。

急速載荷試験装置の特長は、反力装置を必要としない加力装置を用いることにある。そのため、組立て、解体が比較的短時間で済み、載荷時間が短いことと相まって、現場での作業時間を短くすることが出来る。このような反力装置を必要としない加力装置には、火薬を爆発させその反力を杭頭に作用させる反力体慣性力方式と重錘を自由落下させ軟クッションをかいて杭頭に荷重を作用させる軟クッション重錘落下方式がある。本試験では、載荷試験を実施する近傍に民家があることから、火薬を用いない軟クッション重錘落下方式を採用した。

本報告は、重錘落下式による急速載荷試験を実施し、再利用される既設鋼管杭の性能を評価した結果について述べる。また、載荷試験結果の評価では、静的非線形解析や動的非線形解析を実施し、急速載荷試験の簡易評価法である除荷点法の有効性と動的非線形解析手法の妥当性について検証を行った。

## §2. 急速載荷試験による評価

既設鋼管杭の支持力を確認することを目的に地盤工学会基準「(JGS1815-2002)杭の急速載荷試験方法」<sup>2)</sup>に従って急速載荷試験を実施した。

本試験では、モンケンを自由落下することにより動的荷重を試験杭に作用させ、載荷継続時間を長くするために、モンケンと試験杭の間にクッション材を設置して急速載荷試験を実施した。支持力解析には、除荷点法を用いて静的支持力を求めた。

## 2.1 載荷試験方法

図1に急速載荷試験装置の構成図を示す。図に示されるように急速載荷試験は、重錘を所定の高さから自由落下させ、クッション材を介して荷重を杭頭に伝達させている。

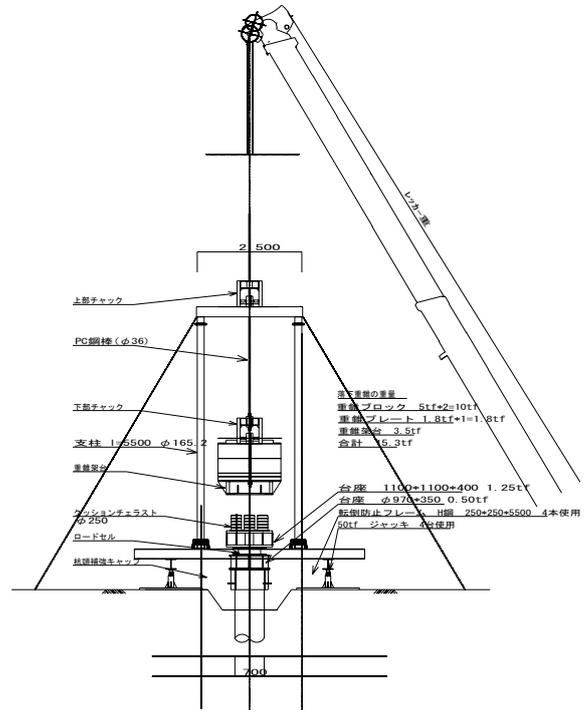


図1 急速載荷試験装置図

## 2.2 計測方法

計測は、杭頭部に加速度計、ひずみゲージおよびロードセルを設置し、杭頭に作用する加速度と荷重を計測した。杭頭の変位は、光学式変位計を用いて計測した。図2に計測システムの概略図を示す。

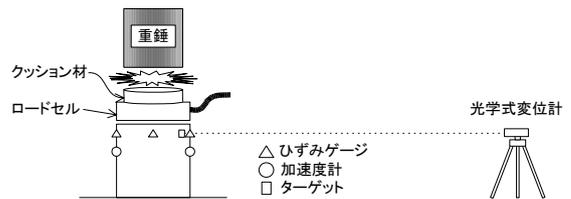


図2 計測システム概略図

## 2.3 載荷試験概要

急速載荷試験は、直径 600mm の杭 4 本、直径 700mm の杭 6 本、計 10 本で実施した。試験杭には、再利用されない杭を使用した。そのため、載荷最大荷重は、杭の許容支持力の 3 倍以上作用させることとした。表 1 に載荷試験杭の諸元と計画最大荷重の一覧を示す。載荷試験は、落下高さを 30cm (No1 のみ 40cm) ずつ増加させ、極限荷

重が得られるか、または計画最大荷重に達するまで行った。

表1 載荷試験杭一覧

試験No	杭種	杭径 (mm)	杭長 (m)	フリクションカット長(m)	設計許容支持力 (kN)	計画最大荷重 (kN)
1	鋼管杭	φ700	42.5	14.0	1451.6	5000.0
2	鋼管杭	φ600	42.5	18.0	1374.3	4000.0
3	鋼管杭	φ600	42.5	18.0	1374.3	4000.0
4	鋼管杭	φ700	42.5	14.0	1451.6	5000.0
5	鋼管杭	φ700	42.5	18.0	1451.6	5000.0
6	鋼管杭	φ700	42.5	14.0	1475.8	5000.0
7	鋼管杭	φ700	42.5	18.0	1475.8	5000.0
8	鋼管杭	φ600	42.5	21.0	1117.8	4000.0
9	鋼管杭	φ600	42.5	21.0	1117.8	4000.0
10	鋼管杭	φ700	42.5	14.0	1475.8	5000.0

2.4 載荷試験結果評価方法

急速載荷試験では、杭が打撃によって下に向かって押込まれた後、地盤と杭材の弾性変形分の抵抗力が上に向かって作用し変位が戻る形となっている。このように、杭の挙動が下向きから上向きに変わる地点、杭が最大に沈下した時点は、杭が静止した状態である。このように最大変位量に達した時点(杭が静止した時点)は、杭体の速度は0となり、地盤の動的抵抗成分が作用していない状態である。すなわち、除荷点に対応する抵抗力は、急速載荷試験における静的抵抗成分の最大値であると判断することが出来る。図3は荷重～杭頭変位の関係および除荷点を示した概略図である。

本試験では、多サイクル載荷を行なうことで、各サイクルに個々の除荷点のデータが得られ、この値をもとに静的載荷試験と同様に第一限界抵抗力、第二限界抵抗力を求めて評価した。

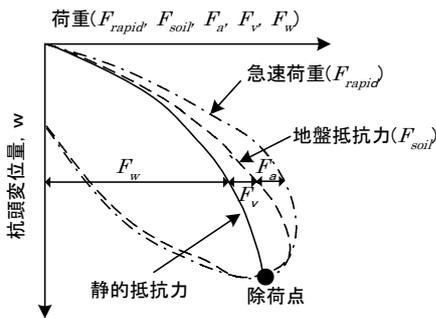


図3 荷重～変位関係および除荷点の概略図

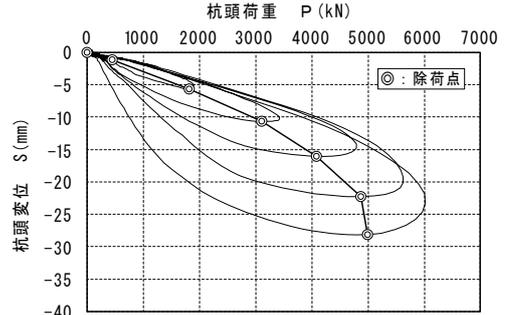
2.5 載荷試験結果

図4に急速載荷試験より得られた杭頭荷重～杭頭変位関係を示す。図上段は載荷試験 No.1(直径 700mm)の結果を、下段は載荷試験 No.2(直径 600mm)の結果を示している。また、図中の◎印は、各荷重サイクルの除荷点の位置を示している。図より、載荷試験 No.1 の結果は、最大の除荷点荷重が 4987.3kN でその時の最大変位量が 28.19mm であった。また、最終荷重時の杭頭部における

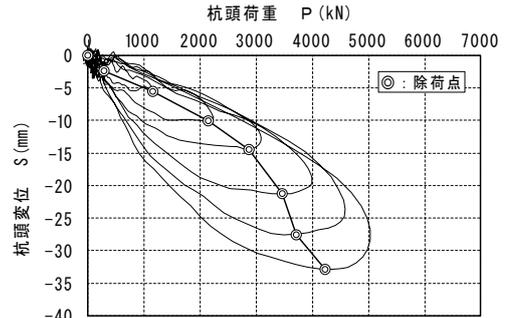
残留沈下量は、0.7mmと小さくNo.1の載荷試験が第二限界抵抗力まで至っていないものと判断される。

載荷試験 No.2 の結果は、最大の除荷点荷重が 4234.2kN でその時の最大変位量が 32.85mm であった。また、No.1と同様にNo.2の残留沈下量は、0.8mmと小さく第二限界抵抗力まで至っていないものと判断される。

なお、本載荷試験近傍には、住居があるため公害振動計測を行い、計画最大荷重時において公害振動レベル(75dB)以上になったため、それ以降の載荷試験は中止した。



a)載荷試験 No.1(直径 700mm)



b)載荷試験 No.2(直径 600mm)

図4 杭頭荷重と杭頭変位量との関係

表2に載荷試験結果一覧を示す。表中の第1限界抵抗力は、除荷点法より求められた LogP-LogS 曲線を用いて算出した。第2限界抵抗力は、公害振動の関係で求めることは出来なかった。そのため、載荷試験より求められる極限支持力は、除荷点荷重の最大値とし、許容支持力はその値を1/3にして求めた。表より、既設鋼管杭の載荷試験で確認した許容支持力は、設計許容支持力以上あり、健全であることが確認された。

表2 載荷試験結果一覧

試験No	杭径 (mm)	除荷点荷重 (kN)	除荷点変位 (mm)	限界抵抗力		載荷試験による極限支持力 (Ru) (kN)	載荷試験による許容支持力 (Ra=Ru/3) (kN)	設計許容支持力 (kN)
				第1限界 (kN)	第2限界 (kN)			
1	700	4987.3	28.19	3114.7	-	4987.3	1662.4	1451.6
2	600	4234.2	32.85	2875.8	-	4234.2	1411.4	1374.3
3	600	4327.0	26.97	1800.0	-	4327.0	1442.3	1374.3
4	700	4450.6	26.94	3258.5	-	4450.6	1483.5	1451.6
5	700	4489.8	30.57	-	-	4489.8	1496.6	1451.6
6	700	5081.7	23.19	3200.0	-	5081.7	1693.9	1475.8
7	700	5273.7	27.62	3745.0	-	5273.7	1757.9	1475.8
8	600	4714.2	32.89	2000.0	-	4714.2	1571.4	1117.8
9	600	4738.3	28.52	2000.0	-	4738.3	1579.4	1117.8
10	700	5406.3	19.84	-	-	5406.3	1802.1	1475.8

### §3. 静的非線形解析による評価

急速載荷試験では、周辺住宅への振動の影響のため極限状態までの載荷試験が出来なかった。そこで、本章では、既設杭の極限支持力を確認することを目的に静的非線形解析を実施した。

#### 3.1 解析概要

解析は、既設の鋼管杭を線形のはり要素で、杭先端ばねおよび杭周辺地盤の摩擦抵抗ばねは非線形のはり要素でモデル化して行った。図 5 に解析モデルの概略図を示す。

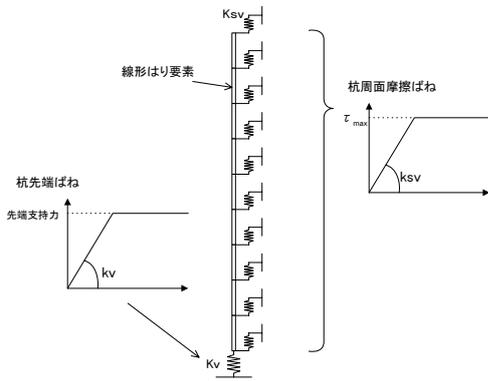


図 5 解析モデル概要図

杭先端ばねや杭周辺地盤の摩擦抵抗ばねは、「鉄道構造物等設計基準・同解説 基礎構造物・坑土圧構造物」<sup>3)</sup>に従って下記の式より求めた。

・杭先端ばね

$$k_v = \alpha_v \cdot (3.2 \cdot \alpha \cdot E_0 \cdot D^{-3/4}) \quad \text{式 1}$$

ここに、 $\alpha_v$ :閉塞率

$E_0$ :地盤の変形係数

$D$ :杭の直径

・杭周面摩擦抵抗ばね

a)砂質土

$$k_{sv} = 0.16 \cdot \alpha \cdot E_0 \cdot D^{-3/4} \quad \text{式 2}$$

b)粘性土

$$k_{sv} = 0.3 \cdot \alpha \cdot E_0 \cdot D^{-3/4} \quad \text{式 3}$$

杭先端ばねや杭周面ばねの上限値は、杭先端支持力や周面摩擦力の上限値を用いた。

#### 3.2 解析結果

図 6 に載荷試験より得られた杭頭部における荷重～変位関係と解析より得られた結果との比較を示す。左図は、 $\Phi 600\text{mm}$ の結果を、右図は、 $\Phi 700\text{mm}$ の結果を示している。図中の○印や△印は、載荷試験結果を、実線は、解

析結果を示している。図で示されるように、解析結果は、載荷試験結果とよく一致している。このことより、静的非線形解析は、妥当であると判断される。

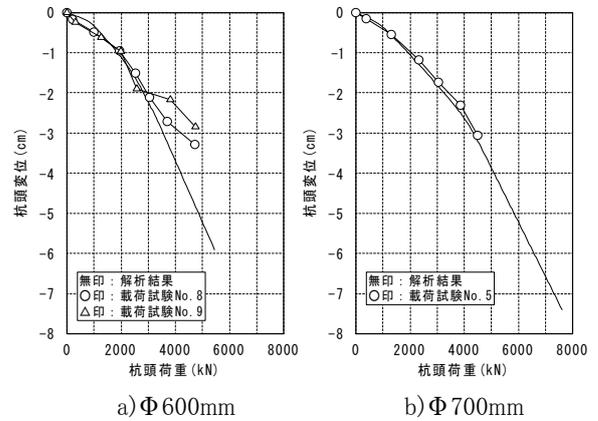


図 6 載荷試験結果と解析結果の比較

### 3.3 既設杭の許容支持力

載荷試験で得られなかった極限支持力を静的非線形解析により算出した。極限支持力は、杭周面摩擦抵抗および杭先端抵抗の全てが上限値を超えた時点の荷重とした。表 3 に解析結果と設計結果との比較を示した。解析は、杭径と地盤条件の違う 4 箇所で行った。

表より、解析より得られた許容支持力は、設計許容支持力より大きな値を示した。このことから、既設杭は、十分な支持力を有していることが確認された。

表 3 解析結果と設計値との比較一覧

場所	杭径	降伏点荷重	降伏点変位	極限支持力 Ru (解析値)	許容支持力 Ra=Ru/3 (解析値)	設計 許容支持力
	(mm)	(kN)	(mm)	(kN)	(kN)	(kN)
A地点	700	5800.0	51.02	5800.0	1933.3	1451.6
B地点	600	5250.0	60.16	5250.0	1750.0	1374.3
C地点	700	7350.0	70.56	7350.0	2450.0	1451.6
D地点	600	4150.0	37.14	4150.0	1383.3	1117.8

### §4. 動的非線形解析による評価

前章では、静的荷重を用いた非線形解析により載荷試験結果を評価し、既設杭基礎の健全度の確認を行った。ただし、本試験は、重錘落下による動的荷重を用いた載荷試験である。そこで本章では、梁～バネモデルによる動的非線形解析による急速載荷試験のシミュレーション解析を実施し、既設杭の健全性について評価を行った。

#### 4.1 解析概要

解析は、静的非線形解析と同様に既設の鋼管杭を線形のはり要素で、杭先端ばねおよび杭周辺地盤の摩擦抵抗ばねは非線形のはり要素でモデル化して行った。

解析手法は、地盤工学会基準「(JGS1815-2002)杭の急速載荷試験方法」に従って実施した。図7に解析モデルの概要図を示す。

図に示されるように解析モデルは、重錘を落下させ杭頭部に荷重を載荷させる自由落下部、杭周面地盤の抵抗を現す周面抵抗モデルと杭先端の抵抗を現す先端抵抗モデルからなっている。本解析における周面抵抗や先端抵抗は、地盤の挙動を正確に表現できるRandolph<sup>4)</sup>のモデルを用いた。

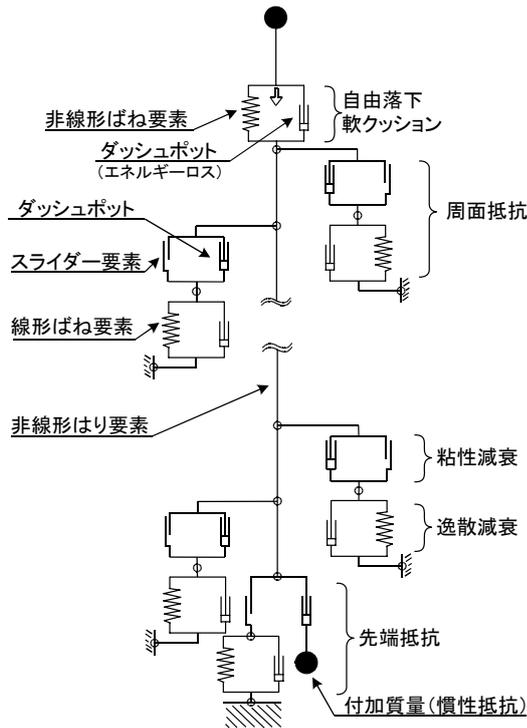


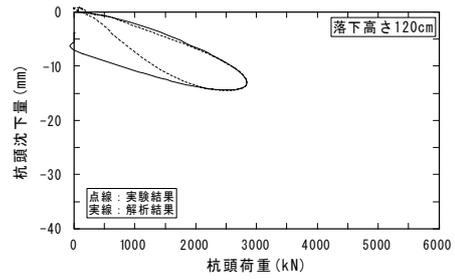
図7 解析モデルの概略図

#### 4.2 解析結果

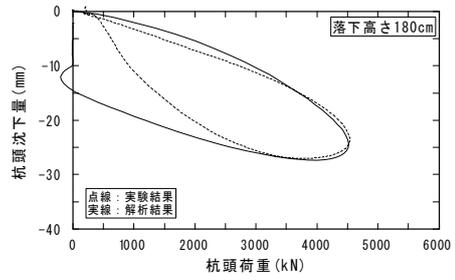
図8図9に動的・非線形解析より得られた結果と載荷試験結果との比較を示す。図は、重錘の落下高さが120cmおよび180cm時における杭頭荷重と杭頭沈下量との関係を示している。図中の実線は解析結果を、点線は載荷試験結果を示している。

図で示されるように解析結果は、荷重が作用してから杭頭沈下量が最大になるまではよく一致しているが、除荷後においては載荷試験結果のほうが早く0点に戻る傾向にある。これは、杭先端地盤が設計計算上、 $N$ 値が最大で50と規定されているため先端地盤抵抗を過小評価している、もしくは除荷時における地盤の挙動が不適切であると思われるが、原因は定かではない。

ただし、除荷点法は、杭頭の最大沈下点と杭頭荷重の関係から静的抵抗力を評価していることから、最大沈下まで一致している解析結果は有効であると判断される。

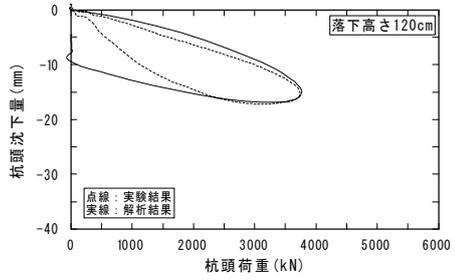


a) 落下高さ 120cm

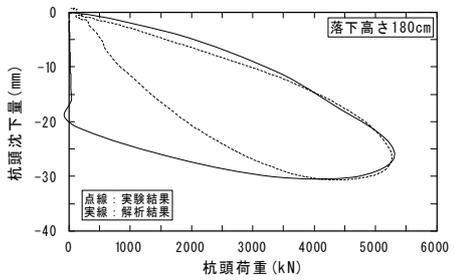


b) 落下高さ 180cm

図8 載荷試験結果と解析結果の比較 (No.8)

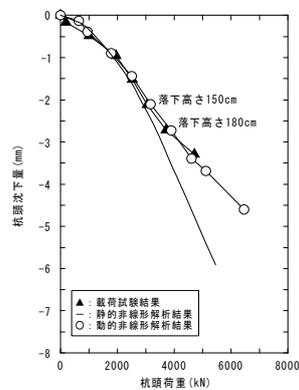


a) 落下高さ 120cm

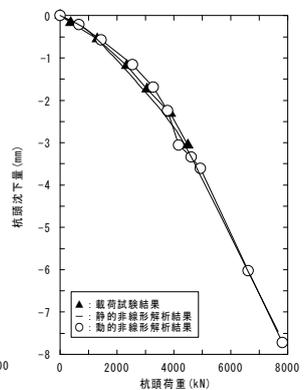


b) 落下高さ 180cm

図9 載荷試験結果と解析結果の比較 (No.5)



a) 載荷試験 No.8



b) 載荷試験 No.5

図10 載荷試験結果と解析結果の比較

図10に動的非線形解析結果を除荷点法で評価した杭頭荷重～杭頭沈下量との関係を示す。図中には、比較を行うために、載荷試験結果(▲印)と§3で実施した静的非線形解析の結果(実線)についても示している。

図に示されるように、本解析モデルによる動的非線形解析の結果と載荷試験結果は、静的非線形結果に比べよく一致している。このことから、重錘の落下状況をモデル化した動的非線形解析のほうが載荷試験状況をより良く表現しているものと言える。

### 4.3 既設杭の健全度

解析より得られた極限支持力および最大周面摩擦力より既設杭の健全度状況について検証を行った。表 4 に解析結果と設計値の比較した一覧を示す。表中の最大周面摩擦力は、周面抵抗の全てが上限値を超えた時の杭頭荷重とした。

表より、最大周面摩擦力および極限支持力は、設計計算値以上である。このことから既設鋼管杭は、設計計算値以上の支持力を有しており健全であることが確認された。

表4 解析結果と設計値との比較一覧

	載荷試験番号No.8		載荷試験番号No.5	
	最大周面摩擦力 (kN)	極限支持力 (kN)	最大周面摩擦力 (kN)	極限支持力 (kN)
設計計算値	2524	5377	3825	7706
載荷試験結果	N.P	N.P	N.P	N.P
静的非線形解析結果	3450	5450	4150	7650
動的非線形解析結果	3904	6450	4173	7802

## §5. まとめ

既設鋼管杭の健全度の確認を行うために重錘落下による急速載荷試験を、結果の評価を行うために静的非線形解析および動的非線形解析を実施した。載荷試験や解析により得られた結果について以下に示す。

- (1)10本の既設鋼管杭に対し急速載荷試験では、周辺住宅への振動の影響のため、極限荷重まで載荷することが出来なかった。
- (2)除荷点法を用い静的抵抗力を求めた結果、載荷試験の最大値は、許容支持力の3倍以上あり、既設鋼管杭が健全であることが確認された。
- (3)静的非線形解析より得られた許容支持力は、設計許容支持力より大きな値を示した。このことから、既設杭は、十分な支持力を有していることが確認された。
- (4)動的非線形解析は、静的非線形解析より急速載荷試験状況を現していることが確認された。
- (5)動的非線形解析より得られた最大周面摩擦力や極限

支持力は、設計計算値以上の支持力を有しており健全であることが確認された。

以上の結果より既設鋼管杭は、設計計算値以上の支持力を有しており健全であるものと判断される。

なお今後は、載荷試験結果を基に波形フィティングを行い、性能設計に向けての評価解析システムの開発を行う予定である。

### 参考文献

- 1) 杭基礎構造物の限界状態設計法に関する研究委員会：基礎構造物における限界状態，土と基礎，Vol.42，No.9，pp.9-14，1994.
- 2) 地盤工学会基準：杭の鉛直載荷試験方法・同解説，pp.175-222，2002.
- 3) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計基準・同解説 基礎構造物・抗土圧構造物，丸善株式会社.
- 4) Randolph, M. F. and Deeks, A. J. :Dynamic and static soil models for axial pile response, Proc. 4<sup>th</sup> Int. Conf. Application of Stress-Wave Theory to Piles, pp.3~14, 1992.

### ひとこと

今後は、逆解析手法を取り入れて波形フィティングを実施し、性能設計に対応した杭の評価手法を開発したいと考えています。



岸下 崇裕