

国立研究開発法人港湾空港技術研究所

港湾空港技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH
INSTITUTE

Vol.55 No.1 March 2016

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

NATIONAL RESEARCH AND DEVELOPMENT AGENCY,
PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

港湾空港技術研究所報告 (REPORT OF PARI)

第 55 卷 第 1 号 (Vol. 55, No. 1) , 2016 年3月 (March 2016)

目 次 (CONTENTS)

1. 載荷試験を活用した杭の軸方向抵抗力の推定方法	水谷崇亮 3
(Estimation of Axial Capacity of Piles utilizing Load Tests)	Takaaki MIZUTANI)

載荷試験を活用した杭の軸方向抵抗力の推定方法

水谷 崇亮*

要 旨

港湾の技術基準では、杭の軸方向抵抗力の推定手法として、杭の載荷試験を行う方法が挙げられている。原位置で載荷試験を実施することで、他の推定手法よりも高い精度で杭の軸方向抵抗力を推定できる。しかしながら、載荷試験を行った場合の特性値の求め方や、その特性値を用いる場合の部分安全係数の考え方は明示されておらず、個別に検討されているのが実状である。

本研究では、既往の研究で示されている杭の載荷試験や、近年実施された杭の載荷試験の結果を収集・分析し、載荷試験結果のばらつきを評価することを試みた。また、その結果を基に、載荷試験結果を用いた杭の軸方向抵抗力の特性値の決定方法や、部分安全係数の考え方を検討した。その際、杭の載荷試験条件を「同一条件」・「類似条件」・「その他の条件」に分類し、それぞれの場合について特性値・部分安全係数の具体的な考え方を検討している。

検討の結果、杭の軸方向抵抗力の特性値を、載荷試験により求められる母集団平均の75%信頼区間の下限值とする考え方を提案している。この際、試験データが1個であっても特性値が求められるよう工夫した。また、部分安全係数については、「同一条件」の場合について現行の値より低減することが合理的であることを示した。「類似条件」の場合には、一律に判断することは難しいものの、試験条件等を吟味することで、部分安全係数を低減できる可能性があることを示した。

キーワード：杭，軸方向抵抗力，載荷試験，特性値，部分安全係数

* 地盤研究領域基礎工研究チームリーダー
〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1 国立研究開発法人 港湾空港技術研究所
電話：046-844-5057 Fax：046-844-0618 E-mail：mizutani-t@pari.go.jp

Estimation of Axial Capacity of Piles utilizing Load Tests

Takaaki MIZUTANI*

Synopsis

Technical standards and commentaries for port and harbor structures in Japan notes that in-situ load test is one of the estimation method of axial capacity of piles. The in-situ load test could provide more precise estimation of the axial capacity of piles at the site than various estimation equations. However, the technical standards and commentaries dose not clearly specify a procedure to derive a characteristic value of the axial capacity from the load test result. It dose not expose the partial factor for the characteristic value, either.

The authors analyzed the data of load tests not only reported in previous studies but also conducted at many ports in recent years, and evaluate variability of the test results. The load test were classified in three categories of test condition: identical condition, similar condition and the others. For each condition, the procedure was suggested to derive the characteristic value from the test results and to decide the partial factor for it.

In the suggested procedures, the characteristic value was calculated as the lower limit of 75% confidence interval of the mean value. The procedure covered the case with only one test data. It was revealed that the partial factor should be increased from the traditional value in the case that the load test was conducted under the identical condition. Even in the case of the similar condition, the possibility was indicated to increase of the partial factor with expert judgments.

Key Words: Pile, Axial capacity, Load test, Characteristic value, Partial factor

* Head of Foundations Group, Geotechnical Engineering Division
3-1-1, Nagase, Yokosuka, Kanagawa 239-0826, Japan Port and Airport Research Institute
Phone : +81-46-844-5057 Fax : +81-46-844-0618 E-mail : mizutani-t@pari.go.jp

目 次

要 旨	3
1. まえがき	7
2. 既往の研究と本研究の位置付け	7
2.1 杭の鉛直載荷試験法	7
2.2 杭の鉛直載荷試験結果の分析	7
2.3 港湾基準における安全率設定の変遷	8
2.4 本研究の目的と検討方針	9
3. 水島港で実施された衝撃載荷試験	9
3.1 試験の概要	9
3.2 試験結果の概要	10
3.3 試験結果のまとめ	12
4. その他の港湾で実施された衝撃載荷試験	12
4.1 A港における衝撃載荷試験	12
4.2 B港における衝撃載荷試験	13
4.3 C港における衝撃載荷試験	14
4.4 D港における衝撃載荷試験	15
4.5 E港における衝撃載荷試験	16
4.6 衝撃載荷試験結果のまとめ	16
5. 載荷試験結果に基づく杭の軸方向抵抗力の推定	17
5.1 基本的な考え方	17
5.2 特性値の決定方法	17
5.3 安全係数の考え方	19
5.4 載荷試験条件の分類と特性値・部分安全係数の考え方	21
6. 結論	22
7. あとがき	22
謝辞	22
参考文献	22

1. まえがき

港湾の施設の技術上の基準・同解説（日本港湾協会，2007）（以下，港湾基準という）では，杭の軸方向抵抗力の推定手法として，杭の載荷試験を行う方法が挙げられている．杭の載荷試験を実施することで，原位置における実際の軸方向抵抗力を直接確認することができる．従って，載荷試験による軸方向抵抗力の推定手法は，経験的な推定式を用いる方法などと比較して精度の高い推定手法であると考えられる．道路橋示方書・同解説（日本道路協会，2012）（以下，道示という）や鉄道構造物等設計標準・同解説（鉄道総合技術研究所，2012）（以下，鉄道標準という）では，杭の載荷試験を行った場合に設計に用いる安全率を優遇する仕組みが導入されており，載荷試験による軸方向抵抗力の推定精度の高さが考慮されている．これに対し，港湾基準では，杭の載荷試験を実施した場合についての特別な記述はなく，載荷試験結果から特性値を求める方法やその場合の部分安全係数の考え方は明示されていない．本稿は，これまでに実施された杭の載荷試験結果を基にそのばらつきを評価し，載荷試験結果から杭の軸方向抵抗力を推定する手法を提案するものである．なお，本稿における検討対象は，実施工で問題となることが多い先端支持杭の押込みに関する軸方向抵抗力とする．

2. 既往の研究と本研究の位置付け

2.1 杭の鉛直載荷試験法

杭の鉛直載荷試験には様々な種類のものがある．一般によく実施されるのは，静的押込み試験，急速載荷試験，衝撃載荷試験の3種であり，いずれも試験法が標準化されている（地盤工学会，2002）．3種の試験法にはそれぞれ得失があり，試験の目的や重要度等に応じて適切な試験法を選択する（菊池ら，2009）．試験を実施するタイミング（施工時・養生後など）や試験条件に応じて複数の試験法を併用する場合もある．

3種の試験法のうち最も試験が簡便に実施できる衝撃載荷試験は，近年，データの解析手法に関する研究が進んだこともあり，序々に採用実績を延ばしている．また，試験の簡便さから同じ現場で複数の杭に対して試験が実施される場合も多く，データの蓄積が進んでいる．

衝撃載荷試験は，衝撃的な荷重に対する杭の挙動から静的な杭の挙動を推定するという試験の原理上，地盤が極限状態に至るような試験条件の場合には，試験で得られた結果を静的押込み試験結果等と同等に扱うことは難しいとされてきた（菊池ら，2009）．一方，静的押込み試

験結果との対応が確認できている場合や，地盤が極限状態に至らなくとも設計で求められる軸方向抵抗力を満足できているような場合には，衝撃載荷試験の結果を設計に活用したいという現場の要請もある．

そこで，本研究では，既往の文献に示された種々の載荷試験データの分析結果を活用するとともに，近年，港湾事業に関連して実施された衝撃載荷試験のデータを収集・分析し，載荷試験結果から杭の軸方向抵抗力を推定する手法を検討することとする．

2.2 杭の鉛直載荷試験結果の分析

杭の軸方向抵抗力の特性値や部分安全係数の考え方を整理するためには，同じ条件の杭について載荷試験を行った際のデータのばらつきを検討する必要がある．しかしながら，杭の載荷試験は大掛りなものであるため，一つの現場で複数の載荷試験を実施する例は少なく，まして同じ条件の杭について複数の載荷試験を実施した例は稀である．

前田ら（1986）は九州横断自動車道の高架橋基礎工事に際し複数の載荷試験を実施し，杭の軸方向抵抗力の信頼性評価を試みている．試験杭は場所打ちコンクリート杭で，長期・短期の静的載荷試験を実施している．隣接する2つの高架橋（延長約1800m）の5点で試験を実施し，載荷試験の結果から得られた周面抵抗力度 r_f を基に軸方向抵抗力の推定式を作成して設計を行っている．さらに，載荷試験で得られた軸方向抵抗力を用いてレベル2信頼性設計法（2次モーメント法）を適用し，すべての杭について信頼性指標 β が4.0以上となるよう杭長の変更等を行ったことが報告されている．なお，前田ら（1986）には1つの高架橋の3点で実施した載荷試験結果の統計量が明示されている．それによると，先端抵抗力 R_0 の変動係数 $C.V.$ は14.5%，周面抵抗力 R_f の $C.V.$ は5.5%であった．

松本ら（1998）は，能越自動車道の能越3号橋の建設にあたり，珪藻泥岩地盤に打撃施工された鋼管杭の衝撃載荷試験を実施して支持力特性を検討した．衝撃載荷試験の結果の整理では，杭の内周面と外周面の摩擦を別々に考慮し開端杭の先端閉塞効果を評価できるモデルを用いて波形マッチング解析を実施している．その結果によると，各橋脚，橋台位置において多数実施した衝撃載荷試験により得られた杭の軸方向抵抗力の変動係数 $C.V.$ が4～6%程度であった．松本ら（1998）は同じ現場で静的載荷試験をあわせて実施しており，静的載荷試験と衝撃載荷試験の結果がほぼ一致したと報告している．

水谷（2015）は，水島港水島玉島地区臨港道路の渡河部で実施された多数の衝撃載荷試験の結果を分析し，その

ばらつきを評価している。この内容については3章で詳しく述べる。

同一の現場ではなく、国内の各地で実施された杭の載荷試験結果を収集し、推定式を構築したりそのばらつきを評価する試みも行われている。

岡原ら（1990）は地方建設局、都道府県、道路4公団から収集した静的載荷試験結果を基に、鋼管杭と場所打ち杭の軸方向抵抗力の推定式を作成した。また、安全係数をあわせて検討している。載荷試験結果と新たに作成した推定式による推定値との比を用いて統計量を求めた結果、先端抵抗力 R_p の変動係数 $C.V.$ は50～60%、周面抵抗力 R_t の $C.V.$ は40%前後であったと報告されている。

松井・落合（1992）は、地盤の不確定性を考慮した摩擦杭基礎の支持力評価を行っている。その一環として、当時の道示に示されていた杭の軸方向抵抗力の推定式の持つばらつきと、現地で載荷試験を実施して求めた推定値のばらつきを比較している。それによると、推定式を用いた場合の軸方向抵抗力の変動係数 $C.V.$ は30.4%であるのに対し、一橋につき多数の載荷試験を実施した場合には $C.V.$ が4.7%まで低下する。一方、一橋で載荷試験を1回だけ実施して杭の軸方向抵抗力を推定する場合には $C.V.$ が27.1%と大きい。対応策として、地層構造等に基づき載荷試験結果の他地点への適用可能性を判定する方法を提案し、この方法を適用した場合には、一橋につき1回のみ載荷試験を行った場合でも変動係数 $C.V.$ が12.1%に抑えられると報告している。

なお、杭基礎設計便覧（日本道路協会、2015）では、前田ら（1986）、岡原ら（1992）、松井・落合（1992）の研究結果が総括され、道示に示された載荷試験を実施した場合の杭の極限支持力の補正係数（実質的には安全率の低減係数）が意義付けられている。

西岡ら（2008）は、鉄道事業に関連して実施された杭の載荷試験のデータベースに基づき、軸方向抵抗力の推定式を整理した。この研究では、杭基礎構造について種々の限界状態を設定し、それぞれの限界状態に対して目標安全性指数を設定する考え方が示されている。西岡ら（2008）の示したデータベースの分析結果によると、打撃施工された鋼管杭の長期使用状態の軸方向抵抗力について、先端抵抗力 R_p の変動係数 $C.V.$ が35%、周面抵抗力 R_t の $C.V.$ が5%となっている。

以上で述べた種々の研究では、載荷試験方法や対象としている杭施工法が一致していない。しかしながら、総じて見ると、先端抵抗力 R_p 、周面抵抗力 R_t の変動係数 $C.V.$ について、全国の載荷試験データに基づく推定式を用いる場合は30%以上、地層構造が類似する位置での載荷試験

を用いる場合は15%程度、地層構造が一致する直近の載荷試験データを用いる場合は10%以下というところがおよその値として意識される。なお、推定式で30%、現地の載荷試験で15%という $C.V.$ の値は、鉄道標準において載荷試験結果に基づく設計を行う場合の変動係数の下限値に対応しており、妥当な値であると思われる。

2.3 港湾基準における安全率設定の変遷

港湾基準では、単杭の軸方向抵抗力（先端支持杭の押し込み抵抗力）を載荷試験又は港湾基準に掲載されている推定式により求めた場合の安全率として、常時2.5、地震時1.5という値が用いられてきた。この安全率は、地盤の極限破壊状態に対応するもので、降伏状態に対しては1.5～2.0程度の安全率を与えるものと考えられている。これまでの港湾基準の改定では、安全率の数値は変化していないものの、その記述ぶりは少しずつ変化してきている。

平成元年の港湾基準までは、常時2.5、地震時1.5という数値が安全率の下限値とされている。そして、専門家の判断を得た上でこれを低減することができるが、いかなる場合においても、常時2.0、地震時1.5以下とすることは避けなければならないとされている。これに対し、平成11年の港湾基準では、引き続き同じ値の安全率を示し専門家の判断を得て低減することを許しているが、いかなる場合でも常時2.0、地震時1.5を確保しなければならないという記述は削除された。

平成19年の港湾基準では、信頼性設計に基づく照査手法が導入され、安全率ではなくパラメータ毎に部分安全係数を乗じる方法が採用された。これに合わせ、それまで常時・地震時で分類されていた杭頭荷重の種別が、船舶接岸・牽引及びクレーン作業時の荷重に関する変動状態と、レベル1地震動及び波浪による荷重に関する変動状態とに分類されることとなった。各変動状態は、本質的には平成11年までの港湾基準の常時・地震時に対応していると考えられるため、本稿では引き続き常時・地震時という区分を用いる。

平成19年の港湾基準で設定された杭の軸方向抵抗力の部分安全係数は、従来の安全率の逆数であり、安全性を担保する数値としては同等であると言える。ただし、平成19年の港湾基準に示された部分安全係数は標準値とされており、平成10年までの港湾基準で見られた安全率の下限値という表現とは少し異なる。また、従来の安全率に含まれていたと考えられる種々のパラメータの変動に対する安全性がそれぞれのパラメータ毎に部分安全係数として設定されていることなどから、平成19年の港湾基準により担保される安全性は、平成11年の港湾基準とは異なる

ものであると考えられる。

なお、道示では常時に対して3.0、暴風時及びレベル1地震時に対して2.0という安全率を採用している。現地で載荷試験を実施した場合は極限支持力に補正係数1.2を乗じる仕組みが導入されており、実質の安全率は常時2.5、暴風時及びレベル1地震時1.6程度に低減される。一方、鉄道標準では、各種の限界状態に応じて安全係数が設定されており、さらに先端抵抗力と周面抵抗力の比率によって係数を変化させる体系となっているので、港湾基準と単純に比較することが難しい。

2.4 本研究の目的と検討方針

本研究の目的は、現地で実施される杭の載荷試験結果から杭の押込みに対する軸方向抵抗力を推定する手法を提案することにある。具体的には、載荷試験結果から特性値を決定する方法と、その特性値に対して適用すべき安全係数を示すことである。その為には、これまでに実施された載荷試験の結果を活用し、試験結果のばらつきを評価する必要がある。このため、2.2で述べた既往の文献に示された分析結果に加え、3章及び4章で近年の港湾事業にあわせて実施された衝撃載荷試験の結果を整理し、そのばらつきを評価する。5章では、4章までの分析結果に基づき、載荷試験結果から杭の軸方向抵抗力の特性値及び安全係数を決定する方法を、いくつかの場合に分けて提案する。最後に6章で本研究を総括する。

3. 水島港で実施された衝撃載荷試験

3.1 試験の概要

水島港では、臨港道路の建設にあたり多数の衝撃載荷試験が実施され、そのデータの分析が行われている。ここではその概要を紹介する。なお、試験条件・試験結果の詳細については、水谷(2015)に示されているので参照願いたい。

試験が実施されたのは水島港水島玉島地区臨港道路の一部として橋梁の建設が予定されている高梁川の河口付近である。試験実施位置を図-3.1に示す。建設予定地での河幅は約1400mで、その間に概ね等間隔で19の橋脚(P1～P19)を建設する計画となっている。施工に先立ち各橋脚予定位置で調査ボーリングを行うと同時に、試験杭を打設して衝撃載荷試験が実施された。なお、橋脚の施工にあわせて、本設杭を用いた試験も実施されており、これらの結果もデータの分析に用いている。

ボーリングにより確認された地盤の成層状況を図-3.2に示す。図-3.2より、Asc2が部分的に点在している点を除けば、橋軸方向に概ね様な成層状態であると考えられる。また、ボーリング調査結果の記載内容から、各土層の土質が橋軸方向に変化しているような様子は見られない。なお、ボーリング調査結果及び杭に求められる軸方向抵抗力の大きさから、Dg2層が杭の支持層に選定された。

衝撃載荷試験は地盤工学会基準(地盤工学会, 2002)に従って実施された。試験後に、得られたデータを用いて

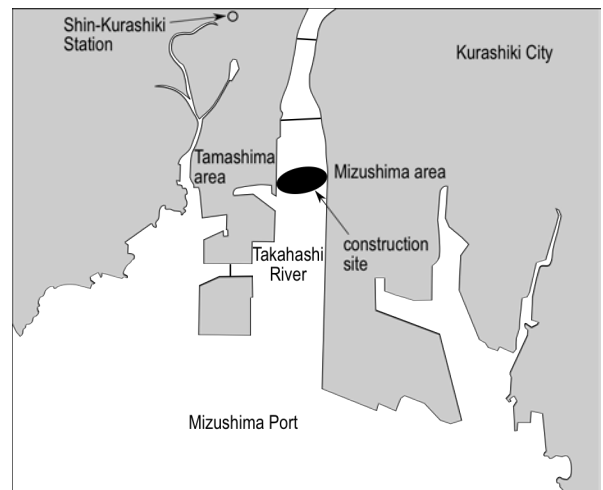


図-3.1 衝撃載荷試験を実施した位置(図中央の黒色楕円部)

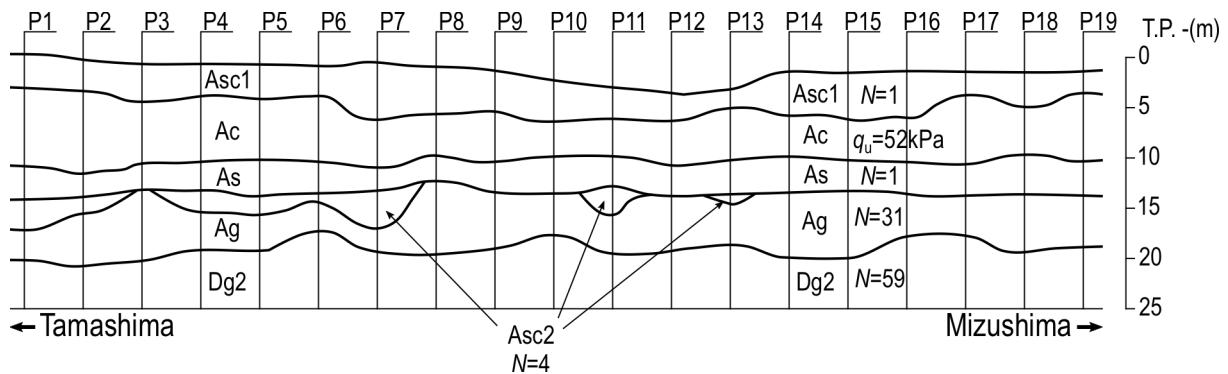


図-3.2 地盤の成層状況

Smith (1960) のモデルを用いた波形マッチング解析を行い、地盤の静的抵抗を算出している。本検討では衝撃載荷試験方法及び結果の解析方法は確立されたものと考え、試験方法及び解析方法そのものについての検討は行っていない。つまり、通常業務において実施される衝撃載荷試験により一般的に得られるであろう試験結果を用いることを原則とし、精度向上を目的とした特殊な解析は実施していない。

試験杭はいずれも杭径1000mmの鋼管杭で、各橋脚位置において杭種、養生日数(0~28日)を変化させ計65ケース実施した。

3.2 試験結果の概要

各橋脚位置で得られた杭の全抵抗力 R_t を図-3.3に、先端抵抗力 R_p を図-3.4に示す。いずれの図からも、開端杭よりもその他の杭の方が抵抗力が大きい傾向が見られる。その他の杭のうち、P3橋脚以外の橋脚で実施した試験は、すべて先端十字リブを杭先端から2mの範囲に取り付けた杭(以下、十字リブ杭という)を対象とした試験である。P3橋脚では、開端杭、十字リブ杭の他、先端十字リブの取り付け範囲を変更した杭や特殊な形状のリブを取り付けた杭の試験を実施したが、試験結果に大きな差は見られなかった。ここでは、開端杭と十字リブ杭について行った載荷試験を対象として結果を分析する。

図-3.3及び図-3.4によると、養生日数が大きくなるに従って、抵抗力がわずかながら増加する傾向が見受けられる。これは、杭のセットアップ(杭施工により乱された地盤の強度回復等に起因する杭の軸方向抵抗力の増加)によるものと考えられる。同一の杭を用いて実施した試験結果から、養生日数が0~1日ではセットアップが不十分と判断されたため、以下では養生日数が0~1日の試験は対象外として結果を分析する。

図-3.4に示した先端抵抗力 R_p について統計量を求めた結果を表-3.1に示す。全対象データについて計算した場合、杭種により分けて計算した場合の結果をあわせて示している。求められた R_p の平均値は、過去に近隣で実施された静的押込み試験で得られた値(富永ら, 1976)と概ね対応していることから、今回の衝撃載荷試験結果は妥当なものであると考えられる。表-3.1より、全対象データに対して計算しても、杭種毎に分けて計算しても変動係数 $C.V.$ は20%弱となっていることが確認できる。

一連の試験の中には、同じ橋脚位置で杭種、養生日数等の試験条件が一致する杭について実施された試験がある。これらの試験で得られた先端抵抗力 R_p を図-3.5に、統計量を表-3.2に示す。いずれも4本の杭の試験結果であるが、

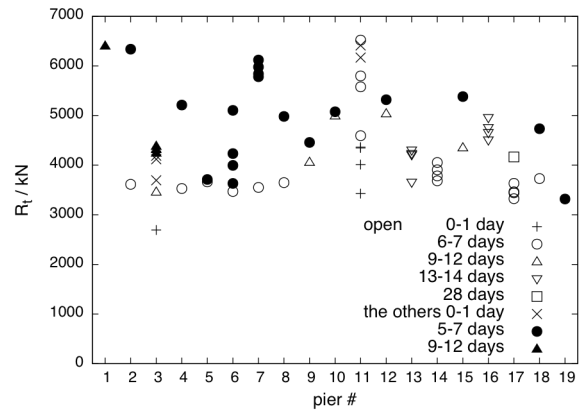


図-3.3 各橋脚位置で計測された杭の全抵抗力 R_t 。横軸は橋脚番号。開端杭(open)とその他の杭(the others)に分け、養生日数毎にプロット。

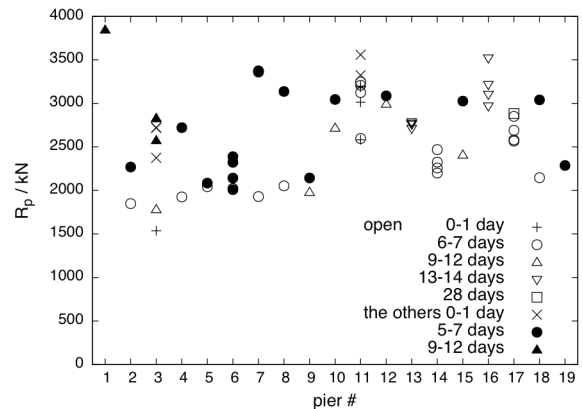


図-3.4 各橋脚位置で計測された杭の先端抵抗力 R_p 。横軸は橋脚番号。開端杭(open)とその他の杭(the others)に分け、養生日数毎にプロット。

表-3.1 先端抵抗力 R_p の統計量 (n はデータ数)

杭種	n	平均値 (kN)	$C.V.$ (%)
全対象データ	53	2650	19.2
開端杭	33	2570	18.4
十字リブ杭	20	2790	19.6

試験結果のばらつきは小さく、変動係数 $C.V.$ は10%を下回っている。

次に、杭の周面抵抗力 R_f について検討する。今回の試験では、同じ橋脚位置で試験を実施した杭の根入れ長は等しいが、橋脚位置が異なる場合は根入れ長も異なる。また、地盤の層構造は橋軸方向に完全に一定ではないため、橋脚位置により各層の層厚が異なる(図-3.2参照)。その

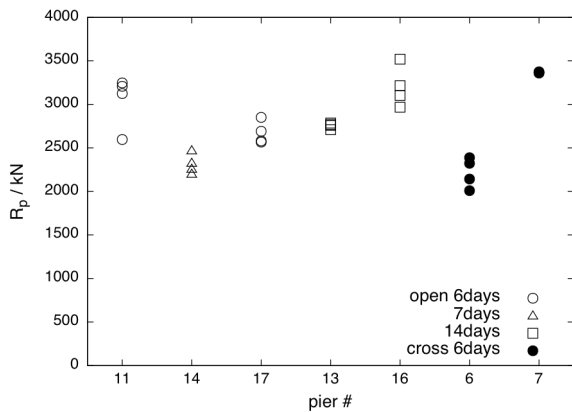


図-3.5 試験条件・実施位置が一致する載荷試験で得られた先端抵抗力 R_p . 白抜きは開端杭, 黒塗りは十字リブ杭で, 養生日数に応じてマークを変更.

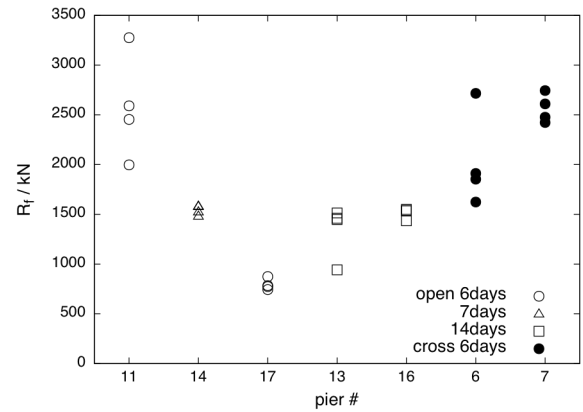


図-3.6 試験条件・実施位置が一致する載荷試験で得られた周面抵抗力 R_f . 白抜きは開端杭, 黒塗りは十字リブ杭で, 養生日数に応じてマークを変更.

表-3.2 試験条件・実施位置が一致する載荷試験で得られた先端抵抗力 R_p の統計量 (n はデータ数)

橋脚	養生 (days)	杭種	n	平均値 (kN)	C. V. (%)
11	6	開端	4	3040	9.93
14	7	開端	4	2310	5.02
17	6	開端	4	2670	4.91
13	14	開端	4	2760	1.18
16	14	開端	4	3200	7.34
6	6	十字	4	2220	7.75
7	6	十字	4	3370	0.19

表-3.3 試験条件・実施位置が一致する載荷試験で得られた周面抵抗力 R_f の統計量 (n はデータ数)

橋脚	養生 (days)	杭種	n	平均値 (kN)	C. V. (%)
11	6	開端	4	2580	20.5
14	7	開端	4	1540	3.10
17	6	開端	4	794	7.10
13	14	開端	4	1340	20.0
16	14	開端	4	1510	3.54
6	6	十字	4	2030	23.5
7	6	十字	4	2560	5.62

ため, 分析対象のデータ全体について R_f の統計量を求めても意味がない. そこで, 同じ橋脚位置, 同じ試験条件で実施された試験に着目し, 得られた R_f を図-3.6に, その統計量を表-3.3に示す. 図-3.6及び表-3.3より, 同条件の試験であっても周面抵抗力 R_f のばらつきが大きい場合があることがわかる. 変動係数 C. V. は3.1%から23.5%と幅広い値を示している.

杭の周面抵抗力を R_f 求める際は, 地盤を構成する各層毎に周面抵抗力度 r_f を定め, これに各層内での杭長と杭周面積を乗じたものを合算して R_f とするのが一般的である. そこで, 試験の結果から各層毎の r_f を集計し分析することを試みた. 分析対象は, 先端抵抗力 R_p の分析と同様に, 養生日数が2日以上の開端杭又は十字リブ杭の試験データである. 得られた周面抵抗力度 r_f の深度方向分布を図-3.7に, その統計量を表-3.4に示す.

図-3.7より, 周面抵抗力度 r_f はいずれの土層においても深度方向に増加する傾向があり, それに伴ってばらつ

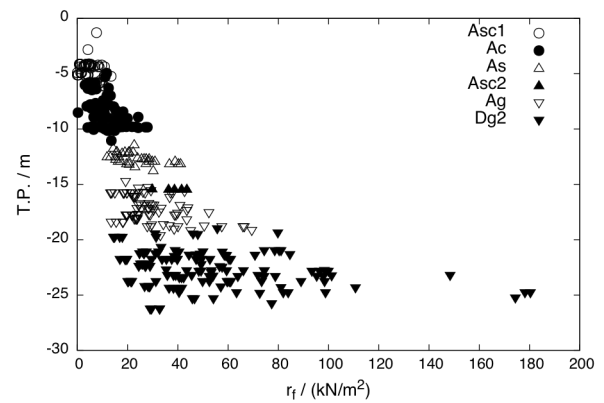


図-3.7 周面抵抗力度 r_f の深度方向分布

きも大きくなっている. また, 表-3.4に示したとおり, データ数 n が少ないAsc2を除くと, 各層の r_f の変動係数 C. V. は30~60%に達している. これらの r_f を用いて杭の周面抵抗力を推定すると, そのばらつきも大きいことが想定される. そこで, 試験で得られた r_f を用いて周面

表-3.4 周面抵抗力度 r_f の統計量 (n はデータ数)

	N 値又は q_u (kPa)	n	平均値 (kN/m ²)	C. V. (%)
Asc1	1	56	5.46	58.4
Ac	52 (kPa)	97	11.2	49.5
As	1	29	24.1	31.8
Asc2	4	5	38.0	14.1
Ag	31	71	31.0	38.7
Dg2	59	120	53.2	52.8

表-3.5 各層の周面抵抗力度 r_f の特性値

	r_{fk} (kN/m ²)
Asc1	4.75
Ac	10.3
As	21.7
Asc2	32.9
Ag	28.6
Dg2	48.9

表-3.6 R_f / R_{fk} の統計量

杭種	n	平均値	C. V. (%)
全対象データ	53	1.09	33.6

抵抗力の特性値 R_{fk} を推定し、試験で得られた周面抵抗力度 R_f と比較することでそのばらつきを評価することを試みた。

はじめに試験で得られた周面抵抗力度 r_f のデータから、各層の周面抵抗力度の特性値 r_{fk} を定める必要がある。ここでは、地盤工学会 (2006) を参考に、 r_f の平均値の95%信頼区間の下限値を特性値とした。各層の r_{fk} を表-3.5に示す。この r_{fk} を用いて、分析対象とした試験杭それぞれの周面抵抗力度の特性値 R_{fk} を計算した。そして試験で得られた周面抵抗力度 R_f との比 R_f/R_{fk} について統計量を求めると表-3.6に示したようになった。

表-3.6で R_f/R_{fk} の平均値が1より大きくなっているのは、周面抵抗力度の特性値 r_{fk} を求める際に95%信頼区間の下限値としたことが影響したものであると考えられる。表-3.6によると、 R_f/R_{fk} の変動係数 C. V. は33.6%である。つまり、杭の載荷試験を行った後、その結果を用いて地層構造が少し異なる近隣地点における杭の周面抵抗力度を推

定すると、その推定値は実測値に対して C. V. で35%程度のばらつきを有していることがわかる。

3.3 試験結果のまとめ

水島港臨港道路の渡河部で実施した多数の衝撃載荷試験の結果を分析し、杭の先端抵抗力度 R_p 、周面抵抗力度 R_f の変動係数 C. V. を求めた。その結果、同じ橋脚位置で同条件の試験を行った場合、 R_p の C. V. は10%程度、 R_f の C. V. は25%程度であった。一方、19橋脚すべてを対象とし、試験条件等が異なる場合もあわせて分析した場合、 R_p の C. V. は20%程度、 R_f の C. V. は35%程度と考えられる。

杭の全抵抗力度は、先端抵抗力度と周面抵抗力度の和であるから、上述のそれぞれの変動係数 C. V. を基に全抵抗力度の C. V. を計算することが可能である。水谷 (2015) はいくつかの方法で全抵抗力度の C. V. を求めている。それによると、全抵抗力度の C. V. は、同じ橋脚位置の場合で15%以下、全橋脚を対象とした場合には20%以下となっている。

4. その他の港湾で実施された衝撃載荷試験

4.1 A港における衝撃載荷試験

(1) 試験概要

A港では、杭式栈橋の施工にあたり、杭径1500mm、長さ45.1mの本設杭3本について衝撃載荷試験を実施した。この杭式栈橋は海側杭、中間杭、陸側杭の3列の杭で支えられる構造で、試験した杭1~3はいずれも栈橋の陸側杭である。杭は油圧ハンマーによる打撃工法で施工された。法線方向の離隔は、杭1と杭2の間で100m、杭2と杭3の間で125mとなっている。杭の支持層は、砂礫又は礫混り砂層と判定されており、N値が50以上の層である。

衝撃載荷試験は、各杭について施工時と養生0.5~1日後の2回行っている。養生日数が短いのは、これ以上の養生日数を設けると周面抵抗力度が大きくなり過ぎ、ハンマーの能力不足により試験が実施できない可能性があることを考慮したものである。そのため、この試験では先端抵抗力度の評価が目的とされており、周面抵抗力度は評価対象外とされている。

(2) 試験結果

衝撃載荷試験により得られた各杭の先端抵抗力度 R_p を表-4.1に示す。いずれの杭についても施工時より養生後の方が R_p が大きく、セットアップ効果が確認できる。養生後の試験結果を用いて統計量を計算すると、平均値が5270kN、変動係数 C. V. が4.12%となり、 R_p のばらつきは小さいと考えられる。

表-4.1 A港で実施された衝撃載荷試験で得られた先端抵抗力 R_p

杭	施工時 (kN)	養生後 (kN)
1	2784	5147
2	2818	5523
3	2792	5146

表-4.2 B港で実施された衝撃載荷試験の試験杭の諸元

杭	杭径 (mm)	全長 (m)	杭長 (m)	肉厚 (mm)	先端深度 (m)
A	1100	44.5	上 27.5	15	-40.85
			下 17.0	11	
B	1100	44.0	上 27.5	15	-40.35
			下 16.5	11	
C	1100	44.0	上 27.5	15	-40.35
			下 16.5	11	

4.2 B港における衝撃載荷試験

(1) 試験概要

B港では、杭式栈橋の築造に際し、3本の本設杭に対して衝撃載荷試験を実施している。各杭の諸元を表-4.2に示す。栈橋は、海側から斜杭、海側直杭、中間直杭、陸側直杭の4列の杭で支えられる構造で、試験に用いられた杭A～Cはいずれも斜杭である。斜杭は鉛直に対して15度の傾角を有し、油圧ハンマーによる打撃工法で施工された。法線方向の離隔は杭AとBの間で43m、杭BとCの間で57mとなっている。各杭の位置での地盤の層構造は概ね同様で、D.L. -40m付近から現れるN値50以上の小礫混り中砂層が支持層とされている。衝撃載荷試験は、各杭について施工時と14日養生後の2回実施された。

(2) 試験結果

はじめに、養生後の試験で確認された周面抵抗力 r_f を表-4.3～表-4.5に示す。杭Cにおいて、D.L. -24～33m付近の細砂層の r_f が小さい値となっているが、これは、データ解析時の層分割の違いによるものと考えられる。従って、杭A～Cで r_f の計測結果に大きな差は無いと言って良い。このことから、各杭の位置における地盤の層構造が概ね同様なものであると判断できる。そこで、ここでは、層毎の周面抵抗力 r_f を議論するのではなく、各杭の試験で得られた周面抵抗力 R_f を直接比較することにする。

衝撃載荷試験で得られた各杭の先端抵抗力 R_p と周面抵抗力 R_f 、全抵抗力 R_t の一覧を表-4.6に示す。表-4.6より杭Cの養生前の R_f が他の杭よりも小さいことが確認

表-4.3 杭Aの試験で得られた周面抵抗力度 r_f

深度 (m)	土 質	r_f (kN/m ²)
-9.200		
～ -16.160	砂質シルト・シルト	25
～ -21.360	シルト質細砂・細砂	20
～ -25.060	腐食土・細砂・有機質粘土	45
～ -33.660	細砂・シルト質細砂	80
～ -39.260	砂質シルト・シルト質細砂	75
～ -40.850	小礫混り中砂	85

表-4.4 杭Bの試験で得られた周面抵抗力度 r_f

深度 (m)	土 質	r_f (kN/m ²)
-10.800		
～ -17.610	砂質シルト	25
～ -21.160	シルト質細砂・細砂	20
～ -26.160	腐食土・細砂	35
～ -33.760	細砂・シルト質細砂	70
～ -38.660	シルト質細砂・砂質シルト	60
～ -40.350	礫混り中砂	80

表-4.5 杭Cの試験で得られた周面抵抗力度 r_f

深度 (m)	土 質	r_f (kN/m ²)
-6.500		
～ -16.130	シルト質細砂・砂質シルト	30
～ -23.580	シルト質細砂・腐食土・砂質粘土	45
～ -32.730	細砂・シルト質細砂	30
～ -38.130	砂質シルト	75
～ -40.350	小礫混り中砂	90

表-4.6 B港で実施された衝撃載荷試験により得られた先端抵抗力 R_p ・周面抵抗力 R_f ・全抵抗力 R_t

杭		R_p (kN)	R_f (kN)	R_t (kN)
A	養生前	245	2527	2872
	養生後	1725	6040	7765
B	養生前	414	2667	3081
	養生後	1518	4891	6409
C	養生前	621	1822	2443
	養生後	1794	5381	7175

表-4.7 B港で実施された衝撃載荷試験（養生後）により得られた先端抵抗力 R_p ・周面抵抗力 R_f ・全抵抗力 R_t の統計量

	平均値 (kN)	C. V. (%)
R_p	1679	8.55
R_f	5437	10.6
R_t	7116	9.55

表-4.8 C港で実施された衝撃載荷試験の試験杭の諸元

杭	杭径 (mm)	全長 (m)	杭長 (m)	肉厚 (mm)	先端深度 (m)
A	1500	48.38	上 4.25	22	-42.30
			14.38	15	
			7.00	15	
			下 12.30	15	
			上 4.25	18	
			3.54	15	
B	1500	48.49	14.50	17	-42.20
			下 26.20	15	
			上 4.15	22	
			3.79	14	
C	1400	48.54	17.50	24	-42.10
			3.00	17	
			下 20.10	14	
			3.00	17	

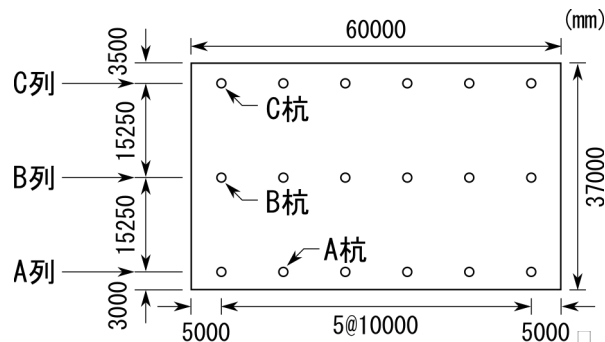


図-4.1 C港で実施された衝撃載荷試験の試験杭A～Cの平面位置関係

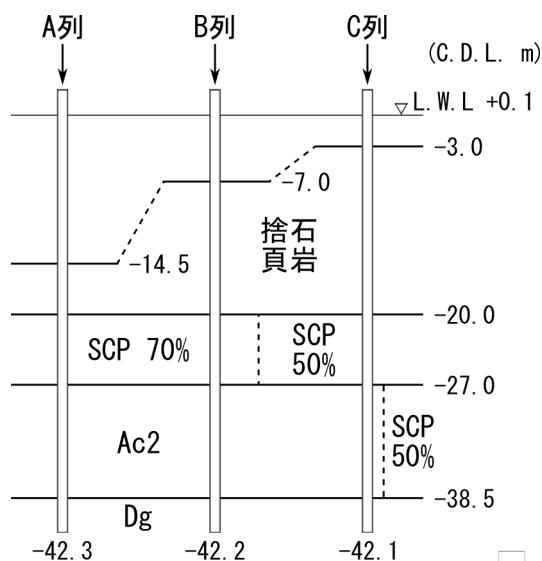


図-4.2 C港衝撃載荷試験の実施位置の地層構造

できる。養生後には他の杭と同程度の値まで回復していることから、施工時の乱れが大きかったことが原因と考えられる。杭A～Cの養生後の試験結果を見ると、杭の軸方向抵抗力の大部分が周面抵抗により発揮されており、杭径や支持地盤の土質に対して R_p が小さいように思える。試験の際に計測された加速度波形等を確認すると、ハンマーの能力不足により荷重が杭先端まで十分に伝達されておらず、先端抵抗力を過小に評価している可能性がある。

杭A～Cの養生後の載荷試験結果を基に、先端抵抗力 R_p 、周面抵抗力 R_f 、全抵抗力 R_t の統計量を求めると表-4.7 のようになる。 R_p 、 R_f 、 R_t の変動係数 C. V. はいずれも10%前後であり、試験結果のばらつきが小さいことが確認できる。

4.3 C港における衝撃載荷試験

(1) 試験概要

C港では、ジャケット式の栈橋の整備に際し、3本の本設

杭について衝撃載荷試験が行われた。試験を行った杭の諸元を表-4.8に示す。栈橋は、海側からA～C列と名付けられた3列の杭で支えられる構造となっている。試験を行った杭A～Cは、同じブロックのジャケットを支える杭で、平面上の位置関係は図-4.1のようである。杭はパイロハンマで施工された後、打止め時に油圧ハンマーで最終打撃する工法が採用された。

試験実施位置の地盤の層構造を図-4.2に示す。杭A、BではSCP層の改良率が70%であるのに対し、杭Cでは50%となっている。衝撃載荷試験は各杭の養生後の1回のみ実施した。養生日数は杭A、Bでは13日であるのに対し、杭Cは11日とわずかに短い。

(2) 試験結果

養生後の試験で確認された周面抵抗力度 r_f を表-4.9に示す。杭A及びBについてはほぼ同様な結果が得られており、地盤の層構造は同一と考えられる。一方、杭Cでは、 r_f がSCP層やAc2層で大きな値を示している。先述のとおり

表-4.9 C港で実施された衝撃載荷試験により得られた各土層の周面抵抗力度 r_f

	杭 A r_f (kN/m ²)	杭 B r_f (kN/m ²)	杭 C r_f (kN/m ²)
捨石・頁岩	7.84	5.70	9.49
SCP 70%	37.23	27.46	
50%			62.73
Ac2	58.52	52.04	86.32
Dg	96.83	95.45	76.96

表-4.10 C港で実施された衝撃載荷試験により得られた先端抵抗力 R_p ・周面抵抗力 R_f ・全抵抗力 R_t

杭	養生 (days)	R_p (kN)	R_f (kN)	R_t (kN)
A	13	3067	6383	9450
B	13	2964	5876	8840
C	11	3283	8302	11585

表-4.11 C港の杭A～Cの衝撃載荷試験により得られた先端抵抗力 R_p ・周面抵抗力 R_f ・全抵抗力 R_t の統計量

	平均値 (kN)	C. V. (%)
R_p	3105	5.24
R_f	6854	18.7
R_t	9958	14.5

表-4.12 C港の杭A及びBの衝撃載荷試験により得られた先端抵抗力 R_p ・周面抵抗力 R_f ・全抵抗力 R_t の統計量

	平均値 (kN)	C. V. (%)
R_p	3016	2.42
R_f	6130	5.85
R_t	9145	4.71

りSCP層の改良率が異なる他、岸壁背後においては杭Cのごく近傍の地点までAc2層のSCP改良が行われていることもあり、その影響が現れた可能性もある。いずれにせよ杭Cの地盤条件は杭A、Bと多少異なると考えた方がよい。

衝撃載荷試験で得られた各杭の先端抵抗力 R_p と周面抵抗力 R_f 、全抵抗力 R_t を表-4.10に示す。杭AとBでは試験結果が似通っているが、杭Cはやや大きい値を示している。なお、試験報告書によると、いずれの試験についても、ハンマーの能力不足により先端抵抗力を過小評価している可能性が指摘されている。

表-4.10に示した杭A～Cの試験結果を用いて計算した統計量を表-4.11に、杭Cの試験結果を除外して杭A、Bの結果から計算した統計量を表-4.12に示す。杭A～Cの試験結果を用いた場合、 R_p 、 R_f 、 R_t の変動係数 C. V. が大きく、試験結果のばらつきが大きいと考えられる。一方、杭Cの結果を除外すると、 R_p 、 R_f 、 R_t の C. V. はいずれも5%前後であり、ばらつきは非常に小さい。このように、載荷試験がごく近い位置で実施されていても、地盤条件が明らかに異なっている場合には、試験結果の整理の際にデータを条件に応じてグルーピングするなどの工夫が必要である。

4.4 D港における衝撃載荷試験

(1) 試験概要

D港では、道路橋の橋脚の建設にあわせ、2本の鋼管矢板について衝撃載荷試験が実施されている。試験対象は鋼管矢板基礎工法で用いる鋼管矢板であるが、単杭の状態で試験を実施しているため、継手等の影響を考慮する必要はない。以下では単に杭と呼ぶ。試験された杭の諸元を表-4.13に示す。試験された2本の杭は遠く離れており、約900mの離隔がある。杭1はパイプロハンマにより打設した後、最終打撃により打ち止めている。一方、杭2は、油圧ハンマーを用いた打撃工法により打設されている。地盤の層構造は概ね同様なものであり、N値が50以上の砂層が支持層として選定されている。衝撃載荷試験は、両杭とも施工時の1回のみ実施した。

(2) 試験結果

施工時の衝撃載荷試験のみ実施されているため、施工に伴い地盤が乱され周面抵抗力は十分に発揮されていないと考えられる。ここでは、先端抵抗力 R_p についてのみの検討する。

杭1で得られた先端抵抗力 R_p は1020kN、杭2では1099kNであった。この値を基に統計量を計算すると、平均値が1060kN、標準偏差が55.9、変動係数 C. V. が5.3%となる。このように、非常に離れた地点であっても、条件によってはばらつきの少ない結果が得られる場合がある。

表-4.13 D港で実施された衝撃載荷試験の試験杭の諸元

杭	杭径 (mm)	全長 (m)	肉厚 (mm)	先端深度 (m)
1	800	41.5	12	-42.05
2	800	44.0	12	-43.90

4.5 E港における衝撃載荷試験

(1) 試験概要

E港では、岸壁の改良工事に際して多数の杭の衝撃載荷試験が実施された。試験を実施した杭の平面的な位置関係を図-4.3に、杭諸元を表-4.14に示す。杭1-1~2及び3-1~2は、海側・陸側の2列の杭でジャケットを支える構造の栈橋を支える杭である。杭2-1~2及び4-1~2は、鋼管矢板井筒により構築される岸壁の周壁を成す鋼管矢板であるが、両側の矢板が未打設の間に単杭の状態で作荷試験を実施した。

この改良工事では、事前に既存の栈橋を撤去し、その支持杭も引き抜いている。新しい杭は、先孔削孔を行って岩ズリ置換を行った後に打設している。試験杭の位置毎に先孔削孔及び置換を行った深度が異なっており、地盤の層構造は一致していない。ただし、杭先端の位置する支持層はいずれの杭についても同じ土層で、N値が50以上の泥岩層となっている。いずれの杭も油圧ハンマーによる打撃工法により打設された(ただし、浅層部で一部バイブロハンマを使用したとの記述が試験報告書に見受けられた)。

(2) 試験結果

各試験で得られた杭の先端抵抗力 R_p と周面抵抗力 R_s 、全抵抗力 R_t を表-4.15に示す。いずれの試験の報告書においても、ハンマーの能力不足から先端抵抗力を過小評価している可能性が言及されている。杭径が等しく平面的な距離に近い位置の試験だけに着目すると、試験で得られた各抵抗力は比較的近い値を示している。例えば、杭1-1と1-2、杭2-1と2-2の試験結果から養生後の各抵抗力の変動係数 $C.V.$ を求めると表-4.16のようになりに小さい値を示す。しかしながら、表-4.15を見ると、杭径が近い杭(杭1-1~3-2の6本)でも、各抵抗力の値や大小の傾向が異なっていることがわかる。この6本の杭について、養生日数0日の全抵抗力の統計量を求めると $C.V.$ が約21%となり、ばらつきが大きいことがわかる。また、杭径が大きい杭4-1~2では、全抵抗力が他の杭よりも大きい。

このように、杭の諸元や載荷試験の条件等が異なるような場合には、その試験結果を一括して取り扱うことが難しい。従って、載荷試験を計画する際は、実際に使用する杭の諸元と同じ杭を用いることが重要である。また、同じ現場内で地盤条件や施工条件が大きく変化するような場合には、それぞれの条件下で試験を行い、データを取得する必要がある。

4.6 衝撃載荷試験結果のまとめ

本章では、近年、各港で実施された衝撃載荷試験のうち、

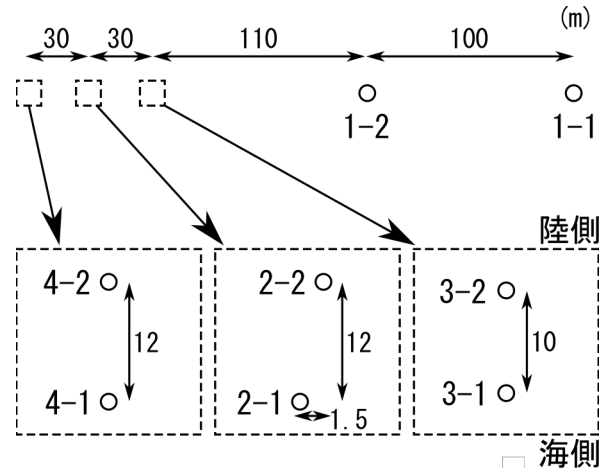


図-4.3 E港で実施された衝撃載荷試験の試験杭の平面的な位置関係

表-4.14 E港で実施された衝撃載荷試験の試験杭の諸元

杭	杭径 (mm)	全長 (m)	杭長 (m)	肉厚 (mm)	先端深度 (m)
1-1	1300	40.5		17	-35.6
1-2	1300	46.0		17	-35.6
2-1	1200	38.0		14	-35.5
2-2	1200	39.0	上 28.5 下 10.5	17 14	-36.5
3-1	1300	44.5	上 37.5 下 7.0	14 13	-39.3
3-2	1300	46.5	上 35.0 下 11.5	16 12	-30.4
4-1	1600	45.5	上 24.5 下 21.0	23 18	-39.5
4-2	1600	44.5		18	-38.0

同じ現場で複数の杭に対して試験が実施された事例を紹介した。対象構造物や試験条件等が異なるため、これらの結果を統一的に議論することは難しい。しかしながら、杭の諸元や地盤条件が良く一致している場合には、載荷試験結果のばらつきは小さく、先端抵抗力 R_p 、周面抵抗力 R_s 、全抵抗力 R_t の変動係数 $C.V.$ が10%程度以下となることが確認できた。杭諸元や地盤条件が完全には一致しないものの類似している場合には、 $C.V.$ が20%程度とな

表-4.15 E港で実施された衝撃載荷試験により得られた先端抵抗力 R_p ・周面抵抗力 R_f ・全抵抗力 R_t

杭	養生 (days)	R_p (kN)	R_f (kN)	R_t (kN)
1-1	0	1749	3514	5263
	1	2137	8717	10854
1-2	0	1268	4485	5754
	1	2134	8871	11005
2-1	0	1172	4953	6126
	8	1703	11329	13032
2-2	0	1598	6667	8264
	2	1690	10424	12114
3-1	0	1496	7361	8857
3-2	0	361	6198	6559
4-1	0	1102	12563	13665
	3	1753	13528	15281
4-2	0	3584	5661	9245
	3	5164	8475	13638

表-4.16 E港の杭1-1と1-2, 杭2-1と2-2の衝撃載荷試験により得られた養生後の先端抵抗力 R_p ・周面抵抗力 R_f ・全抵抗力 R_t の統計量

対象杭		平均値 (kN)	C. V. (%)
杭 1-1 及び	R_p	2136	0.0993
	R_f	8794	1.24
杭 1-2	R_t	10930	0.977
杭 2-1 及び	R_p	1697	0.542
	R_f	10880	5.88
杭 2-2	R_t	12570	5.16

っている。なお、杭の諸元や地盤条件が異なる場合には、載荷試験結果のばらつきが大きくなる。複数の載荷試験を実施した結果、ばらつきが非常に大きい場合には、データを一括して取り扱うのではなく、個別にあるいは適切にグループ分けしてデータ整理することを検討すべきである。

5. 載荷試験結果に基づく杭の軸方向抵抗力の推定

5.1 基本的な考え方

2章で述べた既往の研究や3章、4章で紹介した載荷試験の例から、実施工現場で載荷試験を行うことにより、一般

的な推定式による推定よりも高い精度で杭の軸方向抵抗力を推定可能であると判断される。そこで、杭諸元や地盤条件が本施工で用いる杭と同等な条件で載荷試験を実施し、その結果を設計に活用する場合の取扱いについて検討する。

はじめに、載荷試験により得られたデータから特性値を決定する方法を5.2で説明する。次に、その特性値を用いるにあたって適用すべき部分安全係数の考え方を5.3で整理する。最後に、5.4で載荷試験を試験条件毎に分類し、それぞれの場合について特性値・部分安全係数の考え方を総括する。

5.2 特性値の決定方法

(1) 基本方針

土質調査の結果を基に設計に用いる地盤定数の特性値を決定する方法としては、性能設計概念に基づいた基礎構造物等に関する設計原則（地盤工学会，2006）（以下、設計原則という）が参考となる。設計原則によると、特性値は試験結果から導き出された値（導出値）の平均値である。ただし、単なる機械的な平均ではなく、統計的な平均値の推定誤差を勘案した平均値とされている。一般的には、試験結果の平均値（標本平均）を用いるのではなく、区間推定による母集団平均の推定を行って、その上限値又は下限値を特性値とする。区間推定で用いる信頼係数は特に定められていない。港湾基準で採用されている地盤定数の決定方法（渡部ら，2009）は、設計原則と多少異なった処理体系となっているが、基本的な考え方は同様である。

杭の載荷試験結果に関しては、西岡ら（2008）が実施したデータ整理が参考となる。西岡ら（2008）は設計原則の考え方に従って杭の載荷試験結果を整理しており、この際、信頼係数として片側で75%という値を採用している。これは、特性値を決定した後にさらに安全率を乗じることを考慮し、無用に安全側の値を特性値として採用することにならないように配慮したものである。

杭の軸方向抵抗力に関する照査は、比較的単純な照査式で行われる場合が多い。照査式中の抵抗側の成分は杭の軸方向抵抗力のみとなり、他の抵抗成分が含まれないのが一般的である。そのため、軸方向抵抗力の特性値を平均値の区間推定により決定する際の信頼係数は、照査で担保される安全性に直結する。つまり、大きな信頼係数を採用することは、部分安全係数を小さく（安全率を大きく）設定するのと同質的である。しかし一方で、特性値はそのパラメータの代表値とし、安全上の余裕は部分安全係数で制御するとした方が、特性値と部分安全係数の

役割が明確で理解しやすい。このように考えると、特性値を決定する際に信頼係数をあまり大きく設定することは好ましくない。ここでは、西岡ら(2008)の考え方に従い、信頼係数を片側75%として特性値を求めることにする。

(2) 試験データが複数の場合

ある値 A の試験データを複数個取得し、その特性値 A_k を決定する方法を考える。杭の載荷試験の場合、 A として考えられるのは、杭の全抵抗 R_t や先端抵抗 R_p 、周面抵抗 R_f 、地盤の各層毎の周面抵抗 r_f である。 A の母集団平均 μ_A の片側75%信頼区間は式(1)により求められる。

$$\mu_A \geq m_A + k_n s_A n^{-1/2} \quad (1)$$

ここに、 m_A : A の試験データの算術平均値(標本平均値)、 k_n : 自由度 $n-1$ の t 分布の下側25%点、 n : 試験データ数、 s_A : A の試験データの標準偏差(不偏分散 s_A^2 の正の平方根)である。式(1)は、 A が正規分布に従う独立な確率変数で、 A の母集団の分散 σ_A^2 を試験データの不偏分散 s_A^2 とする仮定の下に導びかれた式である。従って、本来、式(1)を用いる際には A が正規分布に従う独立な確率変数であることを確認する必要がある。しかしながら、2章、3章で紹介した過去の研究成果によると、杭の載荷試験結果に関しては、この条件は概ね満たされているものと考えられる。

k_n の値は数表や表計算ソフトなどを利用することで確認できる。例えば、ExcelではT.INVという関数が用意されており、T.INV(0.25, $n-1$)により k_n が計算される。

前節で述べたように、 A の特性値 A_k は75%信頼区間の下限値とする。変動係数 $C.V. = s_A / m_A$ であるから、 A_k は式(2)のように表すことができる。

$$\begin{aligned} A_k &= \{ 1 + k_n n^{-1/2} C.V. \} m_A \\ &= k'_{n,C.V.} m_A \end{aligned} \quad (2)$$

変動係数 $C.V.$ の値を変化させて試験データ数 n と k'_n の関係を図示すると図-5.1のようになる。図-5.1より、試験データ数 n が大きいほど、また変動係数 $C.V.$ が小さいほど、 k'_n が大きいことが確認できる。 $C.V.$ が10%の場合、試験データが2個でも k'_n が0.93程度となる。例えば、3章、4章で述べた過去の多くの載荷試験では、試験条件が一致していれば先端抵抗 R_p の $C.V.$ が10%を下回っているから、先端抵抗の特性値 A_k として試験データの算術平均値 m_A の93%以上の値を採用することができることになる。

(3) 試験データが1個の場合

ある値 A の試験データが1個の場合、 A の母集団平均の信頼区間を前節で述べた方法により求めることはできない。 A の不偏分散 s_A^2 を求めることができないため

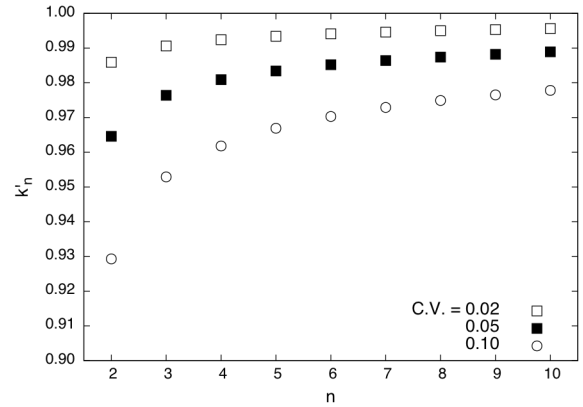


図-5.1 試験データ数 n と k'_n の関係

ある。そこで、既往の試験結果を基に A の母集団の分散 σ_A^2 を仮定し、それが既知の値であるとして検討を進めることにする。

母集団の分散 σ_A^2 が既知の場合、 A の試験データの算術平均値 m_A (試験データは1個なので試験データそのもの) は正規分布に従い、 A の母集団平均 μ_A の片側75%信頼区間を式(3)により求めることができる。

$$\mu_A \geq m_A + k \sigma_A n^{-1/2} \quad (3)$$

k は標準正規分布の下側25%点で、その値は-0.6745である。また、試験データ数 n は1個である。 A の特性値 A_k は、 μ_A の片側75%信頼区間の下限値であり、式(4)で表わされる。

$$A_k = m_A - 0.6745 \sigma_A \quad (4)$$

次に A の母集団の分散 σ_A^2 の値を検討する。 σ_A^2 と母集団平均 μ_A との間には式(5)のような関係が成立する。

$$\sigma_A^2 = (C.V. \times \mu_A)^2 \quad (5)$$

式(5)の右辺には未知の値である A の母集団平均 μ_A が含まれているが、ここでは A の算術平均 m_A で代用することを提案する。この方法は、既知と仮定している母集団の分散を標本平均を基に推定していることとなり、学術的には厳密性に欠ける。しかしながら、杭の載荷試験は工費や工期の制限から1つの現場で1回しか実施されないことも多く、そのデータを活用する為にはやむを得ない措置である。その代替として、母集団の分散 σ_A^2 の値を仮定する際は、変動係数 $C.V.$ を過去の載荷試験結果から考えられる最大側の値に設定することにする。以上より、試験データが1個の場合の特性値は式(6)により求められる。

$$\begin{aligned} A_k &= (1 - 0.6745 C.V.) m_A \\ &= k'_{C.V.} m_A \end{aligned} \quad (6)$$

変動係数 $C.V.$ と $k'_{C.V.}$ の関係は図-5.2のようになる。

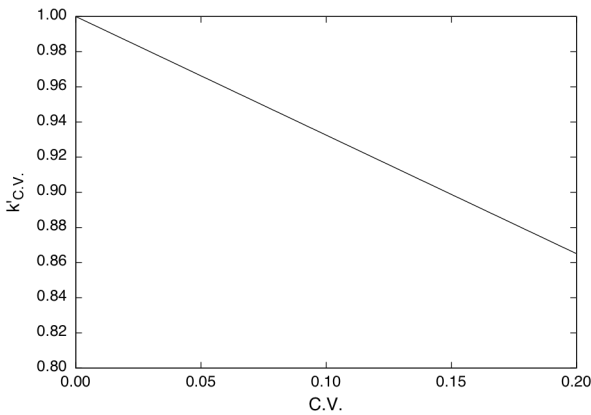


図-5.2 変動係数 $C.V.$ と $k'_{C.V.}$ の関係

式(6)で用いる $C.V.$ は、 A の種類に応じて適切に設定する必要がある。その際のコ考え方は次項で述べる。

(4) 杭の載荷試験データの処理方法

実際に載荷試験のデータ整理を行う際は、試験結果の利用形態に合わせて特性値を計算する必要がある。以下では、載荷試験を行った杭を試験杭、その結果を適用して設計を行う杭を本設杭という。

試験杭と本設杭の杭諸元が一致しており、かつ、試験杭と本設杭の打設地点の地盤の層構造が完全に一致する場合（以下、同一条件という）は、式(2)又は式(6)を利用して試験で得られた全抵抗力 R_t から軸方向抵抗力の特性値を決定すれば良い。

式(6)を用いる場合には、事前に R_t の変動係数 $C.V.$ を設定する必要がある。2章～4章で述べた過去の試験結果によると、例えば水島臨港道路の同一橋脚の杭の場合などのように、杭諸元及び地層構造が一致している場合には、 $C.V.$ は大きくても15%程度と考えられる。従って、式(6)を用いる際には、 $C.V.$ を15%として特性値を決定すると良い（式に代入する際は0.15とすることに注意）。この場合、式(6)より特性値は $0.90m_t$ となる（図-5.2参照）。

試験杭と本設杭の杭径が一致するが杭長が多少異なる場合や、打設地点の地層構造は同様であるが各層の層厚に差異がある場合などは、載荷試験で得られた試験杭の全抵抗力 R_t から直接的に本設杭の軸方向抵抗力を推定することができない。そのため、先端抵抗力 R_p と周面抵抗力 R_f にわけて考える必要がある。さらに、 R_f については、本設杭の打設地点における地盤の層構造を基に、載荷試験で得られた地盤の各層毎の周面抵抗力度 r_f を用いて算出する必要がある。従って、載荷試験の結果を整理する際は、式(2)又は式(6)により R_p と r_f の特性値を計算することになる（このような場合を以下では類似条件

という）。

式(6)を用いる場合には、事前に R_p 、 r_f の変動係数 $C.V.$ を設定する必要がある。3章の水島臨港道路の例や4.5のE港の例などから、類似条件の場合には試験杭と本設杭の支持層が同一であっても、 R_p の $C.V.$ は20%とすべきと考えられる。一方、 r_f については、3章の水島臨港道路の例によると $C.V.$ がかなり大きく、60%見込んでおく必要がある。しかしながら、これは衝撃載荷試験結果に基づくものである。静的押込み試験の結果を整理する場合には、 r_f の計測の原理が大きく異なるため、検討の余地がある（衝撃載荷試験では杭頭で得られた加速度とひずみから解析的に r_f を求めるのに対し、静的押込み試験では鋼管杭に多数のひずみゲージを貼付して直接的に r_f を計測する）。一つの方法として、静的押込み試験の場合は、試験結果で得られた r_f を用いて杭全長に渡る周面抵抗力 R_f を求めた後、式(6)により R_f の特性値を求める方法が考えられる。この場合、2章～4章の過去の事例から、 R_f の $C.V.$ を35%とする。

試験杭と本設杭の杭径が異なる場合、杭の先端閉塞効果の影響を考慮しなければならないが、杭径が異なる場合の先端閉塞効果の変化について十分な知見がない。その為、試験杭と本設杭の支持層が同じ土層であっても、試験杭で得られた先端抵抗力から本設杭の先端抵抗力の特性値を求めることが難しい。従って、この場合は類似条件に該当しないものとする。同一条件・類似条件のいずれにも該当しない場合（その他の条件という）のデータの活用方法は5.4で述べる。

上述した変動係数の値は、あくまでも現時点で利用可能な載荷試験結果に基づいて参考値として定めたものである。今後、載荷試験結果の蓄積が進めば、そのデータを基に適切な値を適宜見直す必要がある。また、試験地の周辺で過去に実施された載荷試験が存在する場合などには、そのデータを加味し、上述の値とは異なる数値を使って特性値を求めることも可能である。

なお、同一条件・類似条件・その他の条件の分類の考え方の詳細については、5.4でさらに詳しく述べる。

5.3 安全係数の考え方

(1) 基本方針

2.3で述べたとおり、港湾基準においては、多少の表現の変遷はあるものの、一貫して常時の安全率2.5、地震時の安全率1.5という数値を基本としてきた。この値は、杭の軸方向抵抗力の推定方法に関わらず用いられている。しかしながら、2章～4章で述べた既往の研究や過去の杭の載荷試験の事例から、推定式と載荷試験では杭の軸方

向抵抗力の推定精度が異なることが明らかである。従来の安全率では、推定精度の低い推定式による設計の場合でも十分な安全性が確保されていると考えられるから、杭の載荷試験を行った場合にはそれと同程度の安全性が確保できる範囲で安全率を低減するのが合理的である。

以下では、杭の載荷試験結果から前節の方法で軸方向抵抗力の特性値を決定した際に適用すべき部分安全係数の値を検討する。なお、本稿では、作用の変動は考慮せず、作用荷重が固定値として与えられる場合について議論を進める。作用が確率変数として与えられる場合は、作用の変動を加味して議論する必要があるが、基本的な検討手順は以下で述べるものと同様である。

(2) 従来の部分安全係数で確保されている安全性

港湾基準の制定当初に安全率を設定した際の根拠は定かではないが、杭の軸方向抵抗力に関わるあらゆる不確定要素の影響を考慮し、経験的に定められたものと思われる。平成19年度に改訂された港湾基準で部分安全係数法が採用され、安全率から部分安全係数に移行した。これにより、安全率という1つの数値にまとめられていた作用・抵抗それぞれのばらつき等の影響を、それぞれの部分安全係数により個別に評価することが可能となった。この時、杭の軸方向抵抗力の標準的な部分安全係数として、従来の安全率の逆数が設定されている。つまり、作用のばらつき等を別途に考慮してもなお、杭の軸方向抵抗力には従来の安全率と同程度の安全余裕を設けている（それだけ不確定要素が多いと見ることもできる）。

先述のとおり、杭の軸方向抵抗力を推定式により推定した場合でも、従来の部分安全係数を用いることで十分な安全性が確保されると考えられる。2章で紹介した松井・落合(1992)、西岡ら(2008)の研究によると、全国各地で行われた載荷試験結果に基づいて作成された推定式では、その推定値と載荷試験によって得られた値の比の変動係数 $C.V.$ が30%程度と報告されている。一方、3章に示した水島臨港道路や4.5のE港の例では、同じ現場において類似条件下で実施した衝撃載荷試験により得られた全抵抗力 R_t の $C.V.$ が20%程度であった。このことから、港湾基準における従来の安全率においても、推定式が変動係数 $C.V.$ で20~30%程度のばらつきを有することが前提とされていると類推できる。

杭の軸方向抵抗力 R が平均値 μ_R 、標準偏差 σ_A の正規分布に従うと仮定する。この時、式(7)で示されるような変数 x は標準正規分布に従う。

$$x = (R - \mu_R) / \sigma_A \quad (7)$$

常時の部分安全係数は0.40（常時の安全率2.5の逆数に等しい）であるから、 R の設計用値は $0.4\mu_R$ である。 R

が $0.4\mu_R$ を下回る時、式(7)より式(8)が成立する。

$$x \leq -0.6 / C.V. \quad (8)$$

式(8)が成立する確率が、 R が $0.4\mu_R$ を下回る確率に対応する。式(8)で $C.V.$ が20~30%とすると、 x は-3~-2以下となる。先述のとおり x は標準正規分布に従うから、 x は-3~-2以下となって式(8)が成立する確率は0.135~2.28%と計算される。この値が従来の部分安全係数により確保されている安全性の余裕であると考えられる。

(3) 載荷試験から特性値を得た場合の部分安全係数

前項で述べた従来の部分安全係数で確保されている安全性に対し、杭の載荷試験で得られる全抵抗のばらつきを考慮した上で必要となる部分安全係数を検討する。

前項と同様に、式(7)で表わされる変数 x を考える。部分安全係数を γ_A とすると、 R の設計用値は $\gamma_A\mu_R$ である。すると、 R が設計用値を下回る確率は、式(9)が成立する確率に対応する。

$$x \leq (1 - \gamma_A) / C.V. \quad (9)$$

従来の部分安全係数と同程度の安全性を確保するには、載荷試験の結果が持つ変動係数 $C.V.$ に対して、 x が-3~-2以下となるように γ_A を定めれば良い。

次に載荷試験結果の変動係数 $C.V.$ の値を検討する。5.2(4)でも述べたとおり、過去の載荷試験結果から想定される $C.V.$ の値は、同一条件の場合で全抵抗力の $C.V.$ が15%、類似条件の場合には先端抵抗力の $C.V.$ が20%、周面抵抗力の $C.V.$ が35%程度と考えられる。類似条件の場合には、全抵抗力に占める先端抵抗力と周面抵抗力の比率により全抵抗力（先端抵抗力と周面抵抗力を加算した値）の $C.V.$ が変化するが、3章の水島臨港道路の場合は全抵抗力の $C.V.$ が20%を少し下回る程度となっている。

$C.V.$ が15%の場合、式(9)で x が-3~-2以下となる γ_A は0.55~0.65と計算される。一方、 $C.V.$ を20%とすると γ_A は0.40~0.60となる（安全率で示すとそれぞれ1.54~1.82, 1.67~2.50となる）。 $C.V.$ を15%と仮定した同一条件の場合は従来の部分安全係数よりかなり大きい値に、 $C.V.$ を20%と仮定した類似条件の場合は従来の安全係数と同じか少し大きい値になっている。

以上より、同一条件の載荷試験の結果から特性値を導びいた場合は、部分安全係数を小さくすることに十分な合理性があると考えられる。一方、過去の港湾基準に書かれていた「いかなる場合においても、常時2.0、地震時1.5以下とすることは避けなければならない」という記述を考慮すると、部分安全係数を大きくする場合でも0.40~0.50の間で設定するのが良いと考えられる。また、地震時

に対する部分安全係数の値の変更は避けるべきである。

類似条件の場合に部分安全係数を変更するかどうかは、現在の知見では一律の判断が難しいところである。しかしながら、学識者の助言等を得た上で部分安全係数を変更することを検討すべきであろう。ただし、この場合も地震時に対する部分安全係数は変更すべきではない。

5.4 載荷試験条件の分類と特性値・部分安全係数の考え方

(1) 載荷試験条件の区分

4.3のC港や4.5のE港の例からもわかるとおり、試験杭と本設杭の地盤条件や杭の諸元が大きく異なる場合には、載荷試験結果から得られた各種の特性値を簡単に採用することはできない。試験杭の載荷試験結果から決定した各特性値を用いることができるのは、試験杭と本設杭の間で諸条件が完全に一致している場合やある程度類似している場合に限られる。5.2及び5.3では、これを同一条件、類似条件として考え方を整理してきた。

ここでは、同一条件、類似条件の区分について、改めて基本的な考え方を述べる。また、同一条件、類似条件のいずれにも当てはまらない場合をその他の条件とする。その他の条件であっても、載荷試験の結果は貴重な資料であり、設計時におおいに参考となるので、その活用方策について簡単に述べる。

(2) 同一条件

同一条件とは、試験杭と本設杭の杭諸元が一致しており、かつ、試験杭と本設杭の打設地点の地盤の層構造が完全に一致する場合を指し、試験杭の載荷試験により得られた「全抵抗力」から軸方向抵抗力の特性値を決定して本設杭の設計に用いることができる場合とする。より具体的には、設計時に同一の土質柱状図を用いて設計を行う杭で、杭諸元が完全に一致するものということである。杭式栈橋の同じブロックの杭とか、3章の水島臨港道路の例でいえば同一の橋脚で用いる杭がこれに該当する。5.3で述べたとおり、同一条件での載荷試験により得られた特性値に基づいて設計を行う場合には、部分安全係数を変更することができる。

(3) 類似条件

類似条件とは、試験杭と本設杭の間で、杭長や地盤の層構造が完全には一致しないものの相当程度類似している条件である。具体的には、試験杭の載荷試験により得られた「先端抵抗力」と「周面抵抗力度」の特性値を用いて本設杭の設計が可能となる場合とする。

載荷試験で得られた先端抵抗力の特性値を設計に用いるためには、試験杭と本設杭の杭径や杭先端形状が一致

しており支持層が同じ層であること、かつ、本設杭の支持層への根入れ長が試験杭のそれと同程度かそれよりも長いことが条件となる。一方、周面抵抗力度の特性値を設計に用いるには、試験杭と本設杭の打設位置で地盤の層構造が同じであることが必要となる。各層の層厚が多少異なっても問題はない。

判断が難しいのは、本設杭の打設位置において、試験杭の打設位置で観察されていない地層（以下、未知層という）が存在する場合である。未知層の層厚が小さければ、未知層内での周面抵抗力を無視して設計することができる。この場合は類似条件が成立すると考えて良い。一方、未知層が厚い場合、これを無視すると設計が成立しないので、未知の層における周面抵抗力度を港湾基準等を参考に推定する必要がある。つまり、載荷試験により得られた特性値と港湾基準等の推定式により決定した特性値を混在させて設計することになる。この場合に類似条件が成立しているかどうかは判断が難しい。一つの参考として、松井・落合（1992）の検討結果が挙げられる。松井・落合は、未知層内の周面抵抗力が杭全体の周面抵抗力に占める割合を指標化する考え方を示している。杭基礎設計便覧では、道示に示された載荷試験を実施した場合の補正係数（事実上の安全率の低減）の適用可能性を、この指標に基づいて判断できるとしている。

5.3で述べたとおり、類似条件の場合、部分安全係数を変更できるかどうかの判断を一律に規定することは難しい。地盤を構成する各層の地盤定数や試験杭の載荷試験結果のばらつき具合などを十分に吟味し、学識者の助言を得た上で部分安全係数を適切な値に設定することが必要である。今回の検討の結果によると、類似条件であっても部分安全係数を変更できる可能性は大きい。今後、効率的な設計を行うため、杭の載荷試験を積極的に活用していくことが望まれる。

(4) その他の条件

試験杭と本設杭の間で、杭諸元や地盤条件が大きく異なっている場合は、載荷試験結果は参考値として取り扱うことが基本となる。とはいえ、試験で得られた先端抵抗力や周面抵抗力度は原位置で実際に計測した値であるから、設計の際にはおおいに考慮すべき値である。例えば以下のような活用方法が考えられる。

港湾基準では、先端抵抗力や周面抵抗力度の推定方法が示されているが、地盤条件によってはこれらの推定方法の適用外となることも多い。この場合、他の基準に記載されている推定方法や、類似する地盤における推定方法を援用して設計を行わざるを得ないが、原位置における測定結果があればそれにより推定方法の妥当性を検証す

ることが可能となる。

開端杭の設計を行う場合は、杭の先端閉塞率が問題となる。港湾基準では、杭径と先端閉塞率の関係が示されており参考とできるが、原位置での載荷試験から先端閉塞率が求められた場合はその値も考慮に加えて設計に活用することができる。ただし、試験杭と本設杭の杭径が大きく異なる場合、試験杭で得られた先端閉塞率を本設杭に適用することが難しい場合もあるので、十分に検証する必要がある。

その他にも様々な検討でおおいに活用することが望まれる。ただし、これらの場合はあくまでも載荷試験結果を参考とした推定値に基づく設計であり、載荷試験結果に基づく設計ということではない。従って、部分安全係数としては港湾基準に記載されている標準的な値を用いるべきで、5.3で述べたような部分安全係数の変更を行ってはならない。

6. 結論

過去に行われた杭の載荷試験の事例を収集し、そのばらつき等の評価を行った。その結果に基づき、載荷試験の結果から特性値を求める方法や、その特性値を設計に用いる際に適用すべき部分安全係数について検討した。

特性値については、複数の試験データが得られた場合には75%信頼区間の下限値とすることを提案した。また、試験データが1個の場合でも載荷試験結果の活用を図るため、一定の仮定の下に1個のデータから特性値を決定する方法を提示した。

部分安全係数については、従来の部分安全係数で担保されているであろう安全性を考慮し、それと同程度の安全性を確保できるように設定することを検討した。その結果、試験杭と本設杭が同一条件の場合には部分安全係数を変更することができること、類似条件の場合であっても、条件を十分に吟味し部分安全係数の変更を検討すべきであることを示した。なお、本研究で対象としたのは、先端支持杭の押込みに関する軸方向抵抗力である。特性値の決定方法については、引抜きの場合や摩擦杭の場合にも適用可能であると考えられるが、部分安全係数の考え方については、別途の検討を行う必要がある。

7. あとがき

港湾基準では、載荷試験の活用方法についての詳しい記述はなく、試験結果の活用方法が事例毎に検討されているのが実状である。これに対し、本研究では、載荷試験

結果を基に特性値を定め、適切な部分安全係数を適用するための一般的な方法を示した。これにより、今後の港湾構造物の設計において、杭の載荷試験結果が今まで以上に活用されることが期待される。検討の結果、載荷試験を実施することで部分安全係数を変更できる可能性が大きいことが示された。今後は、効率的な設計を実施するために杭の載荷試験の活用を積極的に検討していくべきであろう。

なお、本検討で示したいいくつかの数値は、現時点における知見に基づき、安全側の設計になることを意図して設定している。実際に設計を行う際は、利用しようとしている載荷試験結果を十分に検証し、必要に応じて適切な値に変更することを検討すべきである。また、載荷試験データの蓄積にあわせて、これらの数値の設定を随時見直ししていくことも重要である。

(2015年11月7日受付)

謝辞

本研究では国土交通省港湾局及び各地方整備局のご協力の下に収集した載荷試験結果を活用した。特に中国地方整備局広島港湾空港技術調査事務所及び宇野港湾事務所水島港出張所の各位には格別のご助力を頂いた。関係各位に深く感謝致します。また、本研究の一部は一般社団法人日本鉄鋼連盟の鋼構造研究・教育助成事業による助成を受けて実施したものである。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 岡原美知夫・中谷昌一・田口敬二・松井謙二(1990)：軸方向押込み力に対する杭の支持特性に関する研究，土木学会論文集，No. 418/III-13，pp. 257-266。
- 菊池喜昭・水谷崇亮・森川嘉之(2009)：載荷試験を活用した鋼管杭の設計・施工管理手法の体系化，港湾空港技術研究所資料，No. 1201，163p。
- 地盤工学会(2002)：「杭の鉛直載荷試験方法・同解説(第一回改訂版)」，271p。
- 地盤工学会(2006)：「性能設計概念に基づいた基礎構造物等に関する設計原則」，JGS4001-2004，78p。
- 鉄道総合技術研究所(2012)：付属資料22 杭の設計鉛直支持力，「鉄道構造物等設計標準・同解説，基礎構造物」，pp. 526-540。
- 富永真生・根井基雄・越後勇吉・剣持叡・鹿毛征二・橋本正治(1976)：大規模臨海工場の基礎工事(製鉄所の場合)，(3)川崎製鉄，基礎工，Vol. 4，No. 5，pp. 55-90。

- 西岡英俊・神田政幸・篠田昌弘・館山勝(2008)：載荷試験データの統計的処理による杭工法別の支持力算定法，鉄道総研報告，Vol.22，No.10，pp.41-46.
- 日本港湾協会(2007)：2.4.3 杭基礎の静的最大軸方向押し込み抵抗力，「港湾の施設の技術上の基準・同解説」，pp.584-605.
- 日本道路協会(2012)：12.4 杭の許容支持力，「道路橋示方書・同解説，IV 下部構造編」，pp.383-406.
- 日本道路協会(2015)：参考資料 5. 極限支持力推定法の相違による安全率の補正係数とその意義，「杭基礎設計便覧」，平成18年度改訂版，pp.459-470.
- 前田良刀・松井謙二・遠藤元一(1986)：場所打ち杭の支持力に関する信頼性設計，橋梁と基礎，Vol.20，No.5，pp.8-16.
- 松井謙二・落合英俊(1992)：地盤の不確定性を考慮した摩擦杭基礎の支持力評価，土木学会論文集，No.445/III-18，pp.83-92.
- 松本樹典・林正宏・道勇治・武居幸次郎・二塚保之(1998)：珪藻泥岩地盤における打込み鋼管杭の施工と波動理論に基づく荷重～変位関係の推定，土木学会論文集，No.610/III-45，pp.1-18.
- 水谷崇亮(2015)：単一の現場で実施した多数の杭の衝撃載荷試験結果のばらつきの評価，土木学会論文集C(地圏工学)，Vol.71，No.3，pp.228-240.
- 渡部要一・田中政典・佐々真志・菊池喜昭：信頼性設計に基づく性能設計実現に向けた新しい地盤定数設定法の提案，港湾空港技術研究所報告，Vol.48，No.2，pp.123-143.
- Smith, E. A. L.(1960)：Pile driving analysis by the wave equation, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol.86, pp.35-61.

港湾空港技術研究所報告 第55巻第1号

2016.3

編集兼発行人 国立研究開発法人港湾空港技術研究所

発行所 国立研究開発法人港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社ワコー

Copyright © (2016) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

CONTENTS

1. Estimation of Axial Capacity of Piles utilizing Load Tests	
.....	Takaaki MIZUTANI
	3