水島港における杭の衝撃載荷試験に基づく ハイリー式の補正とその適用範囲の検討

水谷 崇亮¹・松村 聡²

¹国立研究開発法人 港湾空港技術研究所 (〒 239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)

E-mail: mizutani-t@pari.go.jp

²正会員 国立研究開発法人 港湾空港技術研究所 (〒 239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)

鋼管杭を打撃施工する場合、ハイリー式等の杭打ち式による施工管理が行われることが一般的である。しかしながら、ハイリー式は杭の軸方向抵抗力の推定手法としては精度が低いことが知られている。これに対し、近年、杭の衝撃載荷試験の結果を用いてハイリー式を補正し、従来よりも精度の高い施工管理を行う方法が提案されている。本稿では、水島港で実施された多数の衝撃載荷試験結果を基にハイリー式の補正係数を試算し、その適用性について検討を行った。検討の結果、全橋脚のデータを用いて補正係数を決定する場合には、ばらつきが大きいため安全上の余裕を確保するために補正係数の決定方法を工夫する必要があることを示した。一方、個々の橋脚毎に補正係数を決定する場合には、ばらつきは一定の範囲にとどまり、施工管理に十分に適用可能であることを確認した。

Key Words: pile, axial resistance, dynamic load test, Hiley's equation, variance

1. 序論

鋼管杭を打込み工法により施工する場合、杭打ち式による打止め施工管理を行うのが一般的である。杭打ち式には様々なものがあるが、我が国の港湾工事においてはハイリー式が広く用いられている。ハイリー式とは、ハンマーの打撃によって杭に与えられるエネルギーと、杭が貫入する際になす仕事とが等しいと考えることにより導かれる式で、鋼杭の場合にはいくつかの仮定に基づいて以下のように簡略化された式が用いられる^{1),2),3),4)}。

$$R_d = \frac{e_f F}{S + \frac{K}{2}} \quad (1)$$

ここに、 R_d は杭の動的支持力、 e_f はハンマーの効率、 F は打撃エネルギー、 S は杭の貫入量、 K はリバウンド量である。 S はある 1 回の打撃により杭頭に生じた残留沈下量、 K はその打撃中に生じた杭頭の最大沈下量から S を引いた値で、いずれも打止め直前の 5~20 回の打撃に対する平均値を用いる⁴⁾。

式 (1) において $e_f = 0.5$ とすることにより、計算される R_d が杭の極限抵抗力 (静的な支持力) R_t と概ね等しくなると報告されている³⁾。杭の施工に油圧ハンマーを使用する場合は、打撃エネルギー F を次式で求めるのが一般的である。

$$F = 2WH \quad (2)$$

ここで、 W はハンマーのラム重量、 H はラムの落下高

さである。なお、式 (1) は、支持杭と見なされるような地盤条件の場合にのみ適用可能で、摩擦杭には適用できない。

ハイリー式などの杭打ち式は、杭打ちという動的な挙動の過程で計測された杭の貫入量、リバウンド量に基づいて静的な支持力を求めようとするもので、原理的に無理があり、結果のばらつきも大きい⁵⁾。そのため、現在では、同一の施工現場における杭ごとの相対的な支持力の変化を知る簡便な方法として、杭の打止め管理の目的に限定して使用することが推奨されている⁴⁾。

これに対し、近年、杭の衝撃載荷試験とハイリー式を組み合わせることで従来よりも精度の高い施工管理を目指す取り組みがなされている。具体的には、ハイリー式にいくつかの係数を乗じて補正し、杭の極限抵抗力の推定値 R_{tp} を求めようとするもので、次式のように表すことができる^{6),7)}。

$$R_{tp} = \frac{eE_0}{S + \frac{K}{2}} \times C_f \times S_r \times S_t \quad (3)$$

ここに、 E_0 は施工時に杭に入力したハンマーエネルギー、 e 、 C_f 、 S_r 、 S_t は補正係数である。入力したハンマーエネルギー E_0 は次式により表わされる。

$$E_0 = WH \quad (4)$$

ハンマーのラム重量 W は施工機械により決定されるが、ラムの落下高さ H は施工状況により現場の判断で調整されるもので、 E_0 を施工前に指定することはできないのが実状である。

ここで,

$$R_{th} = \frac{E_0}{S + \frac{K}{2}} \quad (5)$$

とすると, R_{th} は式 (1) に示したハイリー式による動的支持力 R_d に等しい. この時, 式 (3) は次式のように表わされる.

$$R_{ip} = eR_{th} \times C_f \times S_r \times S_t \quad (6)$$

次に, 式 (6) 中の各補正係数の定義を述べる. e はハンマーエネルギーの杭への伝達状況を表す係数で, 次式により求められる.

$$e = \frac{E_t}{E_0} \quad (7)$$

ここに, E_t は杭の施工時に杭に伝達されたハンマーエネルギーで, 施工時に衝撃载荷試験を行うことで得ることができる.

C_f は, 施工時の衝撃载荷試験で得られた動的抵抗力と静的抵抗力の和 R_T と, 式 (5) に示した R_{th} を結びつける補正係数で, 次式により求められる.

$$C_f = \frac{R_T}{eR_{th}} \quad (8)$$

S_r は, 施工時の R_T のうち, 静的抵抗力 R_{ti} の占める割合を表す補正係数であり, 次式で表わされる.

$$S_r = \frac{R_{ti}}{R_T} \quad (9)$$

S_t は, 杭のセットアップに関する補正係数であり, 施工時の衝撃载荷試験で得られた静的抵抗力 R_{ti} と養生後の衝撃载荷試験で得られた静的抵抗力 (杭の極限抵抗力) R_l の比として求められる.

$$S_t = \frac{R_l}{R_{ti}} \quad (10)$$

以上からわかるとおり, 式 (6) で用いられている補正係数を全て求めるためには, 杭の施工時と一定期間養生後の 2 回の衝撃载荷試験を実施する必要がある. しかしながら, 実施工においては, 現場状況により, 必ずしも施工時と養生後の 2 回の载荷試験が実施されるものではない. そのため, ハイリー式の補正方法も式 (6) のとおりではなく, 現場毎に多少のアレンジを加えて実施されているのが実状である⁸⁾.

式 (6) のような方法でハイリー式を補正することにより, 施工時に杭頭で計測した杭の貫入量 S とリバウンド量 K から杭の極限抵抗力の推定値 R_{ip} を求めることが可能となる. しかしながら, 各補正係数は個々の試験杭について求められるものであり, 打設位置や地盤条件が異なる杭に対する適用性に関しては知見が無い. また, 一つの現場で同条件の試験杭を用いて多数の载荷試験が実施されるケースは稀であるため, 補正係数の持つばらつきに関する情報も十分に得られていない.

このような課題がある中, 水島港では, 臨港道路の建設に先立って, 杭の支持力評価や施工管理に用いるデータを取得するために多数の衝撃载荷試験が実施さ

図-1 建設予定地

れた. 本稿では, そのデータを用いてハイリー式の補正係数を試算し, 補正係数の持つばらつきを評価するとともに, 補正係数の適用範囲について検討を加える.

2. 水島港で実施された衝撃载荷試験

(1) 試験実施位置

試験が行われたのは倉敷市の高梁川河口付近で, 水島港臨港道路の一部として橋梁の建設が予定されている地点である. 建設予定地を図-1 に示す.

建設予定地における河幅は約 1400 m で, その間に 19 の橋脚が等間隔に建設される予定である. 橋脚の基礎には, 直径 1 m の鋼管矢板による直径約 12 m の鋼管矢板井筒基礎が採用された. 建設に先立ち, 各橋脚の位置でのボーリング調査が行われている. 調査で得られた地層縦断図を図-2 に示す. 図中の P1~P19 は橋脚の位置を表している.

図-2 からわかるとおり, 地盤は橋軸方向に比較的一様な成層状況である. また, ボーリング柱状図の記載から, 各層の性状が橋軸方向に変化する様子は見られなかった. このような調査結果から, 設計の際には, 各層の種々の特性値は橋軸方向に一定で, 層厚のみ変化する想定するのが一般的と考えられる. 実設計では, 基礎に作用する軸力を勘案し, 洪積第二礫質土層 (Dg2) が杭の支持層として選定された. この層は, 密~非常に密な礫層で, 粒径が 2~30 mm の亜円~亜角礫から成る層である. 所々で粒径 50 mm 以上の礫も観察された.

(2) 試験方法・条件

衝撃载荷試験は地盤工学会基準⁹⁾に基づいて実施された. 試験データを用いて波形マッチング解析を行い, 杭の軸方向抵抗力を算定している. 解析の際の地盤抵

図-2 土質調査から得られた地層縦断面図

表-1 試験条件一覧 (n は試験数)

橋脚	n	杭番号	杭種	養生日数	ハンマー
P1	1	6	十字	9	NH-115B
P2	1	4	十字	6	NH-115B
P3	2	3, 4	十字	9	NH-115B
P4	1	test	十字	6	NH-115B
P5	1	1	十字	6	NH-115B
P7	4	1~4	十字	6	NH-115B
P11	3	K-1, 3, 4	開端	6	NH-115B
P13	4	1~4	開端	14*	NH-115B
P14	4	1~4	開端	7	NH-115B
P16	4	1~4	開端	14	IHC S-280
P17	4	1~4	開端	6	IHC S-280
P18	1	20	十字	7	NH-100
P19	1	29	十字	7	NH-100

* 杭1のみ養生日数13日で実施

図-3 杭の貫入量 S とリバウンド量 K と関係

抗モデルには Smith のモデル¹⁰⁾を採用した。得られた試験結果は、現在、実務においてごく一般的に用いられる方法により得られるデータであると言える。

衝撃载荷試験は、各橋脚の予定地で、杭種（開端杭又は先端十字リブを設けた杭）、養生日数を変化させて計 65 ケース実施された。試験で得られた杭の軸方向抵抗力の分析結果については、既往の文献¹¹⁾にて報告されている。本稿では、これらの試験のうち、杭施工時の打止め管理記録が通常の工事と同様な形式で残されている杭を対象として検討を進める。また、施工から1週間程度の間に杭のセットアップが生じ、その後は大きなセットアップが見られないことから、養生日数が2日以上試験を検討対象とする。検討に用いた衝撃载荷試験の試験条件を表-1に示す。なお、一部の橋脚については上述の条件に該当するデータが存在しなかったため、表-1に記載がない。

(3) 試験結果の概要

衝撃载荷試験結果の詳細については既往文献¹¹⁾を参照願いたい。ここでは、ハイリー式の補正に係る杭の貫入量 S 、リバウンド量 K 及び施工時の入力エネルギー E_0 と、衝撃载荷試験で得られた杭の軸方向抵抗

力 R_t との関係を紹介する。

S と K の関係を図-3に示す。図-3より、全体的には S と K の間に明確な関係は見られない。しかしながら、先端に十字リブを設けた杭で、開端杭よりも同じ S に対し K がやや大きい傾向が見受けられる。そこで、次節で述べるハイリー式の補正の検討では、データを杭種毎に分類した場合についても試算することにする。 S 及び K と、 E_0 の関係を図-4、図-5に示す。 E_0 の増加に伴って、 S 、 K とともにやや増加する傾向が見られる。 S 、 K 及び E_0 と、 R_t との関係を図-6～図-8に示す。図-6、図-8より、 S と E_0 については R_t との間に明確な関係が見られないことがわかる。一方、図-7より、 K には R_t の増加とともに増加するような傾向が見られる。ハイリー式が成立するものと考え、式(3)の形から K と R_t との間には反比例の関係があることになるが、今回の試験結果ではそうっていない。ただし、先述のとおり、 K と E_0 の間にも一定の関係性が見られていることから、図-7に示した結果は、必ずしも式(3)が成立していないことを表すものではない。

以上に示したいずれの関係を見ても、値のばらつきが大きく、互いの関係性があまり明確でない。個々の測定値の関係を議論するのではなく、式(3)全体の関係

図-4 杭の貫入量 S と施工時の入力エネルギー E_0 との関係

図-7 杭のリバウンド量 K と衝撃载荷試験により得られた杭の軸方向抵抗力 R_t との関係

図-5 杭のリバウンド量 K と施工時の入力エネルギー E_0 との関係

図-8 衝撃载荷試験で得られた杭の軸方向抵抗力 R_t と施工時の入力エネルギー E_0 との関係

図-6 杭の貫入量 S と衝撃载荷試験により得られた杭の軸方向抵抗力 R_t との関係

を検討しなければ、ハイリー式の補正方法の適用性の検証は難しいようである。

3. ハイリー式の補正

(1) R_t と R_{th} の関係

表-1 に示した衝撃载荷試験で得られた杭の軸方向抵

抗力 R_t と式 (5) により計算される R_{th} の関係を図-9 に示す。図-9 より、 R_t と R_{th} の間には、正の相関があるように見受けられる。また、図-9 では、データのばらつきが大きい、各橋脚毎のデータを見るとある程度集まっているようである。そこで、試験データを試験条件に応じていくつかのグループに分け、 R_t/R_{th} の統計量を計算した。計算結果を表-2 に示す。

表-2 中の全データを対象とした計算結果を見ると、 R_t/R_{th} の平均値 m が 1.0 を下回っており、 R_{th} が R_t よりも大きいことが確認できる。また、 R_t/R_{th} のばらつきは大きく、変動係数 C.V. が 30% 前後に達している。杭種の違いに着目すると、開端杭の方が十字リブ杭より m が大きい、今回の試験データでは IHC ハンマーが開端杭にのみ使用されているため、後述するハンマーの影響を受けている可能性がある。そこで、NH ハンマーを用いたデータで比較すると、 m は開端杭で 0.674、十字リブ杭で 0.606 であり、依然として開端杭の方が大きい。従って、杭種が異なる場合にはハイリー式の補正係数を互いに流用することはできないと考えられる。

従来から、使用したハンマーによってエネルギー効

図-9 衝撃載荷試験で得られた杭の軸方向抵抗力 R_t とハイリー式により求められる抵抗力 R_{th} との関係

表-2 R_t/R_{th} の平均値 m , 標準偏差 s , 変動係数 C.V. (n は試験数)

対象データ	杭種	n	m	s	C.V. (%)
全	全	31	0.734	0.223	30.4
全	開端	19	0.815	0.221	27.1
全*	十字	12	0.606	0.165	27.2
NH ハンマー	全	23	0.638	0.159	24.9
NH ハンマー	開端	11	0.674	0.151	22.4
IHC ハンマー	全†	8	1.01	0.138	13.7
P7	十字	4	0.569	0.0185	3.25
P11	開端	3	0.867	0.0802	9.25
P13	開端	4	0.661	0.0955	14.4
P14	開端	4	0.543	0.0420	7.73
P16	開端	4	1.09	0.0813	7.46
P17	開端	4	0.924	0.138	14.9

* すべて NH ハンマー

† すべて開端杭

率の違い等によりハイリー式の計算結果が異なることが経験的に知られているので、ハンマーの種類によってデータを分類して統計量を求めた結果を表-2に示している。また、それぞれのハンマーについて m を傾きとする直線を図-9に書き加えた。表-2より、NH ハンマーを用いた場合と IHC ハンマーを用いた場合では、 m が大きく異なることが確認できる。NH ハンマーを用いた場合は m が 0.65 前後であるのに対し、IHC ハンマーの場合は、1.0 程度と大きい。これは従来から知られている傾向に合致する結果である。また、 R_t/R_{th} のばらつきに着目すると、NH ハンマーの場合には C.V. が 25% 程度であるのに対し、IHC ハンマーでは C.V. が 13.7% と小さい。これは、IHC ハンマーを用いた橋脚が P16, P17 という隣接した 2 つの橋脚に限られているためではないかと考えられる。

そこで、同じ橋脚で複数本の杭の衝撃載荷試験を実施した 6 つの橋脚について、橋脚毎に求めた R_t/R_{th} の統計量を表-2に示している。表-2より、同じ橋脚のデータに限定して統計をとると R_t/R_{th} のばらつきが小さく、

C.V. は 15% 以下となることがわかる。これは、ハイリー式の補正係数を条件が類似した杭に限って適用すれば、補正したハイリー式による軸方向抵抗力の推定精度が高まる可能性を示唆するものである。

(2) 補正係数の決定方法と適用範囲

本検討では、P11 の 3 本の杭を除き、施工時の衝撃載荷試験を行っていないため、式 (6) 中の 4 つの補正係数を個別に求めることはできない。そこで、4 つの補正係数の積に相当する補正係数 α を決定して、ハイリー式の計算結果を補正することを考える。なお、P11 での衝撃載荷試験に基づいて各補正係数を個別に試算した結果については次節で述べる。

ところで、既往文献¹¹⁾によると、全橋脚の衝撃載荷試験結果を用いて求めた杭の軸方向抵抗力の特性値 R_{tk} と衝撃載荷試験で得られた軸方向抵抗力 R_t の比 R_t/R_{tk} は C.V. で 20% 程度のばらつきを有している。一方、橋脚毎に衝撃載荷試験の結果を整理した場合は C.V. が 15% 以下となっている。設計手法にもよるが、 R_t/R_{tk} のばらつきは設計で見込まれるべきものであり、安全率や部分安全係数といった安全上の余裕の中に含まれるように設計されたいと考えられる。そのため、補正係数 α の適用性を検討する際には、これらの C.V. の値を推定精度の検証の目安とすることができる。

最も簡単な補正係数の決定方法として、 α を R_t/R_{th} の平均値 m とする方法が考えられる。この場合、 $R_t/\alpha R_{th}$ の平均値は 1.0、変動係数 C.V. は表-2に示した各値と等しくなる。表-2より、全橋脚の載荷試験結果を基に α を定めた場合は $R_t/\alpha R_{th}$ の C.V. が約 30% であるから、 R_t/R_{tk} よりもばらつきが大きいことになる。この α を用いてハイリー式を補正し施工管理を行うと、ハイリー式により計算した杭の軸方向抵抗力 αR_{th} が十分な軸方向抵抗力を示していても、実際の杭の軸方向抵抗力 R_t は設計で見込まれている余裕を越えて不足している可能性がある。つまり、全橋脚を対象として R_t/R_{th} の平均値として求めた α をそのまま施工管理に用いることは適切でない。対策として、 $R_t/\alpha R_{th}$ のばらつきの大きさを考慮し α の低減を行うなどの安全上の配慮が必要になると考えられる。具体的には、 $R_t/\alpha R_{th}$ の平均値が 1.0 以上になるように α を設定し、 αR_{th} が設計上の余裕を越えて R_t を過大に評価してしまう確率を一定水準以下となるように設定する方法が考えられる。

一方、橋脚毎に衝撃載荷試験の結果を整理し α を決定する場合は、 $R_t/\alpha R_{th}$ の C.V. が 15% 以下であり、 R_t/R_{tk} のばらつきと同程度の水準である。この α を用いてハイリー式を補正し施工管理を行っても、杭の軸方向抵抗力が設計上の余裕を越えて不足する可能性は十分に小さいと考えられる。従って、特に低減等を行うこと

表-3 P11 のデータから求めた各補正係数

杭番号	e	C_f	S_r	S_t
K-1	0.986	0.982	0.581	1.52
K-3	0.680	1.33	0.580	1.81
K-4	0.789	0.977	0.581	1.77

なく、 R_t/R_{th} の平均値 m を α として用いて良いと考えられる。

(3) 個別の補正係数の検討

P11 の杭 K-1, 3, 4 については、施工の際にも衝撃載荷試験を実施しており、打ち止め時に杭に伝達されたハンマーエネルギー E_t 、動的抵抗力と静的抵抗力の和 R_T 、静的抵抗力 R_{ti} が計測されている。そのため、式(7)~(10)に従って、各補正係数を求めることが可能である。計算結果を表-3に示す。

表-3を見ると、 S_r 以外の各補正係数は、杭毎に大きく異なっている。特に e と C_f はばらつきが大きい。今回の検討結果では、式(6)のようにそれぞれ意味付けられた4つの補正係数を個別に求めることは難しいと判断される。

4. 結論

水島港臨港道路の道路橋建設現場において実施された多数の杭の衝撃載荷試験結果を利用し、ハイリー式を補正する場合の補正係数の考え方やそのばらつきと適用性について検討を加えた。その結果、全ての橋脚で実施された載荷試験結果を用いて補正係数を求める場合には、補正係数の決定方法に安全上の余裕を確保するための工夫が必要であることがわかった。一方、各橋脚毎にデータを整理して補正係数を求める場合は、ばらつきが十分に小さく、載荷試験で得られた杭の軸方向抵抗力 R_t とハイリー式の計算結果 R_{th} の比の平均値を補正係数として用いて良いことがわかった。また、既

往文献^{6),7)}で示されているように個々に意味付けされた4つの補正係数を用いてハイリー式を補正する方法は、今回のデータには適用が難しいと判断された。

謝辞: 本稿で使用した衝撃載荷試験結果は、中国地方整備局広島港湾空港技術調査事務所よりご提供頂いた。また、中国地方整備局宇野港湾事務所水島港出張所からは現場の状況等の詳細な情報をご提供頂いた。本研究の一部は(一社)日本鉄鋼連盟の鋼構造研究・教育助成を受けて実施した。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 大崎順彦, 岸田英明: 鋼ぐいの支持力・打撃応力に関する2, 3の問題(その1), 日本建築学会論文報告集, No.79, pp.29-33, 1962.
- 2) 大崎順彦, 岸田英明: 鋼ぐいの支持力・打撃応力に関する2, 3の問題(その2), 日本建築学会論文報告集, No.80, pp.24-27, 1962.
- 3) 日本建築学会: 建築鋼ぐい基礎設計施工規準・同解説, pp.30-33, 1963.
- 4) 日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, pp.641-643, 2007.
- 5) 沢口正俊: 各種動的支持力推定法による計算結果の比較, 第38回土木学会年次学術講演会講演概要集, 第III部, pp.605-606, 1983.
- 6) 菊池喜昭, 水谷崇亮, 森川嘉之: 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.1202, 2009.
- 7) 菊池喜昭: 打込み鋼管杭の施工における支持層確認と施工による影響, 基礎工, Vol.42, No.6, pp.46-49, 2014.
- 8) 野口孝俊, 新原雄二: 打込み鋼管杭の打止め管理事例ー羽田D滑走路建設工事における性能型設計への対応ー, 基礎工, Vol.42, No.6, pp.75-77, 2014.
- 9) 地盤工学会: 杭の鉛直載荷試験方法・同解説, 第一回改訂版, pp.223-245, 2002.
- 10) Smith, E. A. L.: Pile driving analysis by the wave equation, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol.86, pp.35-61, 1960.
- 11) 水谷崇亮: 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, 2015.

(2016. 2. 4 受付)

CORRECTION OF HILEY'S EQUATION AND ITS APPLICABILITY BASE ON DYNAIC LOADING TESTS AT MIZUSHIMA PORT

Takaaki MIZUTANI and Satoshi MATSUMURA

Coefficients to correct Hiley's equation were calculated based on the results of dynamic loading tests of piles at the road bridge construction site in Mizushima port. The result shows that the coefficient decided through the bridge had large variability. Therefore, it was concluded that the safety margin should be considered during the calculation of the coefficient. On the other hand, if the coefficient was calculated for each pier, then the variability was small enough for the construction management.