

14. スプリングハンマー急速載荷試験および同試験を組み込んだ杭の施工方法

丸紅建材リース株式会社 ○松澤 一行

中嶋 義雄

金沢大学 松本 樹典

1 はじめに

従来、先端支持力を期待する杭では、支持層となる比較的深い地層で杭先端を支持するのが通例である。例えば仮設構台等に使用される仮設支持杭において、その設計荷重は概ね500～1000 kN 程度であるが、杭先端はN値 50 程度の支持層まで貫入させるのが一般的となっている。しかしながら実際の地盤では、深い支持層の上部に、ある程度の支持力を期待できる中間層が存在するケースもしばしばあり、このような中間層で杭を支持させることができれば、杭工事にかかる手間を削減し、費用、工期等を含めて大きな経済効果をもたらす。

著者らは、要求された杭の安全性を損なうことなく杭長を短くし、いわゆる中間層と呼ばれていた地層で安全に支持できる杭の構築方法を研究してきた。

機動性に優れたスプリングハンマー急速載荷試験¹⁾を採用することで、載荷試験による杭工事への時間的な損失を最小限に抑え、全杭に対する載荷試験を実施することで、支持力に対する安全性を確保しつつ、杭の短尺化を実現することが可能となった。

本論文では、スプリングハンマーによる急速載荷試験の詳細と、同試験を組み込んだ杭の施工方法について実際に設計施工された仮設構台での事例を併せて紹介する。

表－1 相対載荷時間 (T_r) による分類

区分	載荷方法の定義	相対載荷時間
静的載荷	杭体と地盤の速度および加速度に依存する抵抗を無視することができる載荷	$500 < T_r$
急速載荷	杭体の波動現象は無視できるが、杭体と地盤の速度および加速度に依存する抵抗を無視することができない載荷時間を持つ載荷	$5 \leq T_r < 500$
衝撃載荷	杭体の波動現象や杭体と地盤の速度および加速度に依存する抵抗が顕著な載荷	$5 < T_r$

2 スプリングハンマー急速載荷試験

2.1 急速載荷試験の概要

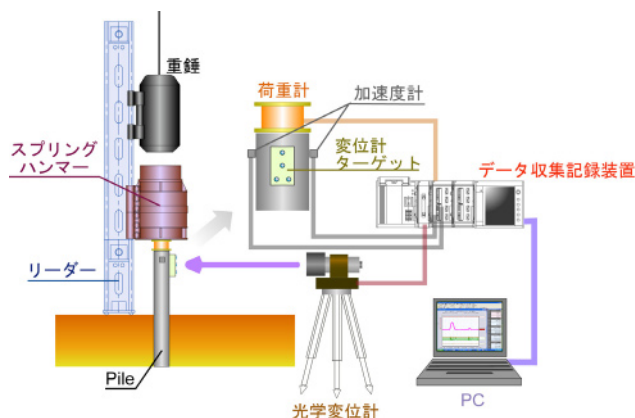
杭の鉛直載荷試験については地盤工学会により2002年に基準化されている²⁾。同基準では表－1に示されるように、相対載荷時間： T_r によって試験を分類している。 T_r は、試験時の載荷時間内に杭体内を伝わる波が何往復するかを示しており、(1)式で与えられる。

$$T_r = t_L / (2L/c) \quad (1)$$

ここに、 t_L : 載荷時間、 L : 杭長、 c : 杭体を伝わる波の速度である。

静的載荷試験はもっとも結果の信頼性が高いとされているが、反力装置や反力杭などの設備が大がかりになり、実施の手間と費用が膨大となる。これに対して衝撃載荷試験は、試験の実施は短時間であり、杭打ち機をそのまま使用できることから容易に実施できるが、波動を考慮した解析の難しさもあり、即時の支持力把握は困難である。

急速載荷試験は、衝撃試験と同様に大がかりな反力装置を必要とせず容易に実施できる上に、載荷時間が衝撃載荷試験よりも長いので困難な波動解析をほとんど必要とせず、静的載荷試験とほぼ同等の結果を得られる試験方法として有効である。



図－1 スプリングハンマー急速載荷試験のシステム

2.2 スプリングハンマー試験装置

図-1 はスプリングハンマー急速荷重試験装置のシステムである。本試験は重錘落下式の急速荷重試験であり、自由落下させる重錘と杭頭との間にばねを介することで荷重時間を延ばすことが可能である。試験時には重錘の質量、落下高さおよびばねの硬さを調整できるので、荷重時間と最大荷重を容易に制御することができる。

測定に用いられるセンサー類は、杭頭に設置される荷重計、加速度計および光学式もしくはレーザ式の変位計用のターゲットであり、これらの信号はデータ収集記録装置によって 1 kHz 程度のサンプリング間隔で測定される。

荷重には杭を施工した杭打ち機がそのまま使用され、ロードセル上に置かれたスプリングハンマー上に質量 2~3 ton の重錘を自由落下させる。スプリングユニットおよび重錘は杭打ち機のリーダーをガイドとしているため、杭との鉛直軸が一致し、精度の高い鉛直荷重が可能である。

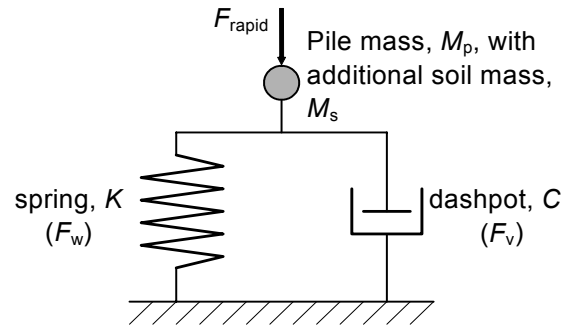


図-2 急速荷重試験での杭と地盤のモデル

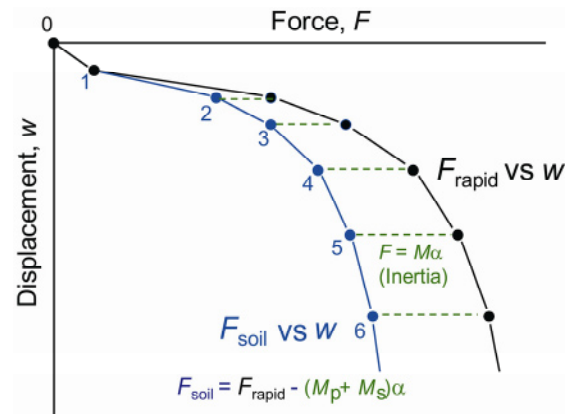


図-3 慣性力の補正

2.3 動的シグナルの解析方法

急速荷重試験の最も有利な点は、図-2 に示するようなモデル³⁾を用いた単純な解析が可能である点である。杭および杭底面の土の付加質量は一質点として扱われ、静的なばねが地盤の静的抵抗力 F_w である。また、ダッシュポットは非線形な定数 C と杭の速度 V の積で表されるダッシュポット抵抗力 F_v を表わしている。

動的な測定シグナルから静的な荷重-沈下関係を求めるために、非線形ダンピング法⁴⁾⁵⁾を用いる。

荷重試験における急速な荷重シグナル F_{rapid} には杭の慣性力が含まれているため、解析の第一段階として杭の慣性力を補正した地盤抵抗力 F_{soil} を求める（図-3）。

地盤抵抗力 F_{soil} には静的な抵抗力 F_w の他にダッシュポットの動的抵抗成分 F_v が含まれている。非線形な地盤ばね定数 K とダッシュポットの定数 C を荷重試験で測定したシグナルを利用して決定することで、 K 、 C 両者の非線形性を考慮に入れた静的な荷重-沈下関係を得ることができる（図-4）。非線形ダンピング法の詳細については文献 4) 5) を参照されたい。

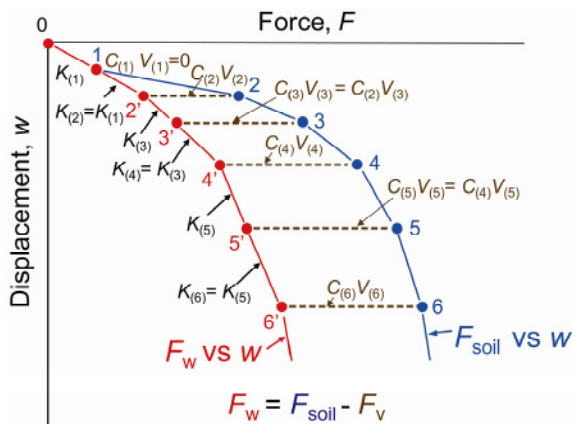


図-4 非線形ダンピング法による解析方法

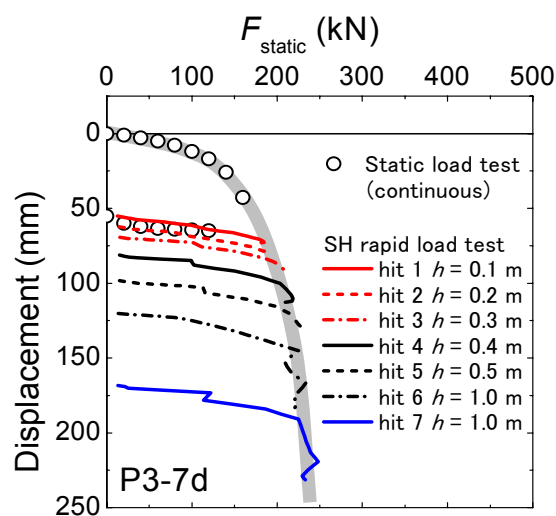
2.4 静的荷重試験との整合性

スプリングハンマー急速荷重試験結果の妥当性を検証するために、同一の杭に対して静的荷重試験と急速荷重試験の両者を連続して行い、両試験結果の比較検証を行った⁶⁾⁷⁾。

図-5 に示されるように、試験ではまず、静的荷重試験が実施され、それに引き続いて複数回の打撃による

る急速載荷試験を実施した。急速載荷試験の荷重－沈下関係は前述の非線形ダンピング法によって得られた静的な荷重－沈下関係である。また急速載荷試験時の変位量は事前に行われた静的載荷試験での最終沈下量を考慮した累積変位量で示している。

図から明らかなように、静的試験およびスプリングハンマー急速載荷試験からの荷重－沈下関係はともに一本の包絡線を描くものであり、このことから非線形ダンピング法による解析を含めたスプリングハンマー急速載荷試験方法が静的載荷試験と同等の結果を示しているものと判断できる。



図－5 同一の杭に連続して行われた静的および急速載荷試験からの荷重－沈下関係

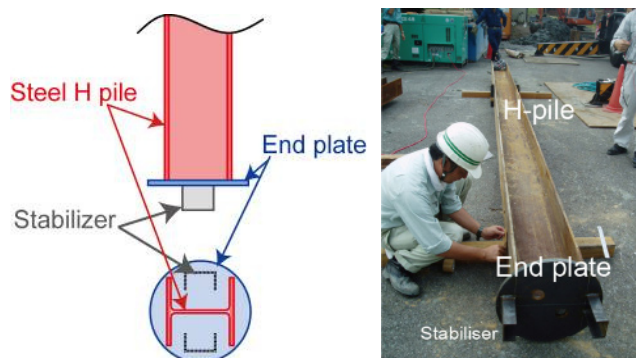
3 急速載荷試験を組み込んだ杭の施工方法

3.1 工法概要

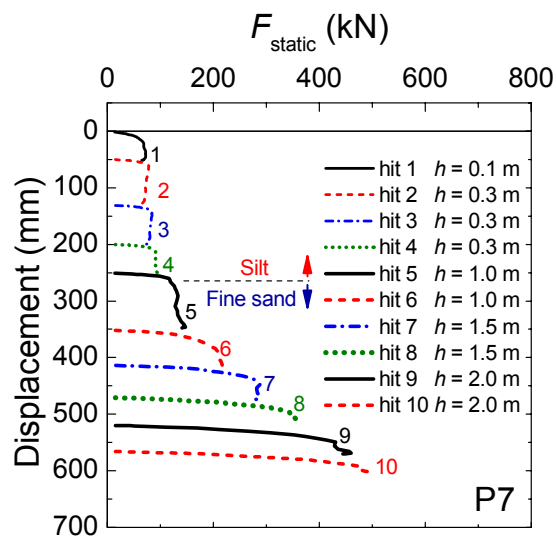
本工法は仮設構台等の支持を目的としたH形鋼杭において、その先端にプレートを施すことにより、より浅い地層で杭を支持させる工法であり、杭の施工はプレボーリング根固め最終打撃工法によって行う。図－6に本工法で用いる杭の先端形状を示す。杭の先端支持力を効果的に発現させるために、杭先端には掘削孔とほぼ同径の鋼製円板を取り付ける。最終打撃時の杭の捻れを防ぐためにスタビライザーが取り付けられている。

過去の実験結果から砂質地盤で先端支持される杭においては、打撃による先端支持力の向上が期待できると考えられる⁶⁾。図－7は先端プレート付きH形鋼杭をシルト層から細砂層へと打撃により貫入させた際の先端支持力の測定結果を示している。図から判るようにシルト層ではその支持力は打撃を加えても一定であるのに対し、細砂層に貫入している部分では支持力は打撃回数を加えるごとに増加している。

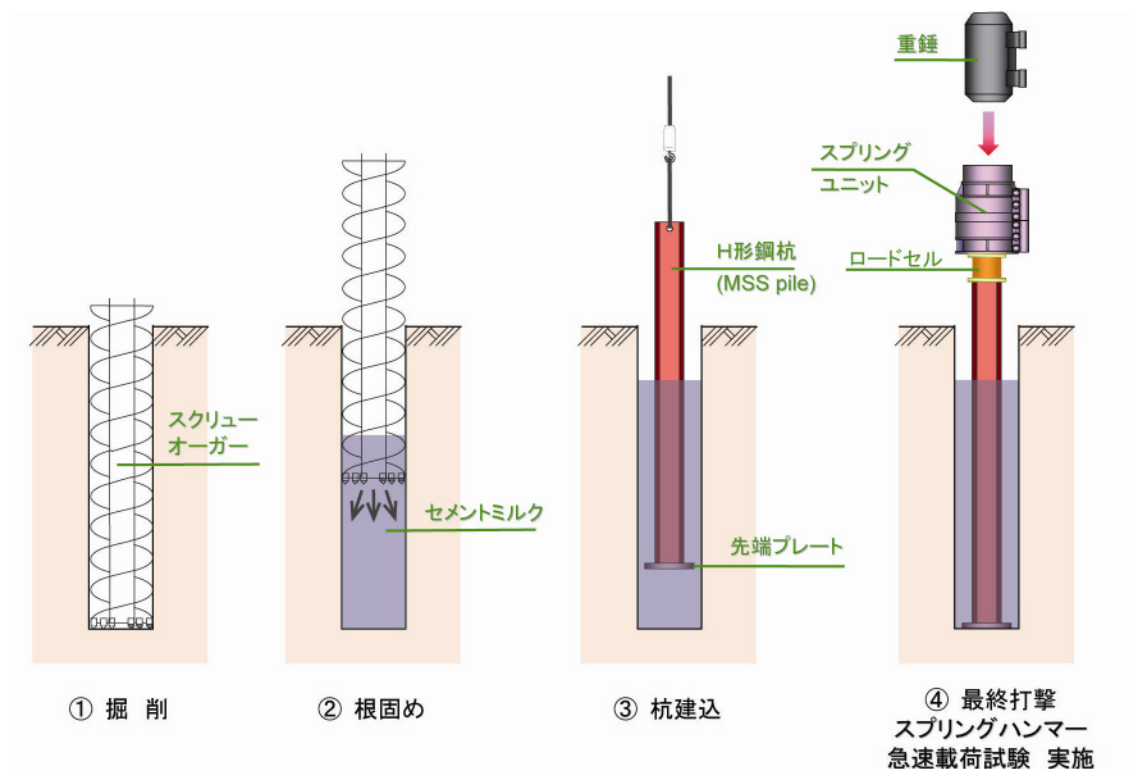
このような利点を活かすことで、ある程度の支持力を持つ中間層の支持力特性を改善し、要求される先端支持力を得ることができれば、従来の設計に比べて大幅に杭長を減ずることも可能である。もちろん支持力改善効果はそれぞれの杭について確認されることが必須であり、ここにスプリングハンマー急速載荷試験を組み込むことで、施工中の杭の先端支持力の把握が可能となる。



図－6 MSSP 工法で使用する杭の先端形状



図－7 打撃による先端支持力の改善効果



図ー8 杭の施工手順

3.2 施工手順

図ー8 は本工法の施工の手順である。所定の深度までスクリューオーガーによる掘削を行い (①), 根固めのセメントミルクの注入終了後に (②), 前述の先端プレートを取り付けたH形鋼杭を吊り込む (③)。通常のプレボーリング最終打撃工法で行われるように、重錘による打撃によって杭先端を所定の根入れ深さに定着させる (④)。このとき、杭頭にロードセルおよび加速度計を設置し、スプリングユニットを介して重錘落下による打撃を行うことで急速載荷試験を実施する。急速載荷試験のための準備はロードセルと加速度計を設置するための僅か数分である。

打撃ごとに杭の先端支持力が測定でき、要求される先端支持力が確認されたところで施工を完了する。

4 実現場への適用

本工法の実際の現場への適用事例として、さいたま(2006)、船橋(2007)、川崎(2008)の3件の例を紹介する。現場はいずれも仮設構台の支持杭であり、図ー9 に示されるような地盤である。同図にはこれらの現場で従来工法により計画されていた杭(B)と、本

工法で実際に短尺化され施工された杭(A)も併せて示している。

表ー3 は各現場で採用した最終打撃時の急速載荷試験で確認した先端支持力を示している。表中の要求性能は支持杭に要求されていた極限支持力であり、設計支持力に短期の安全率1.5をかけたものである。周面摩擦は学会基準⁸⁾にしたがって求めた極限の周面摩擦力である。周面摩擦力についてはさらに安全側に余裕を持たせるためにその80%を見込むものとして、要求性能から摩擦力の80%を減じた荷重を確認する先端支持力とした。

表ー3 現場確認荷重の設定

現場名	要求性能 P (kN)	周面摩擦 Q_s (kN)	確認 先端支持力 (kN) $P - 0.8 \times Q_s$
さいたま	1175	958	409
船 橋	903	396	586
川 崎	1344	1041	511

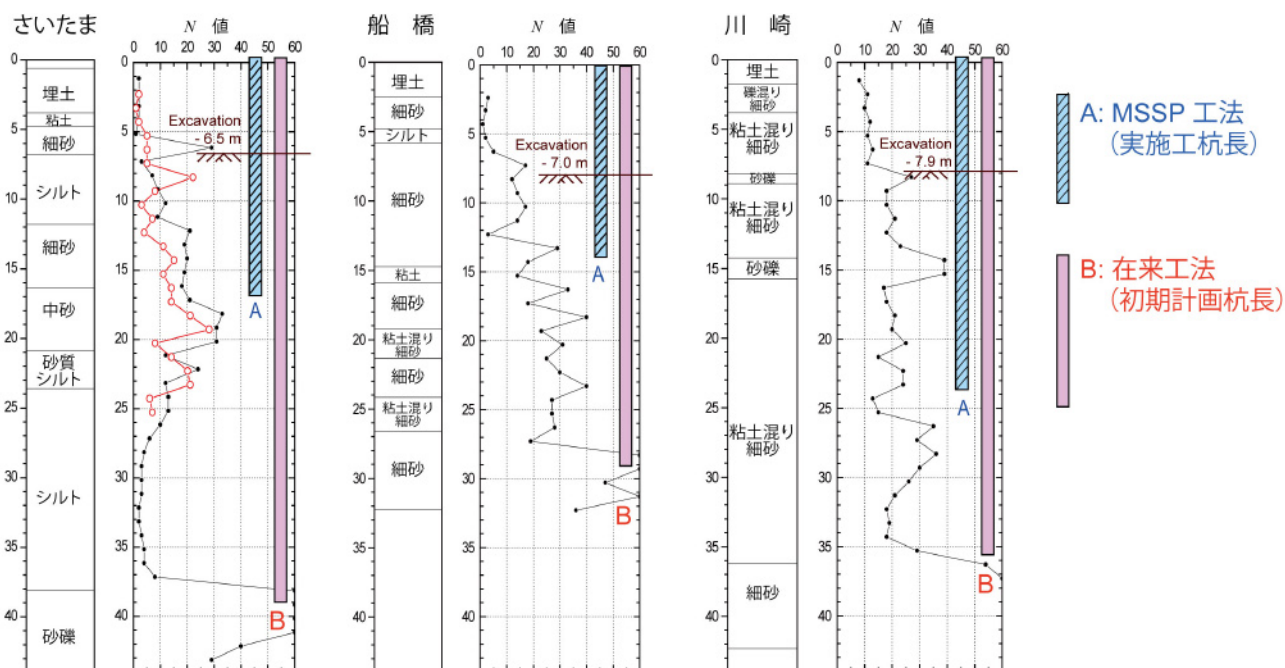


図-9 現場の地盤と杭の状況

5 施工結果

前章で述べたように各現場での確認先端支持力を設定した。ただし、仮設構台の使用条件を考慮して、許容沈下量を 30mm に抑えた。つまり実施工では杭の載荷試験における荷重-沈下関係を確認し、沈下量 30 mm 以内での先端支持力が所定の値となった時点で施工完了とした。

図-10 はさいたま現場での全杭の載荷試験の結果である。すべての杭が要求された 409 kN を許容沈下量の範囲内でクリアしている。また、図中の破線は根

固めセメントミルクが固化した後に行われた試験の結果であり、杭全体（先端+周面摩擦）に要求された支持力 1175 kN を余裕を持ってクリアしていることが見て取れる。図-11 には現場全体の支持力の分布状況が示されている。ここでは星形のマークが根固め固化後の杭の支持力を示している。

同様に図-12 では船橋現場、図-13 では川崎の現場の試験結果を示す。いずれの現場においても、短尺化された杭であっても当初要求された杭の支持力を確保できていることが確認された。

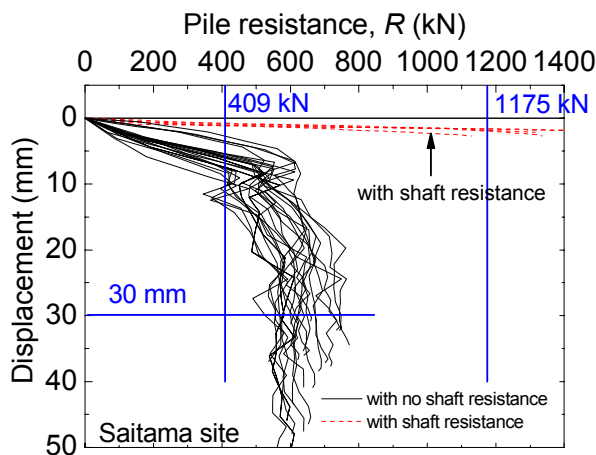


図-10 さいたま現場での各杭の支持力

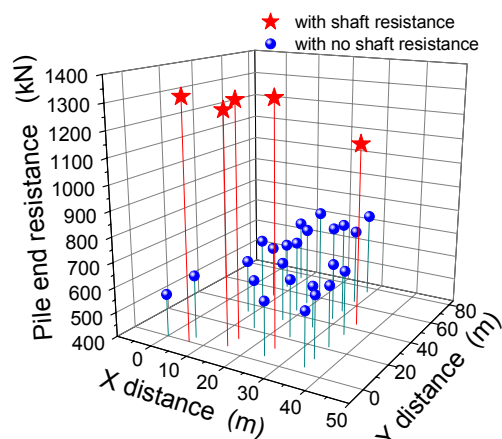


図-11 さいたま現場での先端支持力の分布

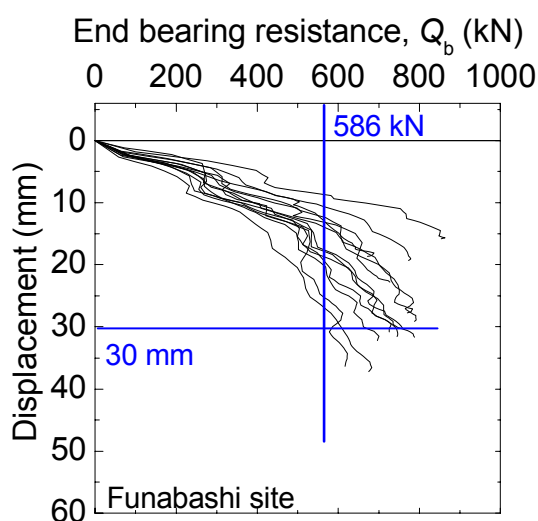


図-12 船橋現場での急速載荷試験結果

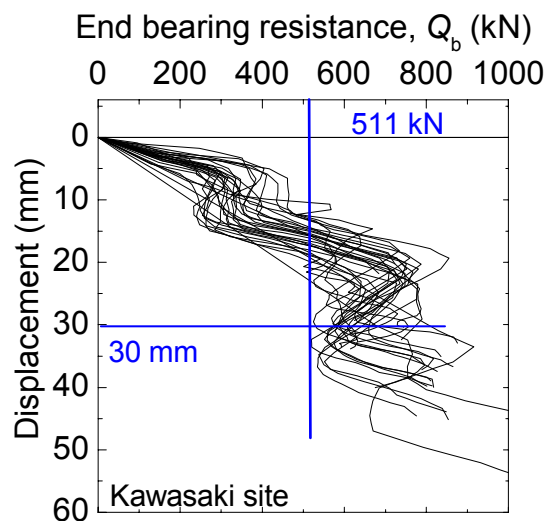


図-12 川崎現場での急速載荷試験結果

表-4 杭の短尺化に伴う低減効果の例

現場名	要求性能 (kN)	杭本数	杭長 (m)			低減 杭延長	低減 杭質量	費用効果			杭施工日数	
								材料費率	工事費率	材&工		
			A	B	A/B			(m)	(ton)	A/B	A/B	A/B
さいたま	1175	27	17.0	39.0	0.44	594.0	80.2	0.44	0.66	0.37	7	11
船 橋	903	13	14.0	29.0	0.48	195.0	26.3	0.48	0.60	0.38	3	5
川 崎	1344	30	24.0	36.5	0.66	375.0	34.9	0.66	0.75	0.63	9	12

表-4 は各現場での杭の短尺化に伴うコスト・工期の比較を示したものである。いずれの現場でも、要求された杭の性能を損なうことなく40～60%の費用削減効果が得られた。

6 おわりに

スプリングハンマー急速載荷試験の機動性を活かして、施工中の全杭に対する載荷試験を実施することができた。これにより構造物の安全性を損なうことなく杭を短尺化することが可能であった。

今後より本工法の汎用性が向上するよう、試験装置の改良や、適用可能な地盤の判定手法など一層の研究を続けたい。

参考文献

1) Matsumoto, T., Wakisaka, T., Wang, F.W., Takeda, K. and Yabuuchi, N. : *Development of a rapid pile load test method using a falling mass attached with spring and damper*, Proc. 7th Int. Conf. on the Appl. of Stress-Wave Theory to Piles, Selangor, Malaysia, pp.

351-358. (2004).
 2) 地盤工学会：杭の鉛直載荷試験方法・同解説，pp.1-17, 175-222. (2002).
 3) Kusakabe, O. and Matsumoto, T. : *Statnamic tests of Shonan test program with review of signal interpretation*, Proc. of 1st Int. Statnamic Seminar, Vancouver, Canada, pp. 113-122. (1995)
 4) Matsumoto, T., Tsuzuki, M. and Michi, Y.: *Comparative study of static loading test and statnamic on a steel pipe pile driven in a soft rock*, Proc. 5th Int. conf. and Exhibition on Piling and Deep Foundations, Bruges, Belgium, pp.5.3.1 - 5.3.7. (1994).
 5) 松本樹典, Middendorp, P., Bermingham, P., 続誠：珪藻泥岩に打設された鋼管杭の急速載荷試験，土木学会論文集，No.517/III-31 pp.13 - 24. (1995).
 6) 清水茂，中嶋義雄，磯部幸夫，松澤一行，松本樹典：先端支持力H形鋼杭の鉛直載荷試験，日本建築学会 2006 年度大会. (2006).
 7) Matsuzawa, K., Nakashima, Y., and Matsumoto, T. : *Spring Hammer rapid load test method and its validations*. Proc. of 2nd Int. Conf. on Foundations, Dundee, Scotland, pp. 223-234. (2008).
 8) 日本建築学会：期限付き構造物の設計・施工マニュアル・同解説―乗入れ構台―，「2.3 支柱の許容支持力」(1986).