

打込み時衝撃力波形に基づいた鋼管杭の静的支持力評価

Evaluation of static bearing capacity of foundation based on impact wave due to driving steel pile

近藤里史*, 田尻太郎**, 佐藤昌志**, 小室雅人***, 岸徳光†

Satoshi Kondo, Taro Tajiri, Masashi Sato, Masato Komuro, Norimitsu Kishi

*室蘭工業大学大学院, 工学研究科博士後期課程 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

**博 (工), (株) 砂子組, 札幌本店土木部 (〒060-0033 札幌市中央区北 3 条東 8 丁目)

***博 (工), 室蘭工業大学准教授, 暮らし環境系領域 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

†工博, 室蘭工業大学特任教授, 暮らし環境系領域 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

Usually, driving steel pile was controlled based on the dynamic bearing capacity of the foundation evaluated following the specifications. However, the capacity is just only one index for driving the pile because the static capacity for design use has not been specified. Even though the static capacity can be evaluated by analyzing the impact force occurred at driving the pile, the method has still been sophisticated and has not been customized for practical use. Here a simple and practical method for evaluating the static bearing capacity of the foundation was proposed, and the applicability was verified comparing with the field test results.

Key Words: steel pile, bearing capacity, impact acceleration

キーワード: 鋼管杭, 支持力, 衝撃加速度

1. はじめに

各種社会基盤施設の支持杭に用いられる鋼管杭において、打撃時における杭の打ち止め管理に関しては、實際上道路橋示方書下部工編 (以後、道示・下部工編) を用いることが多い^{1)~3)}。そこでは弾性波動論に基づいた動的先端極限支持力と、動的に低減した杭周面摩擦力を含む動的 support 算定式から動的 support を算定評価し、その値が設計上の静的許容 support を上回ることで、打ち止め管理の指標となっている。しかしながら、動的 support はあくまで打ち止め管理の指標の一つであり、通常は現場で記録した打込み履歴等から support 層への到達度などを推定し、総合的に判断して打ち止め管理を行っているのが現状である。

動的 support が、打ち止め管理の指標の一つに留まっているのは、それが管理目的である静的 support を直接反映したものではないことが、理由の一つと考えられる。そのため、近年では衝撃載荷試験の動的データマッチングや CASE 法でリアルタイムに処理し、波動論に基づいて静的 support を推定する方法も採用されている^{4), 5)}。

ここで、動的データマッチング法は、杭頭の打込み加速度と杭頭のひずみ波形を計測し、一方で杭全体を

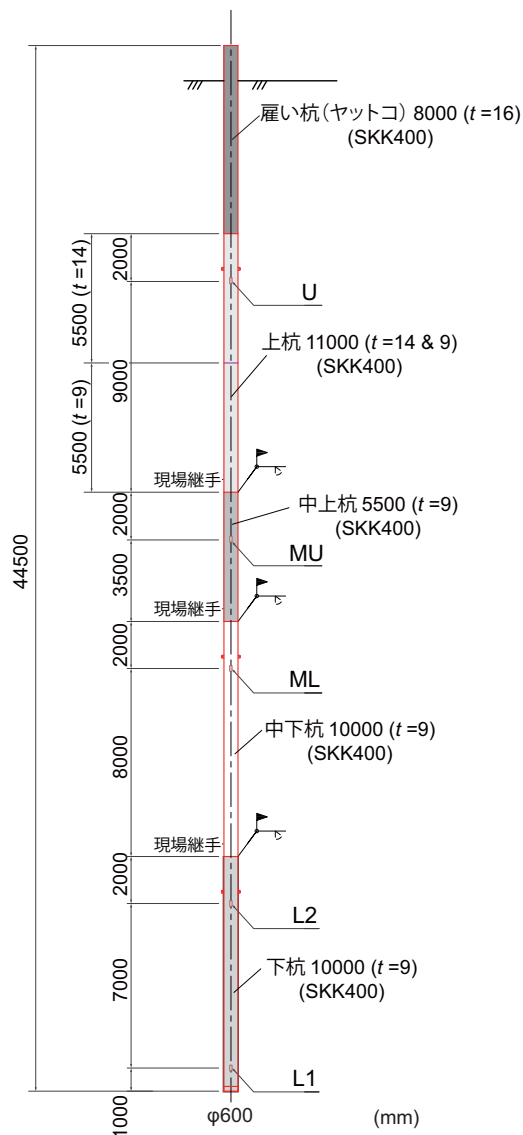
数値的にモデル化し、地盤と杭間の接触問題にはスライダーやダッシュポット、バネを導入し計測結果を基本に各パラメータ定数を決定するための動的応答解析を行い、support を同定するものである。また、CASE 法は、一次元波動論を厳密に展開して静的 support や周面摩擦力を求める手法である。しかしながら、具体的な計算のためには地盤情報を反映したパラメータが必要となる。このように、いずれの手法も、現場への適用にはリアルタイム解析に特化した測定システムと解析システム、および熟練した人員が必要であり、通常の現場技術者が運用できる範囲を越えていると思われる。工学的には、地盤 N 値の他、ランマーの打撃回数や衝撃的打撃力波形、あるいは各打撃毎の杭頭変位等の最低限のデータを用いることによって、簡易に衝撃的な現象を考慮した静的 support 評価が可能になれば、より一層実用性と共に信頼性も向上するものと判断される。

本論文は、φ600 mm、全長 44.5 m の鋼管杭の打込み過程で計測した杭頭の打込み時における衝撃加速度および杭全長に渡るひずみ波形データに基づき、衝撃載荷試験法と同様により実用的に静的 support を推定評価することを目的に、推定結果を杭全長に渡るひずみ波形データによって実証的に検証することを試みた。

なお、打込み杭の打撃過程における杭全長、特に杭頭のひずみ波形計測は、著者等の知る限りでは見当た

† 連絡著者 / Corresponding author

E-mail: kishi@mmm.muroran-it.ac.jp



図－１ ひずみゲージの設置位置

らない。

2. 打込み鋼管杭の衝撃加速度及びひずみ波形計測

2.1 計測の仕様

図－１には、打込み実験に用いた鋼管杭の形状寸法及びひずみゲージ取付位置を示している。軸方向ひずみを測定することとし、ひずみゲージは図中のL1～U間で対向位置に2点取り付け、防水処理材で覆っている。図－２に示しているように、延長ケーブルにはETFE4C シールド付ケーブルを用い、ひずみゲージも含めてアルミテープで杭体に定着させ、打込み時の周辺地盤の抵抗から保護している。なお、ひずみゲージにはゲージ長が2 mm のものを採用した。

図－１には図示していないが、杭頭には容量が1,000 G のひずみゲージ式加速度計を取り付けている。鋼管を溶接して連結する場合には、そのたび毎に移設を繰



図－２ 加速度計およびひずみゲージの設置状況

り返し取り付けている。取り付け位置は、連結位置から下方500 mm であり、後述の図－３に示すようにその位置をA-2とした。取り付けた加速度計の計測可能最大周波数は7 kHz である。なお、加速度計には当初圧電式も併用していたが、ランマーによる衝撃的な打撃力の増加とともにノイズが卓越するため、本研究ではひずみゲージ式加速度計のデータのみを用いて検討を行うこととした。

ひずみゲージは打込み深度の増加と共に順次断線等により測定不能となって行った。そのため、本論文では対向位置2点と加速度計の全データが揃っている打込み延長が0～35.5 m までの結果を用いることとした。

測定時のサンプリング周波数は10 kHz とした。データ処理においては、対向位置2点の測定値を平均化した。各波形は、加速度波形の最大振幅を基本にトリガーレベルを設定し、トリガー前からの波形を含め130 ms 間の波形を抽出することとした。

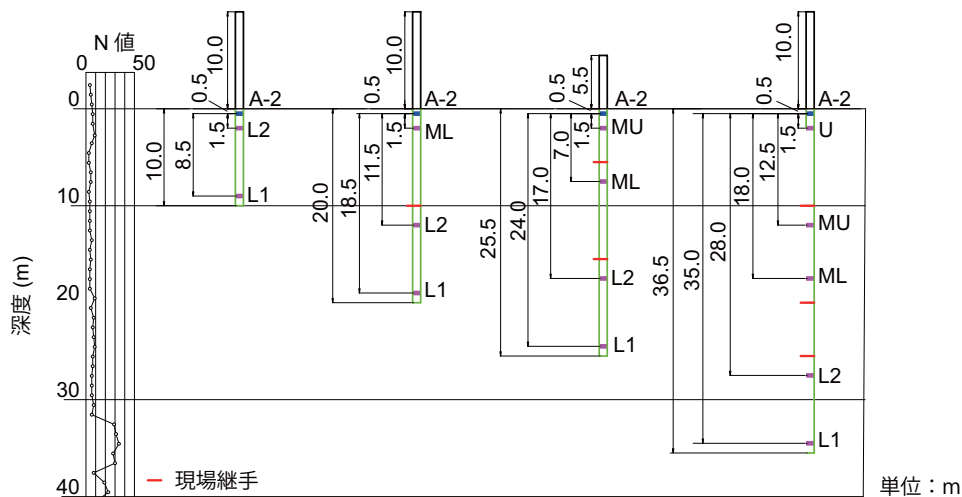
なお、本実験に用いた打撃ハンマーは、日本車両製NH100-2、油圧ハンマーの質量10 ton、最大ストロークが自由落下相当で1.44 m、最大打撃エネルギーが141 kJ である。

2.2 計測結果の概要

図－３には、鋼管の連結部、および各深度におけるひずみゲージ取り付け位置と加速度計設置位置との間隔、事前調査結果による地盤N 値を示している。

1 打撃毎の波形は、偏心载荷状態に至る場合もありばらつきが大きいため、ここでは鋼管杭の打込み深度に応じた平均波形を用いることとした。

鋼管の縦波の弾性波速度 v は、一般に次式で与えら



図－3 打込み状況

表－1 加速度計とひずみゲージ間の距離

現場継手 (m)	距離 (m)					
	A-2	L1	L2	ML	MU	U
0.0～10.0	0	8.5	1.5			
10.0～20.0	0	18.5	11.5	1.5		
20.0～25.5	0	24.0	17.0	7.0	1.5	
25.5～36.5	0	35.0	28.0	18.0	12.5	1.5

れる。

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (1)$$

ここに、 E ：鋼管の弾性係数、 ρ ：単位体積質量である。

いま、鋼管の弾性係数を $E = 2.0 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 、単位体積質量 $\rho = 7,850 \text{ kg/m}^3$ として、式 (1) から算定すると、弾性波速度 v は $v = 5,045 \text{ m/s}$ となる。表－1 には、図－3 に示されたひずみゲージ取り付け位置と加速度計取り付け位置間の距離を一覧にして示している。これらの距離と弾性波速度 v から、加速度計のピーク時刻 ($t = 20.1 \text{ ms}$) を基準として、各深度のひずみゲージまでの波動到達時刻を推定し、ランマー打撃力による衝撃波形の伝播過程を確認した。なお、波動の到達時刻に関しては、波形の立ち上がり時間を用いて算定するべきであるが、誤差を多く含むことから、各波形の最大振幅発生時間を元に算定することとした。

図－4 には、事前のボーリング調査結果から、打込み深度が 18 m から杭がほぼ支持層に達したと考えられる 35.5 m までの代表的な区間について、加速度波形と各点のひずみ波形を示している。杭頭加速度は、打込み延長が 30 m 以上で 300 G 以上を示しており、 N 値が急激に大きくなる 34～35.5 m では 400～550 G 程度の値を示している。また、打込み延長が 34 m 以上の範囲では、地盤 N 値の急激な増加に伴い打撃

力も増大し、杭頭加速度波形は鋭角な形状を示し衝撃荷重荷重時に類似した波形が示されている。

図－4(a)～(e) までのひずみ波形において、A-2 点に近い MU あるいは U 点の最大ひずみ近傍部は、加速度波形と類似の高周波成分が卓越している。一方、杭頭から離れた点での各ひずみ波形の最大応答近傍部はより低周波成分が卓越した波形を示している。さらに、これらの点では理論上の波動到達時刻よりも 5～8 ms 程度遅れて応答していることが分かる。これは、杭先端部の地盤の N 値が未だ小さいために杭全体が貫入することにより、先端部からの反射波の振幅も小さくかつ鋼管の周面摩擦力が多少なりとも作用することによるものと推察される。

これに対して、 N 値が急激に大きくなっていると推察される図－4(f) の打込み延長が 35.0～35.5 m 時点では、U 点から L2 点までがほぼ理論上の到達時間に対応していることが分かる。これは、杭先端部が N 値の大きい岩盤部に到達したことにより、杭先端部岩盤が剛基礎に近い状態となって杭の貫入量も小さいことにより鋼管周面摩擦も小さいことを示唆している。

表－2 には、各ひずみゲージへの波動到達時間の理論値と実測結果を較して一覧にして示している。表より、現場継手が 10.0～20.0 m、20.0～25.5 m の区間では、杭先端部の N 値が小さいこともあり、波動到達時間の理論値と実測値に大きな差が出ており、測定値からの確に波動到達時間を求めることが難しいことが分かる。一方、初期の状態と、現場継手が最終段階における実測の波動到達時間は理論値と大略類似していることが分かる。これは、初期の状態時には鋼管の周面摩擦力が小さいこと、後者の現場継手が最終段階の場合には杭先端支持力が十分大きいことにより、明確に波動伝播の状況を確認できるためと推察される。なお、図－4(b)～(f) で最も杭頭に近い U 点のひずみ値が、2 番目に杭頭に近い MU 点より小さいのは、設計

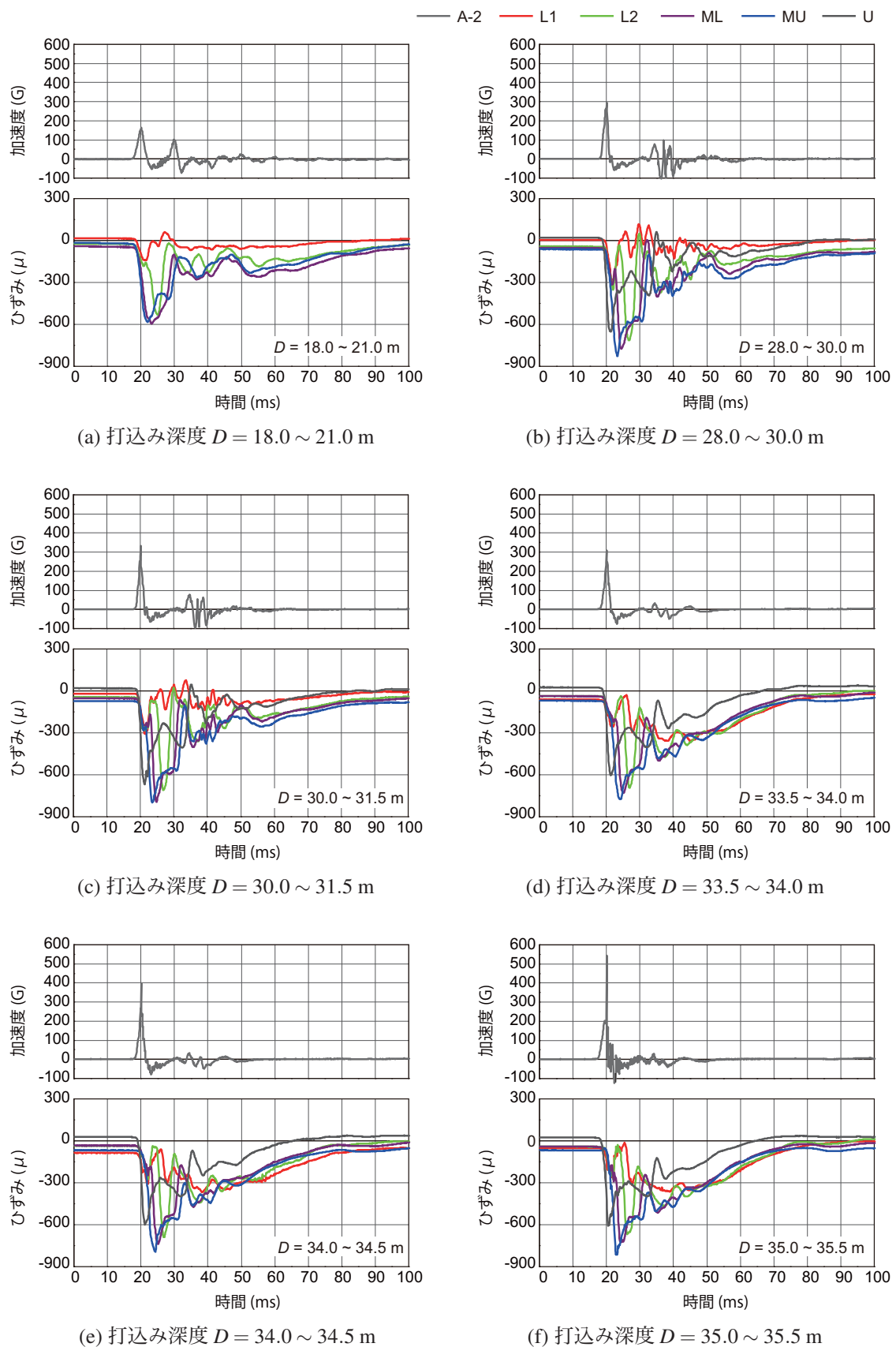


図-4 加速度およびひずみの時刻歴応答波形

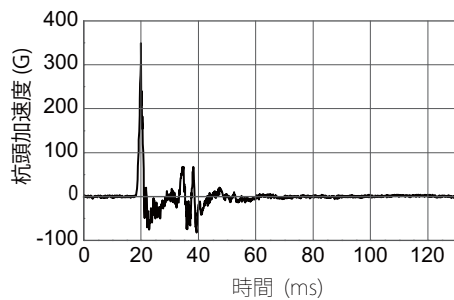
位置まで鋼管を地中に押し込む雇い杭（ヤットコ）を装着する必要性から、U点とMU点の間において鋼管肉厚が $t = 9$ mm から 14 mm に変化し、断面積が

1.5 倍に増加したためと推察される。この値はUゲージとMUゲージのピーク値の比に概ね対応している。

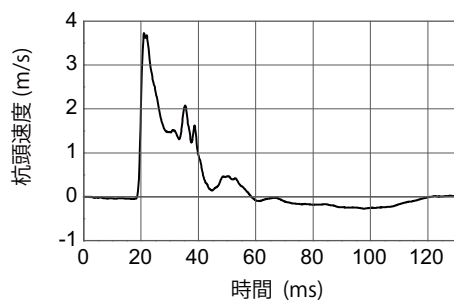
表－2 ひずみゲージへの波動到達時間の理論値と実測値の比較

現場継手 (m)	波動到達時間 (ms)				
	L1	L2	ML	MU	U
0.0 ～ 10.0	1.7 (1.1)	0.3 (0.6)			
10.0 ～ 20.0	3.7 (1.2)	2.3 (4.3)	0.3 (3.1)		
20.0 ～ 25.5	4.8 (1.6)	3.4 (4.9)	1.4 (3.1)	0.3 (2.0)	
25.5 ～ 35.5	6.7 (7.5)	5.4 (6.0)	3.4 (4.1)	2.3 (2.7)	0.3 (0.3)

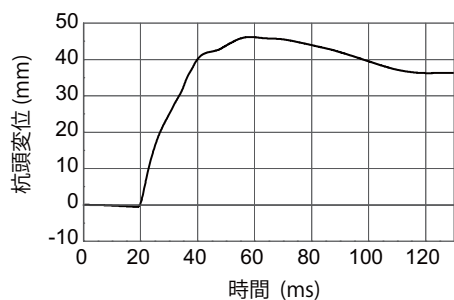
() : 実測結果



(a) 杭頭加速度波形



(b) 杭頭速度

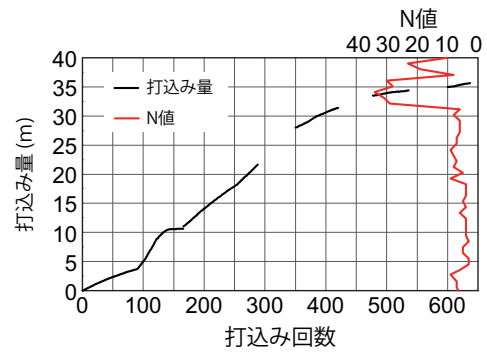


(c) 杭頭変位

図－5 1 打撃時における杭頭加速度，速度および変位波形

2.3 計測結果のまとめ

ここでは，杭先端が支持層に達していない場合における波形は割愛している。杭先端部が未だ支持層に達していない場合には，ランマー打撃力が小さくかつリバウンドが小さいために，ランマーの片当たりやラン



図－6 打撃回数と打込み量の関係

マー筐体による押し込みの影響等が大きく現れ，一次元波動論から予想される杭挙動と必ずしも一致しない結果になっていることを確認している。

一方で，杭先端部が支持層近傍に達した場合には，上述のように安定した結果となり，鋼管杭は概ね波動論に即した動的挙動を示しているものと判断される。

2.4 杭体変位

図－5(a)には，ランマー 1 打撃によって得られる代表的な杭頭における衝撃的な加速度波形の一例を示している。杭体変位（打込み量）は，(a) 図に示す加速度波形を 2 度積分することにより算出した。

数値積分にあたっては，精度上静止の状態に至らないことが明らかになっている。このため，本論文では前述のトリガー前後でそれぞれ 20 ms から 110 ms 間の波形を用いることとし，波形の終端で速度零となる基線補正を行うこととした。

図－5(b)には，(a) 図に示す加速度波形を一度数値積分を施しかつ基線補正して得られた速度波形を示している。また，図－5(c)には，さらに 1 度積分を施して算定した変位波形の一例を示している。

図－6には，図－5(c)に示す 1 打撃毎の杭頭変位を打撃回数で積算して算出した打込み回数と打込み量の関係を示している。図中の赤線はボーリング調査による地盤 N 値の分布を示している。図より，打込み深度が 30 m を越えると打込み効率が悪化しており，ほぼ N 値の大きさと対応する形となっていることが分かる。これより，打込み量に対するランマー打撃回数割合を用いることにより，ランマーの打ち止め管理も可能になるものと推察される。

なお，図中の 22 ～ 28 m における打込み量の不連続は，打撃時の衝撃によって加速度計が鋼管との接着切れを起こし測定不能に至ったことによるものである。一方，後半の不連続は，加速度計に不具合が発生し明らかに異常な波形分布を示していたことにより，データを除外したことによるものである。

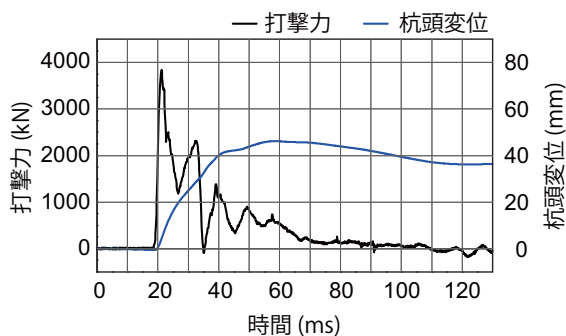


図-7 1打撃時におけるランマー打撃力と杭頭変位波形

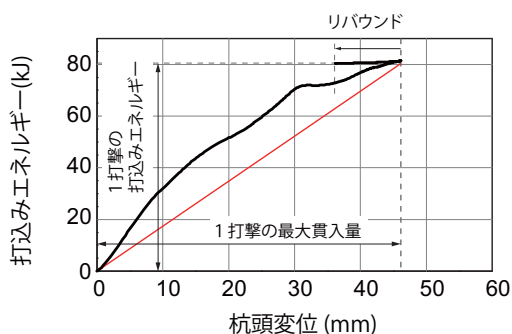


図-8 1打撃時における打込みエネルギー

3. 換算静的支持力の推定

3.1 打込みエネルギー

図-7には、打込み延長30 m時点での1打撃時における打撃力と対応する杭頭変位波形を示している。なお、打撃力は、杭頭から2,000 mm下方に取り付けたひずみゲージの測定値(向かい合う2点の平均値)に杭断面積及び弾性係数を乗じて算定している。

なお、打撃力を評価する方法には、ランマー加速度にランマー質量を乗じる方法と、鋼管の軸ひずみに断面積及び弾性係数を乗じて求める手法がある。ランマー加速度を用いる場合には、まずランマーに加速度計を設置して実測することが不可能に近いことや、金属と金属の衝突であることよりひずみ波形に比較して高周波成分を多く含むため、真に鋼管に入力される打撃力とは異なることが推測される。このことから、本研究では直接鋼管にひずみゲージを貼り付けて計測評価することとした。

1打撃の打込みによるエネルギー量は、打撃力-杭頭変位曲線で内包される面積を積算することにより求められる。

図-8には、1打撃時における打込みエネルギーを杭頭変位を横軸にとって整理している。図より、打込みエネルギーは最大杭頭変位まで増加傾向を示すが、

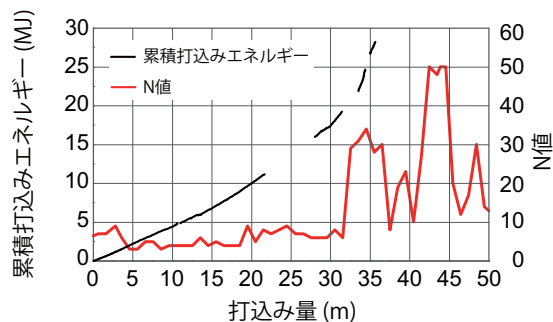


図-9 打込み終了までの累積エネルギー

その後10 mm程度リバウンドするため、ほぼ一様な値を保持した状態で変位が減少していることが分かる。

図-9には、打込み終了までの累積打込みエネルギーについて、打込み量を横軸にとってN値の分布と共に比較して示している。図からも明かなように、N値が大きくなると対応して累積打込みエネルギー量も増加傾向を示し、打込み効率が低下していることが分かる。

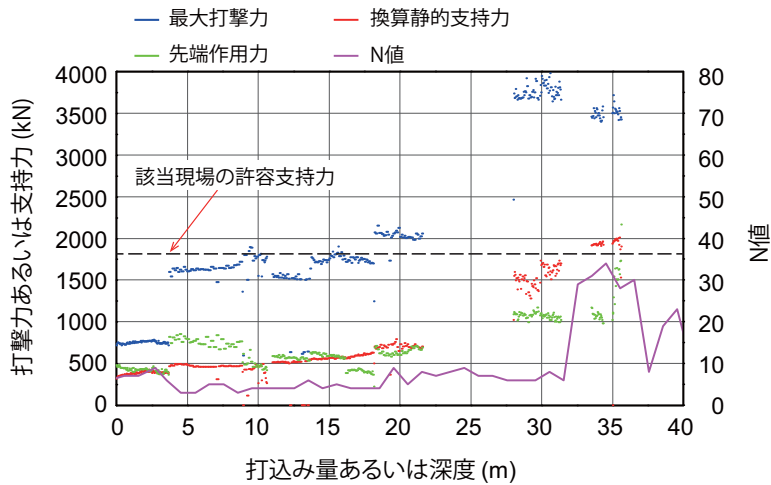
3.2 換算静的支持力

高周波成分を含む衝撃的な打撃力波形を用いて直接的に静的な杭先端支持力を評価することは、処理過程が煩雑になることが想定される。従って、本研究では、最大打込みエネルギーと最大杭頭変位を用い、準静的な考えを導入して杭先端支持力の評価について検討を行うこととした。すなわち、図-8の赤線に示すように、打込みエネルギーと杭頭変位が、最大杭頭変位に対する最大打込みエネルギー量の増加割合を有した線形関係にあるものと仮定し、さらに設計的な概念を導入して衝撃的な打撃力を準静的に一定値であると仮定し、それを最大打込みエネルギー量から換算した静的支持力(以下、換算静的支持力)として定義する。

いま、図-8において換算静的支持力を試算すると、最大杭頭変位量は46.2 mm、最大打込みエネルギーが81.4 kJであることより、換算静的支持力は1,762 kNとして求まる。この値は、図-7における最大打撃力3,831 kNの約1/2.2として求められ、衝撃的な打撃力波形からの換算静的支持力として評価できるものと判断される。なお、ここでは換算静的支持力を安全側に評価するために、杭頭変位としてその最大値を考慮することとした。

3.3 許容設計支持力及び換算静的支持力と各種測定値との比較

図-10には、横軸に打込み深度を取り、抽出波形454波から得られた最大打撃力、換算静的支持力、杭先端作用力の値を、当該現場における許容設計支持力線および地盤のN値分布と合わせて示している。こ



図－10 推定値と実測データの比較

こで、杭先端部への作用力は、杭先端から 1,000 mm 上方に取り付けた L1 ゲージ (図－1 参照) の値を用いて評価することとし、1 打撃毎に測定された最大ひずみ値に杭断面積および弾性係数を乗ずることにより、評価することとした。なお、図中計測結果に多少ばらつきが発生しているが、これは N 値の分布のみならず、鋼管溶接時に打撃を中断することによる鋼管周面摩擦力の増大等も影響しているものと推察される。

(1) 最大打撃力

ランマー打撃時における最大打撃力は、前述のように杭頭から 2,000 mm 下方に取り付けたひずみゲージの測定値に杭断面積および弾性係数を乗じて求めたもので、ランマー 1 打撃における杭頭への衝撃的な作用力の最大値である。図より、深度 4 m 程度で最大打撃力が急激に大きく示されているが、N 値の分布とも逆行しており、その要因は不明である。一方で、N 値がそれほど増加していない深度 5～20 m においても、最大打撃力が増加傾向を示している。これは、鋼管周面摩擦力の影響であるものと推察される。

深度が 30 m 以降においてはさらに値が大きく示されている。これは鋼管の周面摩擦力効果と共に N 値の増大に伴う先端支持力の増加による効果であるものと推察される。深度 35 m 地点では最大打撃力が 3,500 kN 程度であり、換算静的支持力の 1.9 倍前後の値を示している。この値は、工学的には動的な最大支持力として評価可能であり、打込み時における動的応答倍率を工学的に安全側に評価して 2 とすると、最大打撃力を用いて上述と異なる換算静的支持力としても評価が可能になるものと推察される。

また、ここで算定評価した最大打撃力は、道示・下部工編の動的先端支持力に対応するものと推察されるが、勿論ランマーの打ち止め管理に利用可能であることは勿論である。

(2) 杭の先端作用力

杭の先端作用力分布を見ると、相対的に N 値の小さい深度 20 m の範囲では、深度 4～9 m 前後の範囲を除いて、後述の換算静的支持力分布と大略対応していることが分かる。また、深度 28～34 m 程度の範囲では、N 値と対応せず 1,000 kN 程度の一定の値を示している。但し、深度 35 m 以降では、徐々に作用力が大きくなり、換算静的支持力および設計供用支持力値と類似した値に達している。

先端作用力の計測は杭先端の支持力把握のために最も直接的な方法であるが、ひずみゲージを杭先端部に貼り付けなければならないことより、実務的には適用が困難である。

(3) 換算静的支持力

図より、本論文で提案の換算静的支持力は、ほぼ N 値の分布性状に対応して分布していることが分かる。また、N 値が 30 以上を示す深度 35 m 前後では、設計の供用支持力値ともよく対応している。これより、打込みエネルギーの算定が多少煩雑であるものの、本支持力評価は、杭先端支持力評価法として工学的に妥当な手法であるものと判断される。

4. まとめ

本研究では、鋼管杭の打ち止め管理と共に杭先端部の静的支持力評価を行うことを目的に、杭頭での衝撃的な打込み加速度及び杭全長に渡るひずみ波形データに基づき検討を行った。本研究の範囲で得られた結果を整理すると、以下の通りである。すなわち、

- 1) ランマー打撃回数と打込み量の関係は、地盤の N 値にほぼ対応しており、打込み量に対する打撃回数割合を用いて打ち止め管理の可能性が示唆された。
- 2) 杭頭の衝撃的な加速度波形を用いて算定された杭

頭変位波形と衝撃的な打込み打撃力波形から求められる打込みエネルギーにおいて、それが杭頭変位と線形な関係にあるものと仮定して求められた最大換算静的支持力値は、設計の許容支持力とほぼ対応する。

- 3) 杭頭の衝撃的な最大打撃力は道示・下部工編の動的先端支持力に対応するものと推察されるが、杭先端部が支持層に達した場合にはほぼ設計の許容支持力の 1.9 倍程度の値を示す。
- 4) 従って、杭頭の衝撃的な最大打撃力値を持って打ち止め管理が可能であると同時に、安全率を 2 として杭先端部の許容支持力を評価可能になるものと推察される。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説（IV 下部構造編），2012.
- 2) 日本道路協会：杭基礎施工便覧，2015.
- 3) 日本道路協会：杭基礎設計便覧，2015.
- 4) 小嶋英治：杭の衝撃載荷試験における CASE 法の検討，日本建築学会大会学術講演集（東北），pp. 407-408, 2009.
- 5) 小嶋英治：衝撃載荷試験の波形マッチングに差分解析を用いた場合の入力波の検討，日本建築学会大会学術講演集（東海），pp. 561-562, 2003.

(2018 年 9 月 21 日受付)

(2019 年 2 月 1 日受理)