

23 杭許容水平変位量を緩和した橋脚鋼管杭設計法とその実証的検証

Steel-Pipe Pile Design Method for Bridge Piers with Relaxed Permissible Horizontal Displacement of Piles and Its Empirical Verification

富澤幸一* 小嶋英治**

Kouichi TOMISAWA, Eiji KOJIMA

性能規定化に基づく建設コストの有効活用を目的に、平成14年3月に改訂された道路橋示方書IV下部構造編では、一定の条件下において水平変位制限を緩和する杭基礎設計法の規定が新たに追記された。本報では、上記規定に基づき、杭許容水平変位量の基本的考え方を整理し、実現場で新技術として採用した杭許容水平変位量を杭径4%まで緩和する橋脚鋼管杭設計法に対して、現場杭水平載荷試験により実証的に検証した。その際、地盤の弾性解析および弾塑性解析、さらに2次元弾塑性FEMによる載荷試験成果をシミュレートにより、設計法の妥当性を含めた軟弱地盤中の実杭の水平地盤反力特性について考察した。

キーワード：杭、許容変位量、水平載荷試験、弾塑性、有限要素法

Pile, Allowable displacement, Horizontal loading test, Elasto-plastic, Finite element method

1. はじめに

橋梁設計法において、設計施工法の多様化に伴うライフサイクルコスト(LCC)や建設コスト競争力向上の配慮から性能照査型基準が導入された。基礎構造物の設計においても、性能規定化に基づく建設コスト削減を目的に、平成14年3月に改訂された道路橋示方書IV下部構造編¹⁾(以下 道示)では、一定の条件下において水平変位制限を緩和する杭基礎設計法の規定が追記された。

そのため、上記規定に基づき、杭許容水平変位量の考え方および北海道開発局で新たに要領化した杭許容水平変位量を杭径4%まで緩和する橋脚鋼管杭設計の運用規定を整理した。

本報では、杭許容水平変位量の制限を緩和した設計法を以下の手順で検討した。

- ①設計法の基本的考え方の整理
- ②設計運用規定の策定
- ③実杭の水平載荷試験
- ④試験値の弾性解析および弾塑性解析
- ⑤2次元弾塑性FEM解析シミュレーション

許容水平変位量を緩和した杭設計法は、あくまでも杭に過度の残留変形が残らない範囲の地盤反力が適用範囲となる。そのため、設計法の妥当性は、設定した設計地盤反力を実杭の水平載荷試験から得られた実地盤反力と対比し検証した。水平載荷試験の地盤反力特性の考察は、変位レベルに応じた弾性解析および弾塑性解析、さらに2次元弾塑性FEM解析シミュレーションによった。

2. 杭許容水平変位量を緩和した杭設計法

2-1. 許容水平変位量

杭基礎における許容水平変位量は、上部工から決まる許容水平変位量と下部工から決まる許容水平変位量に分類される。このうち、上部工から決まる杭許容水平変位量は、上部構造の機能を損なわないための限界の変位量であり、一義的に決定するものではなく上部工形式や規模により変化する。一方、下部工から決まる杭許容水平変位量については、基礎構造物の剛性を確保し工学的に安定な状態に保ちつつ有害な残留変位を防止するために制限する変位量と定義される。つまり、杭基礎の許容水平変位量は、常時、暴風時、レベル1地震動において過度の変形とならない範囲内に設定することが妥当である。

ただし、軟弱地盤中などに設置される杭基礎の設計では、道示に統一的に規定されている杭径1%の許容水平変位量のみを満足するように杭剛性を確保させた場合、杭体応力や支持力に著しい余裕が生じ経済性が損なわれるケースがある。このような杭基礎にあつては上部工構造の機能と安全性を考慮した水平変位量の許容値のみを規定し、設計地盤面における杭の変位量は特に規定せずに杭前面の水平地盤反力の塑性化を考慮する弾塑性解析による設計法の適用が考えられる。

既往の研究成果では、一般的な杭水平載荷試験の実施結果の各載荷サイクルの徐荷後の杭頭残留変位量 y_s と除荷前の杭径 D に対する杭頭変位量 y の比率(杭頭ひずみ y/D)の関係は、図-1に示すようにある変位レベル

* 独立行政法人 北海道開発土木研究所 土質基礎研究室 主任研究員

Chief Researcher, Geotechnical Division,

Civil Engineering Research Institute of Hokkaido

** (株) ジオトップ 技術本部 主席研究員

Senior Research Engineer, Engineering Division,

Geotop Corporation

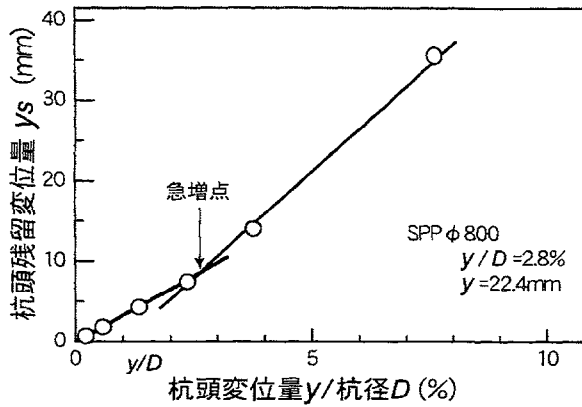


図-1 杭頭残留変位 y_s の急増点

を境界に杭頭残留変位量 y_s が急激に増加する傾向を示すとされている²⁾。そのため、この残留変位量の急増点より杭頭の変位量を小さく、すなわち許容水平変位量を抑えれば基礎の過大な残留変位を防止することが可能となる。水平荷重に対する杭頭変位量および残留変位量の関係については、多数の杭水平載荷試験結果に基づき杭種別に整理されている。この成果に基づき、地盤相対密度のヒストグラムと y_s/D の関係を杭種別の度数分布で表したのが図-2である³⁾。この度数分布は対数正規分布に比較的適合する結果である。図によれば、杭頭残留変位量 y_s /杭径 D の平均値は、鋼管杭で4.1%、PC・PHC杭で3.7%、場所打ち杭で1%強程度である。場所打ち杭の y_s/D が非常に小さいのは、水平抵抗が小さいというよりもむしろ杭体のひび割れ発生が降伏点の判定に影響を与えているためと考えられる。

これらの成果より、改訂前の従来道示では杭許容水平変位量は安全側の統一した指標として杭径の1%($\leq 15\text{mm}$)一定としている。また、杭基礎の挙動を弾性領域から塑性領域にわたり表現する際に基準となる水平変位量(基準変位量)は、弾性限界を示すと考えられる許容水平変位量と同等値として扱っている。このように、杭基礎の種類に関係なく許容水平変位量を一定とすることは一見合理的であるが、一部については過小評価になる場合もあり、建設コスト削減を考慮し杭種条件に応じた適正な許容水平変位量を設定する必要がある。

2-2. 杭許容水平変位の設計緩和規定

前記の既往成果を踏まえ、平成15年度より北海道開発局「道路橋設計施工要領⁴⁾(以下 要領)では、杭応力と杭反力に著しく余裕がある場合の以下の現場条件下で、常時、暴風時およびレベル1地震時に対する杭の水平変位量の制限値つまり杭許容水平変位量を、橋脚の鋼管杭基礎に限り杭径の4%まで緩和するよう規定した⁵⁾。

①比較的低軟弱な地盤

(表層深さ $1/\beta$ 程度までの地盤平均 N 値10程度以下、また液状化の可能性のある地盤)

②レベル1地震時において杭体が弾性体として扱える鋼管杭

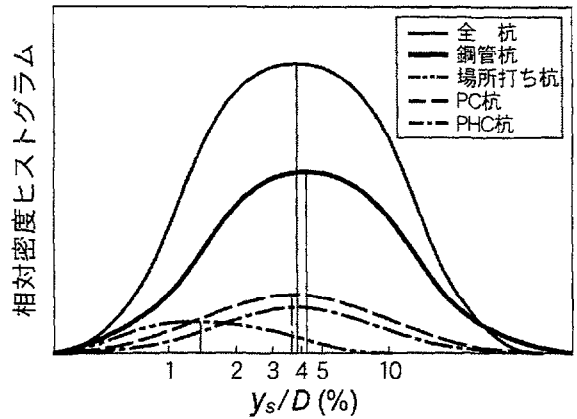


図-2 y_s/D の度数分布³⁾

なお、この設計規定は以下のように考える。

(1). 鋼管杭のみを4%許容水平変位量とする事由

鋼管杭は他の杭種に比べ曲げ剛性が小さく、許容水平変位量を杭径の1%または15mmに抑えた場合、支持力および杭体応力に余裕があるにもかかわらず下部工の規模が決定してしまい不経済となるケースが多く生じる。また、杭水平載荷試験の統計的な検討³⁾によれば、PC杭、PHC杭についても設計許容水平変位量を見直すことも可能となるが、PC杭、PHC杭の試験検証事例は必ずしも多くなく、設計規定は鋼管杭の許容量の見直しのみとする。

(2). 橋脚設計で運用する事由

道示によれば、水平変位の制限の緩和を適用するのは、地盤抵抗の非線形性を考慮して照査する橋脚の杭基礎のみとしている。これは、杭変位量に関わる基礎安定設計が、橋脚を主体とした地震時保有水平耐力照査法に基づき決定されるためである。そのため、この規定は橋脚設計での運用とし、杭断面力、杭頭反力および変位に関する設計照査は、杭と地盤の特性を適切に考慮し、条件に応じ杭基礎を非線形性の地盤反力モデルで実施する³⁾。

(3). 設計水平地盤反力係数 K 値の設定

地盤工学理論に従えば、杭変位の変動に応じ地盤反力は変化する。つまり、杭(許容)水平変位量は大きくなるに従い水平方向地盤反力係数 K 値は低下することになる。ただし、鋼管杭の許容水平変位量4%の緩和は、あくまでも杭の残留変位が過大とならない弾性挙動の範囲内を条件に設定されたものである。また、変位が大きくなる場合の杭設計は上層に塑性域を設定した複合地盤反力法により行なわれ、地盤反力は塑性域との境界面以深の弾性域に設定されることから、道示において基準変位量(杭径の1%相当)に対して算定される現行の水平方向地盤反力係数 K 値を、許容水平変位量を4%とした設計でそのまま運用しても実用上問題ないものと判断される。

今後、本設計法を条件に従い運用することにより、合理的かつ経済的な杭基礎設計が可能となると考える。

3. 水平載荷試験による実証的検証

3-1. 現場概要

上述の要領規定の条件に従い、新たに杭の許容水平変位

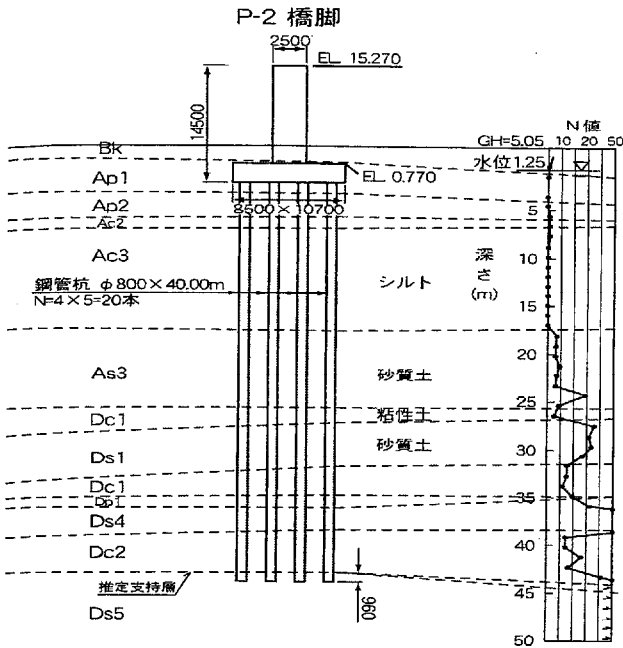


図-3 橋脚構造図・土質柱状

の制限を緩和する設計法を採用した橋梁は、北海道開発局管内 道央圏連絡道路 篠津運河橋である。篠津運河橋は橋長 $L=249.6\text{m}$ の橋梁で、上部工形式は7径間連続合成版鉄桁とし、従来橋の多主桁に対し3主桁の合理化橋としている。また、支承形式は従来方式の分散支承ではなく、橋脚6点固定式の粘性せん断型ダンパーとした。下部工形式については、軟弱地盤上の比較的長尺な支持杭基礎とした。橋台および橋脚基礎には鋼管杭(杭径 $\phi 800\text{mm}$)を採用しているが、P-1~6の6基の橋脚鋼管杭は杭反力・本体応力に大きく余裕をもつことから杭許容水平変位量 y を杭径4% ($y=32\text{mm}=\phi 800\text{mm}\times 4\%$)まで緩和する設計法を採用した。

本設計法の採用により、従来設計法に対し、各橋脚基礎で杭本数を概ね1列減らし下部工躯体を縮小することができるため、全体下部工施工費を15%程度(工事費4000万円)削減することが可能となった。

当該箇所の地盤柱状は、地表面から深度30~40m付近まで軟弱な沖積の泥炭層 $Ap1, Ap2$ ・粘性土層 $Ac2, Ac3$ および緩い砂質土層 $As3$ が厚く堆積しており、支持層はそれより深の N 値=40以上の Ds (砂質土層) が対象である。代表的な土質柱状として現場杭水平載荷試験を実施したP-2橋脚位置のボーリング図を杭諸元(杭径 $\phi 800\text{mm}$, 板厚 $t=16\text{mm}$, 杭長 $L=40\text{m}$, 杭本数 $n=20$ 本=4行 \times 5列)と合わせて図-3に示す。杭施工は $WH=10\text{ton}$ 油圧ハンマによる打ち込み工法とし、杭先端にはフリクションカットのための補強バンドは設置した。P-2橋脚位置の土質柱状は28m位置に砂層の中間層が存在するが2m程度と薄く支持層に不適と判断した。また、当該の杭設計では、土質性状から液化土層に対しては低減係数 DE を乗じた地盤定数設定および圧密対象層では負の周面摩擦力 NF を考慮した設計を行った。P-2橋脚の杭地盤反力に関する主たる現設計条件を表-1に示す。

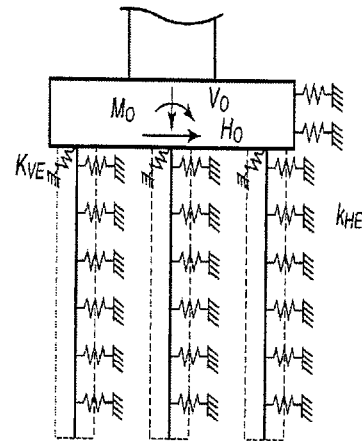


図-4 杭解析モデル図¹⁾

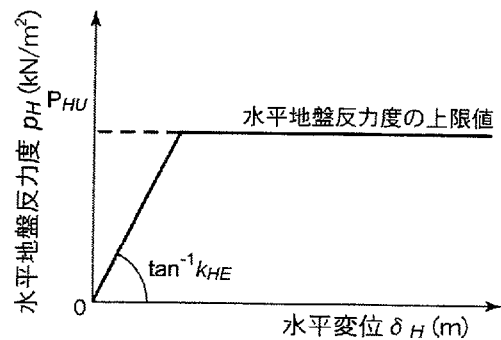


図-5 杭の水平方向抵抗特性¹⁾

表-1 P-2橋脚の設計杭地盤反力

地盤種別	層厚 (m)	平均 N 値 (回)	変形係数 $E(\text{kN/m}^2)$	水平地盤反力係数 $k(\text{kN/m}^3)$	地盤反力上限 $P_u(\text{kN/m}^2)$
粘性土 $Ac2, Ac3$	14.11	0.3	635	2827	62.0
砂質土 $As3$	7.73	8.0	4600	20478	1756.7
粘性土 $Dc1$	8.78	9.6	69800	31073	1316.7
シルト $Dc1, Dp1$	1.23	18.4	12800	57338	739.3
砂質土 $Ds4$	2.18	49.4	58100	258644 ¹⁾	8498.9
粘性土 $Dc2$	4.21	17.2	16500	73453	810.5
砂質土 $Ds5$	1.76	49.9	41600	1815191	9889.9

杭水平抵抗の関与範囲 $1/\beta$ =上層粘性土 深さ 6.18m
 $1/\beta$ 区間の地盤定数
 変形係数 $E_0=699 \text{ kN/m}^2$ 、水平地盤反力係数 $k=2070 \text{ kN/m}^3$

3-2. 弾塑性解析

杭許容水平変位の緩和はレベル1地震動(震度法)設計で適用され、橋脚鋼管杭の杭諸元は変位法解析で決定する。ただし、橋脚設計ではレベル2地震動についても照査を必要とすることから、地震時保有水平耐力法^{6),7)}の設計検討を行った。その際、杭許容水平変位量を杭径4%まで緩和したことから、変位レベルに応じて杭頭

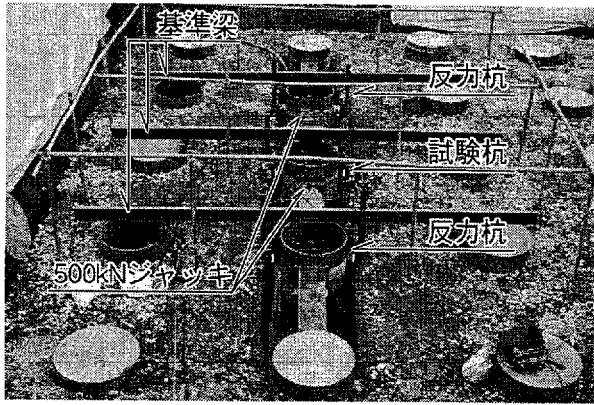


写真-1 現場杭水平載試験の実施状況

から地盤反力を最大受働土圧に置き換える弾塑性解析を行った。解析上、地盤抵抗の非線形性を考慮したラーメン構造とした杭基礎をモデル化した¹⁾(図-4)。

その際、杭の軸方向の抵抗は、地震時保有水平耐力法に用いる杭軸方向バネ定数 K_{VE} を初期勾配として、鉛直支持力の上限值 P_{UN} および引き抜き力の上限值 P_{TU} を定めた。また、杭水平方向の抵抗特性は、杭水平変位量を緩和した弾塑性解析として水平地盤反力度を上限值 P_{HU} とした図-5に示すバイリニア型に設定した。鋼管杭本体については弾性体として照査した。その結果、図-3に示すP-2橋脚鋼管杭の設計照査では、杭頭反力および本体応力に一定の余裕を確保され、水平地盤反力特性に支配された震度法設計において橋軸方向の地震時杭頭水平変位量(実設計杭水平地表面変位量 $y=28.7\text{mm} < \text{許容水平変位量 } 32\text{mm} = \phi 800\text{mm} \times 4\%$)により橋脚鋼管杭基礎の安定性が決定している。

3-3. 杭水平載荷試験法

杭許容水平変位量を緩和した設計法の妥当性、特に水平地盤反力特性を照査する目的で、P-2橋脚鋼管杭において杭水平載荷試験を実施した(写真-1)。現場杭水平載荷試験法は、地盤工学基準「杭の水平載荷試験方法・同解説」⁸⁾に準拠した荷重制御による多サイクル方式の静的正負交番載荷法とした。計画最大荷重 H_{max} は杭地表面水平変位量 y が杭径 4%の $y=32\text{mm} (\phi 800\text{mm} \times 4\%)$ までを想定した $H_{max}=300\text{kN}$ 程度に設定した。試験は杭打設時の地盤の乱れによる地盤反力の回復を考慮し、杭打設後2週間後に実施した。試験杭は代表的位置の橋脚中央の杭とし、隣接杭(正側2本・負側2本)を反力とした。試験杭にはひずみゲージは設定していないが、試験時に得られる水平荷重 H ~ 杭地表面水平変位量 y 、傾斜角 θ 、残留変位量 y_s の関係から設計値と対比した地盤反力特性が検証される。

4. 水平載荷試験結果

P-2橋脚鋼管杭で実施した現場杭水平載荷試験の結果得られた水平荷重 $\text{Log}H$ ~ 杭地表面水平変位量 $\text{Log}y$ および H ~ y 、杭残留変位量 y_s 、杭弾性戻り量 y_b 曲線の関係を

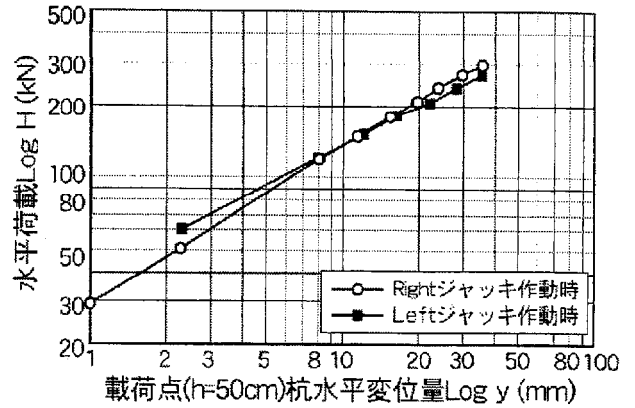


図-6 水平載荷試験の $\text{Log}H$ ~ $\text{Log}y$ の関係

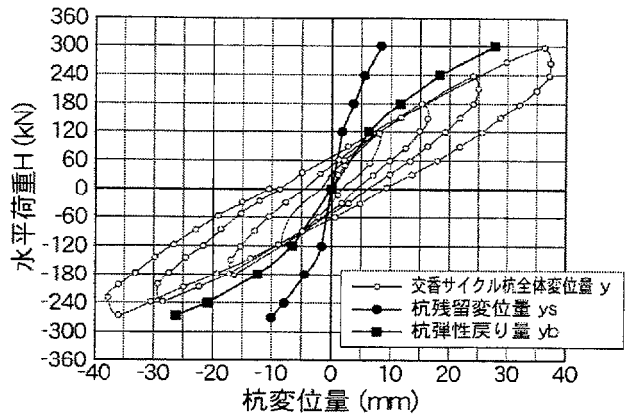


図-7 水平荷重 H ~ 杭地表面水平変位量 y 、杭残留変位量 y_s 、杭弾性戻り量 y_b 曲線

図-6、図-7に示す。

交番水平載荷方式のため、Rightジャッキ作動時とLeftジャッキ作動時の2種の水平荷重 H ~ 杭地表面変位量 y のデータが得られる。図-6に示す杭水平変位量 y は載荷点位置(高さ $h=50\text{cm}$)の処女水平荷重時の値であるが、 $\text{Log}H$ ~ $\text{Log}y$ は直線的な関係を示しており最大水平荷重に至っても地盤の降伏(極限水平抵抗)には至っていないと判断された。Rightジャッキ作動時とLeftジャッキ作動時交番載荷の $\text{Log}H$ ~ $\text{Log}y$ の関係はほぼ合致しており、現場試験の再現性に問題はないと考える。その結果、Rightジャッキ作動時の最大水平荷重 $H_R=299.1\text{kN}$ に対し杭地表面水平変位量 $y_R=36.32\text{mm}$ 、Leftジャッキ作動時の最大水平荷重 $H_L=269.0\text{kN}$ に対し $y_L=35.90\text{mm}$ となった。また、各水平荷重時の杭頭傾斜角 θ を定置型傾斜計(KB-10E)で計測したが、杭地表面水平変位量と同様に水平荷重に対し比例的な増加関係を示した。

図-7に交番水平載荷によって得られたサイクル毎の杭地表面水平変位量 y の関係を示した。この特性曲線から荷重に対する杭復元力が確認された。特性曲線では、面積比を検討することで杭の耐震性を検証するための履歴減衰定数などが得られる。また、残留変位量 y_s については、水平荷重が大きくなるに従い増加の傾向を示すが最大値で $y_s=8\sim 10\text{mm}$ 程度である。

$\text{Log}H$ ~ $\text{Log}y$ が直線的な関係であることや杭弾性戻り

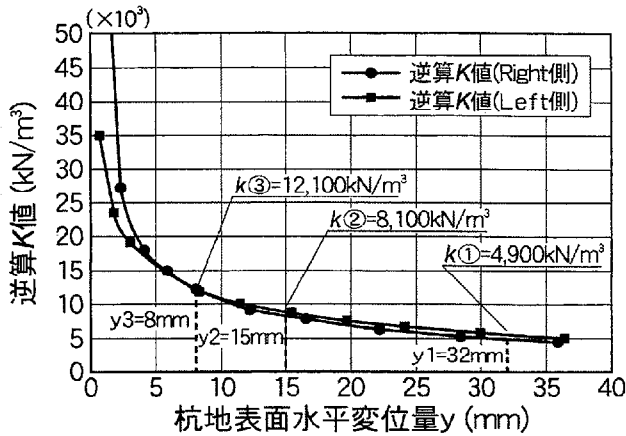


図-8 杭変位量 y ~ 逆算 k 値の関係

表-2 弾性地盤反力法で算定した逆算 k 値

$K①(kN/m^3)$ ($y=32mm$ 変位時)	$K②(kN/m^3)$ ($y=15mm$ 変位時)	$K③(kN/m^3)$ ($y=8mm$ 変位時)
4900	8100	12100

量 y_b が残留変位量 y_s を上回る結果から、杭は弾性挙動内にあると判断される。杭水平載荷試験では本杭を用いているため、杭径 4% の $y=36mm$ 程度までの水平載荷としているが、その後の水平荷重増加に伴い水平地盤反力は徐々に弾塑性領域に移行していくものと想定される。

5. 試験検証

杭許容水平変位量を緩和した設計法の妥当性を検証するため、設計地盤反力に対する杭水平載荷試験で得られた実地盤反力を照査した。杭水平載荷試験の解析は、杭挙動を弾性内とする弾性地盤反力法および現設計法に則った複合地盤反力法により実施した。

5-1. 弾性地盤反力法

原位置における水平地盤反力特性を確認するため、(1)式で示す弾性地盤反力法により、水平載荷試験で得られた水平荷重 H ~ 杭地表面水平変位量 y の関係から水平地盤反力係数 K 値 (逆算 K 値) を算定した。

$$y = H / (2EI \beta^3) \quad (1)$$

ここに、特性値 $\beta = \sqrt[4]{(KD/4EI)}$ 、 y : 杭地表面水平変位量 (mm)、 H : 水平荷重 (N)、 D : 杭径 (mm)、 E : 杭ヤング係数 (N/mm²)、 I : 杭断面二次モーメント (mm⁴) である。

各水平変位レベルに対する逆算 K 値の関係を図-8に示す。その結果、①本設計での緩和許容水平変位量杭径 4% (=32mm)、②従来設計の許容水平変位量 (15mm)、③基準変位量杭径 1% (8mm) に相当する水平地盤反力係数 K 値は、それぞれ $K①=4900kN/m^3$ ・ $K②=8100kN/m^3$ ・ $K③=12100kN/m^3$ と算出される (表-2)。これらは、変位レベルに応じ概ね地盤反力 $P=K \cdot y^{1/2}$ の関係にある。

原位置の孔内水平載荷試験により確認された実地盤変

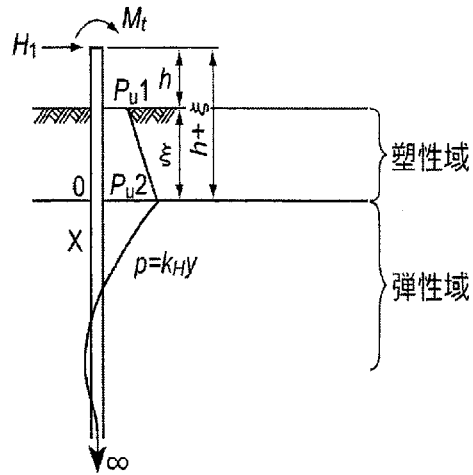


図-9 複合地盤反力法モデル

形係数 Eo より、道示に示された(2)式から地盤変形を弾性領域内として扱った場合の設計水平地盤反力係数 Kh を算定する。

$$Kh = Kho(BH/0.3)^{-3/4} \quad (2)$$

ここに、基準水平地盤反力係数 $Kho = \alpha Eo / 0.3$ 、換算載荷幅 $BH = \sqrt{(D/\beta)}$ 、 Eo : 地盤変形係数 (kN/m²)、 α : 推定係数である。当該の現場地盤において、杭の水平抵抗の関与範囲とされる $1/\beta$ 区間 (深さ 6.18m) の粘性土層の孔内水平載荷試験の平均変形係数は $Eo=699kN/m^2$ である。

その結果、(2)式より水平地盤反力係数 $Kh=2070kN/m^3$ が算定される。この値に対する水平載荷試験から算定された $K①$ ・ $K②$ ・ $K③$ は、2.4~5.8 倍の値を有している。道示によれば(2)式より算出される水平地盤反力係数 Kh は弾性領域内の基準変位量に相当するものであることから、微小変形内の試験値 $K③=12100kN/m^3$ と対比 (5.8 倍 = 試験値 $K③=12100kN/m^3$ / 設計値 $Kh=2070kN/m^3$) することになる。その結果、弾性地盤反力法として設計を照査した場合、現場杭水平載荷試験の実施により、静的レベルにおいて杭水平支持機構上有利となる地盤反力特性が検証されたものとする。

5-2. 複合地盤反力法

当該の橋脚鋼管杭は、杭変位量の緩和条件に従い非線形性を考慮した複合地盤反力法により設計されている。複合地盤反力法の基本モデル図を図-9に示す。複合地盤反力法の設計法は、杭頭荷重・変位レベルに応じ地盤反力 P が極限抵抗土圧強度 $Pu1-2$ に達した後上層地盤に塑性域を設定しそれ以深は弾性域として境界条件を定める手法である。P-2 橋脚の現設計における地盤種別の地盤反力上限値は表-1に示す。

境界以下の弾性域の水平地盤反力係数 Kh を一定して扱う完全弾塑性法では、地盤を深さ・までの塑性域とそれ以深の弾性域に分割し、杭頭外力 Ht 、 Mt に対する釣り合いは以下の式(3),(4)で表される。

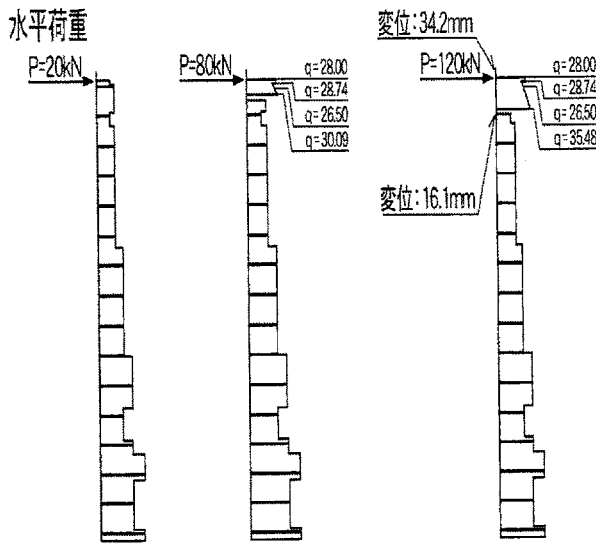


図-10 各水平載荷重レベルの水平地盤反力

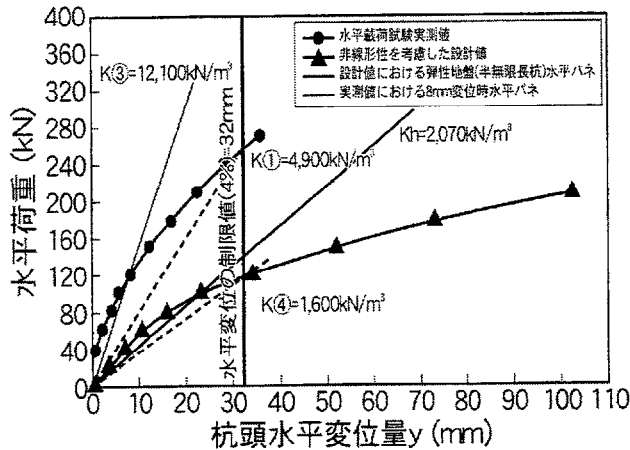


図-11 非線形性を考慮した水平地盤反力係数

$$Ht=Q(h+\xi)=-D(Pu1+Pu2)\xi/2 \quad (3)$$

$$Mt=R(h+\xi)=-D(2Pu1+Pu2)\xi^2/6 \quad (4)$$

この際、塑性反力と弾性反力が等しくなる深さ、の境界面は、(5),(6)式の杭水平変位量 y_0 および地盤反力 P_0 が満足するよう、を逐次変化させて設定される。

$$y_0=1+\beta ho[Ht+Q(h+\xi)]/(2EI\beta^3) \quad (5)$$

$$P_0=Kh \cdot y_0=2\beta(1+ho)[Ht+Q(h+\xi)]D \quad (6)$$

ここに、 $ho=[Ht(h+\xi)+Mt+R(h+\xi)]/[Ht+Q(h+\xi)]$ 、 Q :せん断力(kN)、 R :モーメント(kN-m)である。

上記手法は複合地盤反力法の基本的な考え方であるが、当該の原地盤は多層系であることから、現設計に対し水平載荷試験の各水平荷重を想定した場合には水平地盤反力分布は図-10に示す形状となる。概ね水平荷重 $H=80\text{kN}$ を境界に塑性域が発生し、その後の水平荷重の増加に伴い塑性化領域が徐々に下層に及ぶ傾向を示す。

非線形性を考慮して設計した水平荷重 H に対する杭頭水平変位量 y の関係を、水平載荷試験値(Right ジャッキ側)と合わせて図-11に示した。非線形の荷重・変位曲線は、複合地盤反力法に則り荷重レベルに応じた塑性域深さを考慮して算定したものである。図中には、線形弾性解析として試算した割線も示したが、杭地表面水平変位量 $y=15\text{mm}$ 以上で当該地盤の非線形性が表れていることが分かる。このため、前項の弾性解析で設計値と対比して $K(3)=12100\text{kN/m}^3$ は線形内として扱える水平地盤反力と考えることができる。非線形域における設計地盤反力と水平載荷試験から得られた実測地盤反力の対比は、現設計の変位法計算で算定された実際の設計杭水平変位量 ($y_{\max}=28.7\text{mm}$) を考慮すれば、杭径 4% の許容水平変位量 32mm に対しておこなうのが妥当と考える。その結果、非線形設計における $y=32\text{mm}$ 相当の等価パネとして扱った設計水平地盤反力係数 $K(4)=1600\text{kN/m}^3$ と算定される。これに対し水平載荷試験の実測 $K(1)=4900\text{kN/m}^3$ であり、実測値は設計値の約 3 倍程度の地盤抵抗を有したことになる(表-3)。これは、当初設定された設計地盤反力がさほど大きくないことも考慮すれば、線形域と同様に非線形域においても過大でない範囲の水平地盤反力特性と考えられる。また、3 倍の地盤抵抗を有する実測 K 値を用いた耐震性を照査した結果、レベル 2 地震動作用時には軟弱地盤の上層は塑性領域(受働土圧)となるため、現設計に対し照査結果に大きな差異がない結果となった。その結果、杭水平載荷試験の実施により、当該現場における水平変位制限を緩和した橋脚鋼管杭の設計法の妥当性が概ね検証されたものと判断する。

表-3 弾性地盤反力法と複合地盤反力法で算定した逆算 k 値の比較

$K(1)(\text{kN/m}^3)$ ($y=32\text{mm}$ 変位時)	$K(4)(\text{kN/m}^3)$ ($y=32\text{mm}$ 変位時)
4900	1600

6. 2次元弾塑性FEM解析

水平変位制限を緩和した杭の地盤反力特性を、当該地盤の性状を考慮して解析法や土の構成モデルによる違いを検証する目的から、水平載荷試験の実測値に対して 2次元弾塑性FEM解析による検討を実施した。検討には解析コード PLAXIS を用い、地盤の構成則にはモール・クーロンの降伏基準をもち、弾性域での挙動は双曲線、拘束圧の増加に伴う剛性の増加も表現できるハードニングソイルモデル⁹⁾を用いた。その際、地盤は平面ひずみ・杭は弾性梁要素として扱った。ここでいう弾性域とは、許容水平変位量の考え方で整理したように、杭に過度な残留変位が生じない変形範囲であり、その際地盤のひずみは小さく水平地盤反力は弾性と扱える領域を示す。

検討は、以下のように行なった。

1) ハードニングソイルモデルのパラメータを決めるために、一軸圧縮試験結果を逆解析的にシミュレートする。

表-4 一軸圧縮試験から設定された地盤パラメータ

地盤構成 ¹⁾	層厚 (m)	N 値 (回)	γt (kN/m ³)	c (kN/m ²)	ϕ (°)	E_{50} (kN/m ²)	ν ²⁾
Ap1	1.0	0.6	12	30	0	600	0.4
Ap2	2.0	1	13.6	35	0	900	0.4
Ac2	1.0	1	14	35	0	900	0.4
Ac3	10.5	0.3	16.9	40	0	1900	0.4
As3	7.5	8	19.2	1 ³⁾	25	22400	0.3
Dc1	1.5	6.4	18	200	0	17920	0.4
Ds1	4.5	30	19	1 ³⁾	30	84000	0.3

- 1) 地盤構成の記号は図-3参照
- 2) 粘性土系で $\nu=0.4$ 、砂質土系で $\nu=0.3$ とした。
- 3) 低拘束圧域での計算安定のため、微小の粘着力を設定

表-5 各種試験から設定した変形係数

地層	一軸圧縮試験	孔内水平載荷試験	N値換算 ¹⁾	PS 検層
Ap1	600	450	1260	4286
Ap2	900	632	1792	4857
Ac2	900	632	1792	4857
Ac3	1900	651	573	24143
As3	22400 ¹⁾	22400 ¹⁾	22400	117551
Dc1	17920 ¹⁾	17920 ¹⁾	17920	110204
Ds1	84000 ¹⁾	84000 ¹⁾	84000	116327

単位 (kN/m²) 1) $E=2800N(kN/m^2)$ により換算

2) 杭の水平載荷試験結果は、上記の一軸圧縮試験から決定したケースに加え、変形係数のみを、孔内水平載荷試験、N 値からの換算式、PS 検層の3種類に変化させた合計4ケースについて行い、変形係数の影響について検討する。

6-1 地盤パラメータの設定

地盤構成は、地表面より7層にモデル化した。Ap1層、Ap2層、Ac3層の地盤パラメータは、物理試験および一軸圧縮試験結果の応力~ひずみ関係をシミュレートして求め、一軸圧縮試験データの無いAc2層はAp2層と同等の力学特性と考えAp2層と同一の地盤パラメータを用いた。As3層、Dc1層およびDs1層については、強度定数は設計値を用い、変形係数はN 値からの換算($E=2800N(kN/m^2)$)で与えた。設定された主な地盤パラメータを表-4に示す。

ハードニングソイルモデルは、弾性域に双曲線型の応力~ひずみ関係を規定しているため、入力パラメータとして E_{50} と強度定数を規定すると処女載荷時の応力~ひずみ関係が決定される。さらに、変形係数のみを孔内水平載荷試験、N 値からの換算式、PS 検層の3種類で求めた値に変化させたケースを加え、合計4ケースについて杭の載荷試験のシミュレーションを行った。表-5にそれぞれのケースで設定した変形係数を示す。

6-2. 試験シミュレーション

杭水平載荷試験の解析に用いた有限要素分割図を、図-12に示す。深度25mに堆積するDs1層はそれより上

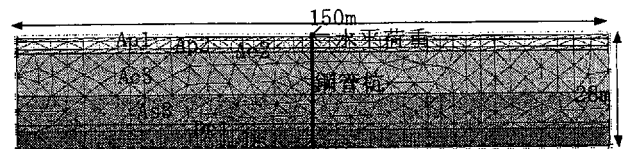


図-12 弾塑性有限要素分割図
(総要素数 958、総節点数 2029)

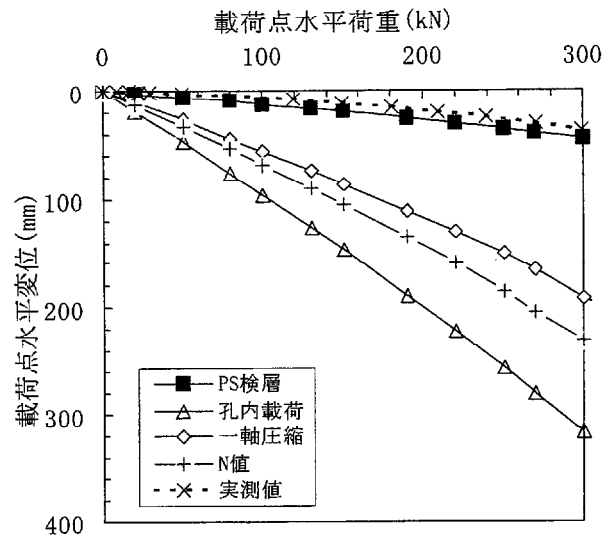


図-13 解析結果と載荷試験結果の比較

部の地層と比較して十分堅固と考え、杭をDs1層下端の深度約28mまでの長さに簡略化して、水平載荷試験で用いた鋼管杭の断面剛性 E_A, E_I を合わせた弾性梁要素でモデル化した。総要素数は958、総節点数は2029であり、境界条件として側面は水平方向、底面は鉛直方向を拘束している。杭水平載荷試験をシミュレートするため杭頭に $H=0\sim 300kN$ の水平荷重を段階的に加えた。

各ケースの荷重~変位関係と杭の載荷試験結果との比較を図-13に示す。今回のケースではPS 検層から設定した変形係数で水平載荷試験結果と比較的良好な精度で合致しており、他の一軸圧縮試験・孔内水平載荷試験・N 値による変形係数のケースでは杭水平変位量は過大値を示した。これは、今回扱ったひずみレベルは弾性内の必ずしも大きなものではなく、同時にPS 検層では比較的地盤の乱れが少ない状態で変形係数が得られたためと推測される。本橋梁の杭設計では静的解析として一般的な孔内水平載荷試験の変形係数を用いて地盤反力を設定しているが、この結果は、弾性地盤反力法での水平地盤反力係数の実測値と設計値と対比結果($K\textcircled{3}/K\textcircled{1}$)と同様に、当該の泥炭性軟弱地盤では設計地盤反力は比較的安全側に設定されたものと考えられる。また、解析の結果、水平載荷試験の杭実水平変位量は通常より大きな最大値 $y_{max} \approx 36.0mm$ であるが、杭変形は塑性域に達しておらず、先に示した考察からも残留変位量の考察からもあくまでも弾性範囲内にあることが明らかとなった。これは、道示に示された許容水平変位量を緩和した杭の弾性挙動内の運用条件を満たす結果である。

今後、現場杭水平載荷試験やFEM解析データを蓄積

すると同時に設計用地盤定数を求めるためのより合理的な調査・試験方法も検討し、本設計法をより合理的な手法として補充していく必要があると考える。

7. 結論

本報における水平変位制限を緩和した橋脚鋼管杭設計法に対する現場杭水平載荷試験成果の実証的検証から、以下の知見が得られた。

- ①水平変位制限を緩和した杭設計法により、下部工諸元を縮小化できることから大きな建設コスト縮減が可能となる。本設計法の採用は、既往の研究成果より、橋脚の鋼管杭基礎に限り支持力・杭応力に余裕がある条件で許容水平変位量を杭径 4%まで緩和するよう規定される。
- ②杭水平載荷試験の実測杭地表面水平変位量 y は、杭径 4%(32mm)相当時で杭残留変位量 y_s は最大値で $y_s=8\sim 10\text{mm}$ 程度と小さく、当該の杭基礎の変形特性は水平変位制限を緩和した杭設計法の運用条件を満たす弾性挙動内にあると考えられる。
- ③当該現場の杭水平載荷試験結果に対する弾性解析から、基準水平変位量(杭径 1%相当=8mm)の杭微小変形内において、杭水平支持機構上有利と考えられる比較的大きな水平地盤反力(試験値 12100kN/m^3 /設計値 $2070\text{kN/m}^3=5.8$ 倍)が検証された。
- ④現設計法である弾塑性解析から、非線形域の許容水平変位量(杭径 4%=32mm)において、静的な水平地盤反力は実測値(試験水平地盤反力係数 4900kN/m^3)が設計値(設計水平地盤反力係数 1600kN/m^3)に対し、杭水平抵抗として有利に作用する過大でない範囲の約 3 倍程度の水平地盤反力特性を示した。この実測水平地盤反力を用いたレベル 2 地震動照査では杭基礎耐震上問題ない結果となった。
- ⑤弾性域での非線形性、変形係数の拘束圧依存性などを考慮できるモデルを用いた 2 次元弾塑性 FEM 解析による水平載荷試験のシミュレートでは、地盤の乱れが比較的少なく、微小ひずみ領域の変形特性を示すと考えられる PS 検層による変形係数を用いた水平荷重と変位量の関係が、比較的良好な精度で実測値に合致した。

また、解析の結果、水平載荷試験の杭実変位量は弾性挙動内の変形であることが明らかとなった。

本現場における杭水平載荷試験成果に対する弾性解析・弾塑性解析・2 次元弾塑性 FEM 解析を適用した地盤反力特性の考察より、実地盤反力は設計値を確保しており当該現場における水平変位制限を緩和した杭基礎設計法の妥当性が検証された。今後、本設計法が現場条件に応じ活用されていくものと考えられる。

8. おわりに

基礎構造物設計法は性能規定基準の実施に伴い、今後新工法・新技術が広く活用されていくものと考えられるが、それらの現場採用に当たっては一定の実検証をおこなうことも必要である。本報では新技術として杭水平変位制限を緩和した設計法を採用した現場検証事例を紹介したが、今後も現場条件を考慮した的確な設計・施工法を実施していくことが重要と考える。また、本報で検証した水平地盤反力の非線形は、地震時保有水平耐力法で用いるバネ特性も考慮したが主に静的レベルの考察であり、今後基礎杭の耐震性を考慮した非線形の動的水平地盤反力特性についても検証していく考えである。

参考文献

- 1). 日本道路協会(2002): 道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編
- 2). 岡原美智夫・高木章次・中谷昌一・田口敬二・坂本昭夫(1989): 載荷試験データによる杭の水平抵抗特性に関する調査 土木研究所資料, 第 2721 号
- 3). 日本道路協会(2002): 杭基礎設計便覧 pp.173~177
- 4). 北海道開発局建設部道路建設課 監修(社)北海道開発技術センター(2002): 道路橋設計施工要領 F.平成 14 年度の道路橋示方書・同解説に関する質問・回答集 付一67
- 5). 西谷雅弘・瀧田昌毅(2002): 水平変位の制限を緩和した杭基礎の設計例 総合土木研究所基礎工 pp.55~57
- 6). 日本道路協会(2002): 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編
- 7). 中野正則・木村嘉富・石田雅博・大越盛幸(1997): 道路橋の杭基礎の耐震設計 土木技術資料 39-2 pp56-61
- 8). 地盤工学会(1984): 杭の水平載荷試験方法・同解説
- 9). Material model manual: Plaxis version 8, Delft, 2002

For effective use of construction costs with regards to performance requirements, a provision of pile foundation design methods that relaxes restrictions on horizontal displacement under certain conditions was added to the Specification for Highway Bridges IV – substructure, which was revised in March 2002. This paper summarizes basic principles of permissible horizontal displacement of piles based on the above provision, and presents the results of verification (using an on-site horizontal pile loading test) of a steel-pipe pile design method for bridge piers, which was applied at an actual site as a new technology with permissible horizontal displacement of piles relaxed to 4% of the pile diameter. At that time, elastic and elasto-plastic analyses of the ground and simulation of the results of loading tests by two-dimensional elasto-plastic FEM were conducted to study the characteristics of horizontal ground reaction force of actual piles, including the validity of the design method, while taking nonlinearity of ground into account.