

許容水平変位量を緩和した杭基礎の設計法

富澤 幸一* 阿部 剛**

1. はじめに

道路橋示方書 下部構造編¹⁾(以下 道示)では、従来、常時・暴風時およびレベル1地震時の杭基礎の許容水平変位量について、「下部構造から決まる許容水平変位量は杭径の1%とするが、1.5m以下の杭についてはこれまでの実績を考慮し15mmとする」とされている。しかし、軟弱地盤における杭基礎では、杭体応力度や鉛直支持力に余裕があっても、レベル1地震時の許容水平変位量によって杭基礎の規模が決定する場合が多い。そのため、平成14年3月に改訂された道示において、「許容水平変位量は弾性解析により求めることを前提としており、また、地盤の硬軟・杭種にかかわらず許容水平変位量を一定としているため、条件によっては許容水平変位量以下とすることによって杭体応力度および鉛直支持力に著しく余裕が生じる場合がある。このような場合には、橋脚基礎に限り水平変位量の制限を緩和する杭基礎の規定により照査するのがよい」との記述が追加された。

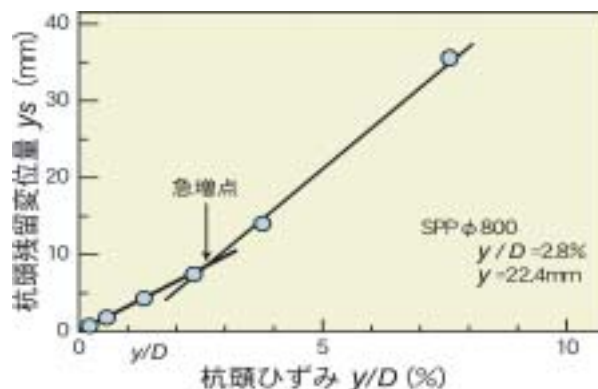
現場条件・杭種別に応じて水平変位量を緩和する杭の設計法は、軟弱地盤では建設コスト縮減につながる有用な手法となる。橋脚鋼管杭で許容変位量を杭径4%まで緩和する設計手法および運用条件については既に公開²⁾し、北海道開発局設計要領³⁾に反映した。

本資料では、その後のPHC杭およびSC杭に関する各機関の研究成果を追記し、今後北海道開発局で運用すべき、水平変位量を緩和した杭基礎の設計法を示す。また、設計要領に基づき平成15年度に北海道開発局で初めて採用した橋脚鋼管杭で許容水平変位量を緩和した設計事例を紹介し、杭水平載荷試験によるその実検証結果を報告する。

2. 杭の許容水平変位量

杭基礎設計における許容水平変位量は、弾性体基礎を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、杭の許容水平変位量は、常時・暴風時およびレベル1地震時において、過度の変形とならない弾性地盤反力の適用範囲内に設定される。

その結果、従来の道示では、許容水平変位量は地盤・

図 - 1 杭頭残留変位 y_s の急増点

杭種により差異はあるものの統一した安全側の指標として、杭基礎の許容変位量を杭径の1% (15mm)一定としている。また、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変位量（基準変位量）は、弾性限界を示すと考えられる許容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変位量を一定とすることは一見合理的ではあるが、軟弱地盤中に設置される杭基礎の設計では、許容水平変位量のみを満足させた場合杭体応力が著しく小さくなり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っては上部工構造の機能と安全性を確保させ、水平変位量の許容値を杭種別に規定する手法が有効となる。

一般的な杭の水平載荷試験の実施結果では、各載荷サイクルの除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、ある変位レベル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⁴⁾(図-1)。そのため、こ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の降伏変位量および残留変位量の関係については、地盤の硬軟・杭種別に、多数の杭水平載荷試験結果に基づき研究されてきている⁵⁾。その中で、比較的軟弱な地盤（表層地盤の平均N値が10以下）で実施された鋼管杭・PHC

表 - 1 S_y/D の統計処理結果

杭 種	鋼 管 杭		PHC杭	SC杭
	A 法	B 法		
試料数	52		19	16
平均値(%)	6.50	7.40	4.2	4.87
標準偏差(%)	3.61	4.57	1.45	1.07
変動係数(%)	55.5	61.7	34.5	22
非超過確率15.9%	3.47	3.45	2.83	3.84
非超過確率30.0%	4.40	4.56	3.33	4.25

杭（プレテンション方式遠心力高強度プレストレストコンクリート杭）・SC杭（外殻鋼管付きコンクリート杭）の水平載荷試験における降伏変位量 S_y の関係を示す。表層軟弱地盤の杭水平載荷試験の統計処理により整理されている結果を表 - 1 に示した⁶⁾。

2.1 鋼管杭

水平載荷試験の既往の研究成果⁵⁾から、杭の降伏変位量 S_y / 杭径 D が対数正規分布するものとして、表層が軟弱地盤で実施された鋼管杭の水平載荷試験の統計処理された結果⁷⁾を図 - 2 に示す。試料数は52試料である。この際、A法は降伏変位量を水平荷重～杭変位量関係の変曲点で判定したもの、B法はワイフル曲線で推定したものである。

その結果、杭水平変位の制限値として降伏変位量 S_y の非超過確率を15.9～30%（平均値より0.5 σ - 1.0 σ 相当の安全性）に設定した場合、A法・B法ともに杭径の3.5～4.5%となった。この成果より、鋼管杭の許容水平変位量の制限値を4%程度まで緩和してもよいと考えられる。この成果については、既に北海道開発局において要領³⁾に記載した。

2.2 PHC杭

同様に、PHC杭19試料の水平載荷試験結果に対して杭の降伏変位量 S_y が統計処理された成果⁸⁾を図 - 3 に示す。その結果、非超過確率を15.9～30%に設定した場合、降伏変位量 S_y / 杭径 D は2.83～3.33%となり、PHC杭の許容水平変位量の制限値を3%程度まで緩和してもよいと成果が得られた。

2.3 SC杭

SC杭16試料の水平載荷試験結果に対しても同様の統計処理が行われており、その結果を図 - 4 に示す⁸⁾。その結果、非超過確率を15.9～30%の降伏変位量 S_y / 杭径 D は3.84～4.25%となり、鋼管杭と同様に、SC杭においても許容水平変位量の制限値を4%程度まで緩和してもよいと考えられる。

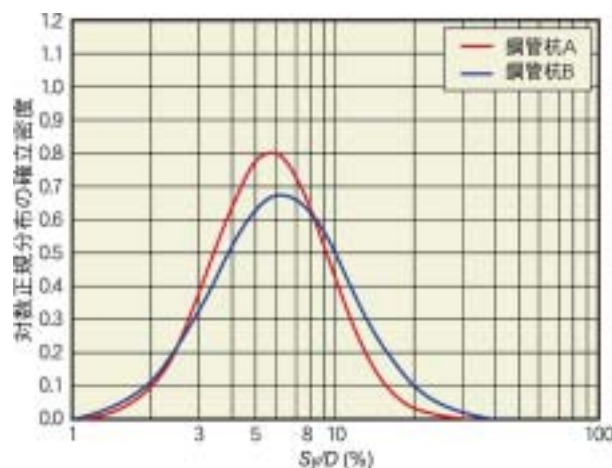


図 - 2 鋼管杭の S_y/D 確立密度分布

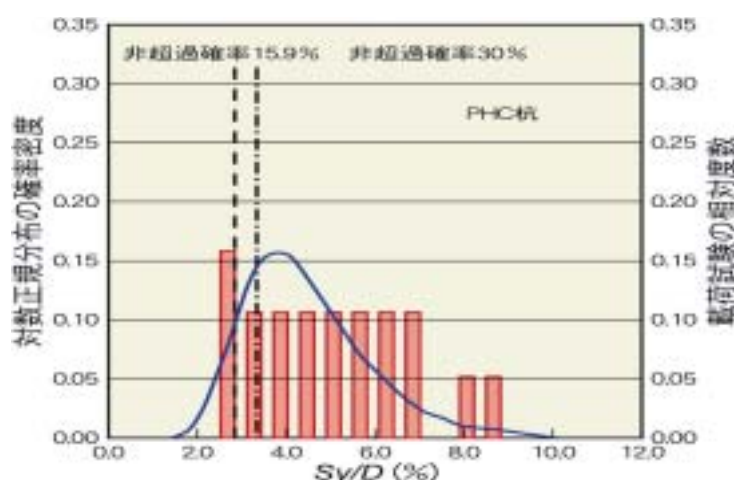


図 - 3 PHC杭の S_y/D 確立密度分布

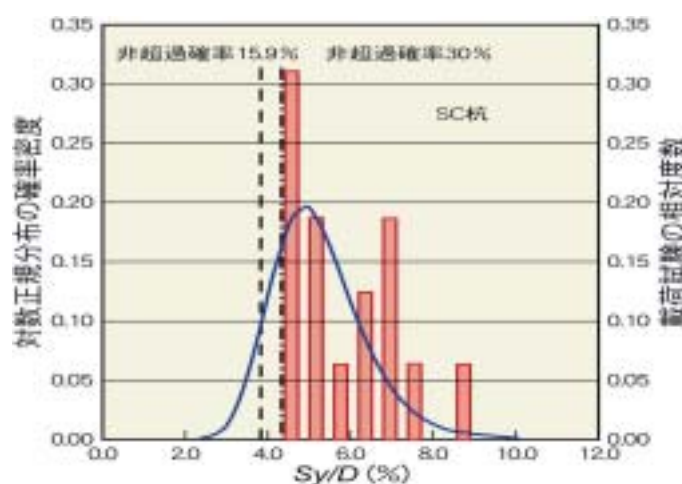


図 - 4 SC杭の S_y/D 確立密度分布

3. 杭許容水平変位量を緩和する設計条件

前記の既往研究成果より、以下の条件に当てはまる場合は、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の制限値つまり許容水平変位量を、橋脚設計において、鋼管杭で杭径の4%（北海道開発局設

計要領³⁾)・P H C 杭で 3 %・S C 杭で 4 %まで緩和することが可能と考える。

今後の合理的な基礎設計法として、杭許容水平変位量を緩和する設計条件は以下のように規定される。

以下、北海道開発局における標準手法とする。

杭許容水平変位量の緩和する設計条件

- ・ 比較的軟弱な地盤（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）
- ・ 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・P H C 杭・S C 杭
- ・ 許容水平変位量の緩和は、鋼管杭で杭径の 4 %・P H C 杭で 3 %・S C 杭で 4 %とする。

なお、この設計規定の留意事項の説明は以下の通りである。

1) 許容水平変位量を緩和する理由

許容水平変位量を小さく抑えた場合、鉛直支持力および杭体応力度に余裕があるにもかかわらず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ことが考えられる。そのため、既往の研究成果である水平載荷試験の統計処理結果より、設計時の許容水平変位量を鋼管杭で杭径の 4 %・P H C 杭で 3 %・S C 杭で 4 %まで緩和する。

今後の研究成果に応じ、他の杭種についても許容水平変位量の見直しも考えられる。

2) 橋脚設計で運用する理由

道示によれば、水平変位の制限を緩和する条件は、地盤抵抗の非線形性を考慮して解析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、橋脚を主体した地震時保有水平耐力照査法⁹⁾に基づき決定されるためである。また、常に盛土荷重が作用している橋台では変位を緩和した場合、地震時挙動が卓越する懸念がある。そのため、橋脚設計での運用とし、杭の断面力、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非線形性の地盤バネモデルとし実施する¹⁾。

3) 設計水平地盤反力係数K値の設定

設計上、杭変位の変動に応じ地盤反力は変化する。つまり、杭（許容）変位量は大きくなるに従い地盤水平反力係数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範囲を条件に設定されたものである。そのため、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地盤反力係数K値を、許容水平変位量を緩和した杭設計そのまま運用しても実用上問題ないものと判断する。

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られる。ただし、本設計法の採用する際は、当面、現場において杭水平載荷試験を実施し、設計水平荷重に対する杭の実変位量・残留変位・地盤反力を検証することが望ましい。

4. 杭許容水平変位量を緩和した鋼管杭の設計事例

平成15年度に北海道開発局で採用した橋脚鋼管杭の水平許容変位量を 4 %まで緩和した設計事例を紹介する。杭水平変位の制限を緩和する設計法を新たに採用した橋梁は、道央圏連絡道路 篠津運河橋である。本設計法の採用により、従来設計法に対して 6 基の橋脚で各 1 列杭を減らすことができたため、下部工底板形状の縮小効果と併せて全体施工費における 15 %程度の建設コスト縮減が可能となった。

4.1 現場概要

篠津運河橋は篠津運河・町道との交差箇所に架橋予定の橋長 $L = 249.6\text{m}$ の橋梁である。上部工形式は 7 径間連続合成鈹桁とし、従来橋の多主桁に対し 3 主桁の合理化橋とした。また、支承形式は従来方式の分散支承ではなく、橋脚 6 点固定方式としている。下部工基礎形式については、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 800 mm）を採用している。P-1 ~ P-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 % ($y = 32\text{mm} = 800\text{mm} \times 4\%$) まで緩和する設計法を採用した。

当該地盤は、地表面から深度 30 ~ 40m 付近まで軟弱な沖積の泥炭層・粘性土層および緩い砂質土層が厚く堆積しており、支持層はそれ以深の N 値 = 40 以上の D_s (砂質土層) が対象である。杭水平載荷試験を実施した P-2 橋脚位置のボーリング成果を杭諸元（杭径 800 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 - 5 に示す。P-2 橋脚位置の柱状は 28m 位置に砂層の中間層が存在するが 2 m 程度と薄く支持層には不適と判断した。また、当該の杭設計では、土質性状から液状化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) を考慮した設計をおこなった。

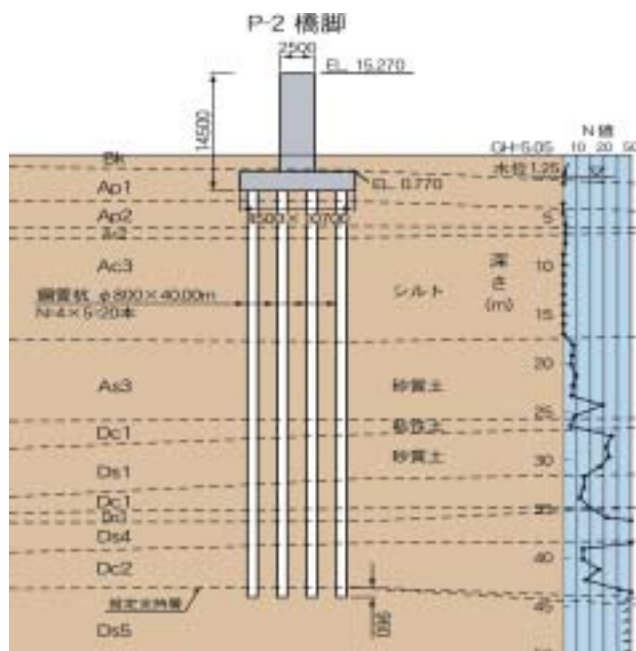


図 - 5 P-2 橋脚構造図・土質柱状

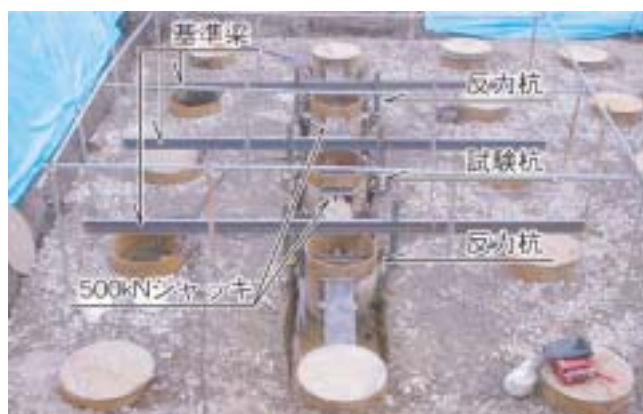


写真 - 1 現場杭水平載荷試験の実施状況

4.2 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」¹⁰⁾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} は杭変位量 y が杭径 4 % の $y = 32\text{mm}$ までとした。試験杭は、代表的位置の橋脚中央の杭とし隣接杭を反力とした。試験時に得られる水平荷重 H ～ 杭変位量 y 、傾斜角 θ 、残留変位量 y_s の関係から設計と対比した地盤反力特性が検証される。

4.3 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

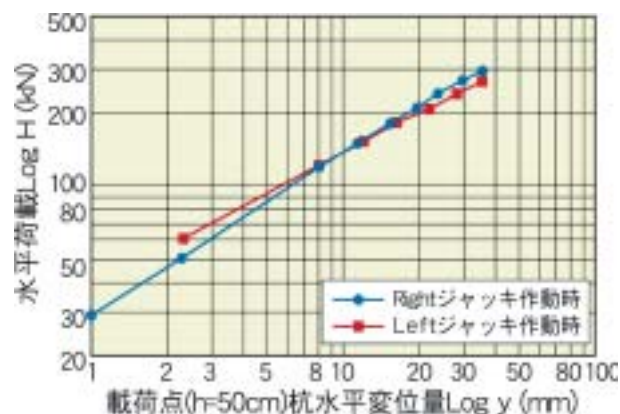


図 - 6 水平載荷試験の $\log H \sim \log y$ の関係

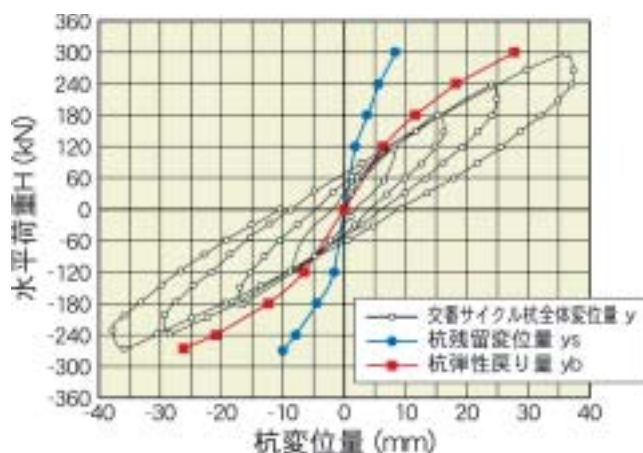


図 - 7 水平荷重 H ～ 杭地表面水平変位量 y 、杭残留変位量 y_s 、杭弾性戻り量 y_b 曲線

果得られた水平荷重 $\log H$ ～ 杭地表面水平変位量 $\log y$ および $H \sim y$ 、杭残留変位量 y_s 、杭弾性戻り量 y_b 曲線の関係を図 - 6、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、 $\log H \sim \log y$ 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 $\log H \sim \log y$ 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。

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。また、残

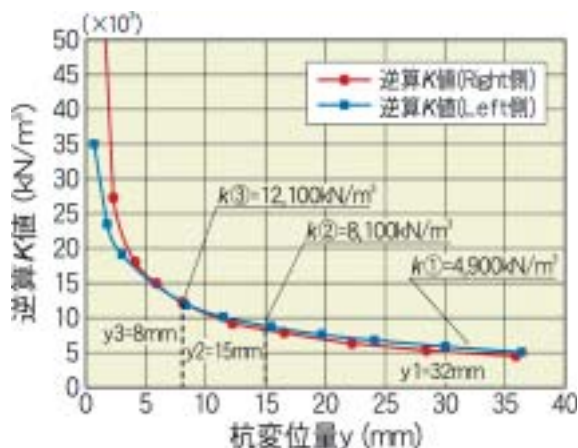


図 - 8 杭変位量 y ～ 逆算 k 値の関係

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 $y_s = 8 \sim 10\text{mm}$ 程度であり、杭は弾性挙動内にあると判断される。最大荷重時でも杭弾性戻り量 y_b は残留変位量 y_s を上回っているが、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。

4.4 弾性地盤反力法解析

水平地盤反力特性を確認するため、弾性地盤反力法¹⁾により、水平載荷試験で得られた水平荷重 H ～ 杭水平変位量 y の関係から水平地盤反力係数 K 値を算定した。各水平変位における逆算 K 値の関係を図 - 8 に示す。その結果、本設計での緩和許容変位量杭径 4 % (= 32mm)、従来設計の許容水平変位量 (15mm)、基準変位量杭径 1 % (8 mm) に相当する水平地盤反力係数 K 値は、それぞれ $K = 4900\text{kN/m}^3$ 、 $K = 8100\text{kN/m}^3$ 、 $K = 12100\text{kN/m}^3$ と算出された。

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)の粘性土層の平均変形係数は $E_o = 699\text{kN/m}^2$ であり、弾性地盤反力法として解析した際、設計水平地盤反力係数 $K_h = 2070\text{kN/m}^3$ 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 $K \sim K$ は、2.4 ～ 5.8 倍の値を有している。設計水平地盤反力係数 K_h 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 K と対比 (5.8 倍 = 試験値 $K = 12100\text{kN/m}^3$ / 計算値 $K_h = 2070\text{kN/m}^3$) することになる。その結果、弾性地盤反力法解析で照査した結果、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。

4.5 複合地盤反力法解析

当該の橋脚鋼管杭の設計は、杭水平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^{1)、4)}によ

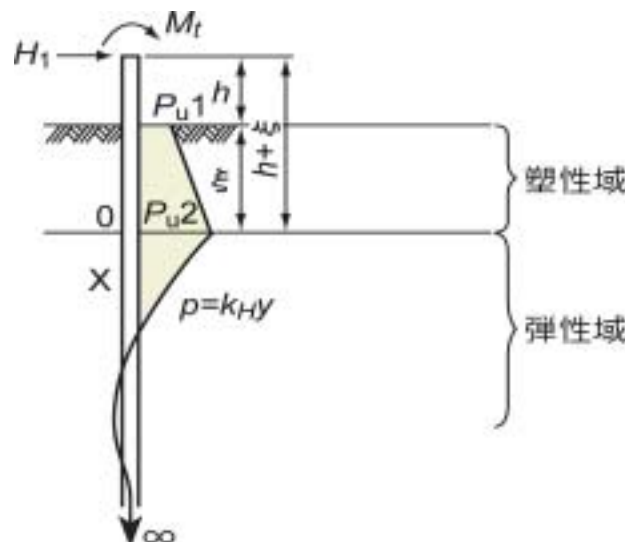


図 - 9 複合地盤反力法モデル

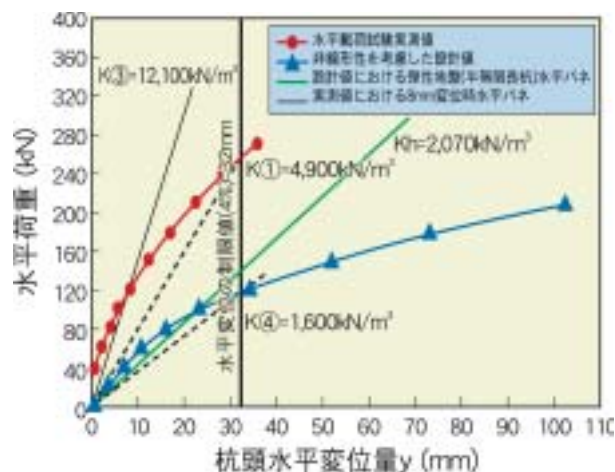


図 - 10 非線形性を考慮した水平地盤反力係数

り設計される。複合地盤反力法の基本モデルを図 - 9 に示す。複合地盤反力法は、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 P_u 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。

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 - 10 に示した。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、前項の弾性地盤反力解析で設計値と対比して $K = 12100\text{kN/m}^3$ 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。その結果、非線形設計における $y = 32\text{mm}$ 相当の等価バネとして扱った設計水平地盤反力係数 $K = 1600\text{kN/m}^3$ と算

定される。これに対し水平載荷試験の実測 $K = 4900 \text{ kN/m}^3$ 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。これは、原地盤が軟弱で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地震動で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。

一連の弾性地盤反力法および複合地盤反力法による杭水平載荷試験結果の解析より、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検証されたと判断する。

5. おわりに

基礎構造物の設計法は、国際化への対応により性能規定基準が導入された。性能規定基準は、基礎の設計施工法の多様化に伴うライフサイクルコストやコスト競争力の向上を求めている。許容水平変位量を緩和した杭設計法は、性能規定化に基づく建設コストの有効活用を目的としている。

本資料では、北海道開発局で今後運用すべき、杭許容水平変位量を緩和した設計法の考え方を示し、現場水平載荷試験による検証事例を報告した。今後、建設コストの有効活用のため、北海道においても本資料で設定した条件に従い本設計法を活用していく必要がある。また、その際に必要に応じて一定の現場試験検証を行うことも重要となる。

6. 参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 下部構造編，平成14年3月
- 2) 北海道開発土木研究所：水平変位の制限を緩和する鋼管杭の設計法 - 今後の合理的設計に向けて - 月報解説No.600 2004.5
- 3) 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：道路橋設計施工要領 平成14年3月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 - 67
- 4) 日本道路協会：杭基礎設計便覧 pp.173～177，平成4年10月
- 5) 岡原美智夫・高木章次・中谷昌一・田口敬二・坂本昭夫：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，1989.
- 6) (社)コンクリートパイル建設技術協会：杭基礎の許容水平変位の緩和について（PHC杭・SC杭） 平成16年3月
- 7) 西谷雅弘・瀧田昌毅：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 2002.5
- 8) 石田雅博・大岩健治郎：PHC杭およびSC杭を用いた杭基礎の水平変位の制限を緩和した設計例 総合土木研究所基礎工 pp.71～73 2004.6
- 9) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 耐震設計編，平成14年3月
- 10) 地盤工学会：杭の水平載荷試験方法・同解説1984



富澤 幸一*

北海道開発土木研究所
構造部
土質基礎研究室
主任研究員
技術士（建設）



阿部 剛**

国土交通省
北海道開発局
建設部
道路建設課
橋梁係長