

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－

土質基礎研究室

1. 水平変位を緩和する杭設計法の考え方

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 改訂道示）では、性能照査型基準が導入された。これは、国際化への対応を強く意識したものであり、設計法および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の向上を求めたものである。さらに、今後は基礎構造物設計においても、限界状態設計法が国際的な主流となると考えられる。

また、改訂道示の具体的ポイントの一つとして、特に杭基礎の許容変位量について、杭径1%（杭径1.5m以下では $y=15\text{mm}$ ）を一定とするという記述に加え、第12章12.8で「杭体応力または鉛直支持力に著しく余裕が生じる特殊条件の場合は、橋脚の杭基礎に限り(5)水平変位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」と追記されている。このことは、技術的根拠に従い導かれたものであり、改訂道示で示された性能規定化に基づく今後の建設コスト縮減に適ったものである。

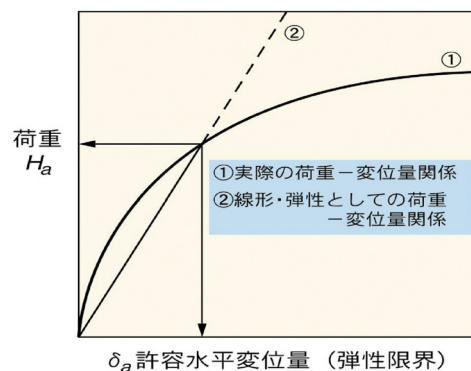
本報では、北海道開発局における今後の合理的な杭基礎設計の実用的運用に向け、「橋脚における鋼管杭の設計水平変位量を4%まで緩和する設計法」について、改訂道示の設計の考え方に基づき解説する。

2. 許容変位量

杭基礎設計における許容変位量は、上部工から決まる許容変位量と下部工から決まる許容変位量に分類される。

この内、上部工から決まる許容変位量とは、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、一義的に決定されるものではなく上部工形式や規模により変化する。

一方、下部工から決まる許容変位量は、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ている。つまり、杭基礎の許容変位量は、常時、暴風時およびレ



図一 杭水平挙動の取り扱い

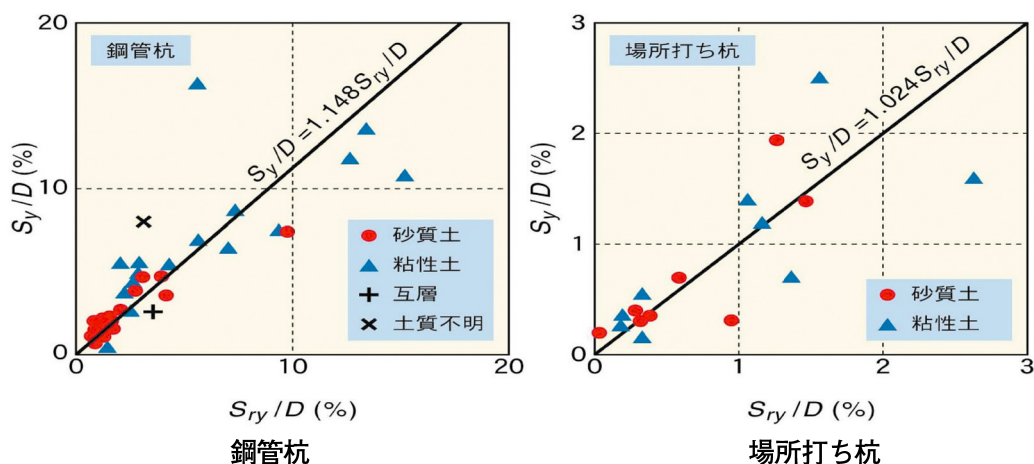
ベル1地震時において、過度の変形とならない弾性地盤バネの適用範囲内に設定する必要がある。

杭の水平挙動は、地盤が完全な弾性体でないため、荷重の増加とともに地盤の塑性化領域が徐々に広がり、非線形性を示す。従って、厳密には設計荷重を制限しなければ、地盤を弾性体として扱えないことにある。しかし、これは基礎の安定を確保するという観点からは必ずしも現実的ではない。そのため、許容応力度法で想定する荷重に対し変わらない地盤抵抗の発現を期待する意味で、許容変位量で規定するすなわち残留変位をできるだけ小さく押さえることのできる範囲で杭設計を行うのが合理的と考えられる。つまり、道路橋の杭基礎設計では、この範囲内で地盤バネを算定し、杭水平挙動を見かけ上線形処理して実用上支障ないという立場で基礎の安定照査を行う（図一）。

ただし、一般に基礎の設計は、許容支持力、許容応力度、許容変位量を満足するように行われるが、杭の場合本体の剛性が小さいことから、特に許容変位量により杭諸元が決定するケースが多いため、許容変位量は慎重に設定する必要がある。

3. 設計許容変位量の決定

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 S_r と、除荷前の杭径 D に対する杭頭変位量 S の比率（杭頭ひずみ



図ー２ ワイブル分布曲線式と残留変位急増点から得られる降伏ひずみの比較

S/D の関係は、ある変位レベルを境界に杭頭残留変位量 S_r が急激に増加する傾向を示す。そのため、この残留変位急増点より杭頭の変位量を小さく、すなわち許容変位量を抑えれば、基礎の過大な残留変位を防止することが可能となると考えられる。

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、杭種別に整理検証されている²⁾。図ー２は載荷試験データのうち、鋼管杭と場所打ち杭についてワイブル分布曲線式を当てはめたときのワイブル分布曲線式における基準変位量 δs と、残留変位急増点から求めた降伏変位量 S_{ry} の相関をみたものである。この際、場所打ち杭においてはワイブル分布曲線式の m は $m = 1$ としている。

なお、図中の記号は以下の通りである。

S_y : ワイブル分布曲線式による基準変位量 δs (mm)

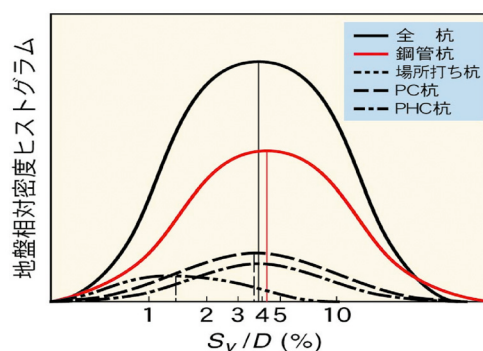
S_{ry} : 残留変位急増点から求めた降伏変位量 (mm)

D : 杭径 (mm)

この結果、両者は比較的良好な相関を示し、残留変位量が急増する点とワイブル分布曲線上の降伏点とほぼ対応すると考えて差し支えないと判断される。

この結果に基づき、地盤相対密度のヒストグラムと S_y/D の関係を杭種類別の度数分布で表したのが図ー３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が得られている。図によれば、 S_y/D の平均値は、鋼管杭で4.1%、P C・P H C杭で3.7%、場所打ち杭で1 % 強程度である。場所打ち杭の S_y/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。

以上のことより、従来の道路橋示方書では、許容変



図ー３ S_y/D の確立度数分布³⁾

位量は杭種により差異はあるものの統一した指標として、杭基礎の許容変位量を杭径の1 % ($\geq 15\text{mm}$) 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、一部については過小評価になる場合もあり、コスト削減を考慮して、今後、杭種などの設計条件に応じた許容変位量を設定する必要がある。

4. 水平変位の緩和条件

前記の既往研究成果より、今後の合理的設計法のため、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地震時に対する水平変位の制限値つまり許容変位量を、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する^{4)・5)}。

水平変位の緩和条件

- ①. 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）
- 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

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). 鋼管杭のみを4% 許容変位量とする事由

鋼管杭は他の杭種に比べ曲げ剛性が小さく、許容変位量を杭径の1%または15mmに抑えた場合、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。

また、載荷試験の統計的な検討によれば、PC杭、PHC杭についても、設計許容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、現在精査中であり、現時点での設計運用では鋼管杭の許容変位量の見直しのみとする。

2). 橋脚設計で運用する事由

改訂道示によれば、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に基づき決定されるためである。

そのため、橋脚設計での運用とし、この際の杭の断面力、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、条件に応じ杭基礎を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

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）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、図-1に示すように、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。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、北海道開発局では、本手法の実績および検証事例をもたないことから、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必要があると考えられる。

（文責：北海道開発土木研究所 富澤幸一
国土交通省北海道開発局 河上聖典）

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 pp.382～387, 平成14年3月
- 2). 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
- 3). 日本道路協会：杭基礎設計便覧 pp.173～177, 平成4年10月
- 4). 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 基礎工, pp.55～57, 2002.5、総合土木研究所
- 5). 北海道開発局建設部道路建設課：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-67、(社)北海道開発技術センター、平成14年3月