

日本の港湾基準と英国港湾基準(BS6349)の部分係数を適用した横棧橋設計の比較検討

国土技術政策総合研究所（出向元：(株)日本港湾コンサルタント） 正会員 ○柴下達哉

国土技術政策総合研究所・京都大学経営管理大学院 正会員 宮田正史

東京理科大学理工学部 正会員 菊池喜昭

1. はじめに

海外における港湾の設計基準として、英国規格協会(British Standards Institution)が発行するBS6349¹⁾ (Maritime Works. 以下BS) とその関連規格が広く利用されている。本研究では、日本の港湾基準²⁾とBSとで異なっている部分係数が設計結果にどう影響するのか、横棧橋（鋼管杭式）を対象として比較検討した。

2. 設計条件の設定方法及び比較検討の方針

両基準でどの設計条件が横棧橋の鋼管杭の断面諸元等の設計結果に与える影響が大きいかを見極める必要がある。本検討では、影響が大きいと予想される、部分係数（荷重係数、抵抗係数）、地震条件、支持力照査式の3項目に着目し、横棧橋設計の比較検討を行う。なお、その他の設計条件は、全て共通の条件（日本基準）を適用した。対象断面は図-1に示すとおりであり、横棧橋鋼管杭に関する照査結果（発生応力度と支持力）および断面諸元に及ぼす影響について検討する。なお、比較方法の詳細条件は後述する。

3. 杭の応力照査の比較方法と比較結果

始めに、杭頭の断面力（曲げモーメント M と軸力 N ）を、横棧橋骨組解析モデルにより算定する。接岸時を例として算定方法を示すと、日本基準では、上部工自重 W_{10} 、上載荷重 W_{20} 、水平力 P_0 （慣性力）の特性値を解析モデルに作用させて断面力（ M_0 、 N_0 ）を算定する（図-2）。一方BSでは、特性値にあらかじめ荷重係数を乗じた荷重（上部工自重 $W_{10} \times 1.35$ 、水平力 $P_0 \times 1.35$ 、上載荷重 $W_{20} \times 1.00$ ）を解析モデルに作用させて断面力を算定する。図-2に示すとおり、この段階ではBSによる曲げモーメントは日本基準の1.13倍（ $M_0 \times 1.13$ ）、軸力は1.15倍（ $N_0 \times 1.15$ ）となる（本検討の設計条件下での比率であることに留意されたい）。なお、地震時の場合も、接岸時と同様の方法で杭頭断面力を算出する。地震時は、水平震度のみを考慮した場合（日本基準）、水平震度と鉛直震度（水平震度の1/2）を考慮した場合（BS）を対象とする。

次に、杭の応力照査結果の比較方法を示す（図-3）。杭の応力照査の比較は、上述の両基準による杭頭断面力を用いた作用耐力比の比較により行うが、その詳細は以下に示すとおりである。日本基準の場合、設計状況ごとに定められた部分係数及び調整係数 m を用いて作用耐力比を算出する。図-3の接岸時を事例として説明すると、日本基準による杭の応力照査式を用い、 $\gamma_s=1.29$ （作用側）、 $\gamma_R=1.01$ （抵抗側）、 $m=1.0$ を入力し、作用耐力比 0.57 を得る。一方、BSの場合は、杭の応力照査式は日本基準を用いるものの、BS基準による杭頭断面力に対応した曲げ応力及び軸方向応力を入力し、部分係数（ γ_s 、 γ_R 、 m ）は全て 1.0 と設定し、作用耐力比 0.50 を得る。この場合、日本基準の方がやや大きい作用耐力比となり、安全側の断面設定になることを示して

キーワード 港湾、横棧橋、設計基準、比較設計、BS6349

連絡先

〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1 国土交通省国土技術政策総合研究所 TEL：0468-44-5028

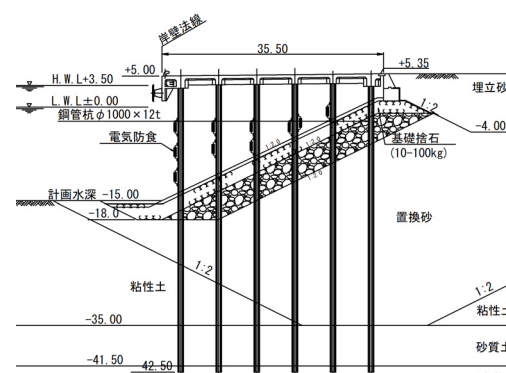


図-1 検討モデル

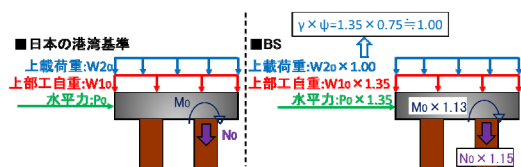


図-2 作用荷重と杭頭断面力（接岸時）

■日本基準	
$m \times \frac{S_d}{R_d} \leq 1.0$	$S_d = \gamma_s \times \frac{\sigma_{cdk}}{red} + \sigma_{bcdk} = 1.29 \times \frac{\sigma_{cdk}}{red} + \sigma_{bcdk}$
	$R_d = \gamma_R \times \sigma_{pyk} = 1.01 \times \sigma_{pyk}$
$m = 1.00$	$\frac{S_d}{R_d} = 0.57 \leq 1.0$
■BS	
$m \times \frac{S_d}{R_d} \leq 1.0$	$S_d = \gamma_s \times \frac{\sigma_{cdk}}{red} + \sigma'_{bcdk} = 1.00 \times \frac{1.15 \sigma_{cdk}}{red} + 1.13 \sigma_{bcdk}$
	$R_d = \gamma_R \times \sigma_{pyk} = 1.00 \times \sigma_{pyk}$
$m = 1.00$	$\frac{S_d}{R_d} = 0.50 \leq 1.0$

図-3 杭の応力照査の比較結果（接岸時）

S_d : 荷重項の設計用値 R_d : 抵抗項の設計用値 γ_s : 抵抗項に乘じる部分係数

γ_R : 荷重項に乘じる部分係数 m : 調整係数

σ_{cdk} : 軸方向圧縮力による圧縮応力度の特性値(日本基準の杭頭断面力より算出)

σ_{bcdk} : 曲げモーメントによる最大圧縮応力度の特性値(日本基準の杭頭断面力より算出)

σ_{pyk} : 曲げ圧縮降伏応力度の特性値

red : 軸方向圧縮降伏応力度を降伏応力度の特性値で除した値として定義される係数

σ'_{cdk} : 軸方向圧縮力による圧縮応力度の特性値BSの杭頭断面力より算出

σ'_{bcdk} : 曲げモーメントによる最大圧縮応力度の特性値BSの杭頭断面力より算出

いる。なお、両基準の作用耐力比の関係はあくまでも本検討で設定した設計条件下での傾向である。

図-4 に、全ての設計状況（作業時・接岸時・牽引時・地震時（水平震度=0.15））における横棧橋の各杭列の、両基準による応力照査の作用耐力比の比（BS/日本基準）を示す。この結果、いずれの設計状況の場合であっても、日本基準の方がやや安全性が高い断面を要求されることがわかる。ただし、BS の作用耐力比に相当する断面剛性を日本基準で得るためには、鋼管杭（φ1000mm）の肉厚を1mm（12→13mm）のみ増厚するだけで済むため、大きな差異ではない。なお、今回の比較では、BS の実務設計で考慮されていると考えられる鋼材降伏強度の座屈を考慮した低減や、降伏強度の低減（材料係数）は考慮していないため、その点も注意が必要である。

4. 杭の支持力照査の比較方法と比較結果

両基準による杭の支持力照査結果の比較についても、作用耐力比を利用した（図-5）。日本基準の場合（図-5 上段）、解析モデルから得られた軸力（ $S_d=1.0 \times S_k$ ）、日本基準による杭の押込方向抵抗力（ $R_d=1.0 \times R_k$ ）、作業時・牽引時・接岸時の調整係数 $m=2.50$ （地震時の調整係数 $m=1.50$ ）から、作用耐力比を算出する。

BS の場合（図-5 下段）は、BS の荷重係数を考慮した軸力（ $S_d=1.15 \times N_0$ ）、表-1 に示す日本基準の杭の抵抗力、仮定した耐力

側の部分係数から作用耐力比を算出する。耐力側の部分係数は、荷重側の部分係数を大きく（構造物に不利な条件）設定しているため、BS EN1997³⁾ に基づき、杭の先端抵抗力 R_{bk} 及び周面抵抗力 R_{sk} に対する部分係数（ γ_b , γ_s ）は 1.0 と設定した。また、杭の抵抗力の設計用値 R'_d の算出は、BS の計算ガイド⁴⁾ に基づき、解析モデルの不確実性を考慮するための係数として model factor(α)を考慮した。ガイドの事例では $\alpha=1.4$ が用いられており、本検討では $\gamma_b = \gamma_s = 1.0$ と設定しているため、日本基準の m に相当する BS の値は $1.61 (=1.15 \times \alpha)$ となる。日本基準の m は従来の安全率に相当するため、BS の安全率相当値(1.61)は日本基準の常時や接岸時の $m=2.50$ と比べると小さい値となる。一方、日本基準の地震時の $m=1.50$ と比べると BS がやや大きい値となる。

しかしながら、 $\alpha=1.40$ の設定の日本の支持力式への適用性が不明であり（RC 杭、鋼管杭など杭種の説明はない）、設計実務での標準的な数値も不明であるため、本検討では両基準の作用耐力比が同値となる α を試行的に逆算した。その結果、接岸時及び牽引時は、 α を 2.2 程度に設定した場合に日本基準と同等の作用耐力比となった。また、作業時は α を 1.9 程度、地震時は 1.2~1.4 程度で日本基準と同等の作用耐力比となった。この結果から明確な結論を導くことはできないが、今後、BS に基づく鋼管杭（開端杭）を用いた横棧橋の支持力設計の実務事例などから α の具体的な数値を収集し、両基準による安全性水準の相違を確認していく必要がある。なお、表-1 に示す杭の支持力照査式は、日本と海外基準では大きく異なる⁵⁾。最大の相違点は、日本基準では杭の周面・先端抵抗力の算出に有効上載圧の影響は考慮しないが、海外基準では考慮する点にある。このため、部分係数の相違に加えて、特に深度が大きい杭には抵抗力の差が大きくなる可能性がある。

5. おわりに

本検討では、横棧橋を対象として、日本基準と BS6349 の両基準による比較検討を試みた。両基準の規定をそのまま適用した比較には至らなかったが、両基準による部分係数の相違が設計成果に及ぼす影響をある程度把握できた。今後は、特に杭の支持力照査の部分について差が大きいため、更なる検討を行う予定である。

参考文献 1) BS6349-1: Code of practice for general criteria, 2000. 2) 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 2018. 3) BS EN1997: Eurocode 7: Geotechnical design, 2004. 4) A Designers' Simple Guide to BS EN 1997, 5) 菊池喜昭・兵動太一：東南アジア地域における杭基礎への鋼管杭導入に関する研究, 第23回土木鋼構造研究シンポジウム資料, 2019.

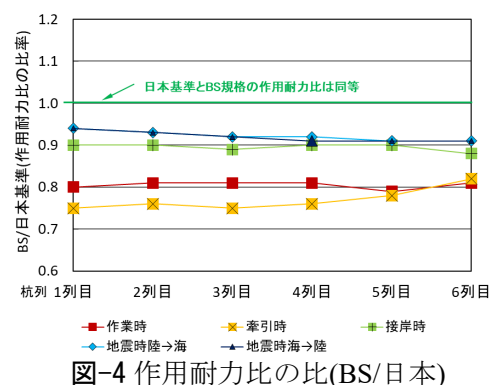


図-4 作用耐力比の比(BS/日本)

■ 日本基準	$m=2.50$	$m \times \frac{S_d}{R_{d0}} \leq 1.0$	$\Rightarrow 2.50 \times \frac{N_0}{R_d} \leq 1.0$
■ BS	$m=1.00$	$m \times \frac{S'_d}{R'_d} \leq 1.0$	$R'_d = \left(\frac{R_{bk}}{\gamma_b} + \frac{R_{sk}}{\gamma_s} \right) \times \frac{1}{\alpha}$
		$\frac{1.15 N_0}{R'_d} \leq 1.0$	$\Rightarrow 1.15 \times \frac{N_0}{R'_d} \leq 1.0$

図-5 杭の支持力の照査結果（接岸時）

表-1 杭の支持力照査式の比較

土質の種類	抵抗力	日本基準	BS 規格
砂質土地盤	先端抵抗	300N	$N_{qs} \sigma'_{v0}$
	周面抵抗	2N	$K_s \sigma'_{v0} \tan \delta$
粘性土地盤	先端抵抗	$6c_u$	$9c_u + \sigma'_{v0}$
	周面抵抗	c_u	αc_u