

斜面上の深礎基礎の設計

緒方 辰男¹・金 聲漢²・茂木 浩二³

¹正会員 工修 日本道路公団 技術部 構造技術課（〒100 東京都千代田区霞が関3-3-2）

²正会員 工修 日本技術開発(株) 東京支社 地下・構造部（〒164 東京都中野区本町5-33-11）

³正会員 工修 (株)白石 技術本部 技術第一部第一課（〒101 東京都千代田区岩本町2-11-2）

1. はじめに

斜面上に設けられる深礎基礎は前面地盤が有限でかつ傾斜しているため、平坦地盤上の基礎とは異なった挙動を示す。また、地盤水平支持機構も斜面特有のものを考慮する必要がある。このため、種々の実験や解析的な研究成果を基本として、深礎基礎の設計手法が、JH設計要領第二集¹⁾に示されている。

一方、平成7年兵庫県南部地震による橋梁の被害に鑑み、道路橋示方書V耐震設計編（以下、道示Vという。）およびIV下部構造編（以下、道示IVという。）が大幅に改訂された^{2),3)}。改訂により、基礎の耐震設計に地震時保有水平耐力法が導入され、大地震時においても基礎の損傷を限定されたものに制御することが明示された。そこで、深礎基礎の耐震設計についても、地震時保有水平耐力法を導入することとした。

以下に、深礎基礎の地震時保有水平耐力法による設計について記す。

2. 設計の基本

橋脚基礎の地震時保有水平耐力法による耐震設計に際しては、杭体および地盤の抵抗要素の非線形性を考慮した計算モデルを用いて、安全性を照査することとしている。標準的な深礎基礎の設計の流れを図-1に示す。

深い基礎としての抵抗機構を十分有効に活用するためには、杭周面のせん断抵抗を考慮することが不可欠であり、モルタルライニング等による新しい土留め工法を用いることで、これを考慮できることが、現場載荷実験により確認されてきている。そこで、平野部での杭基礎同様、杭周面のせん断抵抗を荷重分担に考慮することを基本とした。

水平荷重は、杭底面の鉛直地盤反力、杭前面の水平地盤反力、杭周面のせん断地盤反力で支持させることを基本としている。

橋脚基礎に対する地震時保有水平耐力法による設計は、杭体および地盤の抵抗要素の塑性化を考慮した計算手法を用い、下記を照査することとした。

① 基礎は作用荷重に対して、原則として降伏状態に達してならない。

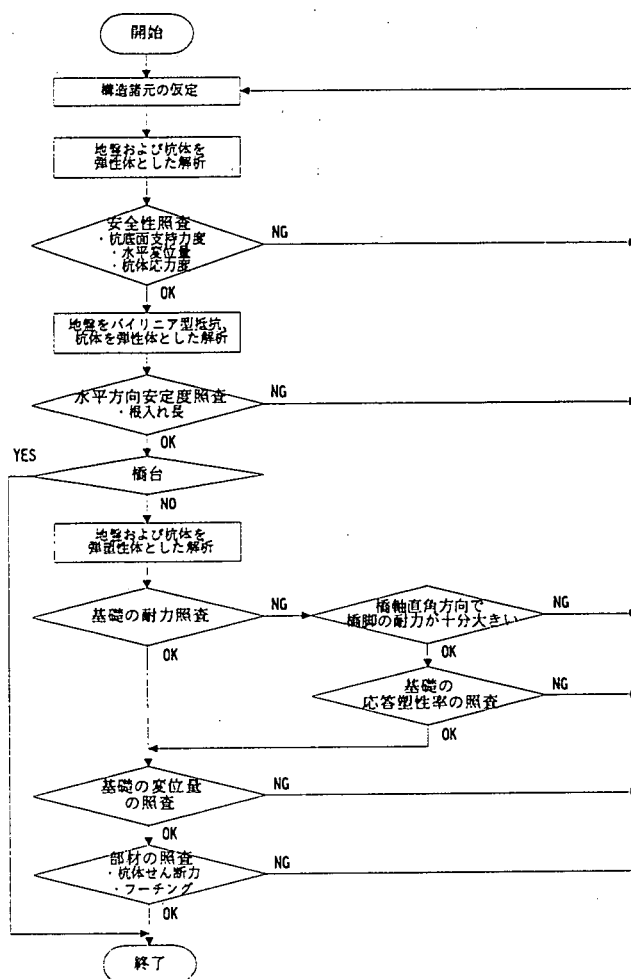


図-1 深礎基礎の設計の流れ

② 橋軸直角方向でかつ橋脚の耐力が著しく大きい場合には、基礎に主たる非線形性が生じることを許容するものとするが、基礎本体に過大な損傷を生じさせないよう、応答塑性率はその制限値をこえてはならない。

③ 基礎に生じる変位により橋梁全体の安定性を損わないよう、基礎天端中心位置に生じる水平変位および回転角は、それぞれの制限値をこえてはならない。

④ 基礎の各部材の耐力は、それぞれに生じる断面力以上でなければならない。

この際に用いる計算モデルとしては、深礎基礎に対する種々の載荷試験結果を精度よく再現できるように、常時や地震時(震度法)の水平安定照査に用いる弾塑性計算モデルを基本とし、地盤の抵抗要素に関する補正係数を変更し、杭体の塑性化の影響を考慮するものとした。

深礎基礎の地盤抵抗要素と計算モデルを表-1にまとめて示す。

表-1 深礎基礎の地震時保有水平耐力法の考え方

			内 容	備 考
計 算 モ デ ル	解析モデル		基礎体・地盤の非線形性を考慮した面内ラーメン骨組モデル	道示Ⅳ杭基礎に準拠。
	非 線 形 性	杭 体	杭の配筋状態に対応したトリリニア型 $M\sim\phi$ 関係を用いる。 ただし、杭体の降伏は杭本体水平面のうち、90度の円弧内に含まれる全ての軸方向鉄筋が降伏した状態とする。 杭の軸力は、押込み杭は $V/\text{杭本数}$ 、引抜杭は0とする。杭自重は考慮しない。	道示Ⅳ杭基礎およびケーソン基礎に準拠。
		基礎前面の地盤抵抗	杭前面の拡がりを持ったすべり土塊の抵抗から算定される水平支持力を地盤反力の上限値としたバイリニア型地盤抵抗とする。	載荷試験の解析結果による。
		基礎底面の地盤抵抗	杭底面の浮き上がり（有効載荷面積）、および底面反力度の上限値を考えたバイリニア型地盤抵抗とする。	道示Ⅳケーソン基礎に準拠。
		基礎周囲の地盤抵抗	杭周面（前背面および側面）の鉛直及び水平方向力に対してせん断抵抗の上限値を考慮したバイリニア型地盤抵抗とする。	道示Ⅳケーソン基礎に準拠。
	そ の 他		フーチング前面抵抗は期待しない。（ただし、慣性力は考慮）	
	基礎の降伏		上部工慣性力作用位置の荷重～変位曲線の変位急増点により判定する。ただし、変位急増点に先立ち、以下の局所的降伏が先行して生じる場合には、その時点を降伏としなければならない。 ①全ての杭体が降伏した状態。 ②一列の杭の杭底面地盤反力が極限支持力に達した状態。	載荷試験の解析結果および道示Ⅳ杭基礎の規定を一部準用。
塑性率の制限値		ケーソン基礎同様、計算された荷重～変位関係に基づき、基礎の塑性率の制限値を決定することを基本とする。	道示Ⅳケーソン基礎に準拠。	
変位の制限値		基礎天端中心における許容変位量の制限値は下記とする。 水平変位量 $\leq 40\text{cm}$ かつ回転角 $\leq 0.025\text{rad}$	道示Ⅴに準拠。	

3. 地盤反力係数

地盤反力係数の基本値は原位置での試験に基づき道示により求める。この値は斜面傾斜や隣接杭の影響を受けていない基本値と呼ぶべきものであり、深礎基礎の設計に際しては、これに対して斜面傾斜や隣接杭による補正係数を乗じて用いる。また、地震時保有水平耐力法による設計の際には、載荷試験結果に対する解析結果により補正係数 αk を考慮することとした。

(1) 水平方向地盤反力係数

$$kH\theta\mu = \alpha\theta\mu kH \quad (1)$$

$$kH = \alpha k kH\theta \left(\frac{BH}{30} \right)^{-3/4} \quad (2)$$

ここに、 $kH\theta\mu$ は斜面傾斜および隣接杭の影響を考慮した地盤反力係数、 $\alpha\theta$ は斜面傾斜に関する補正係数、 μ は隣接杭の影響に関する補正係数、 kH は水平方向地盤反力係数の基本値、 $kH\theta$ は直径30cmの剛体円板による平板載荷試験の値に相当する水平方向の地盤反力係数、 BH は基礎の換算載荷幅、 αk は水平方向地盤反力係数の補正係数で、 $\alpha k = 1.5$ とする。この補正係数は単杭深礎基礎の載荷試験結果に対する計算により、地盤の塑性化を考慮する場合に実験結果を上手く再現するよう決定したものである。

(2) 杭底面の鉛直方向地盤反力係数

$$kV = kV \left(\frac{BV}{30} \right)^{-3/4} \quad (3)$$

ここに、 kV は基礎底面の鉛直方向地盤反力係数、 $kV\theta$ は直径30cmの剛体円板による平板載荷試験の値に相当する鉛直方向の地盤反力係数、 BV は換算載荷幅で $BV = D$ (D は杭径) である。

(3) 杭底面のせん断地盤反力係数

$$kS = 0.3 kV \quad (4)$$

ここに、 kS は基礎底面のせん断地盤反力係数、 kV は基礎底面の鉛直方向地盤反力係数である。

(4) 基礎周面のせん断地盤反力係数

深礎杭周面の鉛直、水平せん断抵抗機構については、現時点で十分な情報が得られていない。そのため、類似構造と考えられる道示IVケーソン基礎に示される地盤反力係数の考え方を準用し、杭前面と側面とに分けて用いることとした。また、これら地盤反力係数は上限値を有するバイリニア型地盤抵抗としてモデル化する。

a) 杭側面の水平方向せん断地盤反力係数

$$kSHD = 0.6 kH\theta\mu \quad (5)$$

ここに、 $kSHD$ は杭側面の水平方向せん断地盤反力

係数、 $kH\theta\mu$ は基礎前面の斜面傾斜および隣接基礎の影響を考慮した水平方向地盤反力係数である。

b) 杭前背面及び側面の鉛直方向せん断地盤反力係数

$$kSVB = 0.3 kH\theta\mu \quad (6)$$

$$kSVD = 0.3 kH\theta\mu \quad (7)$$

ここに、 $kSVB$ は杭前背面の鉛直方向せん断地盤反力係数、 $kSVD$ は杭側面の鉛直方向せん断地盤反力係数、 $kH\theta\mu$ は杭前面の斜面傾斜および隣接基礎の影響を考慮した水平方向地盤反力係数である。

4. 地盤反力および地盤反力度の上限値

(1) 鉛直地盤反力度の上限値

地震時保有水平耐力法の設計で用いる杭底面の鉛直地盤反力度の上限値は次式により求める。

$$qu = \alpha quo \quad (8)$$

$$quo = 1/m (qdo - \gamma_2 Df) + \gamma_2 Df \quad (9)$$

ここに、 qu は杭底面の鉛直支持力度の上限値、 quo は仮想水平地盤での鉛直支持力度の上限値、 α は斜面の影響による低減係数、 qdo は仮想水平地盤での深礎底面の地盤から決まる支持力度の上限値、 Df は有効根入れ長、 γ_2 は深礎底面より上にある地盤の単位体積重量、 m は上限値決定のための補正係数で、 $m = 1$ である。

(2) 水平地盤反力の上限値

地震時保有水平耐力法の設計で用いる水平地盤反力の上限値は、次式により求める。

$$Rqu = \frac{Rq}{m} \quad (10)$$

ここに、 Rqu は水平地盤反力の上限値、 Rq は極限水平地盤反力、 m は上限値決定のための補正係数で $m = 1$ とする。

また、極限水平地盤反力は直線すべり面のせん断抵抗力の最小値として、次式より求める。

$$Rq = \frac{W(\cos \alpha + \sin \alpha \tan \phi) + c A}{\sin \alpha - \cos \alpha \tan \phi} \quad (11)$$

ここに、 Rq は極限水平地盤反力、 W はすべり面より上の地盤の重量、 A はすべり面の面積、 ϕ は地盤のせん断抵抗角、 c は地盤の粘着力、 α は Rq が最小となる角度、 β はすべり面のひろがり角である。

(3) 杭底面地盤のせん断地盤反力の上限値

深礎杭底面におけるせん断地盤反力の上限値は、次式により求める。

$$Su = \frac{1}{m} (c_B A' + N \tan \phi_B) \quad (12)$$

ここに、 S_u は杭底面におけるせん断地盤反力の上限值、 c_B は杭底面と地盤との間の粘着力、 ϕ_B は杭底面と地盤との間の摩擦角、 A' は有効載荷面積、 N は底面に作用する鉛直力、 m は上限値決定のための補正係数で $m=1$ である。

(4) 杭周囲のせん断地盤反力度の上限值

杭周囲のせん断抵抗を確実に考慮できるモルタルライニング等による土留め工を採用した場合には、JHの実施した実験結果に基づき道示IV場所打ち杭に準じた杭周囲のせん断抵抗を考慮してよいものとした。

モルタルライニングによる深礎杭施工を採用する場合には、杭周囲のせん断地盤反力度の上限值として次式を用いるものとした。

① 杭周囲のせん断地盤反力度の上限值

$$f_u = \frac{f}{m} \quad (13)$$

② 杭周囲の極限せん断地盤反力度

砂質土および岩盤については、

$$f = \min[0.5N, (c + p_o \tan \phi)] \leq 20.0 \quad (14)$$

粘性土については、

$$f = (c + p_o \tan \phi) \leq 15.0 \quad (15)$$

ここに、 f_u は杭周囲のせん断地盤反力度の上限值、 f は杭周囲の最大せん断抵抗度、 N は標準貫入試験のN値、 c は土の粘着力、 p_o は壁面に作用する静止土圧強度、 ϕ は土のせん断抵抗角、 m は上限値決定のための補正係数で $m=1.0$ とした。

5. 地盤反力、断面力および変位量の計算

深礎基礎の地盤反力、断面力および変位量は、基礎体および地盤抵抗の非線形性を考慮した地盤バネによって支持された杭ラーメン構造を用いて算出するものとした。

杭本体の曲げ剛性はトリニア型の $M \sim \phi$ モデルとして評価することとした。また、杭体降伏時とは、杭体の引張側の90度の円弧内に含まれる全ての軸方向鉄筋の引張応力度が降伏応力度に達する時とし、終局時とは杭体コンクリートの圧縮縁において、コンクリートのひずみが終局ひずみに達するときとした。このときの鉄筋およびコンクリートの応力度～ひずみ曲線は、それぞれ道示Vの規定に従い、地震動の種類に応じて杭体の帯鉄筋を横拘束筋として考慮して求めるものとした。

6. 深礎基礎の降伏

深礎基礎の降伏は、杭本体の降伏、杭前面地盤が塑性化すること等により、上部工慣性力作用位置での水平変位が急増し始める点とする。

深礎基礎の全体挙動における降伏、すなわち、上部工慣性力作用位置での変位が急増する点は、地盤条件や基礎の諸元等の抵抗側条件と荷重条件との関連により決定され、局所的降伏が必ずしも基礎の全体挙動としての降伏と一致しない場合が存在する。これは、深礎基礎が多様な地盤条件(傾斜、地盤強度)下に建設され、かつ、その形態も様々であることに起因するものと考えられる。そのため、基本的には全体挙動の変位急増点をもって降伏と判定するものとした。

7. 今後の課題

深礎基礎への地震時保有水平耐力法の導入により、従来設計に比べて杭径や杭長などが増大する結果となっている。これは、深礎基礎は通常の平坦地盤における杭基礎に比べて山岳部の比較的良好な地盤に設けられるため、橋脚の保有水平耐力が大きなものとなり、深礎基礎の諸元が大きくなるものと考えられる。また、通常の杭基礎に比べて、杭本数が少なく基礎全体の平面的な規模が小さいために、基礎の回転剛性が小さくなっていることが考えられる。今後さらに周面摩擦力の評価方法、地震時の動的な地盤バネの評価方法、基礎の降伏および終局の定義などについてさらに研究が必要であると考ええる。

8. むすび

今後の高速道路建設においては、大口径深礎の採用が増加するものと考えられることから、大口径深礎特有の設計手法についても現在JHにおいて検討を進めている。これら斜面上の深礎基礎は、急峻山岳地での橋梁建設においては欠かせないものであり、より合理的な設計手法の開発が必要であろう。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編、1996.12
- 2) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説IV下部構造編、1996.12
- 3) 日本道路公団：設計要領第二集、1990.7