

Ⅲ-B60

ダイナミックジャッキを用いた水平載荷試験による

P H C 杭の地盤反力係数の測定とその評価

四国電力(株) 正会員 岩原 廣彦
正会員 末沢 等
飛鳥建設(株) 正会員 小山 雅敏

1. はじめに

徳島県阿南市に四国電力(株)と電源開発(株)が共同で立地する橘湾発電所の2基ある工業用水タンクは、両発電所で使用する工業用水を貯蔵する重要な設備である。また、同タンクの内1基は、約1,400本と多数の杭構造であるとともに、支持岩盤線が複雑に変化に富んだ状況である。

これらを総合的に踏まえてタンク基礎の安全性を確認する目的で、設計に採用した水平方向地盤反力係数が実際の杭で確保できるかを水平載荷試験により確認した。その結果、常時の地盤反力係数は、設計値を十分満足すると共に、地震時におけるタンクの固有周期を考慮して評価した地盤反力係数が、常時の2倍程度以上となることが確認できた。

以下、詳細について述べる。

2. 水平載荷試験概要

試験杭は、当工事において平均的な仕様である $\phi 600 \times t90 \times L11,000(\text{mm})$ B種のPHC杭を用いて、ラム重量7.0トンの油圧ハンマーによりGL-9.46mまで打撃した。水平載荷試験は、杭打設に伴う周辺地盤の乱れの回復を待ため、杭打設2週間後に実施した。試験においては設計水平力である20トンを載荷荷重とし、1方向単サイクルの静的試験（ダイナミックジャッキ+油圧ジャッキ）¹⁾と1方向単サイクルの動的試験（ダイナミックジャッキ+窒素ガス圧）²⁾を実施した。

図-2に杭の打設状況と地盤条件、表-2に試験内容と試験条件を示す。

3. 静的水平載荷試験結果ならびに静的水平地盤反力係数の評価

静的水平載荷試験(S-1)の結果として、図-3に杭頭の荷重～変位曲線を示す。試験データから、一層系地盤のChang式の解析により、試験時の水平地盤反力係数を算定すると、 $ks=2.47\text{kgf/cm}^2$ となる。

静的試験(S-1)の結果とChang式による解析の結果を表-3に示す。

試験結果から算出した静的水平地盤反力係数は、設計で採用しているN値から求めた $ks'=1.76\text{kgf/cm}^2$ を上回り、同試験結果から設計が安全側であることを確認することができた。なお、設計上の係数は、現地のボーリング調査による孔内水平載荷と標準貫入試験結果等を考慮して、福岡一字都の式($k=0.691N^{0.406}$)を採用して決定した。

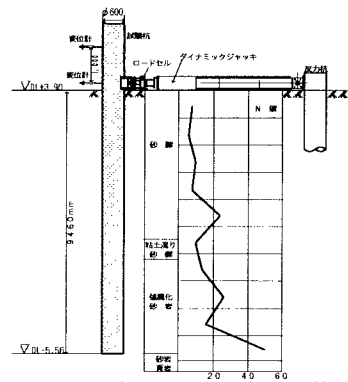


図-2 杭打設状況・地盤条件

表-2 試験内容試験条件

ケース	試験条件	1サイクル時間 t (s)	周波数 f (Hz)
D-1	動的	0.085	2.9
D-2	動的	0.15	1.7
D-3	動的	0.40	0.63
D-4	動的	0.57	0.44
S-1	静的	16.0	0.016

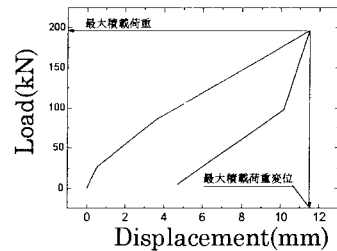


図-3 静的試験(S-1)杭頭荷重～変位曲線

表-3 静的試験(S-1)結果

項目	試験データ (実測値)	Chang式 (計算値)
最大積載荷重 [kN]	199.16	
最大積載荷重時変位 [mm]	11.73	11.73
最大変位 (GL+1m) [mm]	17.36	16.03
傾斜角 [mrad]	5.63	4.30
地盤反力係数 [kgf/cm ²]	—	2.47>ks'

*設計静的水平地盤反数: $ks'=1.76[\text{kgf/cm}^2]$

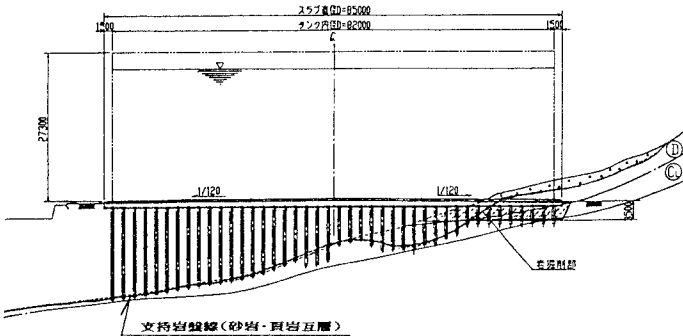


図-1 杭基礎設計断面図

キーワード：水平載荷試験、動的水平載荷試験、地盤反力係数、動的地盤反力係数、PHC杭

連絡先：四国電力(株)建設部計画課（香川県高松市丸の内2番5号 TEL 081-821-5061 FAX 087-825-3034）

4. 動的水平載荷試験結果ならびに動的水平地盤反力係数の評価

(1) 水平載荷速度と杭頭変位について

地震時の水平荷重による載荷速度および杭頭変位ならびに地盤反力係数の関係を確認するため、動的試験(D-1～4)を実施し、図-4 動的載荷試験結果(a,時間～荷重曲線 b,時間～変位曲線 c,荷重～変位曲線)に示す。このc,荷重～変位曲線が左側に膨らむ傾向から載荷速度が速くなるほど、荷重の増加に対して変位の増加が時間的な遅れを生じる動的影響が認められる。

これは、次に示す載荷重と地盤の動的抵抗の関係式から確認することができる。

$$P = m \cdot \alpha + c \cdot v + k \cdot u \quad \text{ここで、} P: \text{土が受ける外力[kN]} \quad m: \text{土の質量[t]} \quad \alpha: \text{載荷による加速度[m/s}^2\text{]} \\ c: \text{土の粘着力[kN} \cdot \text{s/m]} \quad v: \text{土が動く速度[m/s]} \quad k: \text{土のパネ値[kN/m]} \quad u: \text{変位量[m]}$$

上式によれば、杭が外力Pを受けた時、載荷初期は載荷重の立ち上がりの加速度により土質量の抵抗が始まり、次に土の変形による粘性抵抗が現れ、最後に土骨格の弾性抵抗が現れる。このため、杭が停止した状態では、土質量の抵抗ならびに土の粘性抵抗がゼロとなり、土骨格の弾性抵抗のみが残ることとなる。

(2) 載荷速度が地盤反力係数に及ぼす影響について

水平荷重の載荷速度による動的地盤反力係数の影響をみるため、複数の変位レベル(1mm,3mm,6mm,9mm,11mm)における動的試験の載荷荷重と、c,荷重～変位曲線における動的試験時に静的状態となる点と原点を結んだ直線を静的試験における荷重～変位曲線と同等とみなして、この変位における荷重を比較し、表-5に示す。

次に、この結果から地盤反力係数の静的との比を見るために、下式(Changの式から導いた)に従い地盤反力係数比を求めた。

$$Y1 = \frac{(1 + \beta h)^3 + 0.5}{3EI\beta^3} F \quad \frac{F_d}{F_s} \cdot \frac{\beta_d^3}{\beta_s^3} = \frac{k_d^{3/4}}{k_s^{3/4}}$$

ここで、Y1: 載荷位置での変位量 (cm) h: 突き出し長 (cm)[-20cm] E: ヤング係数 [-400,000kgf/cm²] I: 断面2次モーメント [-510,000cm⁴] F: 載荷荷重 (kN) F_d(s): 動的 (静的) 試験時の載荷荷重 (kN) β_d(s): 動的 (静的) 試験時の杭の特性値 kd(s): 動的 (静的) 試験時の水平地盤反力係数 (kgf/cm³) D: 杭径[60cm] kh: 水平地盤反力係数 (kgf/cm³) β 杭の特性値 $\sqrt{(kh \cdot D / 4EI)} \text{ cm}^{-1}$

その結果を表-6に示す。これによると地盤反力係数比は、載荷速度が速く杭頭変位が小さいほど大きく、また、載荷速度が遅く杭頭変位が小さいほど小さくなる傾向であり、1.04～13.61となった。

(3) 地震時におけるタンクの固有周期を考慮した地盤反力係数の確認について

杭基礎設計における水平方向の地盤反力係数を算出するにあたり、基礎の基準変位量は、基礎幅(杭径)の1% (=6mm)であり、この変位におけるタンク本体の固有周期に相当する D1～2 (周波数 f=1.7～2.9Hz 程度) の地盤反力係数比は 2.14～2.48 となった。

5. 終わりに

水平載荷試験より PHC 杭の静的と動的な水平地盤反力係数について、以下の結果を得た。

・静的載荷試験結果から得られた地盤反力係数は、設計で使用した静的水平地盤反力係数より大きく、設計の安全性を満足するものであった。

・地震時におけるタンクの固有周期(載荷速度)を考慮した動的地盤反力係数は、静的の 2.1～2.5 倍程度であり、設計において地震時の水平地盤反力係数を静的の 2 倍としたことが安全側であることを確認することができた。

最後に、本試験の実施、解析にあたり御協力頂いた関係者各位に謝意を表す。

表-5 動的と静的の荷重比(F_d/F_s)

載荷ケース 杭頭変位	() 内は載荷速度			
	D-1 (2.9Hz)	D-2 (1.7Hz)	D-3 (0.63Hz)	D-4 (0.44Hz)
1mm	7.09	4.53	3.54	2.71
3mm	3.27	2.29	1.80	1.59
6mm	1.98	1.77	1.33	1.28
9mm	1.38	1.40	1.24	1.21
11mm	1.13	1.19	1.15	1.03

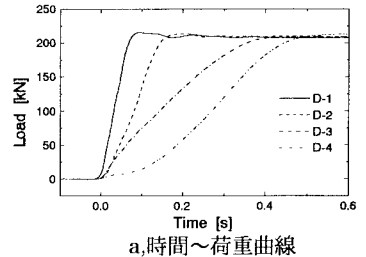
表-6 動的と静的の地盤反力係数比(k_d/k_s)

載荷ケース 杭頭変位	() 内は載荷速度			
	D-1 (2.9Hz)	D-2 (1.7Hz)	D-3 (0.63Hz)	D-4 (0.44Hz)
1mm	13.61	7.50	5.40	3.79
3mm	4.86	3.03	2.19	1.85
6mm	2.48	2.14	1.46	1.39
9mm	1.54	1.57	1.33	1.29
11mm	1.17	1.26	1.20	1.04

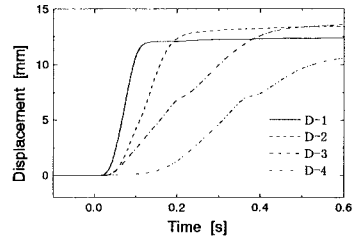
【参考文献】1) 地盤工学会：杭の水平載荷試験方法・同解説

2) 多田他(1997)：鋼管杭の水平載荷試験における載荷速度の影響について、第32回地盤工学研究発表会，pp.1601-1602

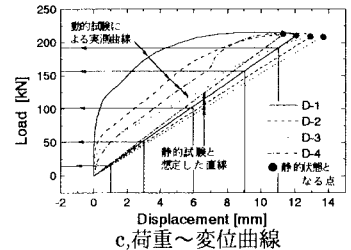
3) 日本道路協会：(1996)道路橋示方書・同解説（IV下部構造編），pp.326



a, 時間～荷重曲線



b, 時間～変位曲線



c, 荷重～変位曲線

図-4 動的載荷試験結果