

鹿島建設技術研究所 正会員 田中邦熙

I. まえがき

杭の先端部支持力は杭基礎を設計する場合、設計荷重およびネガティブフリクション(NF)に対する支持力となるものである。近年NFに関する研究検討が盛んに進められているが、NFの大きさが無視できない大きさであることが実証されてくるにつれて、杭の支持力の評価法の見直しが必要となってきた。杭の先端部支持力は各種支持力公式を用いたり載荷試験を行なったりする方法により検討されているが、それぞれ問題点がある。

今回某現場において、現地の土質条件に応じた杭基礎の最適設計条件および施工法を検討することなどを目的として、「杭打ち試験工事」を実施し、杭打ち時における杭体内の打撃応力測定結果および波動方程式を用いた理論計算結果から杭の支持力の検討を行なったので、その解析検討結果について報告する。

II. 測定方法

(1) 試験場所および土層構成

杭打ち試験工事実施場所は山口県の下関市瀬戸内海側埋立て地であり、地盤条件は図-1に示したとおり、軟弱沖積層(層厚12m)の下に $N=30\sim50$ の層厚3~6mのれき混り粘土層が交互に $GL-45m$ まで存在している。

(2) 試験杭

試験杭は $\phi=500mm$, $t=12mm$, $A_s=184cm^2$, $\ell=50.00m$ のスパイラル鋼管であり、打撃応力測定用ワイヤストレーンゲージ(WSG)ヤリード線の保護のために軽量溝型鋼 $C125\times65\times6\times8$ ($A_c=17cm^2$)が2本杭の外側の杭軸方向に溶接されている。

(3) 杭の打設

本試験杭の打設には、デーゼルハンマーIDH J-34を使用した。

(4) 打撃応力測定

杭打設時の打撃応力などを測定するために、試験杭に図-1に示したとおり、原則として3.00m間隔でWSG 22個等を取りつ

け、杭先端が所定深度に達したときに、図-2に示した測定ブロックダイヤグラムにより測定した。

すなわち打撃応力の波形を正確に把握するために、データレコーダーを使用した。

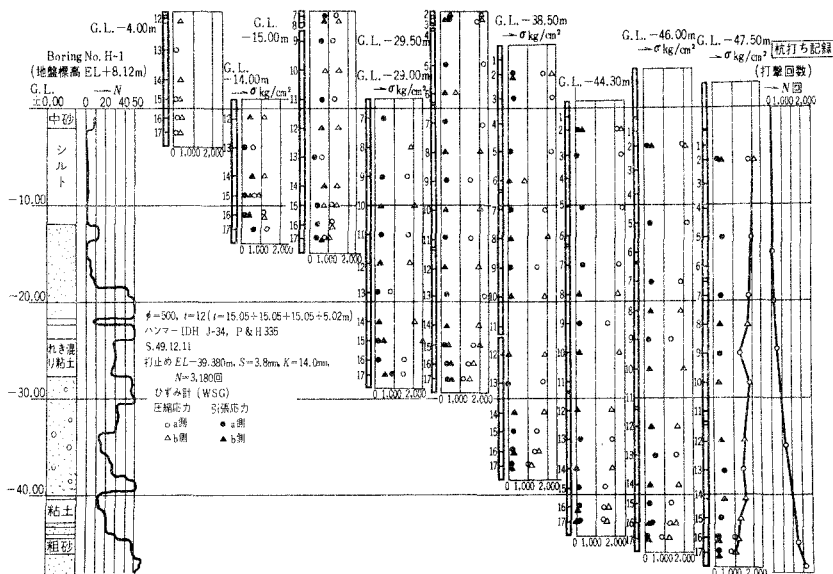


図-1 杭打ち時打撃応力測定結果

Ⅲ. 試験結果

(1) 杭打ち記録

今回の打撃応力測定を実施した試験杭の杭打ち記録は図-1に示したとおりである。地盤強度が比較的大きくかつ杭先端まで投影断面積が 80cm^2 のチャンネル2本が取りつけてあるのに、打止まりでのハンマー1打当り貫入量 $S \approx 4\text{mm}$ 、リバウンド量 $K \approx 14\text{mm}$ 、総打撃回数 $N = 3,180$ 回という状況で比較的容易に杭打設ができた。このことは今回の実験場所における $N = 30 \sim 50$ という地層は、粘性土層中に含まれる $\phi = 100\text{mm}$ 程度のれきのために見掛け上の N 値が大きくなったものであり、杭の設計や施工に当っては十分な注意が必要であることを示すものと考えられた。

(2) 打撃応力測定試験

打撃応力の最大圧縮、引張り応力を杭深度別に図示した結果は図-1に示したとおりであり、図-1から次のようなことが分かる。

- 地盤強度が $N = 1$ 程度の弱い部分では圧縮応力 $\sigma_c = 400\text{kg/cm}^2$ 程度以下であり、引張り応力は生じない。
- 杭先端部が硬い地盤中に貫入すると、その地盤強度に応じて圧縮応力が増大する傾向が認められ、その値は最大 $2,000\text{kg/cm}^2$ 以上にも達した。
- 杭先端部が硬い地盤中に深く貫入すると、圧縮応力は杭先端部に向って減衰し、杭先端部における応力集中現象は認められない。
- 引張り応力 σ_t は一般に 500kg/cm^2 程度以下である。

またデータレコーダーを用いて測定した打撃応力波形の再生結果の一例は図-3のとおりであり、応力波が杭頭から杭先端に向って伝播していく様子がよく理解される。なおこの図から応力伝播速度を求めたところ、 $5,160\text{m/sec}$ 程度であった。

Ⅳ. 杭支持力に関する解析

(1) 波動方程式を用いた杭打設時の挙動解析

杭は連続体であるので、杭打ち時に杭体内を伝わる応力波の動きを波動方程式を用いて表わすことができる。この理論解から杭の支持力や最適施工機械の選定などと言った検討を行なう試みが古くから為されてきた。特にE. A. L. Smith が考案したモデルは理論的に取り扱い易いのでよく用いられている。

いま図-4に示したように断面積 A の完全弾性体(ヤング率 E 、比重 P)の棒を杭体と考えた場合、

断面1における圧縮応力 σ_1 、変位 D

断面2における圧縮応力 σ_2 、変位 $D + \frac{\partial D}{\partial x} dx$

とすれば、長さ dx 部分のひずみは $\frac{\partial D}{\partial x}$ であるから

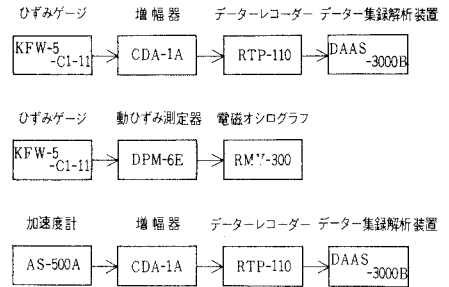


図-2 測定ブロックダイアグラム

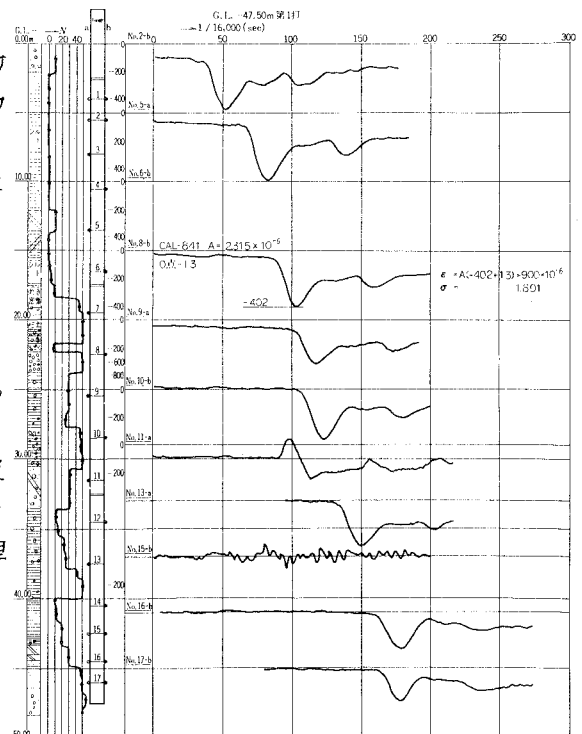


図-3 打撃応力波伝達状況 (杭先端GL-47.50m 第1打)

①式が得られる。

$$\sigma_1 = E \frac{\partial D}{\partial x}, \sigma_2 = E \left(\frac{\partial D}{\partial x} + \frac{\partial^2 D}{\partial x^2} dx \right) \text{----- ①}$$

次に dx 部分に働く慣性力 F は、 dx 部分の質量 m および加速度 a が②式で表わされるから、③式で表わされる。

$$m = \rho A dx, a = \frac{\partial^2 D}{\partial t^2} \text{----- ②}$$

$$F = m a = \rho \frac{\partial^2 D}{\partial t^2} A dx \text{----- ③}$$

$$\text{一方応力の釣り合いからは } F = (\sigma_2 - \sigma_1) A \text{----- ④}$$

$$\text{したがって ①～④式より } \frac{\partial^2 D}{\partial t^2} = \frac{E}{\rho} \cdot \frac{\partial^2 D}{\partial x^2} \text{----- ⑤}$$

⑤式に外部抵抗 R を考慮して取りまとめると、

$$\frac{\partial^2 D}{\partial t^2} = \frac{E}{\rho} \cdot \frac{\partial^2 D}{\partial x^2} - \frac{g}{W} R \text{----- ⑥}$$

次に抵抗 R はスプリング力 f_1 と減衰力 f_2 とにより表わされ、スプリング力 f_1 と変位 D との関係は図-5のように表わされるものとする。すなわち図-5において土は弾性的に OD だけ縮み、それから極限抵抗値 R_u に達する B 点まで弾塑性的に変形する。その後リバウンド量 GC を生じ、全ての力が O になる C 点において土の運動(変形)が終る。

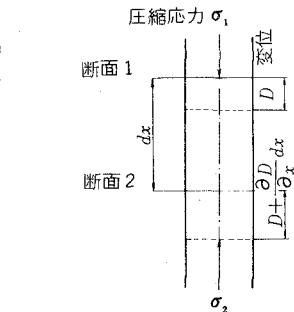


図-4 杭体モデル図

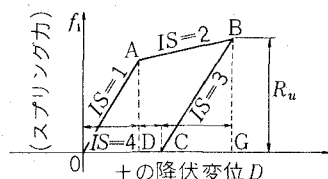


図-5 杭先端土用復元力特性

こゝで地盤は一般に速度の遅い運動よりも早い運動の方が瞬間的に大きな抵抗を示すから、減衰という考え方を導入する。波動方程式の計算では、各微小時間 Δt ごとに杭先端の瞬間速度が変わるが、これを V_p とし、減衰定数として J を考えると $J V_p$ が減衰による地盤抵抗の増減を表わすことになる。また杭先端の土は杭打設により急速に側方に押しやられるが、杭周辺の土はそのように早い運動を示さないから、杭周辺土の減衰定数 J' の方が小さい。

次に図-6において K_m' 、 K_m は地盤のバネ定数、 D_m は質量 W_m の杭セグメント(1単位長)の変位、 D_m' は地盤の塑性変位とすると、スプリング K_m' の縮み量は $(D_m - D_m')$ となり、したがって杭周辺地盤の抵抗 R_m は次式で表わされる。

$$R_m = (D_m - D_m') \cdot K_m' \text{----- ⑦}$$

この抵抗値に減衰定数を導入すると速度に比例した抵抗値が加わり、この場合の抵抗 R_m は次式で表わされる。

$$\text{杭周辺土の抵抗 } R_m = (D_m - D_m') \cdot K_m' \cdot (1 + J' V_m) \text{----- ⑧}$$

$$\text{同様に 杭先端土の抵抗 } R_p = (D_p - D_p') \cdot K_p' \cdot (1 + J V_p) \text{----- ⑨}$$

以上より杭の先端部支持力を求めるためには、⑥式に⑧⑨式を代入し、杭セグメント各部の速度、加速度、変位、杭体内打撃応力などを計算して、これらの結果を検討して支持力を推定することになる。

(2) 計算に用いた数値と計算結果

波動方程式を解くに当って必要な定数は 杭打ち機、杭、地盤などのバネ定数や減衰定数など多数ある。分回は杭のセグメント長を $2.50m$ とし、セグメント数を $20, 18, 16, 12, 10, 8$ の6ケースすなわち杭長を6ケースに分け、杭先端が $GL - 50, -45, -40, -30, -25, -20m$ に達した状態を想定して地盤強度の差による支持力の差を検討することとした。杭先端土のバネ定数は、杭長が短い場合には杭先端付近の地盤強度が小さいので最小 100 ton/cm を与え、杭長の増大とともに最大 $4,000 \text{ ton/cm}$ まで変化させた。また杭周辺土のバネ定数は 80 ton/cm と 20 ton/cm の2通りとした。さらに土の降伏変位は 0.25 cm 、減衰係数は 20% とした。

今回の計算結果のうち、杭体内の最大圧縮応力の理論値と実測値とを対比した結果は図-7に示したとおりであり、両者の一致が比較的良好と判断された計算ケースは次のとおりである。

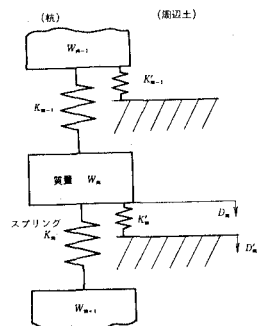


図-6 杭と土との間のモデル

杭長 計算ケース

20 m なし

30 m 9 or 10

45 m 18

50 m 23 or 24

したがって杭の先端支持力 R_u の推定値は、土の降伏変位を0.25 cmとしたのでそれぞれの場合のパネ定数に乗じて次のような結果を得た。

杭長30 m

$$R_u = 800 \frac{\text{ton}}{\text{cm}} \times$$

0.25 cm

$$= 200 \text{ ton/本}, \quad \text{杭長45 m以上} \quad R_u = 1.600 \frac{\text{ton}}{\text{cm}} \times 0.25 \text{ cm} = 400 \text{ ton/本}$$

また杭周面土のパネ定数と杭先端支持力との関係は、杭周面土のパネ定数が小さい程杭先端支持力が大きくなる傾向が認められた。

なお今まで述べてきた杭の支持力は杭先端土のパネ定数と降伏変位とを乗じて求めるものであり、したがって杭の支持力は土の降伏変位に比例していることになる。しかし一般には土の降伏変位は土のパネ定数が大きくなる程小さくなると考えられるので、杭の支持力は単に土の降伏変位と比例関係があるとは言えないことになる。

(3) 考察

波動方程式を用いた理論解析結果と打撃応力実測結果や杭頭で実測される杭貫入記録などとの比較検討結果から杭の支持力などを推定できることが分った。たゞし上述の理論解析には計算に用いる各種インプットデータの決定や解析モデル自体にも多くの問題点を残していると考えられる。すなわち

- 一般に土質工学においては、支持力を論じる場合、その変形機構（応力-歪関係）が複雑であるために剛塑性論を用い力の釣合いだけで論じているが、その変形機構に関して仮定が必要である。
- 杭と地盤との相互作用に関して、地盤は媒体であるが、杭の各セグメント（各深度）毎に一つのバネ系としてモデル化するために、その復元力特性や減衰特性などに関する諸特性値を経験的に仮定する必要がある。
- 杭先端部における開端杭の支持機構に関しては特に多くの不明点があると考えられるが、モデルは一つのパネ系として造ることになりその仮定が単純すぎる。

V. あとがき

波動方程式に関する解析は、杭と土系に対するモデルおよび各種定数の決定に多くの仮定が入っており、その解析結果の実用に当っては多くの問題点が残されているので、今後とも数多くの現場計測と理論的検討の積み重ねが必要である。

最後に本実験解析結果について発表をご許可下さいました日本石油(株)の担当諸氏に対し謝意を表します。

(参考文献) 1. E.A.L.Smith "Pile Driving Analysis by the Wave Equation" A.S.C.E. Part I. Vol. 127, 1962 P. 1146~1193, 2. 「波動方程式によるくい打撃時応力解析」渡辺明・清水定光・松本進 コンクリートジャーナル Vol. 6. No. 10 Oct. 1968

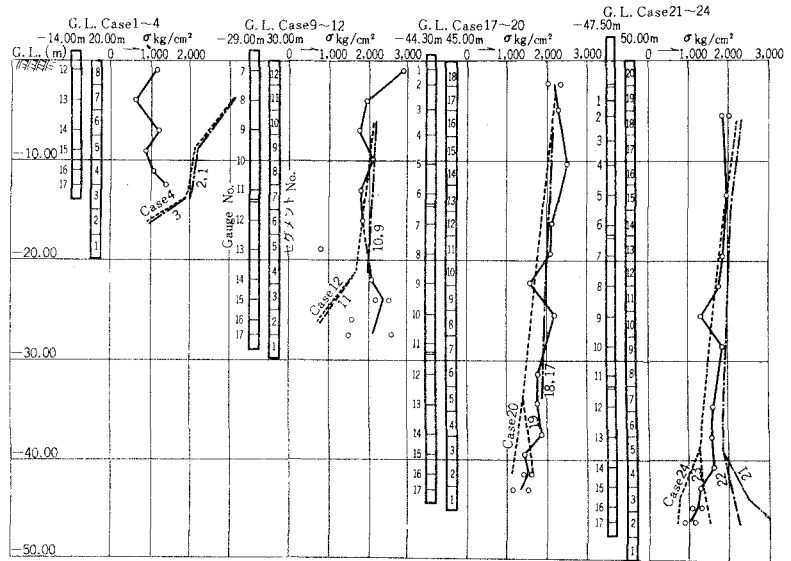


図-7 打撃応力の理論値と実測値との対比