

投稿論文(和文ノート)

**TECHNICAL
NOTES**

岩盤に定着する杭の設計法に関する研究

鍛冶壮吉¹・村野忠夫²・管原稔³・加藤一志⁴

¹正会員 白島石油備蓄(株) 建設一部(〒100 東京都千代田区内幸町2-2-3)
²正会員 (株)エコー 白島プロジェクト室(〒116 東京都荒川区南千住1-59-7)
³正会員 工修 大成建設(株) 九州支店(〒810 福岡県福岡市中央区大手門1-1-7)
⁴正会員 工修 大成建設(株) 土木設計部(〒163-06 東京都新宿区西新宿1-25-1)

本研究では、岩盤に定着する杭の側面付着強度を検討するために、室内モデル杭試験及び現地引抜試験を実施した。その結果、試験から得られた付着強度は、API等の従来の基準を参考に事前に設定した設計強度よりも大きいことが解った。さらに、杭基礎構造全体としての引抜耐力を検討する解析方法として棒～非線形せん断バネ解析を考え、現地引抜試験に対して解析した。解析の結果、解析値と試験値はよく一致し、解析方法が妥当であることが解った。

Key Words : pile, pulling test, grout, bond stress

1. はじめに

従来、岩盤上に薄い堆積層を有する海底地盤に杭式構造物が建設されることは希であった。しかし、近年では、海洋空間の利用範囲の拡大に伴い、上記条件の様な海域にも海洋施設の建設が行われるようになってきている。

白島石油備蓄基地に建設されているシーバース・配管橋もその一つであり、施工中の海象条件を考慮して、その基礎は急速施工可能なジャケット方式を採用している。打撃により杭が所用根入れ長貫入できる通常の地盤条件では、ジャケットを設置し、ジャケットレグ内に基礎杭を打設することにより安定が保たれる。当建設地点は、岩盤上の堆積層厚が平均5m程であり、堆積層のみの支持力では、波力や風荷重といった多大な水平力に抵抗するには不十分で、基礎杭を岩盤に定着する必要がある。このような場合に適用する杭の岩盤定着法のひとつとして、ピンパイル構造が考えられる。(図-1)

ピンパイル構造は、堆積層にハンマー打設した杭(以後スリーブパイルと呼ぶ)の内部を堅固な岩盤の所要深度まで削孔し、その中に杭(以後ピンパイルと呼ぶ)を建て込み、グラウトにより固定するのである。

海洋構造物の基礎杭を堅固な岩盤に定着した実績は国内では少なく、しかも、永久構造物の杭を定着するグラウトの付着強度について言及したものがなく、設計法も体系化されていない。海洋構造物の基礎杭では、陸上構造物のそれと比べ、作用する引抜力が大きい。杭先端が堅固な岩盤に定着されている場合には、押込力に対して十分な支持力を有するこ

とから、杭の根入長決定には引抜力が支配的となる。当シーバースのピンパイル設計では、類似構造に対する本四公団及びアメリカ石油協会(以下APIと略記)の基準値を参考に付着強度を設定し、引抜耐力を検討した。本研究では、ピンパイルの根入長を決定する付着強度の妥当性を室内モデル杭試験及び現地引抜試験結果より検証するとともに、その引抜耐力の評価法を提案したものである。

2. ピンパイル構造の支持機構と設計付着強度

ピンパイル構造では、スリーブパイルに作用した軸力は、ピンパイルとスリーブパイル及び岩盤間のグラウトを介してピンパイル、岩盤へと伝達する。軸力の伝達機構から考えられる引抜荷重時のピンパイル構造の破壊モードは、①スリーブパイルの破断、②スリーブパイルとピンパイル間のグラウトと鋼管の付着破壊、③ピンパイルの破断、④ピンパイルと岩盤間のグラウトと鋼管の付着破壊、⑤グラウトと岩盤の付着破壊である。

本構造物の設計では、②、④、⑤の各設計付着強度を以下の通り設定した。

1) 鋼管とグラウトの付着強度(②、④)

付着強度とその確実性を上げるため、鋼管にはシアキーを設けるものとし、本四公団の仮設物設計指針¹⁾にある鋼管とモルタルの極限付着強度(0.75MPa)の2倍の強度(1.5MPa)とし、その強度に見合うようにAPI基準に従ってシアキーの設計を行った。設計強度の確認は、室内モデル杭試験により行うものとした。

2) グラウトと岩盤の付着強度(⑤)

APIの基準値(0.14MPa)と本四公団の仮設物設計

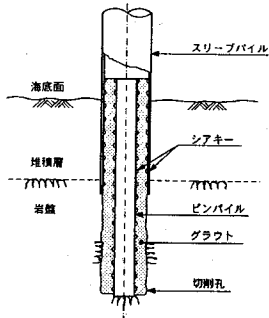


図-1 ピンパイル構造

指針の基準値 ($0.5\text{MPa}/4=0.125\text{MPa}$) のうち小さい値を許容付着強度とした。また、安全率は永久構造物であることを考慮して、本四基準の1.5倍の6とし、設計極限付着強度は 0.75MPa と設定した。その極限付着強度については、施工される岩盤の種類及び状況にかなり影響されることから、現地引抜試験を実施し、確認するものとした。

3. 室内モデル杭試験

グラウトと鋼管の付着強度を検討のため、図-2、表-1に示す試験装置及び供試体を用いモデル杭試験を実施した。シアキーとしては、6mmの溶接ビートを杭の表面に設けた。APIのシアキー設計法では、シアキー付鋼管の付着強度がグラウト強度、シアキー高さ及び間隔より決定されるため、杭径による相似率は考慮しない。計画引抜荷重は、グラウトと鋼管の設計極限付着強度 (1.5MPa) に杭のグラウト埋込み周面積を乗じ求めた値とした。

表-2に試験結果一覧表を、図-3に各杭の杭頭部の荷重～変位関係を示す。表-2及び図-3に示す様に、いずれの場合も計画引抜荷重以上載荷できた。図-3によれば、杭頭部の荷重～変位関係は、杭頭変位 0.1mm 以下の荷重の初期段階において傾きが変化してからは、その後ほぼ一定の傾きで増加している。荷重の初期段階では、埋込まれた鋼管は全長にわたりグラウトと接着し、グラウトが全体的に変形する。しかし、その接着が切れ第2段階になると、シアキーとグラウトの支圧を介して力が伝達するようになり、内部ひび割れが発生し、グラウトが部分的にせん断変形し剛性が低下するものと考えられる(図-4)。荷重の初期段階に傾きが変化した以降最大引抜荷重載荷まで傾きがほぼ一定であることから、最大荷重時でも降伏には至っておらず、本供試体は、事前に設定した設計極限付着強度以上の強度があると考えられる。したがって、シアキーを設けた場合のグラウトと鋼管の極限付着強度は、設計値の 1.5MPa 以上であると推察される。

表-1 室内試験杭仕様

試験杭名	S-11,S-12	S-21,S-22
杭断面	$\phi 216.3 \times 12.7$	$\phi 216.3 \times 12.7$
埋込長	1080	1080
シアキー ピッチ	6mm溶接ビート 50mm	6mm溶接ビート 100mm
グラウト仕様	セメントペースト、水セメント比: 45%	

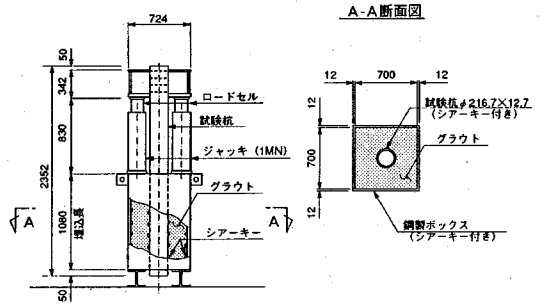


図-2 室内試験機

表-2 室内試験結果一覧表

試験杭名	計画引抜荷重 (MN)	最大引抜荷重 (MN)	平均付着強度 (MPa)	設計極限付着強度 (MPa)
S-11	1.10	1.30	1.77以上	1.50
S-12	1.10	1.20	1.64以上	1.50
S-21	1.10	1.17	1.59以上	1.50
S-22	1.10	1.18	1.61以上	1.50

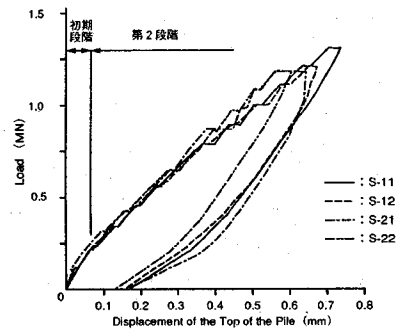


図-3 室内モデル試験杭頭部荷重変位関係

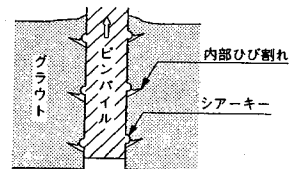


図-4 第2段階での変形状況

4. 現地引抜試験

グラウトと岩盤の付着強度を検討するために、現

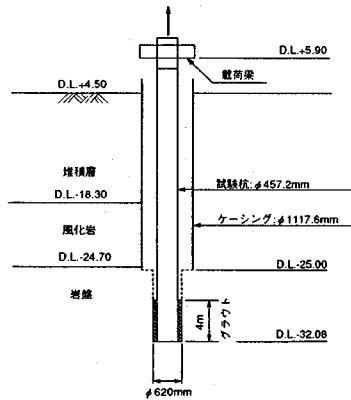


図-5 現地引抜試験状況

表-3 現地引抜試験結果一覧表

試験杭	計画引抜荷重 (MN)	最大引抜荷重 (MN)	最大杭頭変位量 (mm)	残留変位量 (mm)
NO.1	6.0	6.6	36.23	2.17
NO.2	6.0	6.0	36.65	2.61
NO.3	6.0	6.0	36.44	1.60

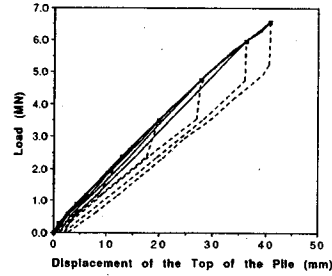


図-6 No.1試験杭頭荷重変位関係

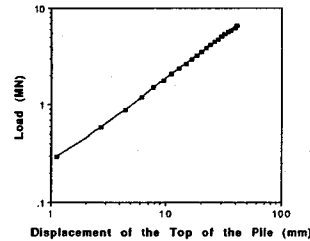


図-7 No.1試験杭LogT~LogS関係

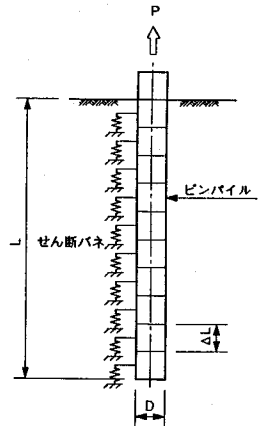


図-8 解析モデル

地引抜試験を行った。試験位置は白島埋立地とし、3本の杭に対して、図-5に示す通り試験を実施した。なお、試験位置の岩盤がシーバース建設位置と同等の弾性波速度2km/sec以上の安山岩類の中硬岩及び硬岩であることを事前ボーリングにより確認した。

計画引抜荷重は、岩盤とグラウトの設計極限付着強度 (0.75MPa) に試験杭のグラウト埋込み周面積を乗じた値とした。載荷段階は、「杭の鉛直載荷試験方法・同解説 (土質工学会)」に準じた。

表-3に試験結果一覧表を示す。図-6にNo.1試験杭の杭頭における荷重～変位関係を示す。また、図-7にNo.1試験杭におけるLogT～LogS曲線を示す。表-3及び図-6によれば、いずれの試験杭も計画引抜荷重 (6MN) 以上載荷することができ、除荷時の残留変位も1.6～2.6mmと小さい。図-6においては荷重～変位関係はほぼ直線となり、また、図-7においても荷重の増加に対して変位量の増大が急化する傾向が見られない。こうした状況から、本試験の範囲では、計画引抜荷重を載荷してもグラウトと岩盤の付着は降伏していないと考えられる。したがって、グラウトと岩盤の極限付着強度は、設計値の0.75MPa以上であると推察される。

5. 引抜耐力の評価法

以上に示したピンバイル構造のモルタルに係わる各付着強度の検討のみでは、ピンバイル構造全体としての引抜耐力は評価できない。ピンバイル構造におけるグラウトの各付着強度は、コンクリートの圧

縮破壊と同様に最大応力に達した後に強度低下が生じる。これにより、杭長が長い場合や杭剛性が小さい場合には、極限状態の付着応力分布はピーク値を持つ不等分布となる。したがって、ピンバイル構造全体としての引抜耐力を検討するにあたり杭長及び杭剛性の影響を考慮するために、図-8に示すようにピンバイル構造を棒～せん断バネでモデル化した解析を行う。

上記の解析において、グラウトに根入れした杭に作用する付着抵抗をモデル化したせん断バネ特性は、以下の通り設定するものとした。

1)バネ反力～変位関係は、付着破壊後の強度低下を考慮するため、次式に示すとおりコンクリートの塑性設計に用いる圧縮作用時の応力～歪み関係表示式のひとつであるSmith式と同様の形状とした³⁾。

$$R = x \times E_i \times \exp(-x / x_0) \quad (1)$$

ここに R: 杭単位長当りバネ反力 (MN/m)

E_i : 杭単位長当り初期バネ定数 (MN/m²)

x: 接点変位 (m)

x_0 : 最大反力時接点変位

$$= R_{max} / \{E_i \times \exp(-1)\}$$

R_{max} : 杭単位長当り最大バネ反力 (MN/m)

2)初期バネ定数 E_i は、室内モデル杭試験の結果より次式にて求めるものとする。

$$E_i = E_0 \times (f_{cu}/f_{cu})^{1/2} \times D/D_0 \quad (2)$$

ここに E_i : 杭単位長当り初期バネ定数 (MN/m²)

E_0 : 室内モデル杭試験における杭単位長当り初期バネ定数 (=3.0×10³ MN/m²)

fcu: グラウト強度 (MPa)
 fcu0: 室内モデル杭試験におけるグラウト強度 (=33 MPa)
 D: 杭径 (mm)
 D0: モデル杭の杭径 (=216.3mm)

表-4 現地試験杭No.1に対する解析結果一覧表

解析ケース	局部付着強度 (MPa)	引抜耐力 (MN)	限界変位 (mm)	平均付着強度 (MPa)
1	0.75	3.38	20.70	0.43
2	1.00	4.51	27.57	0.58
3	1.25	5.64	34.45	0.72
4	1.50	6.77	41.35	0.87

3) 杭単位長当り最大バネ反力Rmaxは、ピンパイル面の単位長当りの付着力と岩盤面の単位長当りの付着力のうち、小さい方の値を用いる。

現地引抜試験におけるNo.1試験杭に対して岩盤とグラウトの極限付着強度を変えて、上記の棒～せん断バネ解析により求めた載荷限界荷重を引抜耐力として表-4に示す。また、岩盤とモルタルの極限付着強度を1.5MPaとして求めた杭頭荷重～変位関係と試験値との比較を図-9に示す。図-9によれば、解析値と試験値がよく一致し、解析方法及びモデル杭試験から設定した解析パラメータが妥当であることを示している。また、解析のピーク部では、非線形な挙動をしていることが解る。表-4からは、試験杭では6.6MNまで載荷し耐力が確認されており、岩盤とグラウトの局部付着強度が1.5MPaあることが解る。しかし、この強度はあくまで局部的なものであるため、根入れ全長にわたって均等に強度を発揮するものでない。したがって、設計において個々の杭の引抜耐力を照査する場合には、載荷試験もしくは棒～せん断バネ解析により定めた極限耐力を根入れ部の杭表面積で除した極限平均付着強度を用いるべきである。解析から求めた現地引抜試験に対する極限平均付着強度は0.87MPaとなり、設計極限付着強度0.75MPaと比べ大きな値であることから、設計強度以上の強度があることが解る。

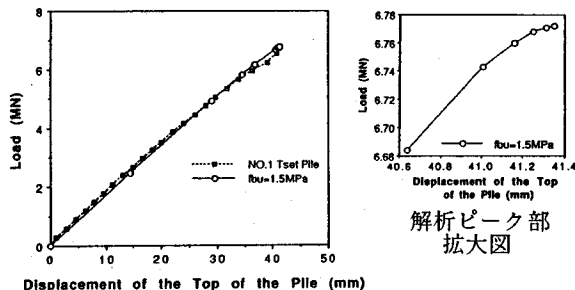


図-9 現地試験杭No.1での解析値と試験値の比較

せん断バネ解析を考え、せん断バネ特性といった解析パラメータを室内モデル杭試験結果から設定した。現地引抜試験について解析値と試験値を比較した結果、解析により実試験が再現できることが解り、提案した解析方法が適用可能と考えられる。

従来の基準を参考に設定した鋼管とグラウトの付着強度及び岩盤とグラウトの付着強度は、試験結果と比べ小さい。今後は、付着強度を精度良く設定し経済的な設計を行うとともに、解析パラメータの合理的評価をするため、極限まで載荷した試験結果の蓄積が必要である。

6. まとめ

岩盤に杭を定着する方法としてピンパイル構造を考え、その設計に用いる各設計付着強度を本四公団及びAPIの従来の基準を参考に設定したが、室内モデル杭試験及び現地引抜試験の結果から設定値以上に強度があることが解った。さらに、ピンパイル構造全体の引抜耐力を検討する目的で、杭長及び杭剛性の影響を考慮できるピンパイル構造に対する棒～

参考文献

- 1) 本州四国連絡橋公団: 仮設物設計指針, 1977.
- 2) American Petroleum Institute: Recommended Practice for Planning, Design and Constructing Fixed Offshore Platforms, 1991.
- 3) G.M. Smith & L.E. Young: Ultimate Theory in Flexure by Exponential Function, J.ACI, No.52-3, 1955.

(1995. 7. 19 受付)

STUDY OF DESIGN METHOD OF PILE ANCHORED TO BEDROCK

Sokichi KAJI, Tadao MURANO, Minoru SUGAHARA and Kazushi KATO

To study the bond strength and confinement friction at the interface between the pile and bedrock, pull-out tests were conducted both in the laboratory and in the field. It was confirmed from these tests that the bond strength and confinement friction obtained from them is larger than the design bond strength and confinement friction set beforehand in reference to the API and other standards. Furthermore, as a method of estimating the pull-out resistance of the pile, a structural analysis of a bar model with non-linear shear springs was devised and applied to the field pull-out test case. The results of the analysis showed that the analytical and experimental values agree well with each other, thus indicating the appropriateness of this analysis.