

砂地盤中の単杭の復元力特性に関する水平載荷試験

木村嘉富¹・大越盛幸¹・阪野彰¹・福井次郎¹

¹正会員 建設省 土木研究所 構造橋梁部 基礎研究室（〒305 茨城県つくば市旭1）

1. まえがき

地震時の構造物の挙動を推定する方法として動的解析手法は有効な手法である。動的解析を行うためには構造物を構成の各抵抗要素の復元力特性をモデル化する必要があり、橋脚については載荷試験を基にその復元力特性が明らかとされている。一方、基礎については動的解析のための計算手法は幾つか提案されているが、そこで用いる復元力特性については十分には検証されていないのが現状である。

ここでは、杭基礎における水平抵抗の復元力特性を明らかにするため、土槽中に作成した砂地盤に復元力特性の異なる4種類の試験杭を設置し、正負交番水平載荷試験を行った。また、同一諸元の試験杭について気中で交番曲げ試験を行い、地盤中の杭の復元力特性と比較した。さらに、地盤中の杭の載荷試験結果を解析し、各深度における水平地盤反力度～水平変位の履歴曲線を推定した。

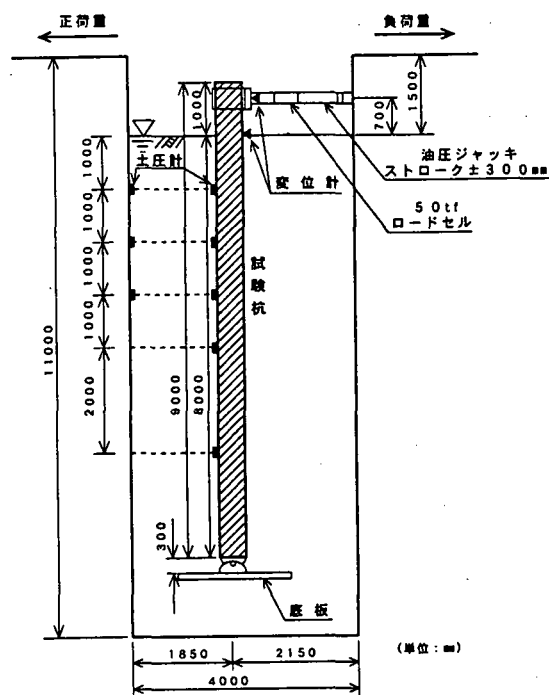


図-1 地盤中の杭の水平載荷試験

2. 試験方法

(1) 地盤中の杭の水平載荷試験

地盤中の杭の水平載荷試験の概要を図-1に示す。3 m×4 m×11 mの土槽中に作成した砂地盤に、直径30 cm、長さ9 mの試験杭を設置し交番水平載荷試験を行った。試験結果解析時の境界条件を明確にすることから、杭頭部および杭先端部についてはヒンジ構造とした。

試験ケースを表-1に示す。ケース1は場所打ち杭を模した鉄筋コンクリート杭であり、軸方向主鉄筋はD10 (SD295A) を16本とし、帯鉄筋としてD4

(SD295A) を40 mm間隔で配置した。杭体外面から軸方向主鉄筋中心までの距離は5.0 cmである。ケース2は道路橋示方書に準拠するようスパイラル鉄筋量を増加した肉厚6.0 cmのB種（有効プレストレス80 kgf/cm²）のPHC杭である。軸方向のPC鋼線はφ7 mmを12本とし、スパイラル筋としてD6 (SD295A) を50 mm間隔で配置した。ケース3からケース5

は鋼管杭である。ケース3および4の材質はSTK400とし板厚は5.8 mmとした。これは一般に用いられている鋼管杭と同程度の板厚杭径比である。ケース5は大変形領域までの地盤の抵抗特性を把握するため、強度（耐力）の大きい鋼管を用いた。

地盤材料として用いた鹿島砂の物理特性を表-2に示す。地盤作成は試験杭を建込んだ後、グラブバケットによる水中落下法にて行った。地盤作成時に密度を測定したところ平均1.51 g/cm³、相対密度19.5%であった。載荷試験中は水位を作成地盤面と同等の高さになるように保持している。

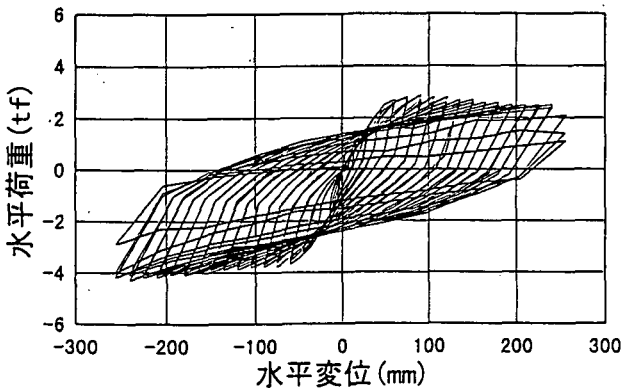
各ケースとも載荷点での水平変位を±nδ_o（ここに、δ_o=15 mm, n=1, 2, 3・・・）と変位制御による交番水平載荷試験とした。ただし、ケース4は正側のみの載荷である。各変位における繰返し回数は3回で、載荷速度は約60 mm/分である。各載荷ステップにおいて、載荷点および地盤面における杭の水平変位、杭体のひずみを測定した。試験終了後、地盤面の沈

表-1 試験ケース

ケース	杭種	杭径 (mm)	杭長 (mm)	試験方法	備 考
1	鉄筋コンクリート杭	300	9,000	正負交番	設計基準強度 210kgf/cm ²
2	PHC杭				設計基準強度 800kgf/cm ² B種(有効アレスト280kgf/cm ²)
3	鋼管杭(薄肉)	318.5		一方向	板厚 5.8mm, STK400
4					
5				鋼管杭(厚肉)	正負交番

表-2 地盤材料の物理特性

土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)	礫分 (%)	砂分 (%)	シルト分 (%)	粘土分 (%)	均等係数 U_c	50%粒径 D_{50} (mm)	最大乾燥密度 ρ_{max} (g/cm ³)	最大乾燥密度 ρ_{max} (g/cm ³)
2.644	1.8	97.4	0.8	0	2.66	0.67	1.789	1.459



(a) 地盤中の杭の水平載荷試験

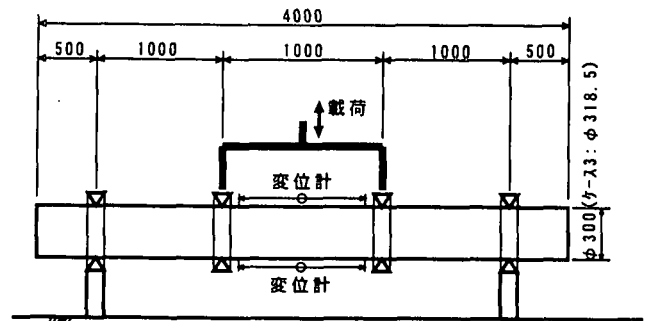
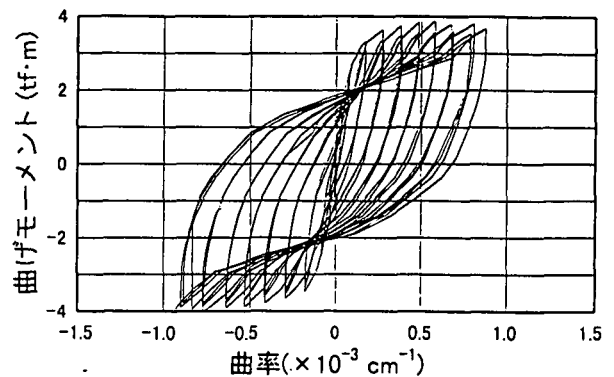


図-2 気中の杭の曲げ試験



(b) 気中の杭の曲げ試験

図-3 載荷試験における履歴曲線 (ケース1: 鉄筋コンクリート杭)

下量を測定し、さらに地盤撤去中に杭体の損傷状況について観察を行った。

(2) 気中の杭の曲げ試験

杭体の復元力特性を確認するため、上記試験ケース1～3の試験杭と同一諸元の杭について気中曲げ試験を行った。その概要を図-2に示す。試験方法としては、水平に設置した杭の両端付近を単純支持し、その中央付近2点に鉛直荷重を正負交番載荷した。荷重は地盤中の杭の試験と同様に変位制御方式とした。杭体の曲率は、載荷点間における杭体の上下縁で測定した軸方向変位から求めた。

3. 試験結果

図-3～7に、地盤中の杭の水平載荷試験による水平荷重～水平変位の履歴曲線、および、気中の杭の曲げ試験により得られた曲げモーメント～曲率の履歴曲線をそれぞれ示す。

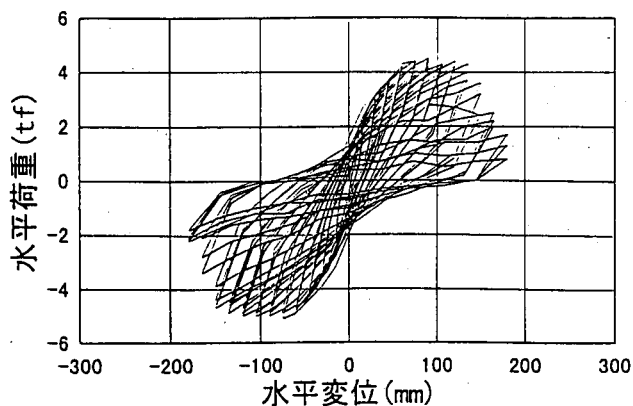
地盤中の杭の水平載荷試験における履歴曲線および杭体の損傷状況は次のとおりである。

場所打ち杭を模したケース1は、水平変位90mmで

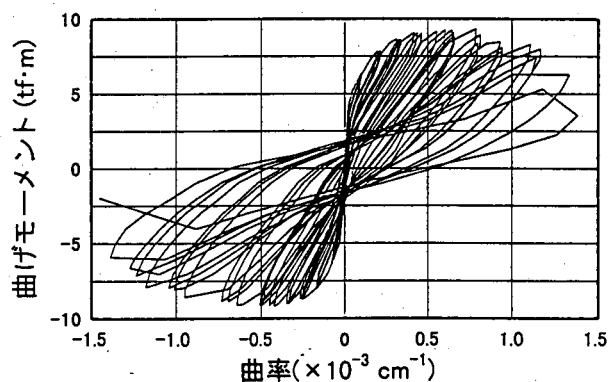
最大水平荷重となった。水平変位240mmまでは急激な荷重低下は認められず、その後各サイクルごとの荷重低下が大きくなり最終的に水平荷重は1.1tfまで低下している。試験終了後地盤を掘削し杭体の損傷状況を観察したところ、地盤面付近から1.8m付近にわたってクラックが多数発生していた。地盤面より1.0mの位置においてかぶりコンクリートに浮きが生じており、かぶりコンクリートを除去すると軸方向鉄筋の破断が確認できた。

PHC杭を用いたケース2は、水平変位90mmで最大水平荷重に達し、水平変位135mmまでほぼその値を保持している。その後各サイクルごとに荷重低下が徐々に大きくなり水平変位180mmで荷重は0.8tfとなった。杭体には地盤面より0.7mから2.0m付近にかけてクラックが発生しており、約1.35mの箇所においてPC鋼線が破断していた。

鋼管杭を用いたケース3では水平変位90mm(6δ_o)において杭体の最大応力度が降伏点に達した後、165mmにおいて水平荷重が最大値に達する。その後荷重が低下しはじめ、水平変位240mmで水平荷重が0.6tfとなった。試験後の観察では地盤面より1.55mの深度において鋼管が破断しており、その断面は載荷方向を短辺とした長方形の形状となつて

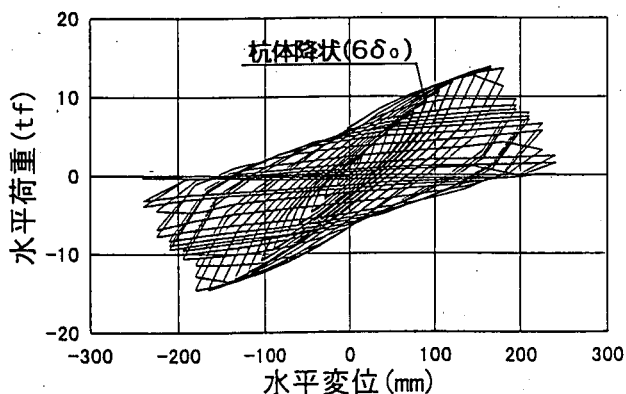


(a) 地盤中の杭の水平荷重試験

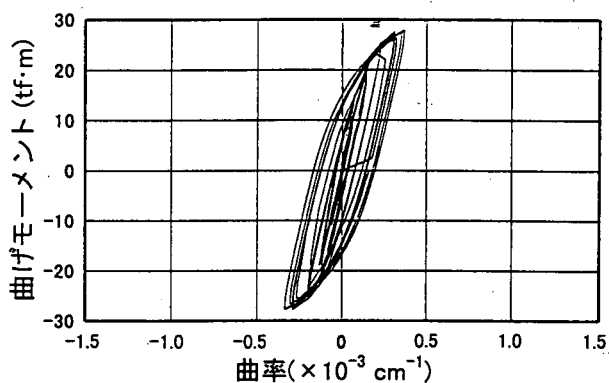


(b) 気中の杭の曲げ試験

図-4 荷重試験における履歴曲線 (ケース2: PHC杭)



(a) 地盤中の杭の水平荷重試験



(b) 気中の杭の曲げ試験

図-5 荷重試験における履歴曲線 (ケース3: 鋼管杭)

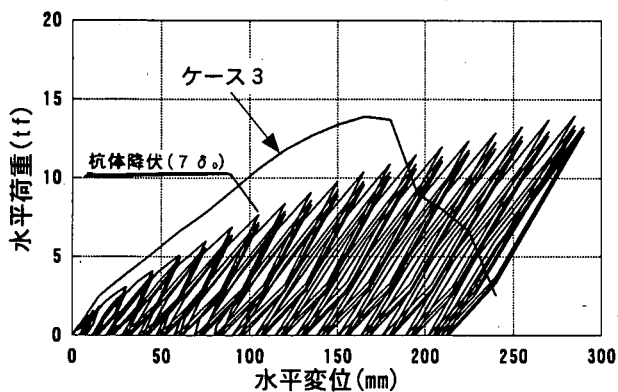


図-6 地盤中の杭の水平荷重試験における履歴曲線 (ケース4: 鋼管杭、一方向荷重)

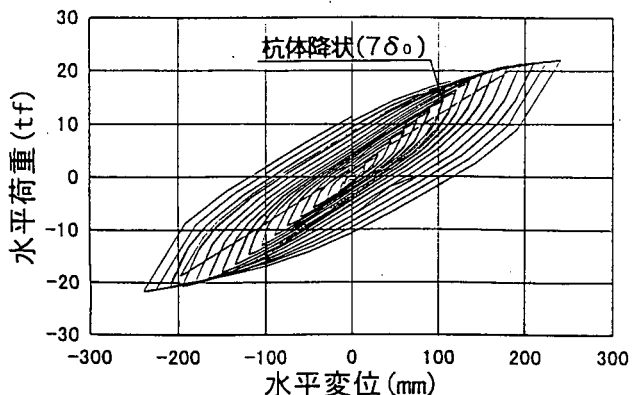


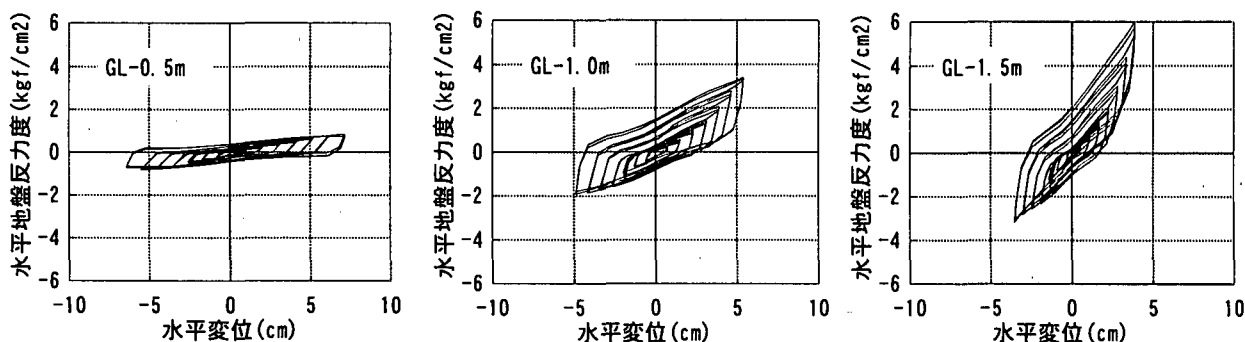
図-7 地盤中の杭の水平荷重試験における履歴曲線 (ケース5: 厚肉鋼管杭)

いた。

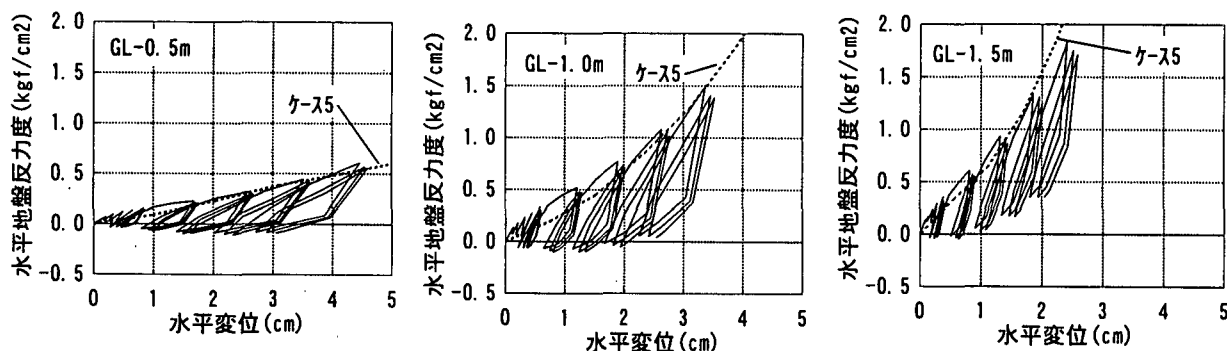
ケース3と同一諸元の鋼管杭を用いたケース4では水平変位105mm (7δo) で杭体が降伏するが、試験を行った285mmまで水平荷重は増加している。試験後の杭体の損傷は地盤面から2.5m付近を中心若干屈曲している程度であり、座屈などは認められなかった。

厚肉の鋼管杭を用いたケース5では、水平変位が105mm (7δo) で杭体が降伏し曲線の勾配が徐々に低下するものの、履歴曲線の形状は最大の水平変位240mmまで保たれている。試験後の杭体の損傷は地盤面から2.5m付近を中心若干屈曲している程度であった。

各杭体の気中曲げ試験の履歴曲線は、それぞれ鉄筋コンクリート部材、プレストレストコンクリート部材および鋼材としての特徴がよく表れたものとなっている。なお、図-5の鋼管杭においては、荷重の途中段階から1つの荷重点付近で杭体が座屈したため、履歴曲線はそれ以前のものを示している。また、図-3では試験装置の制約から杭体の耐力が低下する領域までの履歴曲線は得られていない。



(a) ケース 5 (厚肉鋼管杭、正負交番載荷)



(b) ケース 4 (鋼管杭、一方向載荷)

図-8 水平地盤反力度～水平変位履歴曲線

4. 水平地盤反力度の復元力特性

地盤中の杭の載荷試験のうち、鋼管杭を用いたケース3～5について計測した杭体の曲げひずみを解析し、杭体の水平変位および水平地盤反力度分布曲線を推定した。このとき杭体の曲げモーメントと曲率の関係が明確であればひずみゲージの有効範囲まで解析可能であるが、ここでは線形解析が可能な鋼管の縁応力度が降伏応力に達するまでを対象とした。

図-8に、ケース5およびケース4における水平地盤反力度～水平変位履歴曲線を示す。(a)に示すケース5の履歴曲線は、エネルギー吸収に優れた紡錘型曲線を示している。今回解析した範囲では、同一水平変位において繰返し載荷による地盤反力度の低下は認められず、逆に若干ではあるが増加している。また水平変位が大きくなると骨格曲線の勾配が増加している。この理由として、試験地盤が相対密度が19.5%とゆる詰めの砂地盤であったため、繰返し載荷により地盤が締め固められたものと考えられる。このことは試験後のコーン貫入値が増加したことからも伺える。各深度における履歴曲線を比較すると、深度が深くなるにしたがってその勾配が大きくなっており、これは地盤の変形係数の拘束圧依存性によるものと考えられる。以上の傾向は、ケー

ス3の場合についても同様であった。

図-8 (b) は一方向載荷により得られたケース4の履歴曲線を示している。(a)と比較すると、一方向載荷のため1/4部分のみしか得られていないが、その形状はよく似たものとなっている。また、同図中比較のためにケース5の骨格曲線を破線で示しているが、ほぼ一致している。水平荷重～水平変位の履歴曲線は図-6に示したように一方向載荷と交番載荷により大きく異なっていたが、水平地盤反力度～水平変位の履歴曲線についてはよく似た形状となっている。このことは、これまで多数行われている実杭における一方向の水平載荷試験結果を解析することにより、水平地盤反力度の復元力特性を推定できる可能性を示していると言える。

5. あとがき

砂地盤中の杭の水平載荷試験および気中の杭の曲げ試験を行い、各種の杭の復元力特性を把握した。また、水平地盤反力度～水平変位の履歴曲線を推定した。

今回行った解析は、杭体の曲げモーメント～曲率関係が線形範囲のみを対象としたが、今後は、杭体の曲げ剛性の非線形性を評価して大変形領域における水平地盤反力度～水平変位関係を把握したい。