

高レベル地震動履歴を受けた鋼管杭の 圧縮耐力について

松田 隆¹・秋山 宏²・小林 真³

¹正会員 工博 大林組技術研究所 土木第五研究室 (〒204-0011 清瀬市下清戸4-640)

²工博 日本大学総合科学研究所理工学研究科 (〒101-8308 千代田区神田駿河台1-8-14)

³正会員 工修 発電設備技術検査協会検査事業本部技術部 (〒107-0052 港区赤坂1-5-11)

鋼管杭が高レベル地震動により塑性域に達する断面力履歴を水平交番載荷試験にて再現し、さらに杭体塑性化後の耐力を把握するための鉛直載荷試験を実施した。交番載荷試験から、中詰めがあることにより、降伏荷重及び最大荷重が若干高くなり、荷重～変位曲線において最大耐力に達した後の荷重低下勾配が緩やかになること、中詰めがない場合で降伏変位の5.4倍の変形能を、中詰めがある場合で同7.8倍であることがわかった。鉛直載荷試験から、塑性変形後の圧縮耐力は、鋼管に発生した局部座屈の膨らみ高さ又は鋼管の軸方向変位に反比例し、中詰めがない場合でも常時荷重の2.7倍におよぶ十分な耐力を有することがわかった。

Key Words: Steel pipe pile, strong earthquake motion, alternating loading test, vertical loading test, plasticity

1. はじめに

高レベル地震動が杭基礎構造物に作用した場合、杭頭部のみならず、地盤ひずみが大きくなる層境界部での損傷が予想される。このとき、上部構造物あるいは周辺の構造物に与える影響として、地震荷重作用時の塑性変形能と、損傷を受けた後の杭基礎の保有耐力を把握しておく必要がある。

兵庫県南部地震での杭基礎構造物の被害を受けて、杭体の塑性変形能に関する検討は多く行われてきたが、地上式LNGタンクなどの重要構造物の基礎に用いられるような大口徑鋼管杭の軸力作用時における水平荷重～変位関係を試験的に求められた例はほとんどない。また、繰り返し荷重により塑性履歴を受けた杭の耐荷性能を試験的に求めた例も少ない。そこで、実大規模の杭としてφ0.7mの鋼管杭を用いて、常時荷重に相当する一定軸力を作用させた状態での水平交番載荷試験を実施することで杭体を塑性化させ、繰り返し変形特性あるいは塑性率を検討した。さらに、一旦塑性化した杭が保有する軸方向耐力を確認することを目的に、塑性履歴を受けた杭体の鉛直載荷試験を実施した。

試験パラメータは、杭体の中詰めの有無と塑性率

である。このとき、中詰めのある場合は杭頭部すなわち基礎スラブとの接合部を模擬したもので、中詰めのない場合は、地層境界部にある一般部を模擬した。塑性率に関しては、M-φ曲線を得ることで、降伏時の回転変位の3倍あるいは5倍の変位を目標に繰り返し水平変位を与えた。

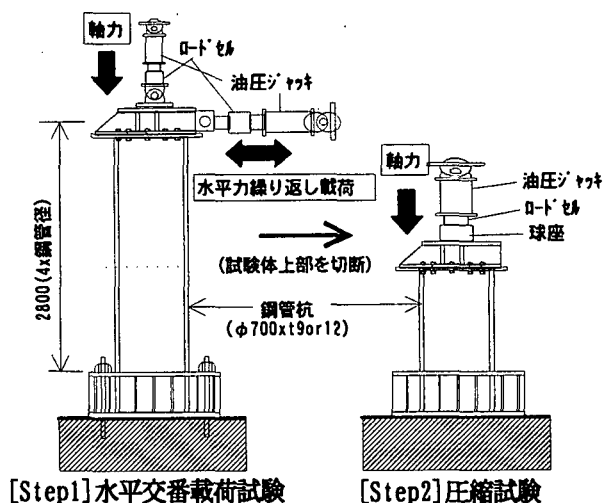


図-1 試験概要

2. 試験方法と試験ケース

試験の第一ステップは水平交番試験である(図-1(Step-1)). まず, 試験体に一定軸力(=降伏軸力×0.3)を載荷し, この荷重を保持した状態で所定の載荷点に正負の繰り返し水平荷重を目標水平変位($n \cdot \delta y$)に達するまで載荷した. このとき, 杭基部圧縮側の鋼管が降伏(素材の引張試験より求めた降伏ひずみを参照)する時点での水平変位を降伏変位 δy として, δy の整数 n 倍の変位を片振幅とした両振り交番載荷で漸次振幅を増加させた.

各振幅における繰り返し回数は3回である. 最大水平変位は, 最大荷重に達しない $n=3$ と最大荷重を越える $n=5$ とした.

試験体には実物大の鋼管杭(外径 $D=0.7\text{m}$, $t=12\text{mm}$, SKK400スパイラル鋼管)を使用した. 交番載荷試験での試験体長さは $4D=2.8\text{m}$ とした. 試験体には, 試験体基部での局部座屈の損傷が顕著になると考えられるため, 鋼管上端にプレートを取り付けた. 中詰めコンクリート(圧縮強度 23.5kN/mm)の長さは外径 D と同じ 70cm にした.

試験の第二ステップは交番載荷試験で損傷を受けた試験体を用いた鉛直載荷試験である(図-1(Step-2)). 圧縮試験体は上部を切り離し, 長さ $1.5D$ の試験体としたが, このとき, 水平方向の残留変位が強制的に 0 となるように水平力を加えて形状を整えた. 鉛直載荷試験には, 10000kN 級の圧縮試験機を用い, 交番載荷試験での載荷軸力値まで荷重制御で行い, それ以後, 変位制御とした.

試験ケースを表-1に示すが, Case1は損傷のない杭の鉛直載荷試験であり, 耐荷性能の基準とした.

表-1 試験ケース

ケース	コンクリート中詰め	目標最大水平変位
Case 1	なし	損傷なし
Case 2	なし	$3 \delta y$
Case 3	なし	$5 \delta y$
Case 4	あり	$3 \delta y$
Case 5	あり	$5 \delta y$

3. 交番試験試験

(1) 試験状況

中詰めのないCase3の場合(図-2), 水平荷重と載荷点変位の関係は紡錘型形状であり, $4 \delta y$ 付近で正負両方向ともに最大荷重に達し, $5 \delta y$ で載荷サイクルの増加に伴い荷重が徐々に低下した. 中詰めのあるCase5の場合(図-3), $5 \delta y$ でも最大荷重に達することなく, また, 載荷サイクルの増加に伴う荷重の低

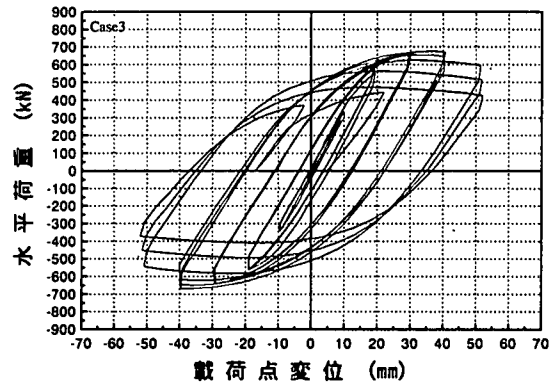


図-2 荷重～載荷点変位(Case3)

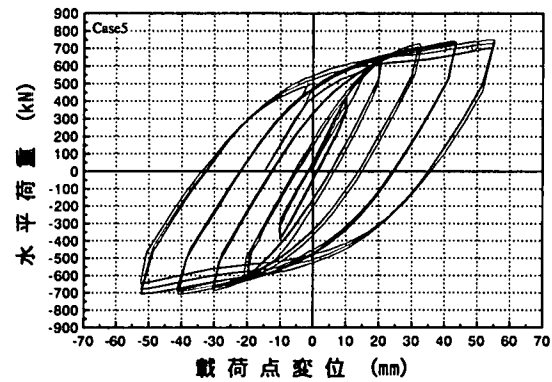


図-3 荷重～載荷点変位(Case5)

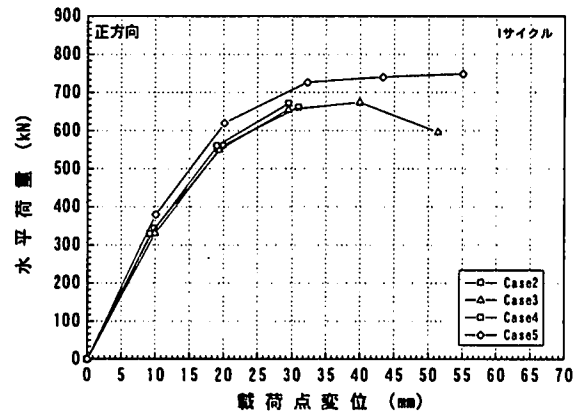


図-4 荷重～変位包絡線(Case2～Case5)

下もほとんどみられない. 図-4に1サイクル目の荷重変位関係の包絡線を示す. 中詰めを行なったCase 5は, $3 \delta y$ を越えてから, 同一変位(変位約 30mm)での中詰めのないCase2, 3の荷重を上回る. これは, 鋼管とコンクリート間の摩擦力やコンクリートが鋼管の変形を拘束し局部座屈の発生を抑制する効果と考えられる.

(2) 試験結果

載荷サイクルの増加に伴う鉛直方向のひずみとなる鋼管長さ変化を図-5に示す. 同図から, $3 \delta y$ 載荷後においてサイクル数に比例して変形量が増加することがわかる. Case3, 5では, $4 \delta y$ から軸方向変位は急激に増加した. 実験状況の観察から, $4 \delta y$ 付近

から図-6に示す局部座屈の発生が確認された。Case2, 4では、目視による局部座屈の発生は確認できなかったが、計測データから約2mmの膨らみがあった。Case3, 5では最大荷重に達する4 δy から試験体基部で象足座屈が観察された。荷重方向の圧縮縁及び引張縁では、試験後の試験体基部から100~110mm、荷重直角方向では80~100mmの位置で局部座屈のピークが発生した。

中詰めのあるCase5はCase3に比べ鉛直変位の増加が少ない。4 δy 付近からの鉛直変位の増加は、局部座屈膨らみの増加を示しているとする、同一変位の繰り返し荷重を行なった場合、中詰めを行なうことにより局部座屈の膨らみを低減できることを示し

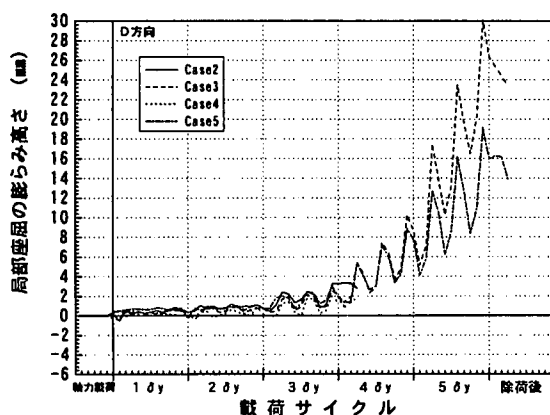


図-5 荷重～軸方向変位関係

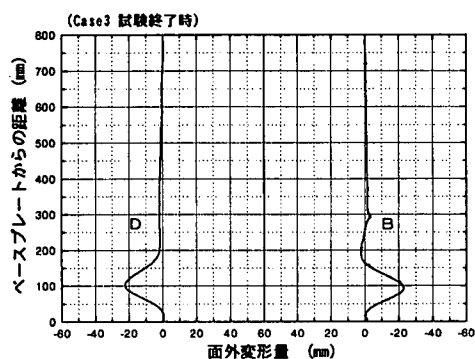


図-6 局部座屈膨らみ形状

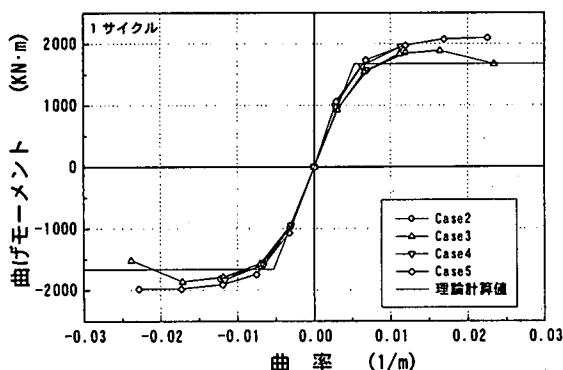


図-7 曲げモーメント～曲率関係

ている。

基部から1Dの位置に取り付けた変位計の出力より求めたM- ϕ 関係を図-7に示す。1 δy までの荷重では実験結果と理論値が一致している。中詰めを行った場合、5 δy でも全塑性モーメントを保持した。降伏時の曲率 ϕ_y に対して、全塑性モーメントが保持されている曲率は、Case3で5.4 ϕ_y (4 δy 時)、Case5で7.8 ϕ_y (5 δy 時)となった。

4. 鉛直荷重試験

(1) 試験状況

交番荷重試験を行わなかった損傷のない杭(Case1, 図-8)が比較の基準となる。

Case1では、約6500kNで軸方向において降伏ひずみに達し、円周方向ひずみは約7000kNで降伏ひずみに達した。最大荷重は8642kNであり、このときの鉛直変位は12.4mmに達した。荷重開始から鋼管表面ひずみが降伏ひずみに達する荷重付近までは、試験体中央部が膨らむ「たる」状の変形が観察された。その後、最大荷重に達する前後では、鋼管上端部及び下端部において局部座屈による5mm程度の膨らみが観察された。最大荷重以降の鉛直変位の増加により、下端部の局部座屈の進展が顕著となり荷重が徐々に低下し、荷重点の鉛直変位が80mmで終了した。

交番荷重試験で3 δy まで荷重を行なったCase2, 4の初期勾配は、Case1の初期勾配とほぼ同じである。5 δy まで荷重を行なったCase3, 5と比較すると、中詰めを行なったCase5の方が初期勾配は大きい。Case1, 2, 4は、最大荷重に達した直後に徐々に荷重が低下しているが、Case3, 5は最大荷重に達した直後に大きく荷重が低下した。

(2) 試験結果

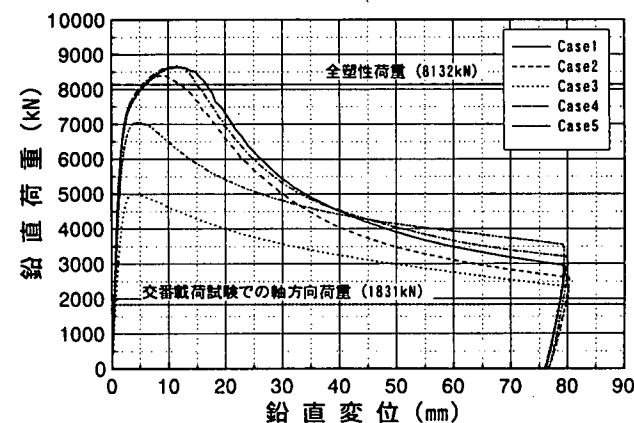


図-8 鉛直荷重～鉛直変位関係

表-2 最大荷重

試験 ケース	Pmax (kN)	長期荷重比 Pmax/1831	全塑性荷重比 Pmax/8132
Case1	8642	4.72	1.063
Case2	8400	4.59	1.033
Case3	4994	2.73	0.614
Case4	8668	4.73	1.066
Case5	7059	3.86	0.868

全断面降伏荷重計算値(=断面積×降伏応力)及び長期荷重(軸力比0.3相当)と試験結果の比較を表-2に示す。すべてのケースで長期荷重(1831kN)の2.73～4.59倍の鉛直方向の耐力を有している。このことは、塑性履歴を受けたとしても長期安定性における鉛直保有耐力は確保されていることになる。さらに、Case1は、全断面降伏荷重計算値を6%程度上回る耐力を有し、Case2、4の最大耐力も全断面降伏荷重計算値を上回り、損傷を受けていない鋼管を用いたCase1とほぼ同等の耐力を有していた。これは、最大荷重に達する前に局部座屈が発生するが、ひずみ硬化の影響により全断面降伏荷重計算値よりも若干高い耐力となったと考えられる。5倍の塑性率に達したCase3においても全断面降伏荷重の61%の残留軸方向耐力を有し、Case5は全断面降伏荷重計算値の87%の耐力を保有することが分かった。

図-17に各試験体の試験後に測定された試験体基部の4方向に発生した最大膨らみ高さの平均値と残留耐力の関係を示す。最大変位 $3\delta y$ の繰り返し載荷を受けた場合の局部座屈の膨らみ高さは約1mmであり、この時の耐力は繰り返し荷重等の損傷を受けていない場合とほぼ同等の耐力を有することになる。また、中詰めがなく $5\delta y$ の繰り返し載荷を作用させた場合、局部座屈の膨らみ高さは約20mmであり、それでも損傷を受けていない鋼管の60%近い耐力を

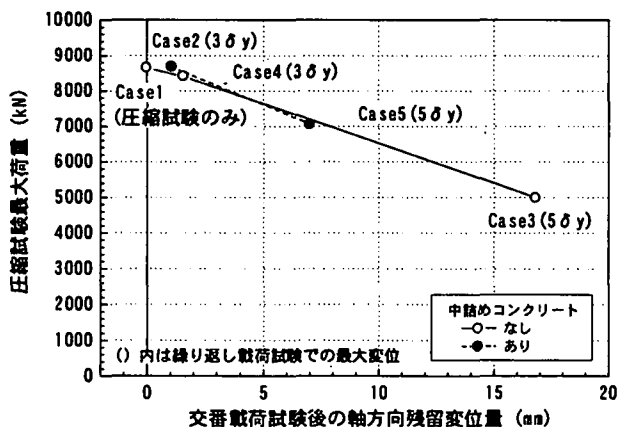


図-9 最大荷重と残留軸方向変位量との関係

有していた。中詰りを有する場合においては、 $5\delta y$ の繰り返し載荷を受けても局部座屈の膨らみ高さは約8mm程度と小さく押さえられ、圧縮耐力は無損傷鋼管杭の80%程度の耐力を有していた。これらの関係から、同様の載荷方法にて膨らみ高さが0～20mm程度発生した鋼管杭の残留圧縮耐力の推定は可能である。

このように、残留耐力は局部座屈高さに反比例して小さくなる傾向を示す。従って、繰り返し載荷により損傷を受けた鋼管の残留軸方向耐力は、その載荷荷重に関わらず、ほぼ局部座屈の膨らみ高さに反比例することが明らかになった。

5. まとめ

実物大の鋼管杭の交番載荷試験及び鉛直載荷試験から以下のことが明らかになった。

- ・コンクリート中詰めの有無にかかわらず、 $4\delta y$ において局部座屈が発生した後、最大荷重に達し、 $5\delta y$ にて荷重が低下した。
- ・中詰めがあることにより、降伏荷重及び最大荷重が若干高くなり、荷重～変位曲線において最大耐力に達した後の荷重低下勾配が緩やかになる。さらに、水平方向の同一載荷点変位において、局部座屈の膨らみ高さ及び軸方向ひずみが小さくなる。
- ・ $M-\phi$ 関係から、降伏時の曲率 ϕ_y に対しての全塑性モーメントが保持されている曲率は、中詰めのない場合で $5.4\phi_y$ 、中詰めのある場合で $7.8\phi_y$ となった。
- ・交番載荷試験後の鋼管の圧縮耐力は、鋼管に発生した局部座屈の膨らみ高さ又は鋼管の軸方向変位に反比例する。
- ・中詰めがなく $5\delta y$ の繰り返し載荷を受けた場合の局部座屈の膨らみ高さは約20mmであったが、長期荷重の2.7倍におよぶ十分な耐力を有していた。
- ・中詰りを有する場合において $5\delta y$ の繰り返し載荷を受けても局部座屈の膨らみ高さは約8mmに押さえられるため、長期荷重に対し4.8倍もの耐力を有し、繰り返し荷重を受けていない鋼管杭の1割程度の耐力低下しか生じなかった。

謝辞：この試験は新日本製鉄(株)鉄鋼研究所で実施された。また、本研究は(財)発電設備技術検査協会が国の委託を受けて実施した「発電設備耐震信頼性実証試験」のうち、LNG地上式タンクの耐震実証試験の一環として実施したものである。ここに記して、関係者各位に謝意を表する。