

正負交番繰り返し荷重を受ける斜め組杭式栈橋の破壊過程

Failure process of open piled wharf with coupled raking piles subjected to reversed cyclic loads

築地健太郎*, 井上 譲**, 岩波光保***, 横田 弘****

Kentaro Tsuji, Yuzuru Inoue, Mitsuyasu Iwanami, Hiroshi Yokota

* 工修, 独立行政法人港湾空港技術研究所 構造強度研究室 研修生 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)

(若築建設株式会社 技術本部技術研究所)

** 工修, 若築建設株式会社 技術本部設計部 (〒153-0064 東京都目黒区下目黒 2-23-18)

*** 工博, 独立行政法人港湾空港技術研究所 構造強度研究室 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)

**** 工博, 独立行政法人港湾空港技術研究所 構造強度研究室長 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)

This paper presents the structural behavior of an open piled wharf with coupled raking piles subjected to reversed cyclic loads. Experimental test was undertaken for three scaled wharf models to investigate load carrying capacity, ductility, and the process of overall failure. The raking piles carried applied loads by axial forces at first. Then flexural moments became dominant after the raking piles lost their capacities to carry axial forces. The rotational movements at the joint of the compressive piles and deck became large when cracks occurred in the deck. The curvature at the head of raking piles was larger than that of vertical piles because the axial force was dominant in the raking piles.

Key Words: open piled wharf with coupled raking piles, reversed cyclic loading test, failure process

キーワード: 斜め組杭式栈橋, 正負交番繰り返し載荷実験, 破壊過程

1. まえがき

鋼管杭式栈橋は我が国の係留施設において代表的な構造形式であり, 一般的に耐震性に優れているとされている. その構造形式は, 直杭式と斜め組杭式に大別することができ, それぞれで水平荷重に対する抵抗機構が異なる. すなわち, 直杭式は曲げモーメントが, 斜め組杭式は軸力がそれぞれ卓越する.

直杭式栈橋構造については, 竹鼻ら¹⁾, 横田ら²⁾によって地震時挙動に関する実験および解析や耐震性能照査に関する研究³⁾などが行われ, その研究成果として提案された保有耐力法に基づく耐震性能照査手法が, 現行の「港湾の施設の技術上の基準・同解説(平成11年4月)⁴⁾」において採用されている. しかしながら, 斜め組杭式栈橋では十分な検討がされておらず, 従前の震度法による許容応力度設計が適用されている. そこで, 斜め組杭式栈橋についても直杭式栈橋と同様の耐震設計手法の確立が必要とされている.

斜め組杭式栈橋の地震時挙動を把握するため, 濱田ら⁵⁾は模型振動実験を行い, その振動特性は基盤からの入力が支配的であり, 直杭式栈橋とは異なることを示している. さらに, 横田ら⁶⁾は斜め組杭式栈橋の地震応答特性を解析によって検討し, 保有耐力法に基づく耐震性能照査手法の導入可能性を示している. しかしながら, 栈橋構造全体が崩壊へと至るまでの破壊過程については, 未だ解明されて

いないのが現状である. そこで本研究では, その地震時挙動および崩壊へと至る破壊過程を明らかにするため, 斜め組杭式栈橋モデル試験体の正負交番載荷実験を行った.

2. 載荷実験の概要

2.1 実験の概要

図-1に示す斜め組杭式栈橋モデル試験体を対象として正負交番載荷実験を行った. この実験結果から, 斜め組杭式栈橋の終局状態に至る損傷イベントの発生状況, 鋼管杭および上部工の挙動を明らかにし, 上部工と杭の接合部の回転変形挙動にも着目して, 水平荷重に対する抵抗機構について検討を行った.

2.2 試験体の概要

現行の斜め組杭式栈橋の設計法では, 栈橋に作用する地震力, 防衛工反力, 牽引力等の水平荷重は, 斜め組杭がすべて分担し, 直杭は水平荷重を分担しないものと仮定している. そこで, 本実験では, 地震力によって斜め組杭式栈橋が崩壊する場合を想定し, 使用する試験体の構造は, 水平荷重を受け持つ斜め組杭1組と, その両側に1本ずつの直杭を配置した左右対称構造とした. 使用した試験体の形状および寸法を図-1に示す. 試験体は一般的な栈橋の約1/6の縮尺モデルとなっている.

斜め組杭式栈橋モデルの載荷実験を行うにあたり, 構造

全体が崩壊に至るまでの上部工および鋼管杭の塑性変形性能、上部工と杭の接合部の回転変形挙動を把握するため、杭下端埋込部と基部コンクリートとの定着方法が異なる3ケースの試験体について正負交番載荷実験を行った。表1に各試験体の杭埋込部と基部コンクリートの定着方法を示し、各基部の定着状況を図-2に示す。このように、基部における斜杭の結合条件を変えることで、引抜きに対する抵抗力を変化させた。

杭頭部の結合処理は実際の栈橋で一般的に行われている方法を採用し、3 ケースとも鋼管に溶接した鋼板(以下、プレートと呼ぶ)に鉄筋を溶接する方法とした。RC 上部工の配筋は実物の方法をできる限り踏襲した。RC 上部工の配筋状況を図-3 に示す。

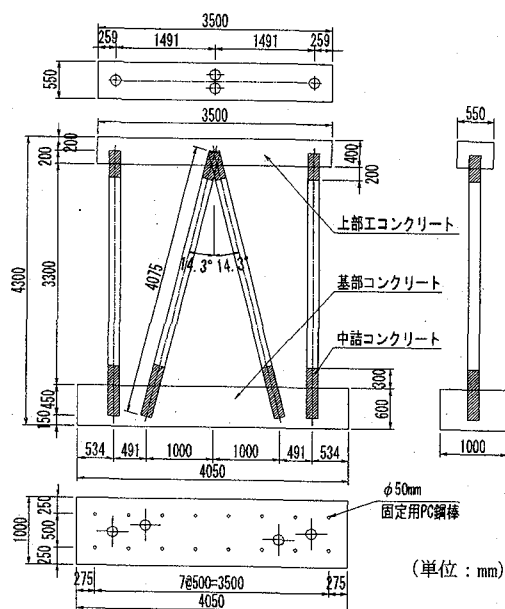
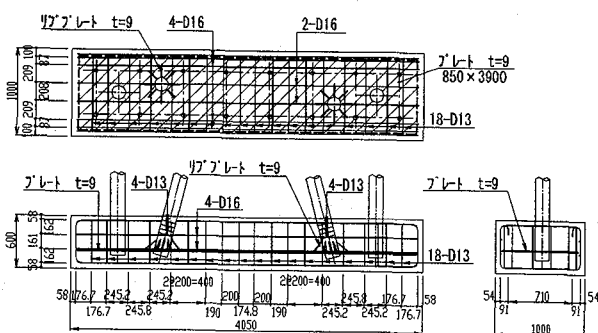


図-1 試験体の一般構造

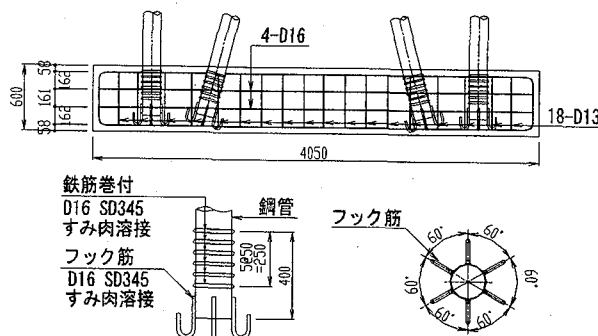
表-1 杭埋込部と基部コンクリートの定着方法

試験体 ケース	試験体 タイプ	杭埋込部と基部コンクリート の定着方法
CASE1	プレート 定着タイプ (引抜きをでき るだけ防ぐ)	杭埋込部の下端にプレートを 溶接し、杭端を剛結させた。斜 杭埋込部はリブプレートと巻 き鉄筋(4@D13)を溶接して補 強した。
CASE2	曲げフック タイプ (大きな荷重下 で引抜きを生 じさせる)	杭埋込部に巻き鉄筋を必要本 数分(6@D16)溶接し、杭下端 部には鉄筋フック(D16)を 6 本溶 接し、基部コンクリートに定着 させた。
CASE3	スタッドジベ ルタイプ (同上)	杭埋込部にスタッドジベルを 必要本数分(24 本)溶接して基 部コンクリートに定着させた。

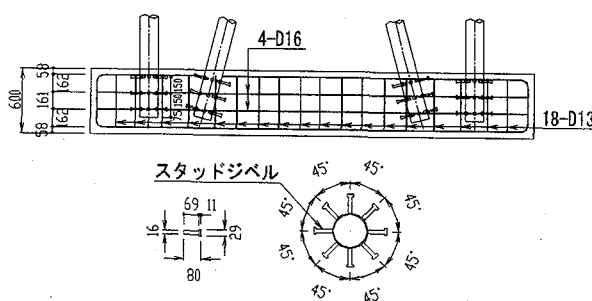
鋼管はφ165.2mm×t4.5mm (STK400)を使用し、上部工コンクリートとの接合面から 200mm、基部コンクリートとの接合面から 300mm の位置まで中詰コンクリートを充



(a) CASE1 プレート定着タイプ



(b) CASE2 曲げフックタイプ



(c) CASE3 スタッドジベルタイプ

図-2 基部の定着状況

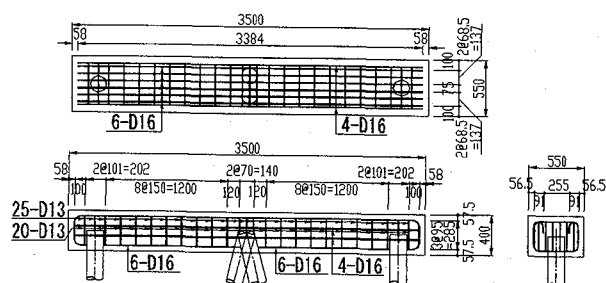


図-3 RC 上部工の配筋状況

填し補強を行った。上部工、基部コンクリートおよび中詰コンクリートはそれぞれ同じ仕様とした。コンクリートの配合を表-2に、強度試験結果を表-3に示し、鋼材（鋼管、異形鉄筋、スタッドジベル）の寸法および強度試験結果を表-4に示す。

表-2 コンクリートの配合

呼び強度 (N/mm ²)	スランプ (cm)	粗骨材の 最大寸法 (mm)	単位量(kg/m ³)				
			水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
24	12	20	162	292	795	1056	2.92
水セメント比 55.5%			空気量 4.5%				

※使用材料

- ・セメント：早強ポルトランドセメント
- ・細骨材：山砂（粗粒率2.50，表乾比重2.58）
- ・粗骨材：碎石（実積率62.0，表乾比重2.70）
- ・混和剤：AE減水剤（標準型Ⅰ種）

表-3 コンクリート強度試験結果

	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	材齢 (日)
CASE1	43.0	3.14	90
CASE2	40.9	2.82	99
CASE3	42.7	2.92	111

表-4 鋼材の強度試験結果

種類	鋼種	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)
鋼管 φ165.2mm, t4.5mm	STK400	400	469	33
異形鉄筋 D13	SD345	375	533	26
異形鉄筋 D16	SD345	406	570	30
スタッドジベル d16mm, L80mm	SS400	324	471	34

2.3 実験方法

(1) 試験体の配置

載荷実験は試験体を図-4に示すように反力床上に水平に設置し、基部コンクリートをPC鋼棒にて反力壁に固定して実施した。RC上部工はローラー支承に載せ、RC上部工と支承の間にはテフロンシートを2枚挟み、支承と試験体の間の摩擦を低減させた。

載荷には押引両動油圧ジャッキを使用し、RC上部工に繰返し水平載荷を行うことで地震力を想定した正負交番載荷実験を行った。

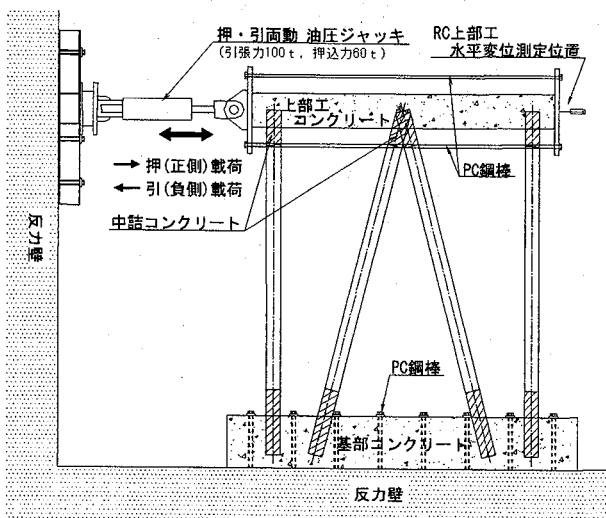


図-4 試験体配置および載荷方向

(2) 載荷方法

図-4に示す正側載荷を初期載荷とし、鋼管杭縁部が降伏した時点もしくはRC上部工の鉄筋が降伏した時点での上部工の水平変位を δ_y とし、この δ_y を基に変位制御で載荷を行った。上部工の水平変位は図-4に示す載荷用ジャッキの反対側の位置での測定値とした。実験での δ_y の決定は、徐々に載荷を行い、その経過を見ながら行った。

載荷手順は直杭式栈橋モデル載荷実験²⁾での載荷方法に準じた。各ステップでの最大変位を $1\delta_y$ ずつ増加させて押し引き1サイクルの繰返しを3回行い、試験体の破壊状況を見ながら、それ以後の載荷ステップの取り方や載荷方法を調整することとしていた。しかし、今回の斜め組杭式栈橋モデル載荷実験では $\pm 1\delta_y$ の1サイクルを終えた時点で試験体上部工の損傷が著しく進んだため、この時点で載荷方法を変更し、水平変位 $0.5\delta_y$ 刻みで、1ステップあたり1サイクルで載荷を行った。

変位計、ひずみゲージの取付位置を図-5に示す。同図中では、煩雑さを避けるため、A杭およびB杭では変位計取付位置を示し、C杭およびD杭ではひずみゲージ取付位置を示した。杭のひずみは各杭で7つの断面で測定した（以下、杭頭部側から1断面、2断面、・・・と呼ぶ）。なお、ひび割れの発生状況については目視にて確認した。

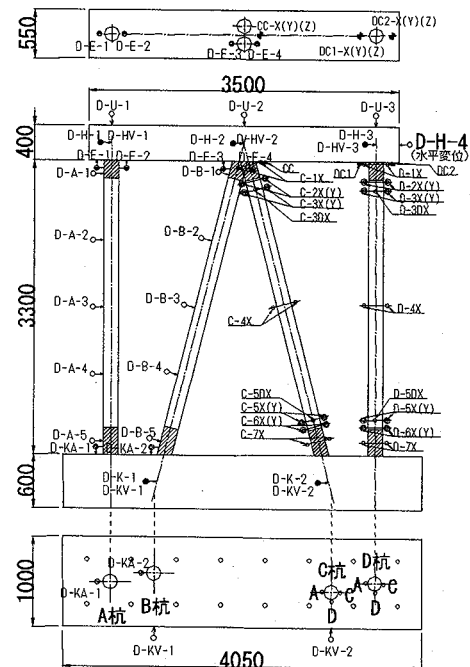


図-5 変位計およびひずみゲージ配置

3. 実験結果と考察

3.1 破壊の進行状況

杭下端の定着処理方法を変えた3ケースの試験体に対して載荷実験を実施したが、杭下端の引抜きを想定したCASE2 および CASE3 において引抜き変位は最大で1mm程度であった。明確な杭下端での引抜きは認められなかったことから3ケースともほぼ同様の挙動を示し破壊へと至った。以下、CASE1 について破壊の進行状況を述べる。

CASE1 は塑性域での鋼管杭および上部工の挙動を把握するため、水平荷重に対して杭の引抜きが発生しないように設計した試験体であり、杭下端はプレートに溶接し剛結させて定着処理を行った。

試験体の主な損傷イベントは図-6 のように進行した。 $-2.5\delta_y$ 時点でのRC 上部工のひび割れ発生状況を図-7 に、試験体の最終破壊状況を図-8 に示す。

まず、 $\pm 30\text{kN}$ までの予備載荷後、正側載荷を行った。水平荷重が $+90.2\text{kN}$ に達した時点でB 杭杭頭部で上部工コンクリートにひび割れが発生した。水平荷重 $+144.8\text{kN}$ では、B 杭杭頭部から発生したひび割れがC 杭杭頭部へと繋がり、 $+145\sim+150\text{kN}$ で、杭頭部で鋼管がきしむような音が発生し始めた。引き続き荷重を加えると、 $+199.8\text{kN}$ の時点でC 杭杭頭部（2断面）のひずみが材料試験結果から求めた降伏ひずみに達したことから、この時点の水平変位 $+24.04\text{mm}$ を $+1.0\delta_y$ と決定した。

負側載荷では、 -150.3kN でC 杭杭頭部にひび割れが発生し、 -189.2kN でB 杭杭頭部が降伏ひずみに達した。この時、水平変位は -23.34mm であった。

負側載荷ではB 杭が押込み杭、C 杭が引抜き杭として働いており、降伏に至る挙動は正側載荷時と押込み、引抜きが反対になるもののほぼ同様の挙動を示した。また、杭頭降伏時の荷重と水平変位量は、既に上部工に損傷が発生していたため、正側よりわずかに小さいが、ほぼ同程度の値となった。

$+1.5\delta_y$ では、A 杭の杭頭部周辺にひび割れが発生した。これは、既に斜杭杭頭部が降伏し、斜杭杭頭部周辺の上部工コンクリートの損傷が進んでいたため、引抜き力に対する斜杭の耐力が低下し、その分を直杭が受け持つようになったためと考えられる。 $+1.5\delta_y$ での水平荷重は $+223.2\text{kN}$ となり、これが最大荷重であった。

以降の載荷では、 $-1.5\delta_y$ でD 杭杭頭部周辺の上部工にひび割れが入り、斜杭杭頭部周辺の上部工は損傷がさらに進み、かぶりコンクリートが剥落しそうになった。水平荷重 $+210.2\text{kN}$ で $+2.0\delta_y$ となり、この時点で耐力の低下がみられた。

既に水平荷重に対する抵抗機構が、斜杭の軸力抵抗モードから構造体全体としての曲げ抵抗モードに変化しており、 $+2.0\delta_y$ でA 杭杭頭部が降伏ひずみに達し、 $+2.5\delta_y$ （ $+179.1\text{kN}$ ）でD 杭杭頭部も降伏ひずみに達した。 $+2.0\delta_y$ に至る前にC 杭杭頭下縁のコンクリートが剥落した。

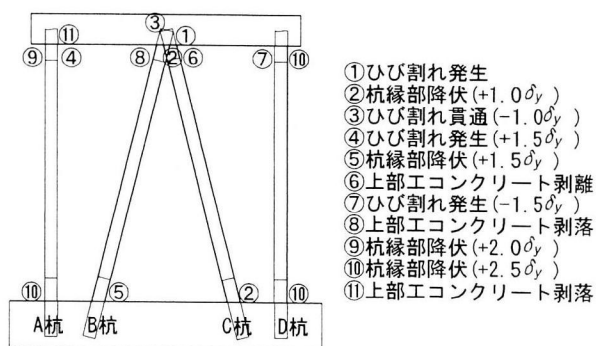


図-6 試験体の損傷過程(CASE1)

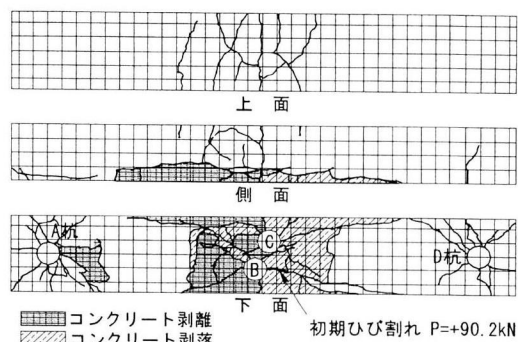


図-7 RC 上部工のひび割れ発生状況(CASE1)

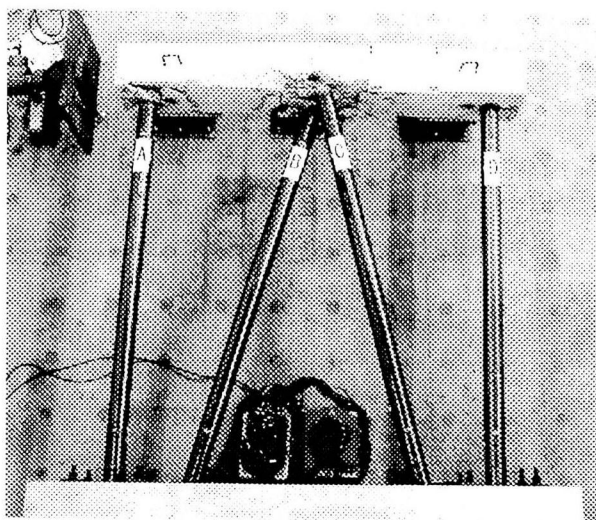


図-8 試験体の破壊状況(CASE1, $+7.5\delta_y$)

$+2.0\delta_y$ の時点でB 杭およびC 杭は上部工から抜け出したようになっており、杭頭部周辺の上部工には抜け出しによるせん断ひび割れが発生した。

水平変位が $+2.5\delta_y$ 付近に近づくと、杭頭部のきしみが著しくなり、上部工コンクリートの剥離・剥落範囲も広がった。 $-2.5\delta_y$ の時点でC 杭杭頭部周辺のかぶりコンクリートはほとんど剥落し、鉄筋がほぼむきだしの状態となった。以降 $\pm 4.5\delta_y$ まで正負交番載荷を行ったが、上部工の損傷が大きくなり斜杭杭頭部に損傷が集中し、荷重は最大荷重の6割程度まで低下した。さらに押切り載荷を行い、水平変位 $+7.5\delta_y$ まで載荷を行うと、水平荷重 $+178.4\text{kN}$ で

+7.5 δ_y に達した。この時点の水平変位は+180.08mm となり、除荷後の残留変位は+138.92mmであった。

杭下端の引抜きを想定したCASE2およびCASE3においても、杭は引き抜かれることなく、ほぼCASE1と同様の破壊過程を辿った。杭下端で引抜きが発生しなかった原因としては、斜め組杭に発生した大きな軸力によって斜杭杭頭接合部が著しく損傷し、上部工から杭の拔出が生じたためである。その結果、引抜き杭に基部で引抜きを生じさせるまでの荷重が伝達されなかったものと考えられる。

このように、斜め組杭式栈橋構造では、斜杭杭頭接合部が構造全体としての抵抗機構に大きく影響を及ぼすことが明らかとなった。

現行の斜め組杭式栈橋の設計は、地震力によって発生する各部材の応力が、許容応力度以下になるように行われており、特に斜杭杭頭接合部に着目した設計は行われていない。その理由は、実際の斜め組杭式栈橋が、これまで地震力のような水平力によってこのような被害、損傷を受けたことがなく、破壊メカニズムや破壊過程が解明されていなかったからである。

これまでに、直杭式栈橋については、杭頭接合部に焦点をあてた実験・解析が行われ、その回転変形挙動を考慮した解析手法も提案されている⁷⁾。一方、斜め組杭式栈橋については、本実験から杭頭接合部が栈橋構造全体の強度変形特性を大きく支配していることが明らかとなったことから、今後は、杭頭接合部に着目した設計手法を確立するべく、解析を行う予定である。

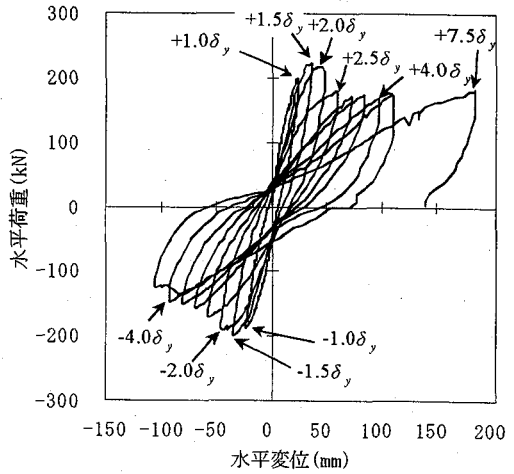
表-5 各載荷ステップ時の作用荷重

載荷ステップ	水平荷重 (kN)			最大荷重に対する作用荷重の割合 (%)		
	CASE1	CASE2	CASE3	CASE1	CASE2	CASE3
+1.0 δ_y	199.8	202.0	202.1	—	—	—
+1.5 δ_y	223.2	228.8	226.2	100	100	100
+2.0 δ_y	210.2	217.9	220.4	94	95	97
+2.5 δ_y	179.0	192.6	197.4	80	84	87
+3.0 δ_y	169.5	173.6	177.9	76	76	79
+3.5 δ_y	173.4	162.4	163.3	78	71	72
+4.0 δ_y	167.7	167.6	160.5	75	73	71
+7.5 δ_y	178.4	173.1	150.9	80	76	67
-1.0 δ_y	-189.2	-199.4	-204.3	—	—	—
-1.5 δ_y	-200.8	-216.4	-216.6	100	100	100
-2.0 δ_y	-188.7	-200.1	-208.2	94	92	96
-2.5 δ_y	-169.0	-169.4	-179.1	84	78	83
-3.0 δ_y	-157.8	-158.5	-161.1	79	73	74
-3.5 δ_y	-152.1	-144.6	-146.5	76	67	68
-4.0 δ_y	-148.5	-140.4	-135.3	74	65	62

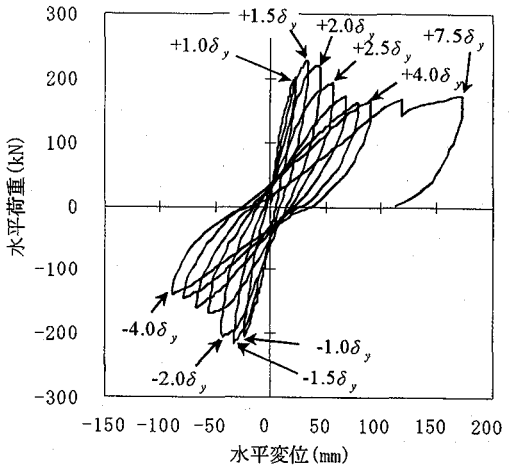
3.2 荷重-変位関係

図-9に各ケースの水平荷重と上部工の水平変位の関係を示し、表-5に各載荷ステップ時の作用荷重（最大荷重に対しての割合）を示す。

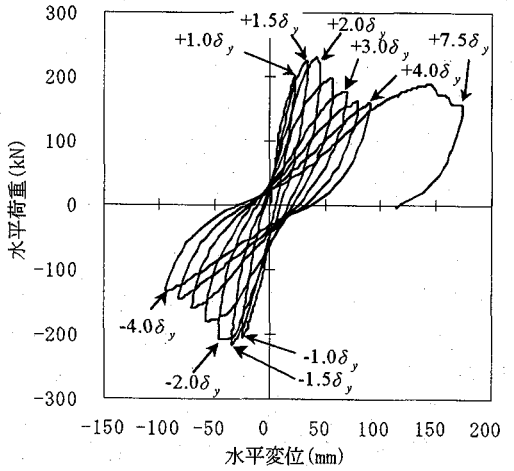
CASE1では、前述のとおり、水平荷重+199.8kNでC杭2断面が圧縮側で降伏ひずみに至り、このとき δ_y は24.04mmであった。一方、負側載荷では、荷重-189.2kNでB杭2断面が降伏し、 $-\delta_y$ は-23.34mmであった。



(a) CASE1 プレート定着タイプ



(b) CASE2 曲げフックタイプ



(c) CASE3 スタッドジベルタイプ

図-9 荷重-変位関係

CASE2の正側載荷では、荷重+202.0kNでCASE1と同じくC杭2断面が降伏し、 δ_y は22.98mmであった。一方、負側載荷では、荷重-199.4kNでB杭3断面のD側が初めに降伏し、 $-\delta_y$ は-22.45mmであった。

CASE3では、水平荷重+202.1kNでC杭2断面が降伏し、 δ_y は23.09mmであった。負側載荷では、荷重-204.3kNで

C 杭 2 断面が引張側で降伏ひずみに至り、このとき $-\delta_y$ は -25.37mm であった。

$\pm 1.0 \delta_y$ の決定後、各ケースとも $\pm 1.5 \delta_y$ において正側、負側ともに最大荷重を示した。 $\pm 2.0 \delta_y$ ではわずかに荷重が低下し、この時点で最大荷重の 95% 程度の耐力を保持していた。その後、CASE1 および CASE2 では $+2.5 \delta_y$ の時点で、CASE3 では $+3.0 \delta_y$ の時点で、最大荷重の 80% 程度まで耐力が大幅に低下した。その後の載荷では、引き続き荷重は徐々に低下したが、 $+4.0 \delta_y$ においても最大荷重の 70% 程度の耐力を示した。

CASE1 および CASE2 では、 $+7.5 \delta_y$ の時点で逆に荷重がわずかに上昇しているが、これは、杭頭接合部のプレートが突っ張るように水平荷重に抵抗したためと考えられる。載荷は押切り載荷として $+7.5 \delta_y$ まで行ったが、途中の段階で、構造体全体として水平荷重を受け持つ抵抗機構ではなくなり、斜杭杭頭部のプレートに荷重が集中し、プレートの変形のみが進む状況となった。このため、本実験では押切り時の $+7.5 \delta_y$ を終局とはせず、正側載荷で耐力が急激に低下した時点を終局状態とした。このように、CASE1 では $+2.5 \delta_y$ 、CASE2 では $+2.5 \delta_y$ 、CASE3 では $+3.0 \delta_y$ を終局状態とした。

CASE2 および CASE3 では、ともに杭下端の引抜きがほとんど発生しなかったことから、杭下端を剛結させた CASE1 と比較して、その水平荷重—水平変位関係はほぼ同様の傾向を示した。また、終局状態へ至るまでの RC 上部工の損傷過程も CASE1、CASE2 および CASE3 では明確な違いは認められなかった。これらのことから、本実験では 3 ケースとも杭下端は剛結であったと考え、以降、CASE1 の実験結果について考察することとする。

3.3 鋼管杭の軸方向ひずみ

CASE1 の $+1.0 \delta_y$ および $+2.5 \delta_y$ での鋼管杭の軸方向ひずみ分布をそれぞれ図-10 および図-11 に示す。

杭軸方向ひずみは、曲げモーメント分布とほぼ同様、すなわち、杭両端で大きく、杭中央部は小さい結果となった。また、中詰コンクリート部は、鋼管杭のみの断面より剛性が大きいため、1 断面および 7 断面はひずみが相対的に小さくなり、中詰コンクリート部との境界である 2 断面および 6 断面にひずみが集中し、境界部分のひずみが相対的に大きくなった。

$+1.0 \delta_y$ の軸方向ひずみ分布図では、C 杭の A 側頭部および C 側基部、B 杭の C 側頭部がそれぞれ降伏ひずみに達している。正側載荷の場合、C 杭は杭全体が圧縮ひずみとなっており、水平荷重に対して軸圧縮で抵抗していたことがわかる。しかし同時に、杭両端の同一断面でのひずみ量に著しい差が認められることから、水平荷重に対して曲げでも大きく抵抗していたと考えられる。一方、A 杭、B 杭および D 杭は、杭両端の同一断面で圧縮ひずみと引張ひずみが同時に発生していることから、主に曲げで抵抗した。また、全体として引張ひずみが生じていたことから、

引抜き杭として機能していたと考えられる。

通常、斜め組杭式栈橋では、水平荷重には斜杭に働く軸力方で主に抵抗すると考えられているが、今回の実験から、水平荷重に対しては、斜め組杭の軸力での抵抗だけでなく、各杭の曲げ抵抗も主要な抵抗機構であることが明らかとなった。

$+2.5 \delta_y$ では既に全ての杭が杭頭部および基部で降伏しており、全ての杭が主に曲げで抵抗していることがわかる。また、それぞれの載荷ステップで A 杭と D 杭はほぼ同様なひずみ挙動を示していることから、直杭は終局状態に至るまでほぼ同じ抵抗機構を示していたと考えられる。

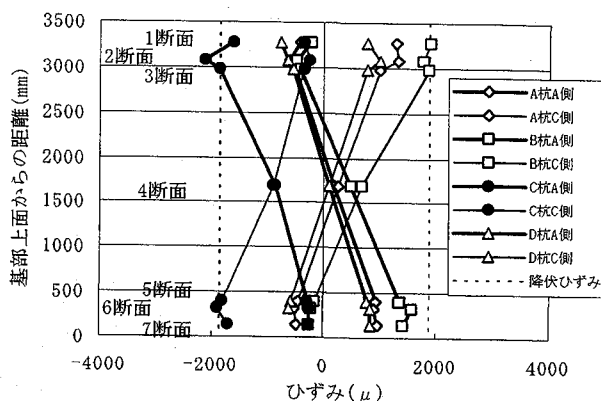


図-10 鋼管杭の軸方向ひずみ分布(CASE1, $+1.0 \delta_y$)

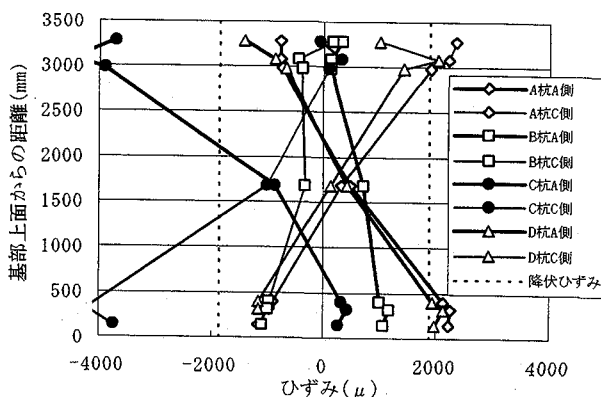


図-11 鋼管杭の軸方向ひずみ分布(CASE1, $+2.5 \delta_y$)

3.4 杭頭接合部の回転

杭頭接合部の回転角は、鋼管杭と RC 上部工の接合部の相対変形量を変位計により測定し、時計回りを正として回転角に換算した。

CASE1 について A 杭および C 杭の杭頭接合部回転角と水平荷重の関係を図-12 に示す。

A 杭接合部は、 $+2.0 \delta_y$ の時点ではまだ弾性的な回転挙動を示しており、 $+3.0 \delta_y$ 以降に回転角が急激に大きくなった。これは、斜杭が引張力を受け持たなくなり、直杭杭頭部に大きな曲げモーメントが発生したためと考えられる。一方、C 杭接合部は、C 杭接合部周辺に目視でひび割れが確認された水平荷重($+144.8\text{kN}$)とほぼ同程度の $+130 \sim$

+140kN に達した段階で塑性化し、その後急激に回転変形が進んだ。RC 上部工にひび割れが発生することで接合部の回転性能が大きく変化することが確認できた。

A 杭の杭頭接合部は、 $+1.0\delta_y$ で -0.1° 、C 杭の杭頭接合部は、 $+1.0\delta_y$ で -0.7° 回転した。正側水平荷重に対しては C 杭が突っ張る形で抵抗することから、C 杭接合部周辺の損傷が進んだことにより、 $+1.0\delta_y$ では C 杭接合部が各杭の中では最も大きく回転した。

A 杭接合部において $+4.0\delta_y$ から $+4.5\delta_y$ の間に約 2.0° 回転角が大きくなっているが、この時点では A 杭杭頭部周辺の損傷が大きく進んでおり、杭頭部で抜出しも発生していた。つまり、杭頭接合部の相対変形量の測定値には、かぶりコンクリートの浮き上がりや杭の抜出しによる変形量が含まれ、測定値は杭頭接合部の実際の回転角とは異なるものと考えられる。同様に C 杭接合部では、 $+2.0\delta_y$ に達する前に斜杭杭頭部周辺の損傷がさらに進み、杭頭周辺でかぶりコンクリートが剥離し始めたため正確な回転角の測定ができなくなった。測定可能域では C 杭接合部回転角は負の値で推移し、接合部は反時計回りの回転であることがわかる。

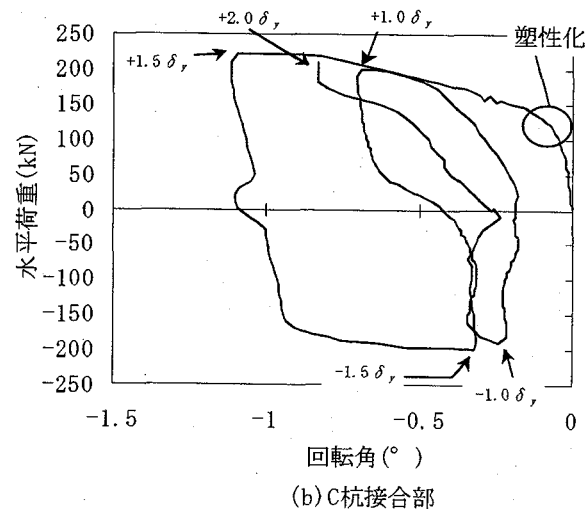
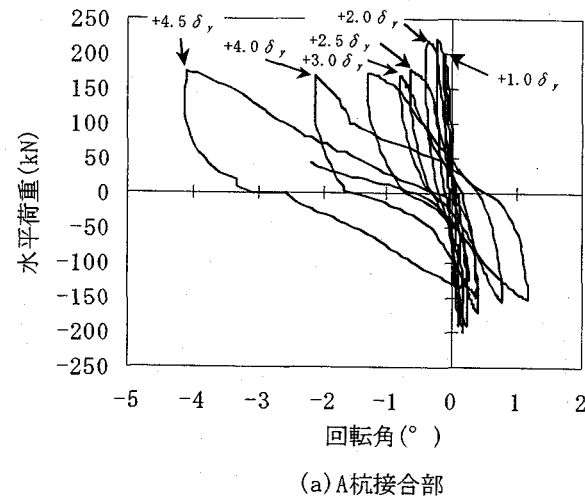


図-12 荷重-接合部回転角の関係(CASE1)

左右対称の構造であることから、B 杭接合部は負側荷重時において C 杭接合部の回転挙動と同様の挙動を示し、D 杭接合部は A 杭接合部とほぼ同じ回転挙動を示した。

斜め組杭式栈橋では、水平荷重に対して、まず斜杭に働く軸力で抵抗することから、この軸力による抵抗機構が崩れるまでは直杭杭頭接合部の回転は少なく、斜杭杭頭接合部が大きく回転していた。また、水平荷重に対して直杭杭頭部は正負両側に同程度の回転挙動を示したのに対し、斜杭杭頭部は押し込み杭として働いている場合にのみ大きな回転挙動を示した。

3.5 杭頭モーメントと接合部曲率

鋼管杭の軸方向ひずみから 4 断面と 7 断面の曲げモーメントを算定し、杭軸方向に曲げモーメントが直線分布すると仮定して杭頭モーメントを算定した。接合部曲率は杭頭部の回転角から換算した値とした。

CASE1 での A 杭および C 杭の杭頭モーメントと接合部曲率の関係を図-13 に示す。直杭と斜杭では水平荷重に対する抵抗機構が異なることから、杭頭モーメント-接合部曲率関係も大きく異なっていることがわかる。

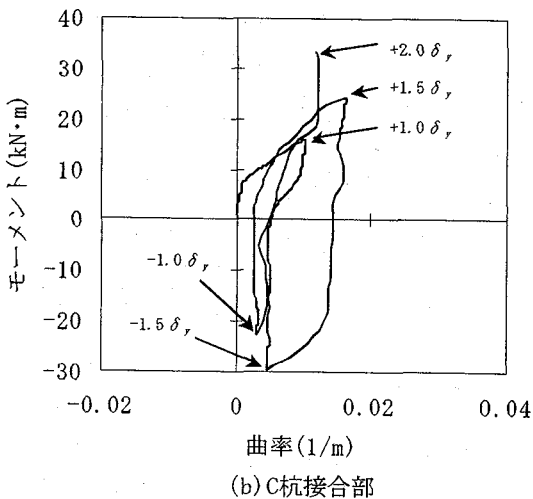
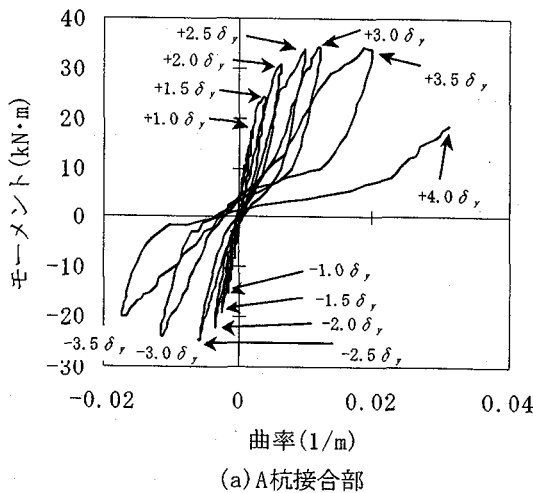


図-13 杭頭モーメントと接合部曲率の関係(CASE1)

図-14 に杭頭モーメントと接合部曲率の載荷ステップによる変化を示す。載荷ステップ+2.5 δ_y 以降は、引抜き側の斜杭が上部工から抜け出し、斜杭の杭頭モーメントは押込み杭の杭頭に集中するようになった。一方、直杭の杭頭モーメントは正負交番載荷に応じて正負両側に発生したことがわかる。A 杭と C 杭で比較した場合、+1.0 δ_y では、A 杭杭頭モーメント 17.7kN・m に対して、C 杭 16.1kN・m とほぼ同程度の杭頭モーメントが作用していた。接合部曲率は、A 杭が 0.0019(1/m)に対して C 杭は 0.010(1/m)であり、C 杭杭頭接合部は載荷初期から大きな曲率を示した。これは、斜め組杭式栈橋では水平荷重に対して斜杭の軸力で抵抗することから、斜杭杭頭接合部の損傷が進み、C 杭接合部の曲率が大きくなったものと考えられる。同様に、-1.0 δ_y では B 杭接合部が大きな曲率を示した。

斜杭接合部の曲率は測定可能域では C 杭接合部では正の曲率のみを示した。一方、B 杭接合部では初期載荷時に C 杭接合部の回転挙動の影響を受けて正の曲率を示したが、杭頭接合部周辺にひび割れが発生した時点で、C 杭接合部の回転の影響から解放され、以降は、負の曲率のみを示した。斜杭接合部では、杭が押込み杭として働く場合に曲率が大きくなった。一方、直杭接合部の曲率は正負の杭頭モーメントに合わせて正側負側に徐々に大きくなった。これは直杭と斜杭の水平荷重に対する抵抗機構の違いをよく表していると考えられる。

C 杭接合部曲率は、+1.5 δ_y で 0.016(1/m)であり、+2.0 δ_y では 0.012(1/m)となった。+2.0 δ_y では杭頭部周辺の損傷が進んだことで曲率が小さく計算されたものと考えられる。

降伏時曲率 ϕ_y と終局時曲率 ϕ_u の比（以下、塑性率と呼ぶ）を表-6 に示す。同じ直杭接合部構造である A 杭接合部と D 杭接合部の塑性率は、A 杭接合部のほうが、大きい結果となったが、これは初期載荷が正側であったためと考えられる。すなわち、初期載荷が正側であったため載荷側の A 杭接合部が D 杭接合部よりも大きく変形し、先に損傷した。このため、降伏後においても D 杭接合部と A 杭接合部では A 杭接合部に損傷が集中し、D 杭接合部は損傷が少なかった。結果として、D 杭接合部では終局時の変形は小さく、A 杭接合部と比較して、塑性率が小さく計算されたものと考えられる。直杭式栈橋での既往の研究²⁾では塑性率は 3~4 程度であり、今回もこれとほぼ同様の結果となった。これに対して、斜杭接合部では塑性率は小さく、C 杭接合部で 1.6 程度であった。

表-6 塑性率(CASE1)

	降伏時曲率 ϕ_y (1/m)	終局時曲率 ϕ_u (1/m)	塑性率 ϕ_u/ϕ_y
A 杭接合部	0.0019	0.0098	5.2
C 杭接合部	0.010	0.016 *	1.6
D 杭接合部	0.0016	0.0046	2.9

※C 杭接合部の終局時曲率は測定可能域での最大曲率とした。

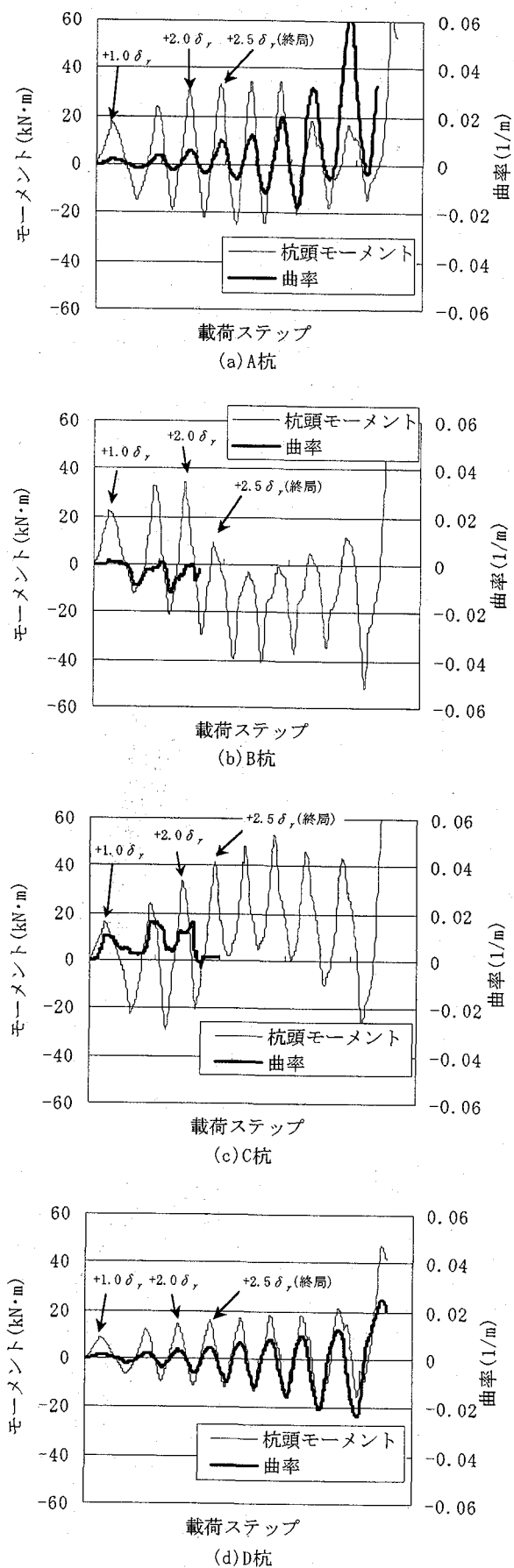


図-14 杭頭モーメントと接合部曲率の変化(CASE1)

3.6 曲げ応力と軸応力の関係

各杭2断面の軸方向ひずみから算定した曲げ応力と軸応力の関係を図-15に示す。

正側荷重の载荷によって、C杭には大きな軸圧縮応力および曲げ応力が発生し、構造として対をなす斜杭のB杭には軸引張応力および曲げ応力が発生した。直杭であるA杭およびD杭には軸引張応力と曲げ応力が発生していたが、曲げ応力が卓越していたことがわかる。試験体の構造は左右対称であるが、正側载荷を初期载荷としているため、正側载荷で押込み杭として働くC杭の最大軸圧縮応力値が、負側载荷時のB杭の最大軸圧縮応力値を上回る結果となった。また、どのケースも载荷の初期段階では、斜杭では軸引張応力よりも軸圧縮応力が卓越したが、载荷を繰り返すに従って、曲げ応力が卓越してくる結果となった。

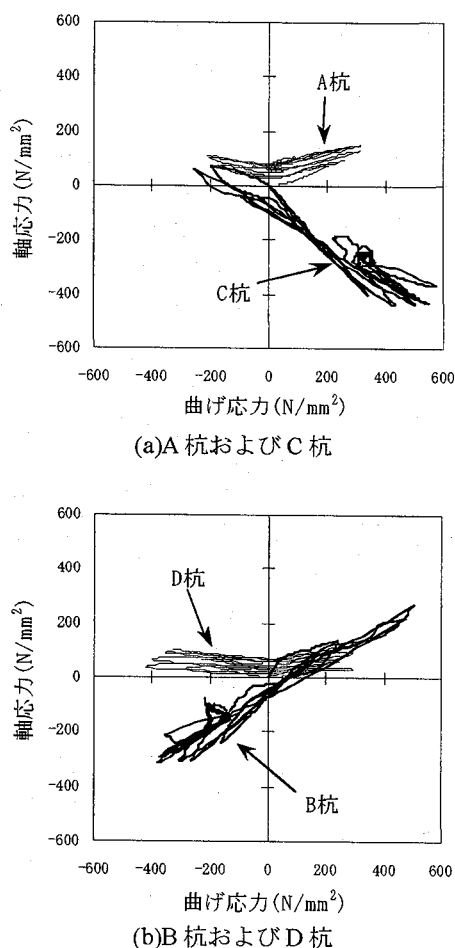


図-15 曲げ応力と軸応力の関係(CASE1)

図-15で示した結果について各杭の軸応力、曲げ応力と水平荷重の载荷ステップによる変化を図-16に示す。

A杭では、正側負側载荷のどちらの場合も軸引張応力が作用しており、 $+2.5\delta_y$ では $+1.0\delta_y$ 時の約2倍の軸引張応力が発生していたが、その変動は小さかった。また、A杭と構造として対をなすD杭もほぼ同様の傾向を示した。

一方、正側载荷時に引抜き杭として働くB杭は $+2.0\delta_y$ までは引抜き力を受け持っているが、 $+2.5\delta_y$ では引抜き

力を受け持てなくなり、このときの水平荷重は最大時の80%程度まで低下した。引抜き杭が機能しなくなった時点で、引抜き側の斜杭断面には残留ひずみが存在しているだけの状態になっており、これ以降の斜杭の変形は押込み時に発生する軸圧縮応力によるもののみと考えられる。これに対して、直杭は斜杭が引抜きに抵抗できなくなった $+2.5\delta_y$ 以降も、その抵抗機構に大きな変化は見られず、水平荷重に対して杭の引張と曲げで抵抗したことがわかる。

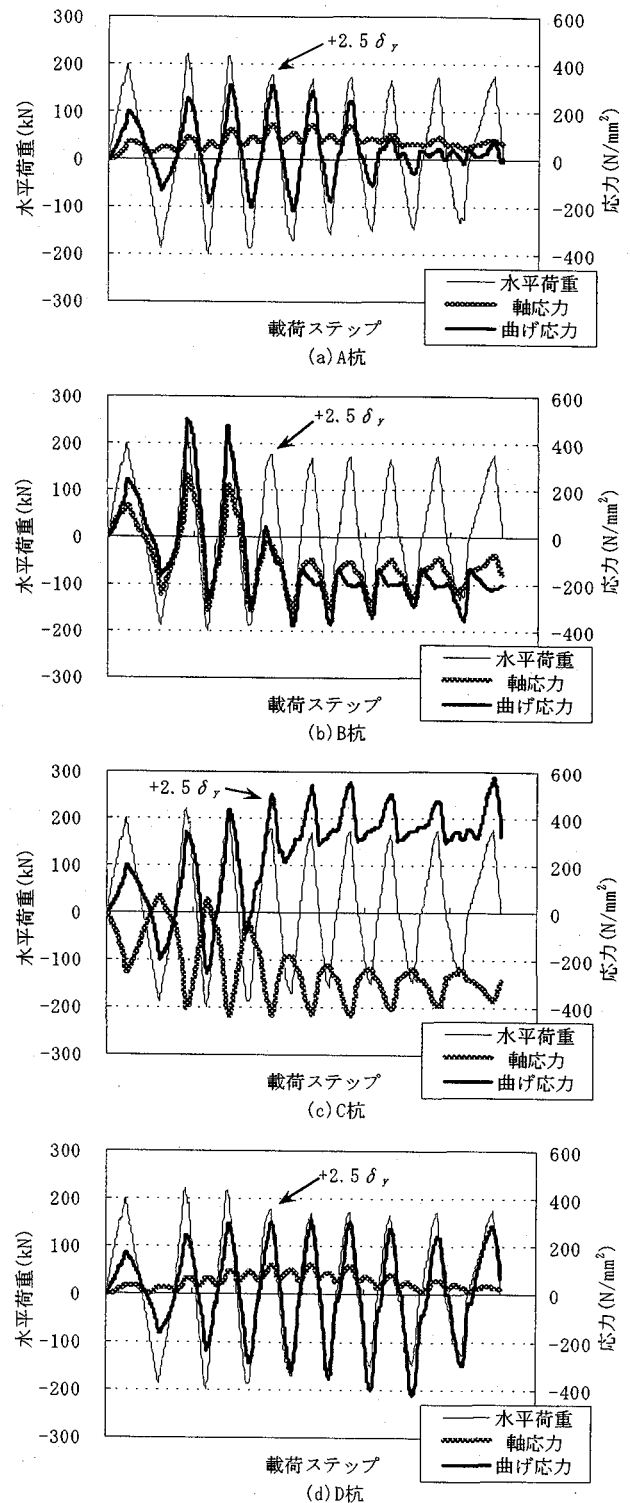


図-16 軸応力、曲げ応力と水平荷重の変化(CASE1)

4. まとめ

杭下端の定着処理方法を変えた試験体に対して正負交番載荷実験を実施したが、杭の引抜きを想定したケースにおいても引抜き変位は最大で1mm程度であり、杭下端において明確な引抜きは確認できなかった。これは斜杭杭頭接合部の損傷が著しく、上部工から杭の拔出しが生じたため、杭基部に引抜きを生じさせるまでの荷重が伝わらなかったためと考えられる。よって、本実験結果は、杭が十分な引抜き抵抗力を有している場合に相当するものと考えられる。

今回の斜め組杭式栈橋モデル試験体の載荷実験より得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 斜杭に発生する軸力で斜杭杭頭接合部が損傷した後、斜杭が降伏し、以降、斜杭杭頭接合部に損傷がさらに集中し、斜杭が引抜き力を受け持てなくなった。この時点で、急激に耐力が低下した。
- (2) 斜め組杭式栈橋は、水平荷重に対して斜杭は軸力と曲げて抵抗した。引抜き力を受け持つ斜杭が引抜き力に対して抵抗できなくなった時点で斜杭の抵抗機構が変化し、軸圧縮と曲げて抵抗するようになるのに対して、直杭の抵抗機構は変化せず、軸引張と曲げて抵抗した。
- (3) RC 上部工に初期ひび割れが発生することで接合部の回転性能は大きく変化し、押込み杭の杭頭部が大きく回転する現象を示した。
- (4) 降伏に至るまでは、斜杭が軸力で大きく抵抗するため、直杭杭頭接合部と比較して斜杭杭頭接合部の曲率が大きくなった。
- (5) 斜め組杭式栈橋の杭頭接合部の曲率から計算した塑性率（終局時曲率／降伏時曲率）に関して、直杭接合部は、直杭式栈橋の杭頭接合部の塑性率とほぼ同様の値を示し、斜杭接合部では直杭接合部の1/3～1/2の塑性率であった。

5. 今後の課題

今回の実験から得られた知見を基に、杭頭接合部の回転挙動や杭の抵抗機構の変化等を考慮した解析を行い、より詳細に検討を行うことにしている。また、杭が十分な引抜き抵抗力を有しない場合の耐荷機構についても検討を進める予定である。これによって、今後、斜め組杭式栈橋の新しい耐震性能照査手法の確立を行いたい。

参考文献

- 1) 竹鼻直人，横田弘，宮田正史，菅野高弘：横栈橋の地震時挙動に関する模型振動実験，土木学会第53回年次学術講演会講演概要集，I-B265，pp.530-531，1998.
- 2) 横田弘，川崎進，菅原亮，Hazem El-Bakry，川端規之：鋼直杭式栈橋の地震時保有耐力に関する実験および解析，港湾技術研究所報告，第38巻，第2号，pp.223-255，1999.6.
- 3) 横田弘，竹鼻直人，南兼一郎，高橋邦夫，川端規之：鋼管杭式横栈橋の地震応答解析結果に基づく設計水平震度の考察，港湾技術研究所報告，第37巻，第2号，pp.75-130，1998.6.
- 4) (社)日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，1999.4.
- 5) 濱田純次，菅野高弘，上部達生，上田茂，横田弘：斜杭式栈橋の地震時挙動に関する模型振動実験，土木学会論文集，No.682/I-56，pp.101-113，2001.7.
- 6) 横田弘，濱田純次，大熊弘行，麻生川学，佐藤博：斜め組杭式栈橋の地震応答特性と耐震性能照査，構造工学論文集，Vol.48A，pp.479-488，2002.3.
- 7) 横田弘，片岡保人，菅原亮，Hazem El-Bakry，川端規之：栈橋の鋼管杭と上部工接合部の力学的挙動に関する実験および解析，港湾技研資料，No.977，2000.12

(2002年9月13日受付)