

# 港湾空港技術研究所 資料

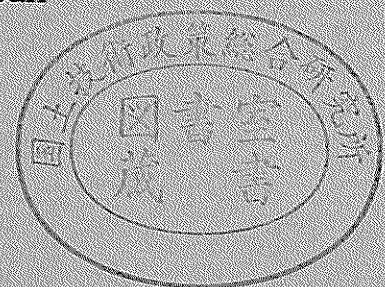
TECHNICAL NOTE  
OF  
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1049      June 2003

斜め組杭式棧橋の破壊過程に関する実験および解析

横 田      弘  
岩 波      光 保  
築 地      健太朗  
井 上      譲

独立行政法人 港湾空港技術研究所  
Independent Administrative Institution,  
Port and Airport Research Institute, Japan



## 目 次

要 旨 .....	3
1. まえがき .....	4
2. 載荷実験の概要 .....	4
2.1 実験の概要 .....	4
2.2 試験体の概要 .....	4
2.3 実験方法 .....	7
3. 実験結果と考察 .....	8
3.1 試験体の破壊過程 .....	8
3.2 荷重－変位関係 .....	11
3.3 塑性率 .....	12
3.4 鋼管杭の軸方向ひずみ .....	12
3.5 杭頭接合部の回転 .....	13
3.6 杭頭モーメントと接合部曲率 .....	14
3.7 曲げ応力と軸応力の関係 .....	15
4. 数値解析 .....	17
4.1 解析概要 .....	17
4.2 解析結果および考察 .....	18
5. 結論 .....	19
6. あとがき .....	20
謝辞 .....	20
参考文献 .....	20
付録 A 鋼管杭の軸方向ひずみ分布 .....	21
付録 B 荷重－接合部回転角の関係 .....	22
付録 C 曲げ応力と軸応力の関係 .....	24

# Failure Process of Open Piled Wharf with Coupled Raking Piles

Hiroshi YOKOTA<sup>\*</sup>  
Mitsuyasu IWANAMI<sup>\*\*</sup>  
Kentarou TSUJI<sup>\*\*\*</sup>  
Yuzuru INOUE<sup>\*\*\*\*</sup>

## Synopsis

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 to 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.

Nonlinear analysis was carried out based on the above experiment results. Although analysis in consideration of the rotation movements at the joints was performed, the experiment result was not well simulated. As a result of further analysis, it was concluded that the joint should be well modeled with the local damage at the joint of the raking piles and deck.

**Key Words** : Open piled wharf with coupled raking piles, reversed cyclic loading test, failure process, joint, nonlinear analysis

---

<sup>\*</sup> Head of Structural Mechanics Division, Geotechnical and Structural Engineering Department  
<sup>\*\*</sup> Senior Researcher, Geotechnical and Structural Engineering Department  
<sup>\*\*\*</sup> Trainee of Structural Mechanics Division, Geotechnical and Structural Engineering Department,  
Wakachiku Construction Co.,Ltd.  
<sup>\*\*\*\*</sup> Ex-Trainee of Structural Mechanics Division, Geotechnical and Structural Engineering Department,  
Wakachiku Construction Co.,Ltd.  
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan  
Phone : +81-46-8445059 Fax : +81-46-8440255 e-mail:yokota\_h@pari.go.jp

# 斜め組杭式栈橋の破壊過程に関する実験および解析

横 田 弘 \*  
岩 波 光 保 \*\*  
築 地 健 太 朗 \*\*\*  
井 上 讓 \*\*\*\*

## 要 旨

本研究では、斜め組杭式栈橋が崩壊へ至るまでの破壊過程を把握することを目的として、斜め組杭式栈橋モデル試験体の正負交番載荷実験を実施した。斜め組杭式栈橋では、水平荷重に対して、まず斜め組杭の軸力で主に抵抗した。その後、引抜き杭が引抜き力に抵抗できなくなった時点で、構造全体としての抵抗機構が変化し、曲げによる抵抗が支配的となった。また、RC 上部工にひび割れが発生した地点で、杭頭接合部の拘束度合いが著しく低下し、回転変形が進んだ。また、水平荷重に対して、斜杭の軸力によって主に抵抗するため、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。実験結果を基に非線形解析を行った結果、杭頭接合部の回転挙動を考慮する手法では実験結果を再現できず、杭頭接合部の損傷を考慮し、その強度変形特性を適切にモデル化する必要があることが明らかとなった。

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，接合部，非線形解析

---

\* 地盤・構造部 構造強度研究室長  
\*\* 地盤・構造部 主任研究官  
\*\*\* 地盤・構造部 構造強度研究室 依頼研修員（若築建設株式会社）  
\*\*\*\* 前 地盤・構造部 構造強度研究室 依頼研修員（若築建設株式会社）  
〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人港湾空港技術研究所  
電話：046-844-5059 Fax：046-844-0255 e-mail:yokota\_h@pari.go.jp

## 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、直杭式は杭の曲げモーメントが、斜め組杭式は杭の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<sup>1)</sup>、著者ら<sup>2)</sup>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<sup>3)</sup>などが行われた。その研究成果として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）<sup>4)</sup>」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。

濱田ら<sup>5)</sup>は、斜め組杭式栈橋の地震時挙動を把握するために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、直杭式栈橋の場合とは異なることを示している。さらに、著者ら<sup>6)</sup>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た。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。さらに、実験から確認された破壊過程を考慮した静的非線形解析を行い、その適用性を検討した。

## 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

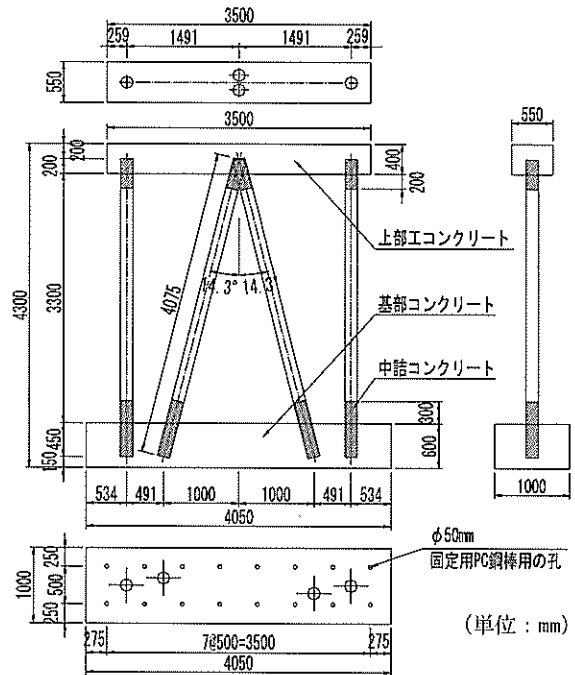


図-1 試験体の一般構造

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や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、図-2に各試験体の基部の定着状況を示す。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。これは、斜杭が引き抜ける場合とそうでない場合を模擬したものである。

斜杭杭頭部の結合処理は実際の栈橋で一般的に用いら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、つばプレートと呼ぶ）に鉄筋を溶接する方法とした。RC上部工の配筋は実構造物の方法をできる限り踏襲した。斜杭杭頭部の結合状況を図-3に、RC上部工の配筋状況を図-4に示す。

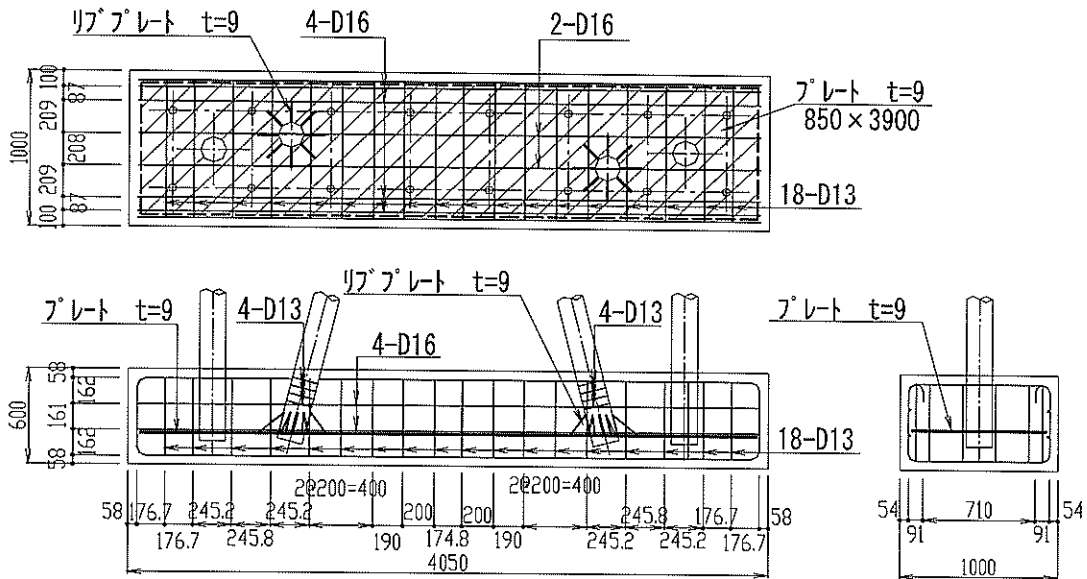
鋼管はφ165.2mm×t4.5mm(STK400)を使用し、上部工コンクリートとの接合面から200mm、基部コンクリート

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

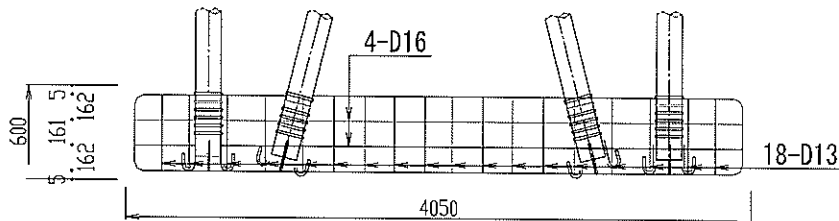
ートの配合を表-2 に，強度試験結果を表-3 に，鋼材（鋼管，異形鉄筋，スタッドジベル，プレート）の寸法および機械的性質を表-4 に示す。

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，杭端を基部コンクリートに剛結させた。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。



(a) CASE1 プレート定着タイプ



(b) CASE2 曲げフックタイプ

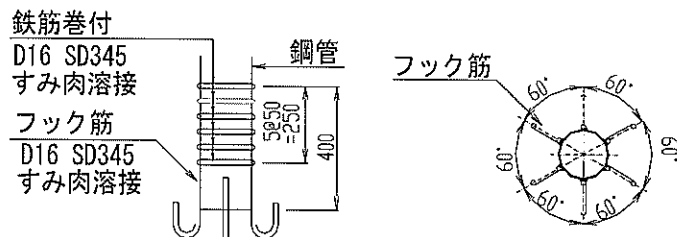
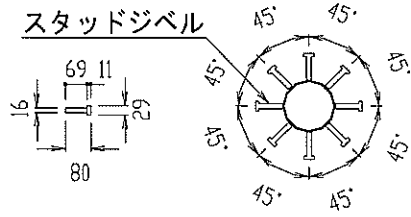
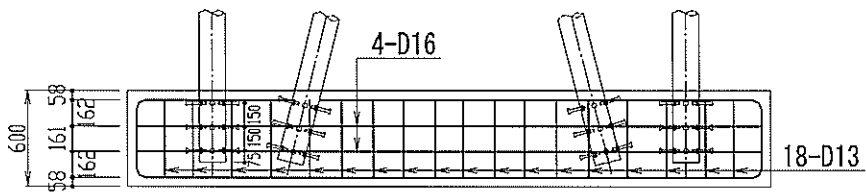


図-2 基部の定着状況 (その1)



(c) CASE3 スタッドジベルタイプ

図-2 基部の定着状況 (その2)

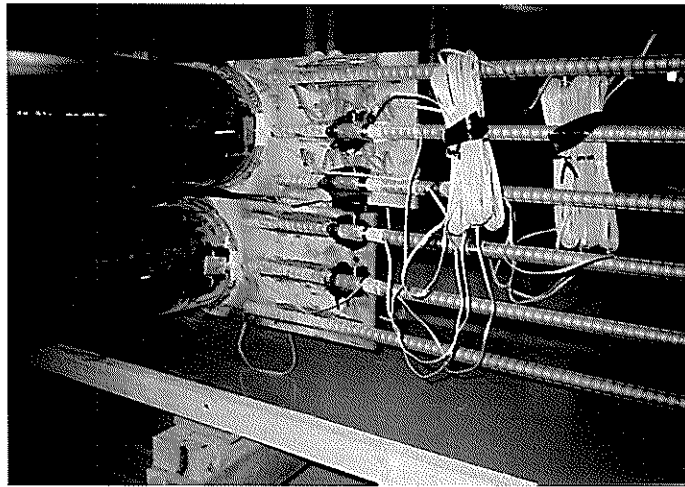


図-3 斜杭杭頭部の結合状況

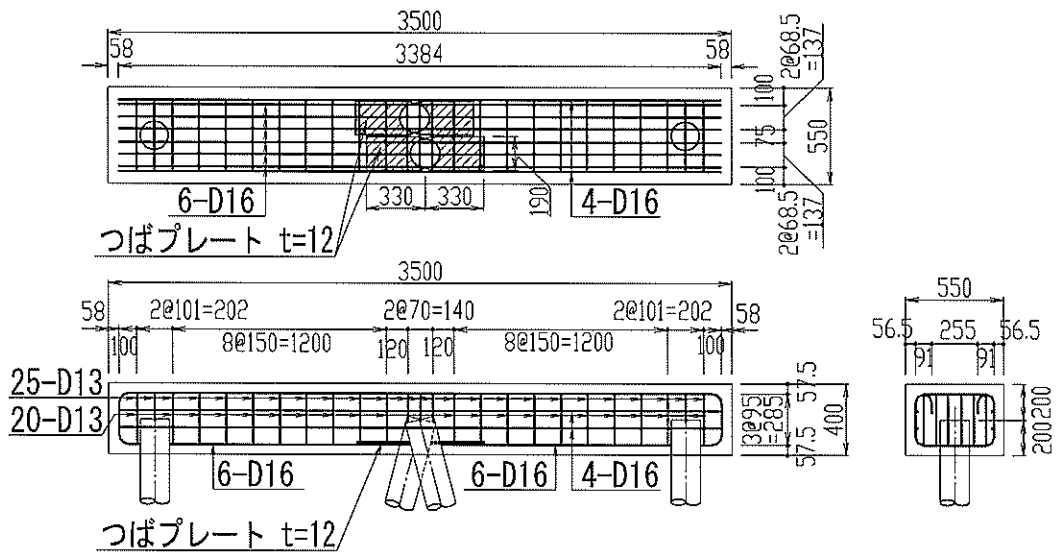


図-4 RC 上部工の配筋状況

表-2 コンクリートの配合

呼び強度 (N/mm <sup>2</sup> )	スランブ (cm)	粗骨材の 最大寸法 (mm)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				
			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(F.M.) 2.50  
表乾密度 2.58g/cm<sup>3</sup>
- ・粗骨材：碎石 実積率 62.0%  
表乾密度 2.70g/cm<sup>3</sup>
- ・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 <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	材齢 (日)
CASE1	43.0	3.14	90
CASE2	40.9	2.82	99
CASE3	42.7	2.92	111

表-4 鋼材の寸法および機械的性質

種類	鋼種	降伏点 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)
鋼管 φ 165.2mm, t 4.5mm	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	CH16A※	324	471	34
プレート(基固定着用) t 9mm	SS400	296	437	29
つばプレート t 12mm	SS400	303	445	30

※アルミキルド鋼

### 2.3 実験方法

#### (1) 試験体の配置

載荷実験は、試験体を図-5 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。

#### (2) 載荷方法

図-5 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  $\delta_y$  とし、この  $\delta_y$  を基に変位制御で載荷を行った。上部工の水平変位は図-5 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  $\delta_y$  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<sup>2)</sup>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 サイクル載荷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 サイクルの載荷を行った。

変位計およびひずみゲージの取付位置を図-6 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ている。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。

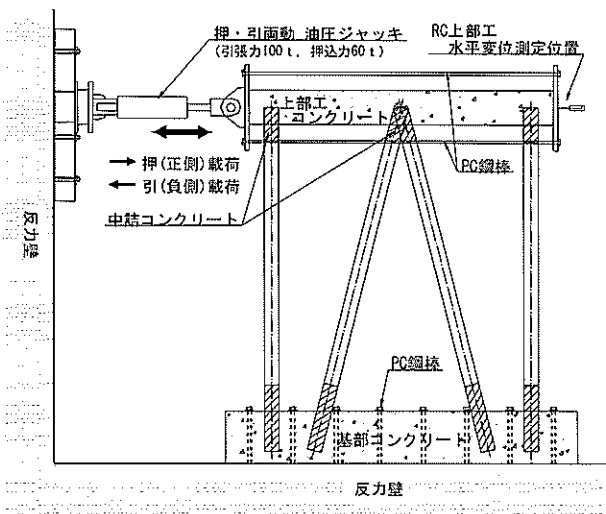


図-5 試験体配置および載荷方向



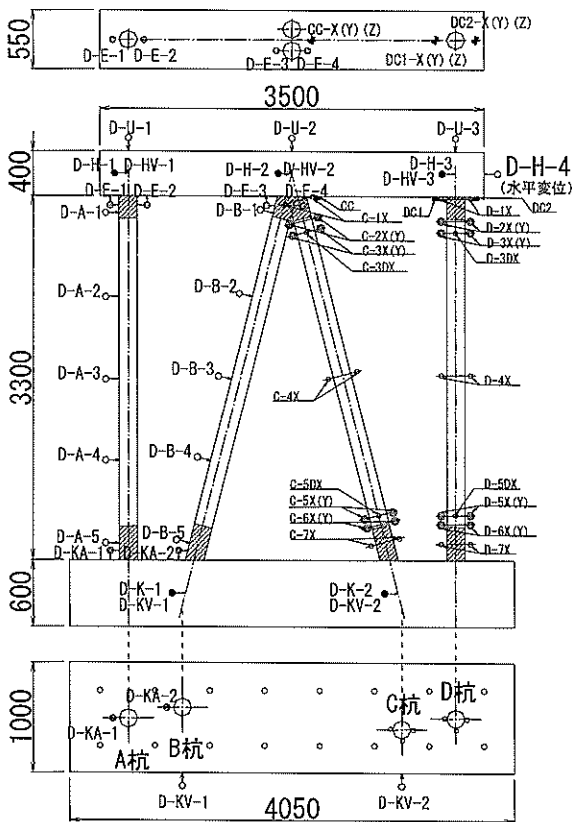


図-6 変位計およびひずみゲージ配置

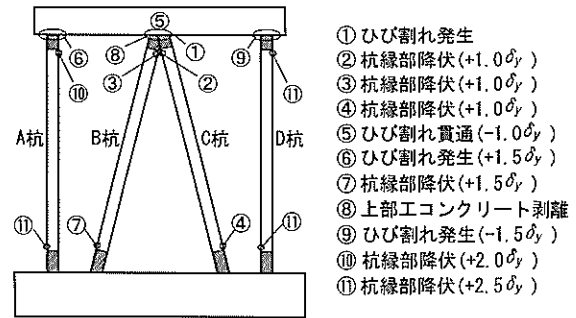


図-7 試験体の損傷過程(CASE1)

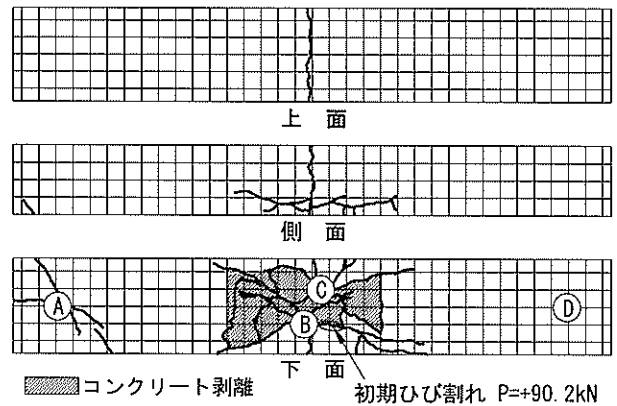


図-8 RC 上部工のひび割れ発生状況(CASE1,+1.5  $\delta_y$ )

### 3. 実験結果と考察

#### 3.1 試験体の破壊過程

載荷実験は、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実施した。以下、各ケースについて破壊の進行状況を述べる。

##### (1) CASE1 (プレート定着タイプ)

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、水平荷重に対して基部で杭の引抜きが発生しないように設計した試験体である。

試験体の主な損傷イベントは図-7 のように進行した。+1.5  $\delta_y$  時点でのRC 上部工のひび割れ発生状況を図-8 に、載荷実験終了後の試験体の破壊状況を図-9 に示す。なお、図-8 中のA~D は、各杭位置を示している。

まず、 $\pm 30\text{kN}$  までの予備載荷後に正側載荷を行った。水平荷重が+90.2kN 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+144.8kN で、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~+150kN 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、+199.8kN の時点でC 杭杭頭部(2断面)のひずみが材料

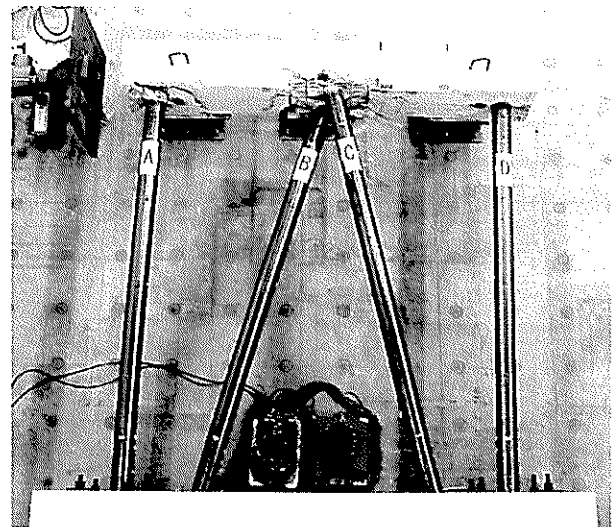


図-9 試験体の最終破壊状況(CASE1)

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+24.04mm 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抵抗力が低下し、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+223.2kN 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の剥離範囲が広がった。水平荷重+210.2kN 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  $\delta_y$  (+179.0kN) で D 杭杭頭部も降伏ひずみに達した。+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杭の抜出しによるせん断ひび割れが発生した。

水平変位が+2.5  $\delta_y$  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範囲もさらに広がった。-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離し、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て、荷重は最大荷重の 6 割程度まで低下した。その後、正側の押切り載荷を行うと、水平荷重+178.4kN で+7.5  $\delta_y$  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。

## (2) CASE2 (曲げフックタイプ)

CASE2 は、水平荷重に対して杭が塑性化した後、杭基部で引抜きが発生するように設計した試験体による実験である。

試験体の主な損傷イベントを図-10 に、+1.5  $\delta_y$  時点での RC 上部工のひび割れ発生状況を図-11 に示す。

CASE1 と同様に、 $\pm 30$ kN までの予備載荷後に正側載荷を行った。水平荷重が+105.2kN に達した時点で、B 杭杭頭部周辺の上部工コンクリートにひび割れが発生した。水平荷重+114.9kN の時点で B 杭と C 杭の接合部で発生したひび割れが繋がり、水平荷重+150.4kN に達したとき、既に発生していた B 杭杭頭部周辺のひび割れがさ

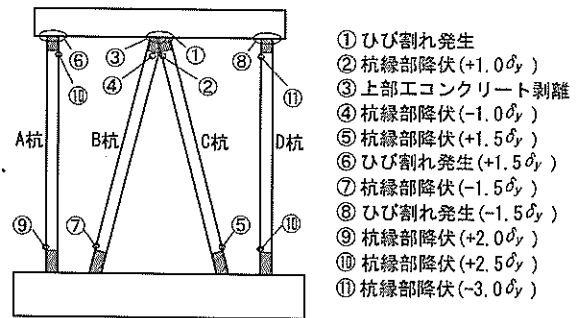


図-10 試験体の損傷過程(CASE2)

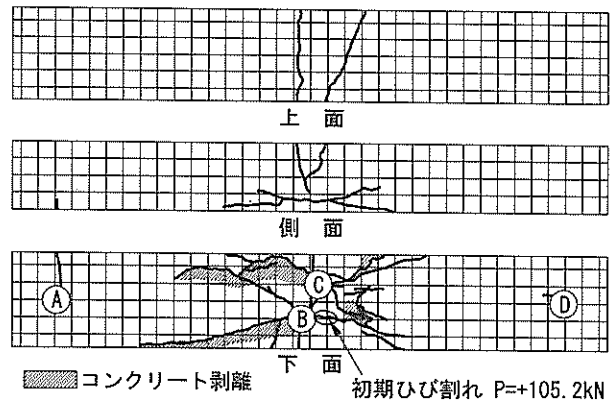


図-11 RC 上部工のひび割れ発生状況(CASE2,+1.5  $\delta_y$ )

らに伸展し、側面側の上部工端部まで貫通した。水平荷重+202.0kN の時点で C 杭杭頭部のひずみが降伏ひずみに達したことから、この時点の水平変位+22.98mm を+1.0  $\delta_y$  と決定した。

負側載荷では、水平荷重-150.2kN で C 杭杭頭部周辺にひび割れが発生した。-199.4kN で B 杭杭頭部が降伏ひずみに達し、この時、水平変位は-22.45mm であった。

+1.5  $\delta_y$  での水平荷重は+228.8kN となり、この時点が最大荷重であり、CASE1 とほぼ同程度の結果となった。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の損傷がさらに進んだ。

水平荷重+217.9kN で+2.0  $\delta_y$  となり、この時点で耐力の低下がみられた。+2.0  $\delta_y$  で A 杭が降伏し、+2.5  $\delta_y$  で D 杭も降伏した。目視確認による試験体の損傷状況は、CASE1 とほぼ同様であり、+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た。以降の載荷では杭頭部のきしみが顕著となり、斜杭杭頭部周辺の上部工コンクリートの剥離がさらに進んだ。

-4.0  $\delta_y$  まで載荷を行った時点で、荷重は最大荷重の 6 割程度まで低下し、上部工の損傷も著しく進行していたことから、CASE2 における正負交番載荷は-4.0  $\delta_y$  までとし、その後、CASE1 と同じ水平変位+7.5  $\delta_y$  までの押切

り載荷を行った。

CASE2 においては、明確な杭下端での引抜きは認められず、結果として、CASE1 とほぼ同様な破壊過程を辿った。

### (3) CASE3 (スタッドジベルタイプ)

CASE3 は、CASE2 と同様に、水平荷重に対して杭が塑性化した後、杭基部で引抜きが発生するように設計した試験体による実験である。試験体の主な損傷イベントを図-12 に、 $+1.5 \delta_y$  時点での RC 上部工のひび割れ発生状況を図-13 に示す。

載荷手順は CASE1 および CASE2 と同様に、 $\pm 30 \text{kN}$  までの予備載荷後に正側載荷を行った。

水平荷重が  $+124.7 \text{kN}$  に達した時点で B 杭杭頭部周辺の上部工コンクリートにひび割れが発生した。この時点で B 杭と C 杭接合部の杭間に発生したひび割れは繋がり、B 杭杭頭部のひび割れは上部工側面下側の端部まで貫通した。斜杭杭頭部周辺での初期ひび割れは CASE1 および CASE2 と同様の発生状況を示した。引き続き荷重を加えると、 $+202.1 \text{kN}$  の時点で B 杭および C 杭杭頭部のひずみが降伏ひずみに達したことから、この時点の水平変位  $+23.09 \text{mm}$  を  $+1.0 \delta_y$  と決定した。 $+1.0 \delta_y$  での水平荷重および水平変位は CASE1 および CASE2 とほぼ同程度の値を示した。

負側載荷では、水平荷重  $-140.1 \text{kN}$  で C 杭杭頭部の上部工コンクリートにひび割れが発生した。水平荷重  $-204.3 \text{kN}$  で C 杭杭頭部が降伏ひずみに達し、この時、水平変位は  $-25.37 \text{mm}$  であった。 $\pm 1.0 \delta_y$  の載荷段階では、全ケースとも斜杭杭頭部周辺のみ損傷が見られ、直杭杭頭部周辺にひび割れの発生はなかった。また、CASE3 においても  $+1.5 \delta_y$  で A 杭の杭頭部周辺にひび割れが発生し、斜杭杭頭部周辺の上部工の剥離が始まった。水平荷重  $+226.2 \text{kN}$  で  $+1.5 \delta_y$  となり、他のケースと同様に、この時点が最大荷重であった。また、その荷重もほぼ同程度の結果となった。

以降の載荷では、CASE1 および CASE2 と同様に、 $-1.5 \delta_y$  で D 杭杭頭部周辺の上部工にひび割れが入り、 $+2.0 \delta_y$  の時点で耐力の低下がみられた。直杭は、 $+2.0 \delta_y$  で A 杭が降伏し、 $-2.0 \delta_y$  で D 杭が降伏した。

CASE3 における載荷は、CASE2 と同様に、 $-4.0 \delta_y$  まで正負交番載荷とし、その後、 $+7.5 \delta_y$  までの押切り載荷を行った。

CASE3 は、CASE2 と同様に、杭下端の引抜きを想定したタイプの実験であったが、押切り載荷終了時においても、明確な引抜きは認められず、CASE1 および CASE2

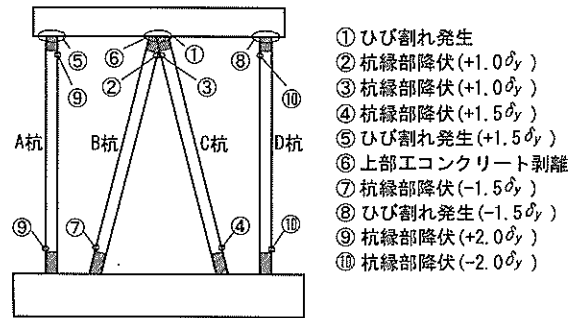


図-12 試験体の損傷過程(CASE3)

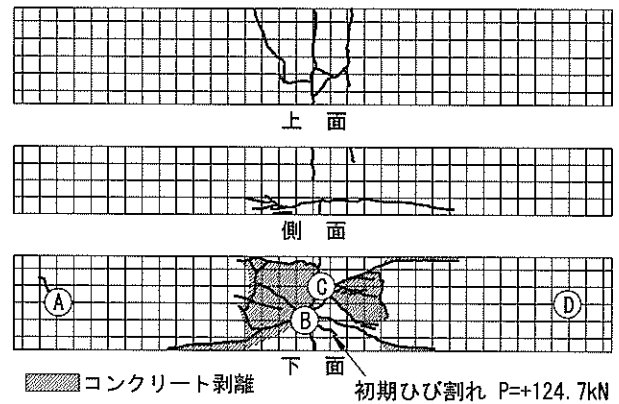


図-13 RC 上部工のひび割れ発生状況(CASE3,  $+1.5 \delta_y$ )

とほぼ同様な破壊過程を辿った。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、上部工からの杭の拔出しが生じ、その結果、基部で引抜きを生じさせるまでの荷重が引抜き杭に伝達されなかったためと考えられる。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や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・解析を行い、その回転変形挙動を考慮した解析手法も提案している<sup>7)</sup>。一方、斜め組杭式栈橋については、本実験から斜杭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、本研究では、斜杭杭頭接合部に着目した非線形解析を行うこととした。非線形解析については、4. で述べる。

表-5 各載荷ステップ時の水平荷重

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

### 3.2 荷重-変位関係

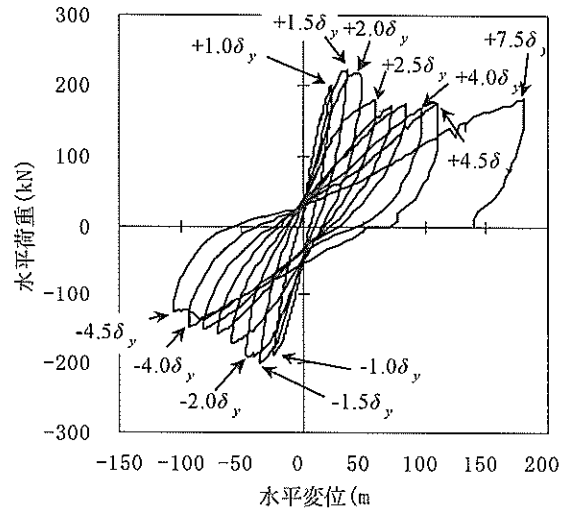
図-14 に各ケースの水平荷重と上部工の水平変位の関係を示し、表-5 に各載荷ステップ時の水平荷重および最大荷重に対する水平荷重の割合を示す。

$\pm 1.0 \delta_y$  の決定後、各ケースとも  $\pm 1.5 \delta_y$  において正側および負側ともに最大荷重を示した。  $\pm 2.0 \delta_y$  では最大荷重の 95%程度まで荷重が低下した。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、  $+4.0 \delta_y$  の時点においても最大荷重の 70%程度の耐力を示した。

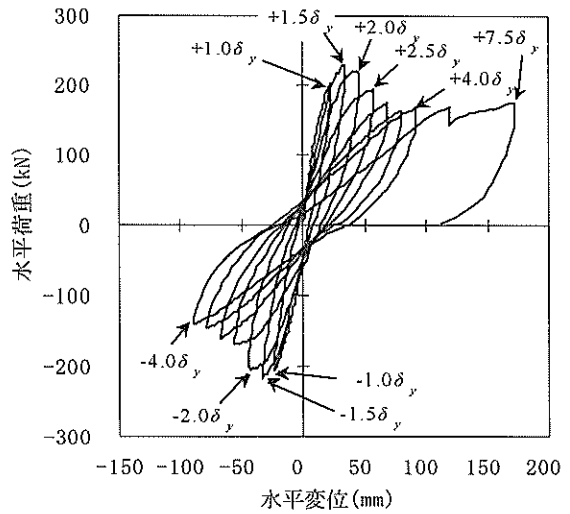
CASE1 および CASE2 では、  $+7.5 \delta_y$  の時点で逆に荷重がわずかに上昇しているが、これは、斜杭杭頭接合部のつばプレートが突張るように水平荷重に抵抗したためと考えられる。荷重は押切り荷重として  $+7.5 \delta_y$  まで行ったが、その途中の段階で、構造体全体として水平荷重を受け持つ抵抗機構ではなくなり、斜杭杭頭部のつばプレートに荷重が集中し、つばプレートの変形のみが進む状況となった。

本実験の結果、斜め組杭式栈橋では、最大荷重を示した後、急激に水平荷重に対する耐力の低下が認められたことから、斜め組杭式栈橋における終局時は、最大荷重時とし、各ケースとも、  $+1.5 \delta_y$  を終局時とした。

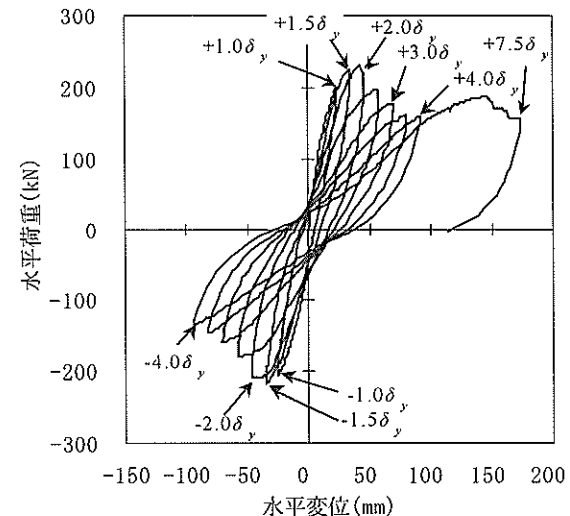
CASE2 および CASE3 では、ともに杭下端の引抜きがほとんど発生しなかったことから、杭下端を剛結させた CASE1 と比較して、その水平荷重-水平変位関係はほぼ同様の傾向を示した。また、3.1 で述べたように、終局状態へ至るまでの RC 上部工の損傷過程も CASE1、CASE2 および CASE3 で明確な違いは認められなかった。



(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-14 荷重-変位関係

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 塑性率

保有耐力法に基づく耐震性能照査における指標の一つである塑性率を、ここでは終局荷重時の水平変位  $\delta_u$  と緑部降伏時の水平変位  $\delta_y$  の比で表すこととする。この場合、直杭式栈橋の模型載荷実験結果<sup>2)</sup>では、塑性率は3~4 程度となる。本実験結果から、斜め組杭式栈橋では、塑性率は1.5 となった。

直杭式栈橋と斜め組杭式栈橋では、水平荷重に対する抵抗機構が異なり、水平荷重に対して、斜め組杭の軸力で主に抵抗する斜め組杭式栈橋は、小さい水平変位で、大きな水平荷重に抵抗する構造である。したがって、水平荷重に対して、主に杭の曲げで抵抗する直杭式栈橋とでは、その塑性率を単純に比較することはできない。しかし、斜め組杭式栈橋の構造特性を把握する上で、塑性率は一つの重要なパラメータであると考えられる。

載荷実験においては、杭下端は基部コンクリートに定着させているのに対して、実際の栈橋は、地盤中に杭が打ち込まれた状態であり、杭下端の固定条件は本実験で用いた試験体とは大きく異なる。直杭式栈橋については、既往の栈橋の建設事例に基づいて設定した標準的諸元を有する栈橋の弾塑性解析の結果<sup>9)</sup>から、地盤条件を考慮した場合での塑性率は3.5~6 程度となっており、解析結果は、ほぼ妥当な値を与えていると考えられる。

これに対して、斜め組杭式栈橋は、水平荷重に対して軸力が卓越する抵抗機構であるため、杭下端の固定条件が、その塑性率に大きく影響を及ぼすと考えられるが、現時点では、その影響度合いを明らかにできず、今後の検討課題の一つである。

また、直杭式栈橋の耐震性能照査を行う場合に、簡便法によって保有耐力を算定する際の塑性率は、終局時の上部工水平変位の弾性限度に対する水平荷重の比としている。この際、直杭式栈橋では、終局状態を地中部で杭が最初に全塑性化した時点として設定し、許容塑性率の算定式を提案している<sup>8)</sup>。同様の手法を斜め組杭式栈橋の耐震性能照査に用いる場合には、斜め組杭式栈橋では、杭の引抜きあるいは斜杭杭頭部の損傷が栈橋全体の強度変形特性を支配していると考えられることから、斜め組杭式栈橋の終局状態を適切に評価し、設定する必要がある。

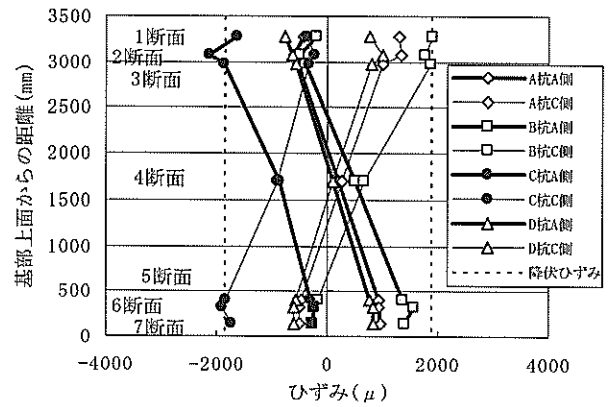


図-15 鋼管杭の軸方向ひずみ分布(CASE1, +1.0  $\delta_y$ )

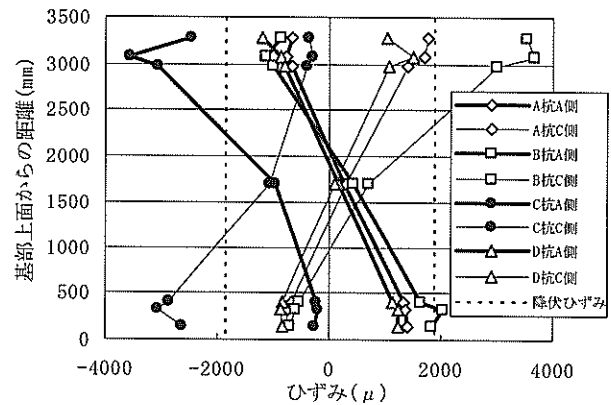


図-16 鋼管杭の軸方向ひずみ分布(CASE1, +1.5  $\delta_y$ )

### 3.4 鋼管杭の軸方向ひずみ

CASE1 の+1.0  $\delta_y$  および+1.5  $\delta_y$  での鋼管杭の軸方向ひずみ分布をそれぞれ図-15 および図-16 に示す。なお、凡例では、各杭断面の載荷ジャッキ側をA 側、その反対側をC 側と表記した。

杭軸方向ひずみは、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である1 断面および7 断面は、鋼管杭のみの断面より剛性が高いため、ひずみが相対的に小さくなり、中詰コンクリート部と鋼管部の境界である2 断面および6 断面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 杭は杭全体で圧縮ひずみが発生しており、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

と引張りずみが発生していることから、主に曲げで抵抗したといえる。また、A杭、B杭およびD杭は、全体の傾向として引張側に歪んでいることから、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で主に抵抗すると考えられている。このため、現行の設計法では、水平力は斜杭が全て受け持つものとしているが、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。

+1.5  $\delta_y$  では、各杭とも頭部および基部においてひずみが著しく増大しており、降伏後の抵抗機構は曲げが卓越していたことがわかる。また、それぞれの荷重ステップで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。

### 3.5 杭頭接合部の回転

直杭式栈橋の構造解析を行う場合、杭頭接合部の回転挙動の適切なモデル化が重要である。そこで、斜め組杭式栈橋についても杭頭接合部の回転挙動について考察する。ここで、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。図-17に回転角模式図を示し、CASE1での各杭の杭頭接合部回転角と水平荷重の関係を図-18に示す。

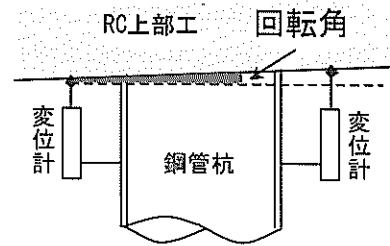
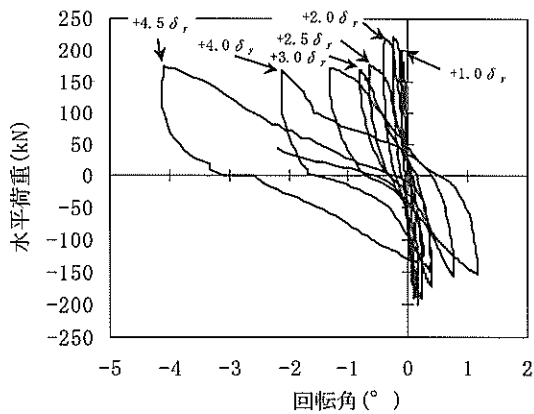
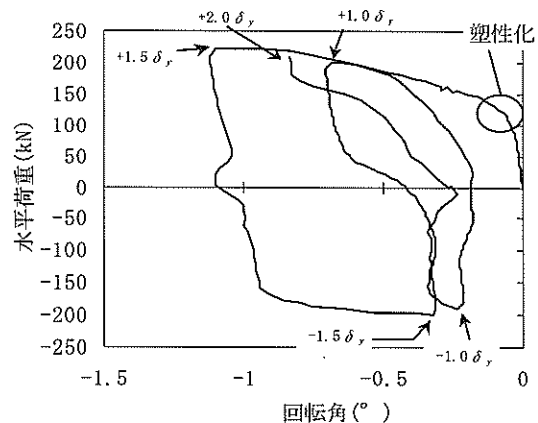


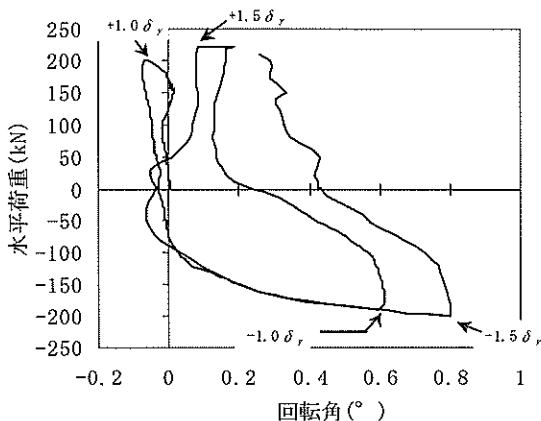
図-17 回転角模式図



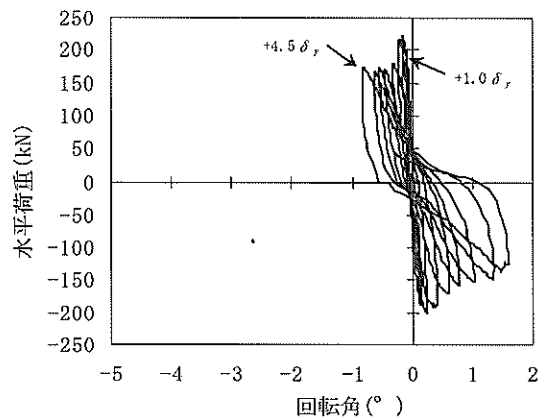
(a) A杭接合部



(c) C杭接合部



(b) B杭接合部



(d) D杭接合部

図-18 荷重-接合部回転角の関係(CASE1)

試験体は、左右対称の構造であることから、正負交番載荷によって、斜杭のB杭接合部とC杭接合部は、対称的な回転挙動を示し、直杭のA杭接合部とD杭接合部は同様な挙動を示した。

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いるが、 $+3.0\delta_y$ 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てなくなったことで、構造全体としての抵抗機構が、軸力抵抗モードから曲げ抵抗モードへ変化し、直杭の負担が大きくなり、直杭杭頭接合部の損傷が進んだためと考えられる。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( $+144.8\text{kN}$ )とほぼ同程度の荷重 $+130\sim+140\text{kN}$ 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。つまり、RC上部工にひび割れが発生することで斜杭杭頭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杭接合部において $+4.0\delta_y$ から $+4.5\delta_y$ の間に約 $2.0^\circ$ 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剥離や杭の抜出しに伴う変形量が含まれており、実験での回転角測定値は杭頭接合部の実際の回転角とは厳密に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著しく進み、杭頭部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。

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主に抵抗することから、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変形は少なく、斜杭杭頭接合部が大きく回転した。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。

$+1.5\delta_y$ までの各杭の回転角と水平荷重の関係(包絡線)を図-19に示す。正側水平荷重に対してはC杭が突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。また、載荷の初期段階に着目すると(図-19内の拡大図)、水平荷重 $+80.5\text{kN}$ の時点で斜杭接合部に初期ひび割れが発生したことで、B杭およびC杭接合部の回転変形特性が大きく変化したことが明らかとなった。

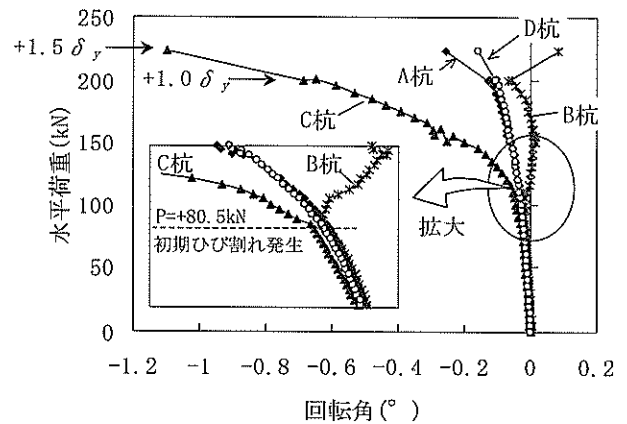
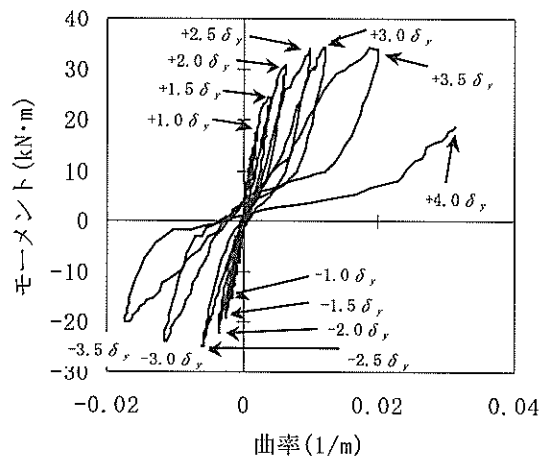
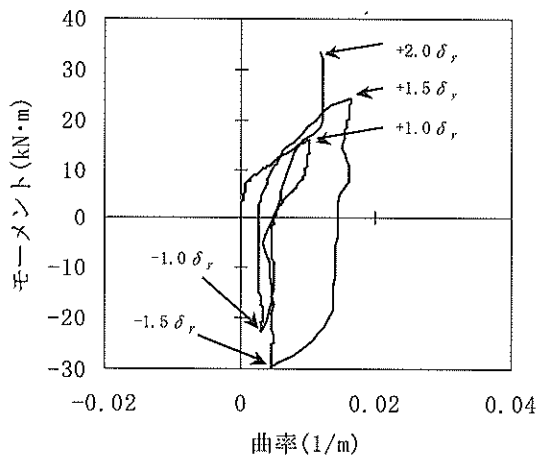


図-19 各杭の回転角と水平荷重の関係(CASE1)



(a) A杭接合部



(b) C杭接合部

図-20 杭頭モーメントと接合部曲率の関係(CASE1)

### 3.6 杭頭モーメントと接合部曲率

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-20に示す。ここで、杭頭モーメントは、鋼管杭の軸方向ひずみ測定値から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。

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（以下、接合部の  $M-\phi$  関係と呼ぶ）も大きく異なっていることがわかる。接合部の  $M-\phi$  関係について詳しく考察するため、図-21 に杭頭モーメントと接合部曲率の荷重ステップによる変化を示す。

荷重ステップ+2.0  $\delta_y$  の時点では、斜杭接合部は既に著しく損傷しており、この時点で、斜杭杭頭接合部の回転角の測定はできなくなった。このため、+2.0  $\delta_y$  以降は、斜杭接合部の曲率も算定できなくなったが、この荷重段階で、斜杭は上部工から抜け出したようになっていた。+2.5  $\delta_y$  以降の荷重ステップでは、引抜き側の斜杭が上部工から抜け出したことで、斜杭の杭頭モーメントは押込み杭の杭頭に集中し、引抜き杭には、ほとんど発生していない。これに対して、直杭の杭頭モーメントは+2.5  $\delta_y$  以降も正負両側に発生しており、接合部曲率も正負両側の値を示したことがわかる。

A 杭と C 杭と比較した場合、+1.0  $\delta_y$  では、A 杭杭頭モーメント 17.7kN $\cdot$ m に対して、C 杭 16.1kN $\cdot$ m とほぼ同程度の杭頭モーメントが作用したが、接合部曲率は、A 杭は 0.0019(1/m)、C 杭は 0.010(1/m)であり、C 杭杭頭接合部が荷重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先に進み、変形が進んだことで、C 杭接合部曲率が大きくなったものと考えられる。

同様に、-1.0  $\delta_y$  では B 杭接合部が大きな曲率を示しており、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ることがわかった。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明確に表していると考えられる。

### 3.7 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-22 に示す。

正側荷重の荷重によって、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、正側荷重を初期荷重として

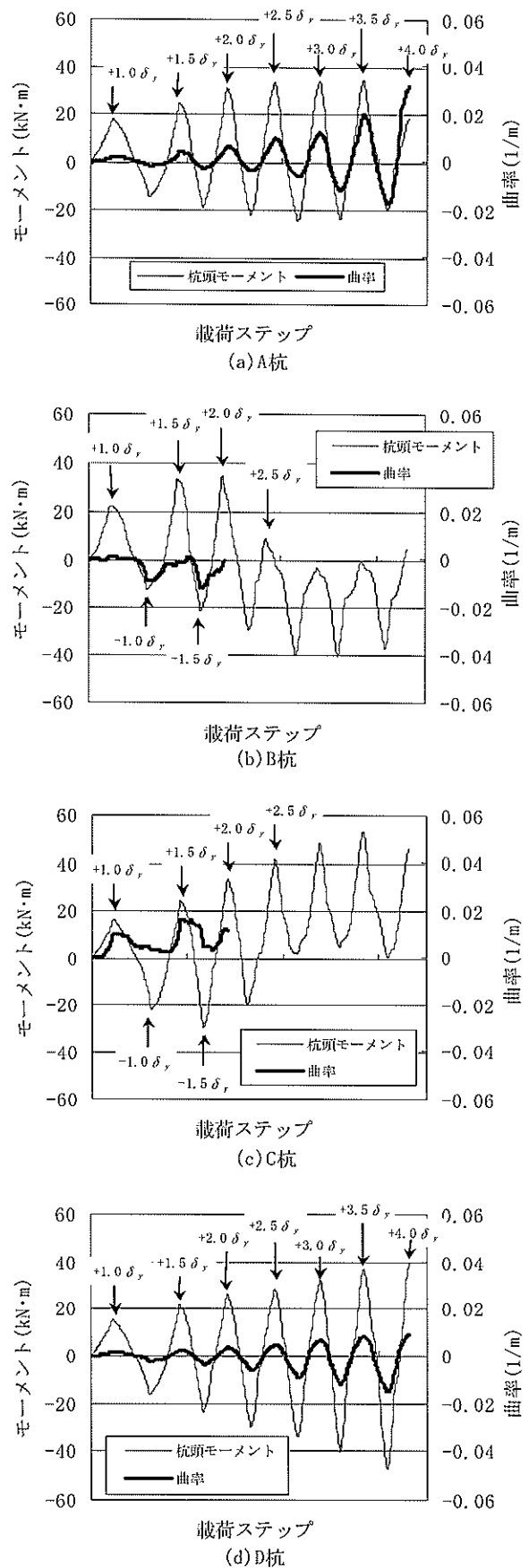
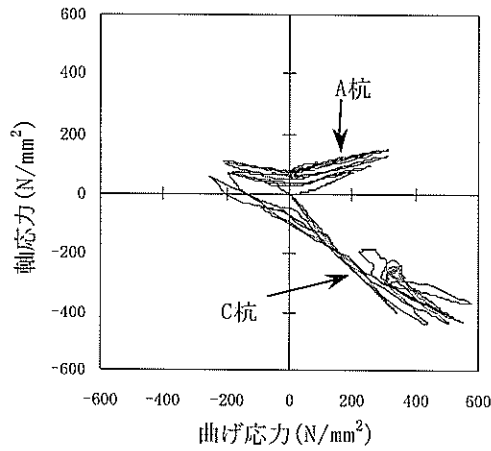
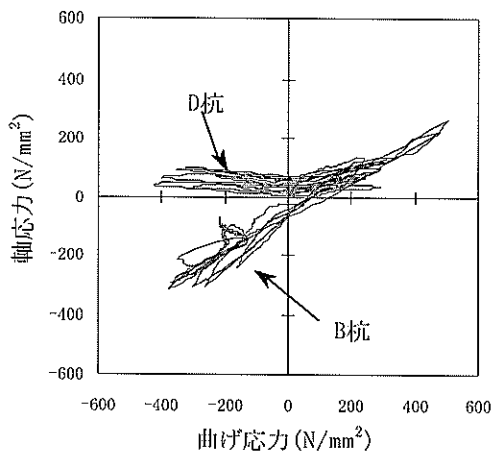


図-21 杭頭モーメントと接合部曲率の変化(CASE1)





(a) A 杭および C 杭



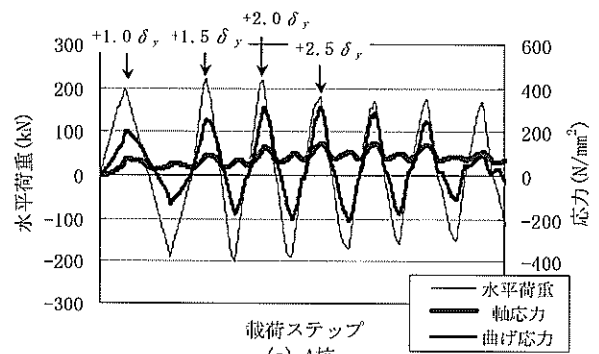
(b) B 杭および D 杭

図-22 曲げ応力と軸応力の関係(CASE1)

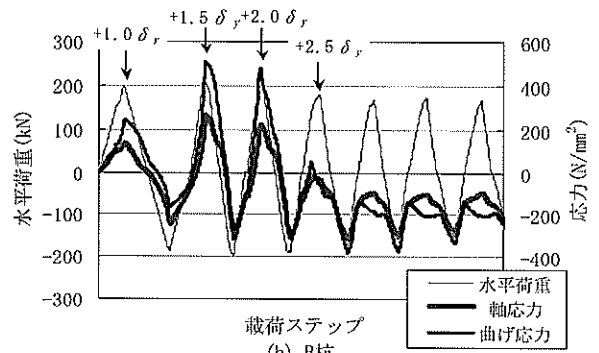
いるため、正側載荷で押込み杭として働く C 杭の最大軸圧縮応力値が、負側載荷時の B 杭の最大軸圧縮応力値を上回る結果となった。また、どのケースも載荷の初期段階では、斜杭では軸引張応力よりも軸圧縮応力が卓越した。載荷を繰り返すに従って、曲げ応力が卓越してくる結果となった。これは、斜杭杭頭接合部の損傷が進み、上部工から杭が抜け出したことで、引抜き杭が引張力を受け持てなくなり、構造全体としての抵抗機構が軸力抵抗モードから曲げ抵抗モードへ移行していったことを示している。

図-22 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載荷ステップによる変化を図-23 に示す。

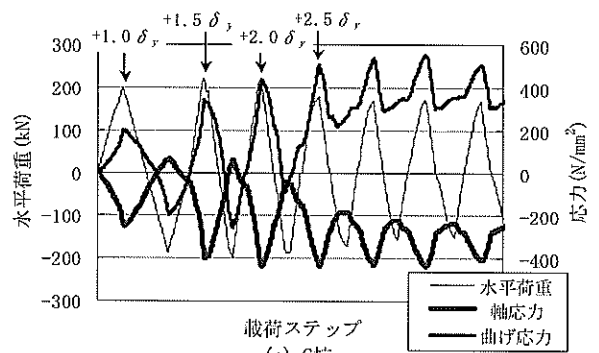
A 杭では、正側負側載荷のどちらの場合も軸引張応力が作用しており、 $+2.5 \delta_y$  では  $+1.0 \delta_y$  時の約 2 倍の軸引張応力が発生していたが、その変動は小さかった。また、A 杭と構造として対をなす D 杭もほぼ同様の傾向を示した。



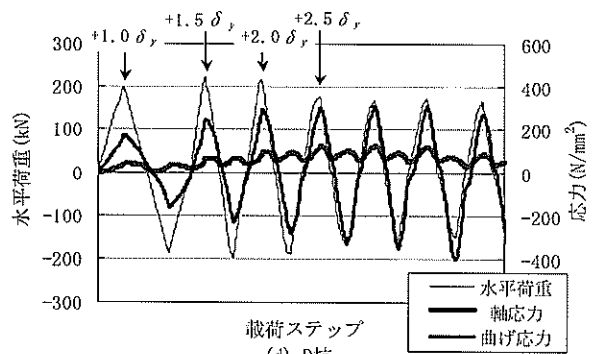
(a) A 杭



(b) B 杭



(c) C 杭



(d) D 杭

図-23 軸応力、曲げ応力と水平荷重の変化(CASE1)

一方、正側載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たが、 $+2.5 \delta_y$ 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。

載荷実験では、 $+1.5 \delta_y$ の時点で最大荷重を示した後、耐力が低下し、引抜き杭が引抜き力に抵抗できなくなった $+2.0 \delta_y \sim +2.5 \delta_y$ の時点で、斜め組杭式栈橋としての軸力抵抗機構が完全に崩れた。このことから、杭が十分な引抜き抵抗力を有している場合は、レベル1地震動に対しては、杭の降伏を、レベル2地震動に対しては、斜杭杭頭接合部の損傷による軸力抵抗機構の崩壊を終局状態として、斜め組杭式栈橋の耐震性能を評価することができる。

#### 4. 数値解析

現行の港湾の施設の技術上の基準・同解説<sup>4)</sup>では、栈橋の耐震性能照査は、(a)簡便法、(b)弾塑性解析法、あるいは(c)非線形動的解析法のいずれかの方法で行うこととしているが、構造が複雑な場合や斜杭を含む場合には、簡便法では保有耐力を過大に評価する可能性があり、弾塑性解析法等による詳細な解析が必要であるとしている。直杭式栈橋については、これまでに実施された模型載荷実験による破壊過程の把握、ならびに解析手法の検討<sup>2,7)</sup>の結果、杭と上部工の杭頭接合部の回転挙動を考慮することで、より詳細に栈橋の非線形挙動を推定できることが報告されており、その解析手法も確立されている。

本研究において斜め組杭式栈橋の模型載荷実験を実施した結果、杭が十分な引抜き抵抗力を有している場合は、斜杭杭頭接合部の性能が、栈橋構造全体の強度変形特性に大きく影響を及ぼすことが明らかとなった。よって、ここでは、斜め組杭式栈橋の斜杭杭頭接合部の回転挙動およびその損傷過程に着目した静的非線形解析を行い、その適用性について検討した。

##### 4.1 解析概要

杭が十分な引抜き抵抗力を有しているものとして、CASE1の模型載荷実験結果を基に、杭下端を固定とした

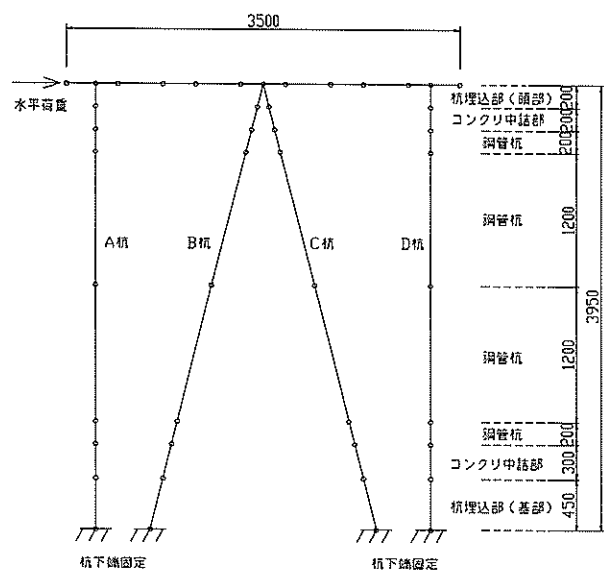


図-24 解析モデル

表-6 解析ケース

解析ケース	解析モデル概要
①	杭頭接合部の回転挙動を考慮しない
②	杭頭接合部の回転挙動を考慮する
③	杭頭接合部の損傷を考慮する

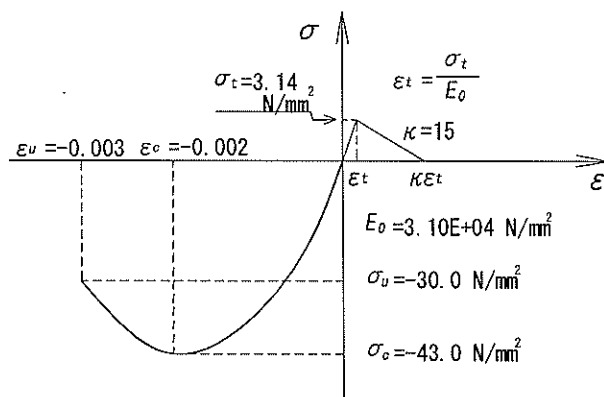


図-25 コンクリートの応力-ひずみ関係

2次元静的非線形解析を行った。解析は、杭頭接合部の回転挙動を考慮しないケース、杭頭接合部の回転挙動を考慮したケースおよび杭頭接合部の損傷を考慮したケースについて行った。解析モデルおよび解析ケースを、それぞれ図-24および表-6に示す。各ケースとも鋼管杭およびRC上部工は、それぞれはり要素でモデル化した。杭頭部および基部のコンクリートを中詰した鋼管部のヤング率は、直杭式栈橋の解析<sup>2)</sup>と同様に、コンクリート

の剛性を 1/2 だけ有効と仮定して設定し、杭埋込部の剛性は十分に剛なものとして設定した。また、杭下端は完全に固定されているものとしてモデル化を行った。

解析に用いた各材料特性値は、材料試験結果を基に設定した。コンクリートは、図-25 に示す応力-ひずみ関係とし、鋼管杭の応力-ひずみ関係は、バイリニアモデルとした。

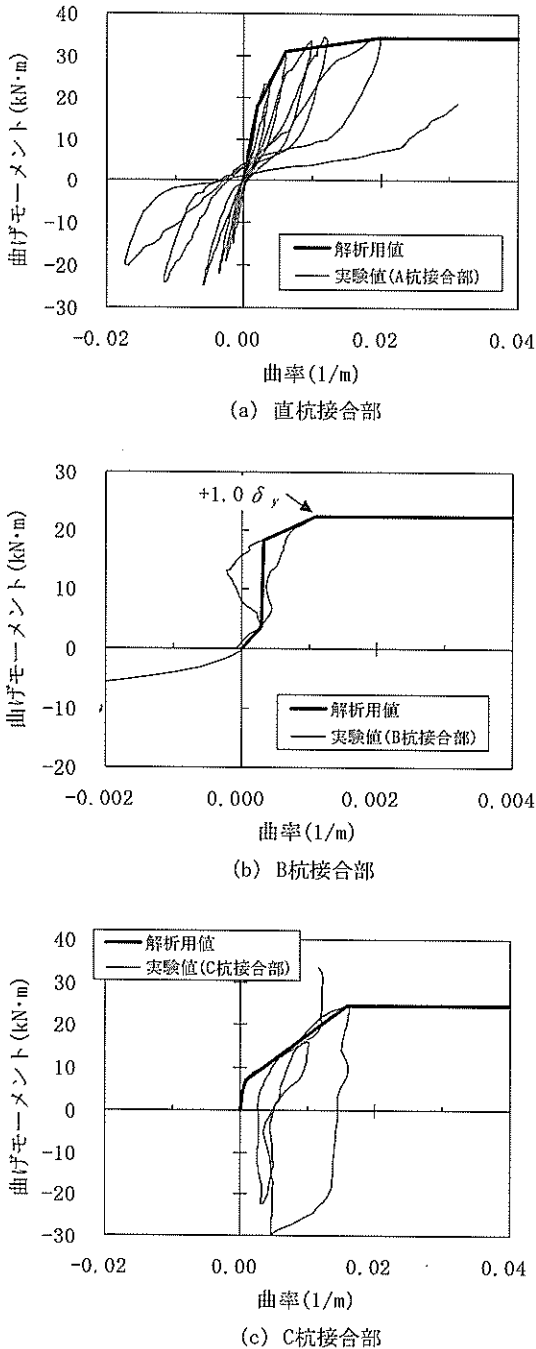


図-26 解析に用いた接合部の  $M-\phi$  関係

解析ケース②における杭頭接合部の回転挙動は、杭頭部のコンクリート中詰部の要素特性を、実験から得られた接合部の  $M-\phi$  関係を基に設定した。この際、直杭接合部は A 杭接合部の  $M-\phi$  関係から、斜杭接合部は、それぞれ B 杭接合部および C 杭接合部の  $M-\phi$  関係から設定した。図-26 に解析に用いた接合部の  $M-\phi$  関係を示す。

解析ケース③における杭頭接合部の損傷については、杭頭接合部の損傷に伴って生じた上部工からの杭の抜出しを栈橋の強度変形特性における支配的要因と考え、引抜き杭杭頭部にバネ接合要素を導入することで上部工からの杭の抜出しを表現した。バネ要素は、杭軸方向バネと杭軸直角方向バネとし、杭軸直角方向に対しては剛な要素モデル（杭軸直角方向バネ定数  $k \rightarrow \infty$ ）とした。

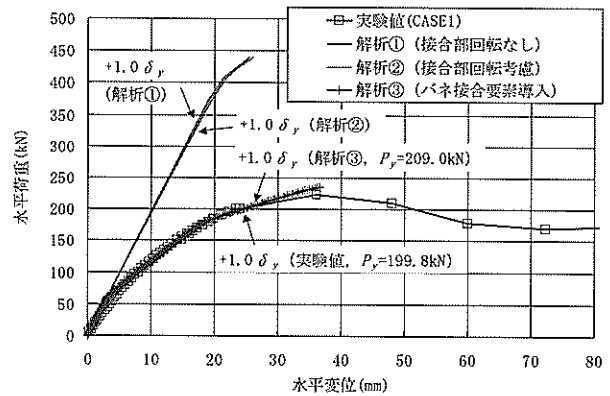


図-27 荷重-変位関係

#### 4.2 解析結果および考察

図-27 に数値解析から得られた水平荷重-水平変位関係を示す。なお、比較のため、CASE1 の載荷実験結果も示した。

##### (1) 杭頭接合部の回転挙動を考慮しないケース

杭頭接合部の回転挙動を考慮しないケースでは、載荷に伴って生じた構造全体としての剛性低下を表現できず、杭縁部降伏時の水平荷重は実験結果の約 1.7 倍、水平変位は約 0.7 倍という解析結果となった。

##### (2) 杭頭接合部の回転挙動を考慮したケース

杭頭接合部の回転挙動を考慮したケースは、回転を考慮しない場合（解析ケース①）よりも、わずかに水平変位が大きくなるものの、解析ケース①と同様に、載荷に伴って生じた構造全体としての剛性低下を再現できず、杭縁部降伏時の水平荷重は実験結果の約 1.6 倍、水平変

位は約 0.7 倍であった。

筆者ら<sup>2)</sup>による直杭式栈橋の解析では、杭頭接合部の回転挙動を考慮した手法によって、水平荷重—水平変位関係を比較的良く再現できたが、斜め組杭式栈橋に同様の手法を用いて行った今回の解析では、実験結果を再現することができなかった。また、筆者ら<sup>2)</sup>による直杭式栈橋の解析では、上部工および杭の曲げモーメント—曲率関係を適切にモデル化する手法によって、荷重—変位関係を比較的良く再現できることも示している。そこで、斜め組杭式栈橋についても、この手法による解析を試行したが、実験結果を再現することはできなかった。これらの理由は、直杭式栈橋では上部工と杭の曲げ抵抗が主な抵抗機構であるのに対して、斜め組杭式栈橋では斜め組杭の軸力による抵抗が主な抵抗機構であるため、構造全体の剛性が低下するメカニズムが異なることが原因と考えられる。

### (3) 杭頭接合部の損傷を考慮したケース

引抜き杭の杭頭部に導入した杭軸方向バネによって、杭頭接合部の損傷による影響を考慮した。杭軸方向バネは、初期ひび割れが発生するまでは、剛なバネとし、初期ひび割れの発生以降は、実験結果の荷重—変位関係に合うようにバネの荷重—変位関係を図-28 のように設定した。ここで、初期ひび割れ発生時の杭軸方向荷重 (114kN) は、実験結果より初期ひび割れ発生時の B 杭杭頭部での軸力から設定した。その結果、実験結果とほぼ同程度の水平荷重で C 杭杭頭部縁部が降伏し、その際の水平変位も実験結果に近い値となった。このことから、斜め組杭式栈橋の構造解析を行う場合は、杭頭接合部の強度変形特性を適切にモデル化することが重要であると考えられる。

今回の解析<sup>③</sup>では、杭頭接合部の損傷を、上部工から杭が徐々に抜け出していく現象として考え、引抜き杭の杭頭部に導入したバネによって表現したが、その適切なモデル化の手法を提案するまでには至っていない。今後、杭頭接合部の力学的挙動に着目した実験および解析を行い、さらなる検討を行う必要がある。

## 5. 結論

本研究では、斜め組杭式栈橋の模型載荷実験によって、栈橋構造全体が崩壊へと至る過程を明らかにした。また、数値解析によって、斜め組杭式栈橋の破壊メカニズムを検討し、斜杭杭頭接合部の適切なモデル化が必要であることを示した。

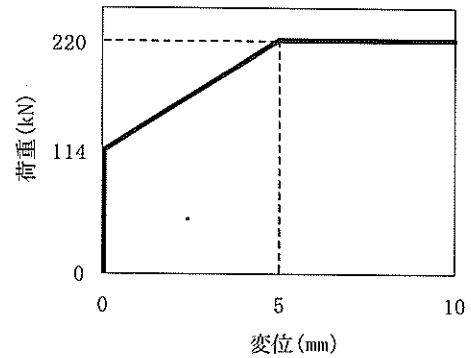


図-28 杭軸方向バネの荷重—変位関係

載荷実験は、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を行ったが、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および数値解析に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) 斜め組杭式栈橋において鋼管杭が最初に降伏した時点における水平変位と最大荷重時の水平変位の比 (塑性率) は 1.5 程度であり、直杭式栈橋の場合の 1/2 ~ 1/3 となった。
- (3) 斜め組杭式栈橋は、水平荷重に対して斜杭は軸力と曲げで抵抗した。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、軸圧縮と曲げで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、軸引張と曲げで抵抗した。
- (4) 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。
- (5) 杭頭接合部の回転挙動のみを考慮した数値解析では、実験結果を再現できず、杭頭接合部の損傷を考慮する必要があった。

## 6. あとがき

今回の実験および解析から得られた知見を基に、杭頭接合部の力学的挙動について、より詳細な検討を行うことにしている。また、杭が地盤中から引き抜ける場合の構造特性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。

(2003年2月14日受付)

## 謝辞

本研究の載荷実験および解析の実施にあたっては、港湾空港技術研究所構造強度研究室の加藤絵万研究官をはじめ、同依頼研修員の永田淳氏(株式会社横河ブリッジ)、伊藤始氏(前田建設工業株式会社)にご協力頂いた。末尾ながらここに記して謝意を表します。

## 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, 1998, pp.530-531.
- 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, 1999, pp.223-255.
- 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, 1998, pp.75-130.
- 4) 運輸省港湾局監修: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 日本港湾協会, 1999, pp.745-753.
- 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, 2001, pp.101-113.
- 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, 2002, pp.479-488.
- 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.
- 8) 横田弘, 川端規之, 芥川博昭, 黒崎和保, 津嶋敏明, 原田典佳, 矢頭明子: 鋼直杭式栈橋の弾塑性解析による耐震性能照査および簡便照査法の提案, 港湾技研資料, No.943, 1999.

付録 A 鋼管杭の軸方向ひずみ分布

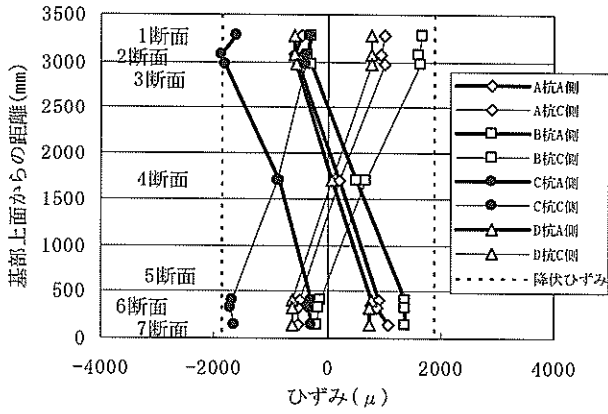


図-A.1 鋼管杭の軸方向ひずみ分布(CASE2, +1.0  $\delta_y$ )

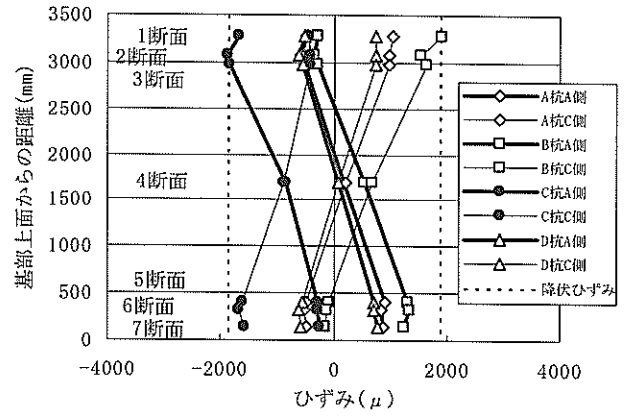


図-A.3 鋼管杭の軸方向ひずみ分布(CASE3, +1.0  $\delta_y$ )

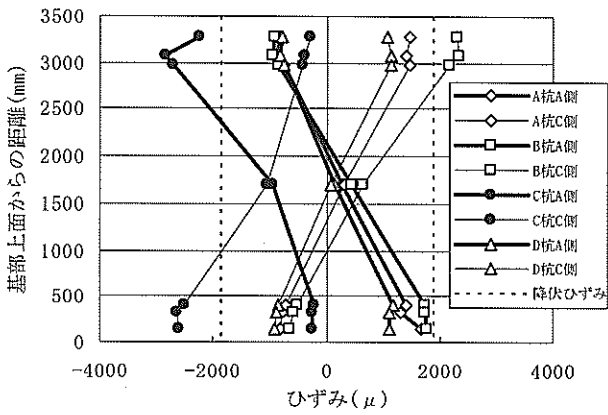


図-A.2 鋼管杭の軸方向ひずみ分布(CASE2, +1.5  $\delta_y$ )

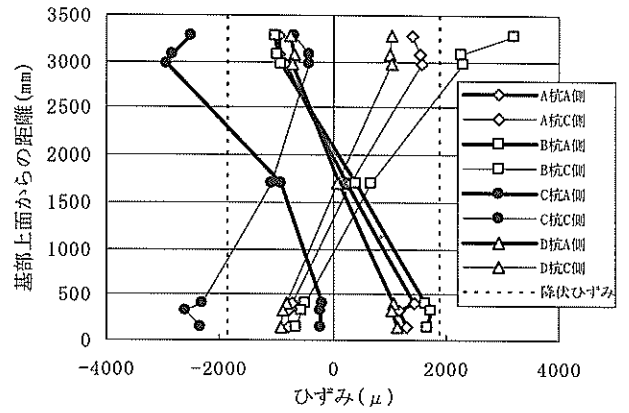


図-A.4 鋼管杭の軸方向ひずみ分布(CASE3, +1.5  $\delta_y$ )

付録B 荷重－接合部回転角の関係

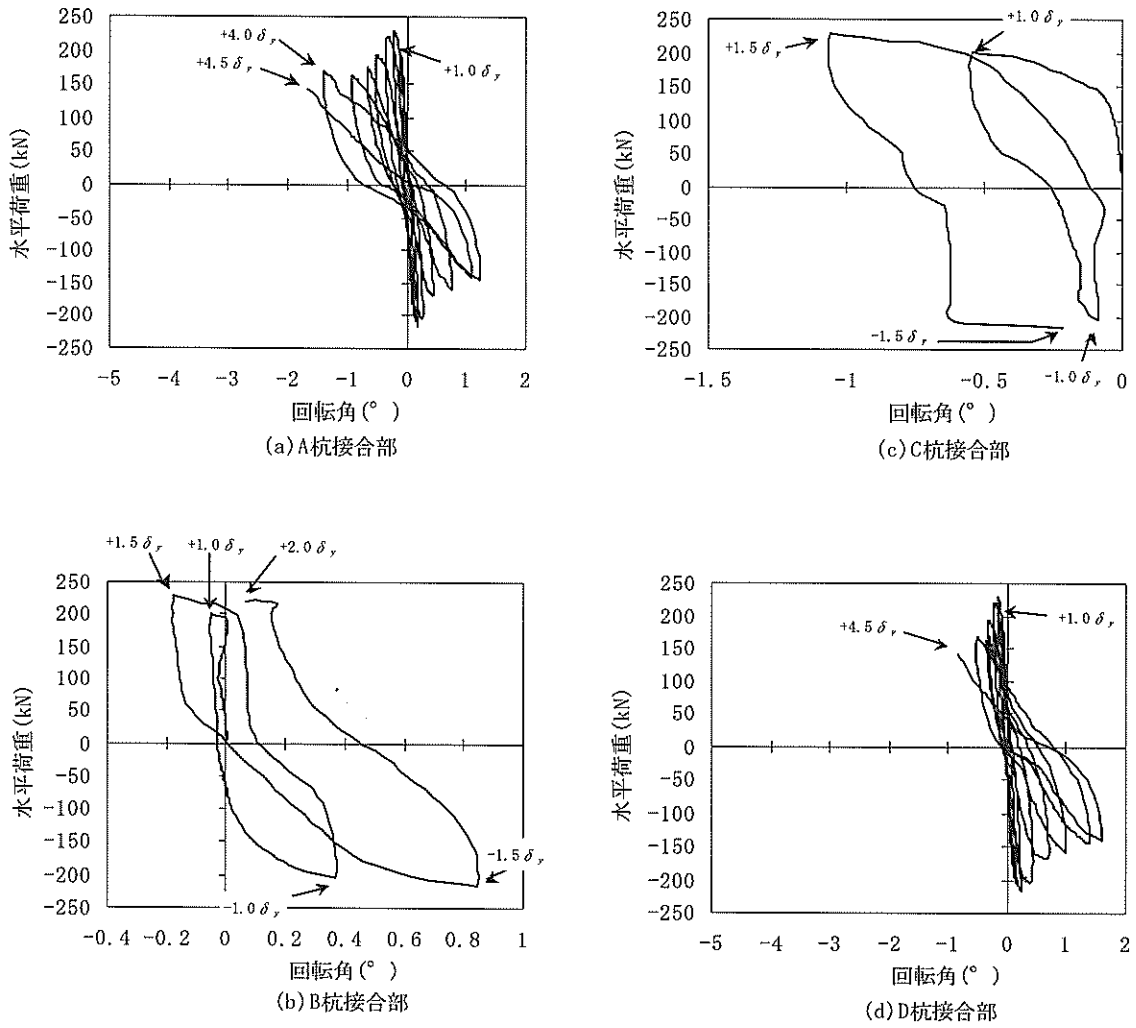
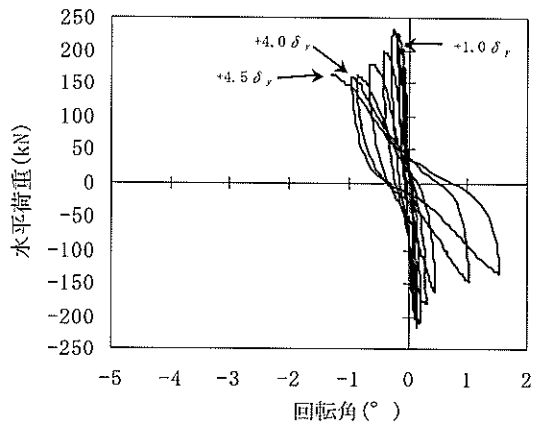
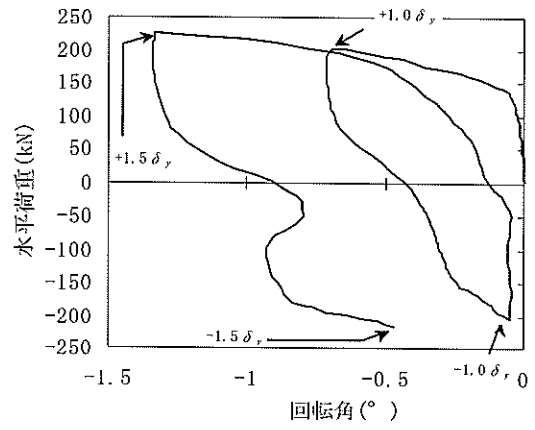


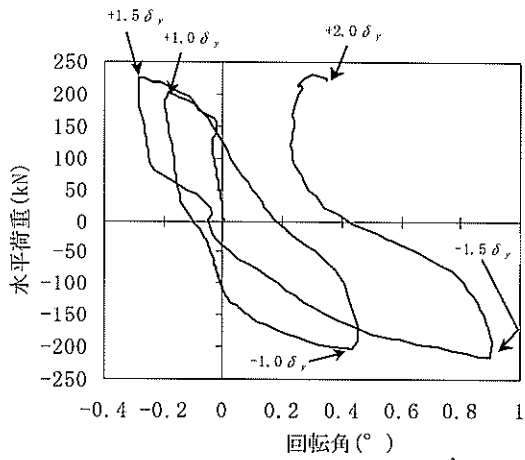
図-B.1 荷重－接合部回転角の関係(CASE2)



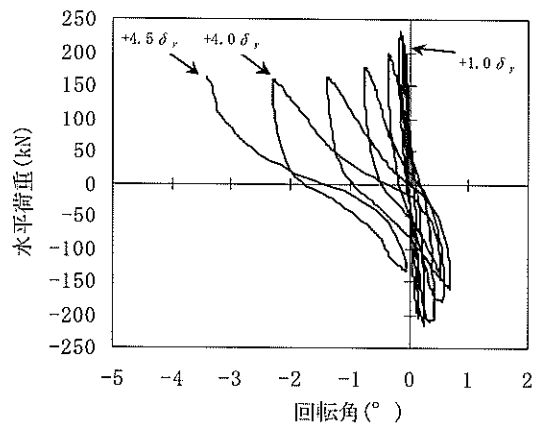
(a) A杭接合部



(c) C杭接合部



(b) B杭接合部

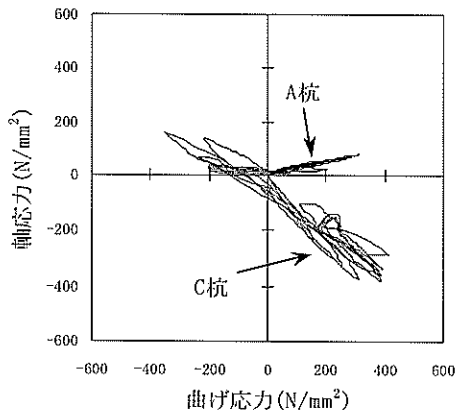


(d) D杭接合部

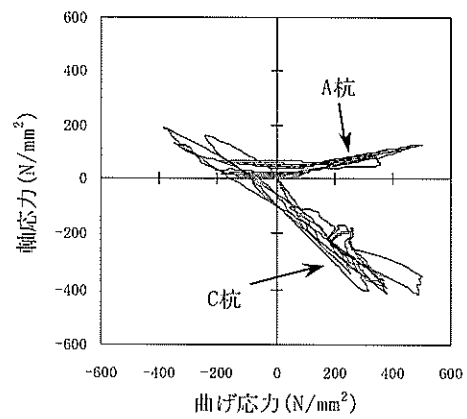
図-B.2 荷重-接合部回転角の関係(CASE3)



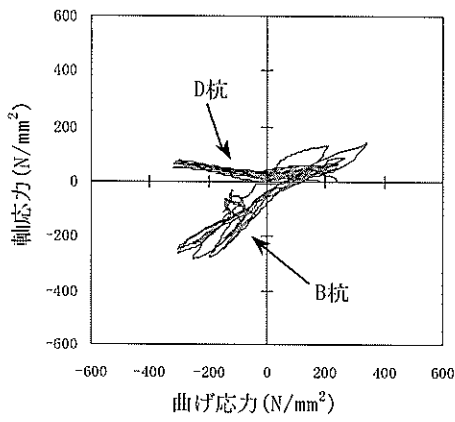
付録C 曲げ応力と軸応力の関係



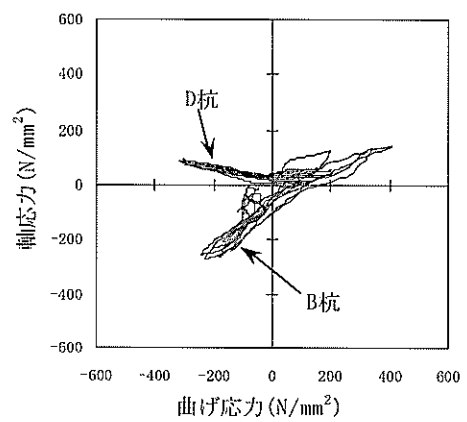
(a) A 杭および C 杭



(a) A 杭および C 杭



(b) B 杭および D 杭



(b) B 杭および D 杭

図-C.1 曲げ応力と軸応力の関係(CASE2)

図-C.2 曲げ応力と軸応力の関係(CASE3)

港湾空港技術研究所資料 No.1049

2003.6

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所

横須賀市長瀬3丁目1番1号

TEL.046(844)5040 URL.<http://www.pari.go.jp/>

印刷所 昭和情報プロセス(株)

Copyright © (2003) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI.

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。