

# D滑走路 連絡誘導路部(栈橋部)の構造設計

～新しい杭頭構造への対応～

大林組 橋本学・加藤敏明・田中浩一・早川智浩

JV工務・企画 Gr 上野浩二

キーワード: 栈橋、床版、プレキャスト、杭頭構造

## 1. まえがき

連絡誘導路は、現空港と新滑走路島を結ぶ全長約 620m の海上構造物であり、現空港側に位置する“栈橋部”と新滑走路側に位置する“橋梁部”に構造が大きく分けられる(図-1参照)。現空港に接続する部分は構造高さが低いいため、床版に対する暴風時の波力(揚圧力)を考慮する必要があり、栈橋構造としている。一方、新滑走路側では、小型船舶が通行可能な航路(幅 50m×2本)を確保する必要があり、橋梁構造としている。

本稿では、栈橋部の床版の構造設計について、設計上の留意点とその対策について報告するとともに、下部構造と床版との接合構造(杭頭構造)について、構造形式の選定理由と本工事のために実施した杭頭構造確認実験について報告する。

## 2. 栈橋部床版の構造概要

### 2-1 PC 梁スラブ構造の採用

栈橋部の床版はプレストレストコンクリート梁スラブ構造(以下、PC 梁スラブ構造)とし、部材はプレキャスト化した。構造形式を決定する際には、以下に示す点を考慮した。

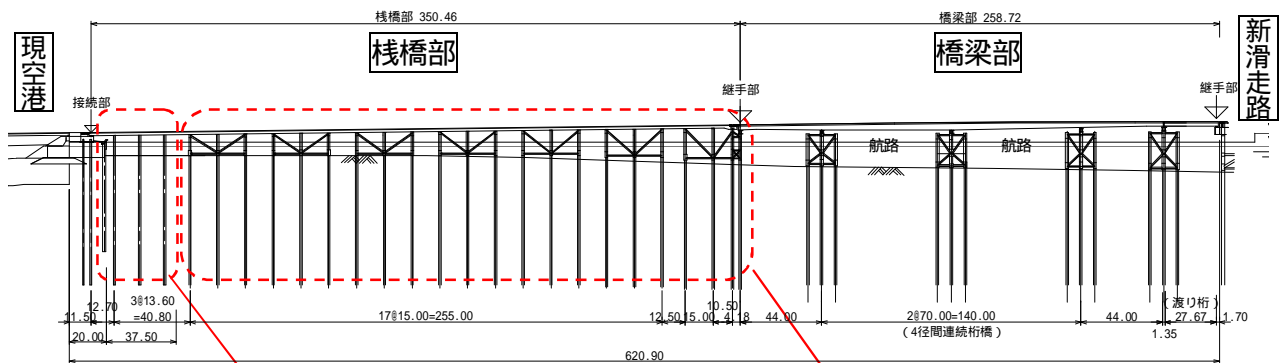


図-1 連絡誘導路 側面図

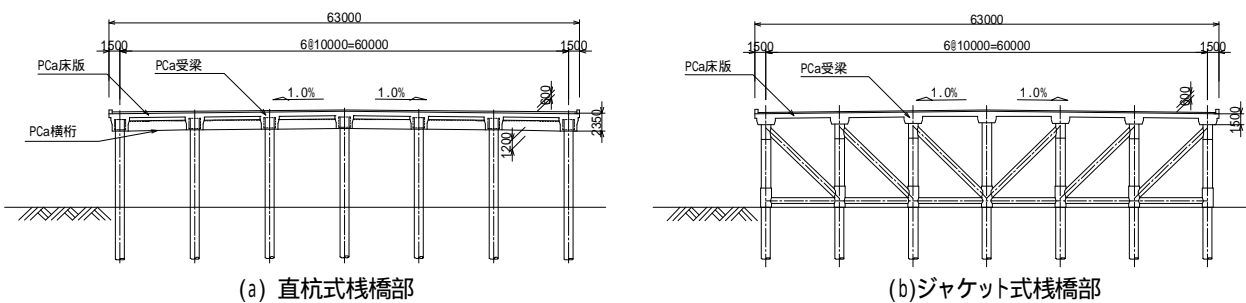


図-2 連絡誘導路 栈橋部 断面図

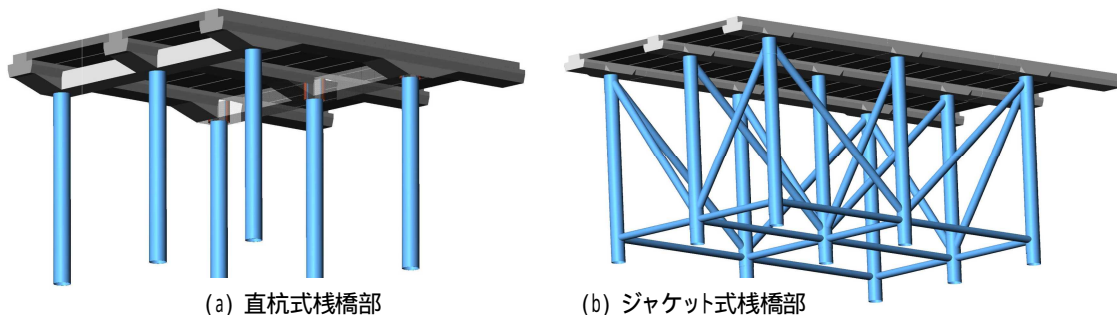


図-3 連絡誘導路 栈橋部のイメージ図

栈橋部には揚圧力が作用するため、カバープレートの設置が不可能である。床版下面は潮風を直接受ける厳しい塩害環境にある。

塩害耐久性を確保するためには、施工時、供用時のひび割れを制御する必要がある。PC構造は、RC構造に比べて、ひび割れ制御が確実である。

現場作業の低減による工程遅延リスクを回避するためには、部材のプレキャスト化が必要である。PC梁スラブ構造を採用することにより、部材のプレキャスト化が可能である。同時に、耐久性の向上を図る。

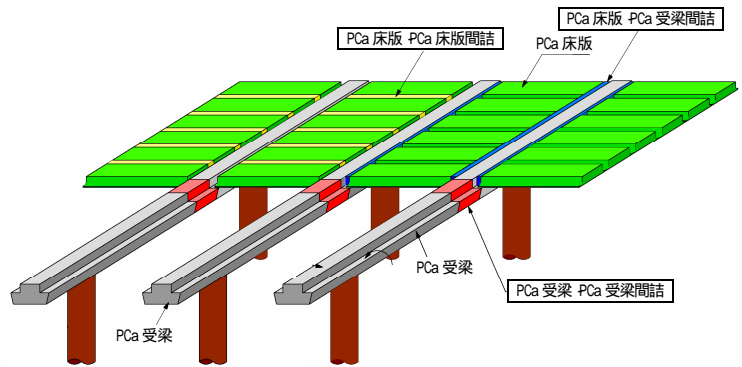


図-4 連絡誘導路 栈橋部床版の構造概要

## 2-2 2種類の栈橋構造

栈橋部には、“直杭式”と“ジャケット式”の2種類の栈橋構造を採用した(図-2,3 参照)。現空港側の護岸付近では、常時において地盤変形が生じ、地震時においても誘導路方向に地盤変形が生じる。地盤変形により栈橋杭に発生する断面力を低減するために、現空港近傍の栈橋構造を“直杭式”とした。

## 2-3 床版の施工方法

床版の施工は、製作ヤードで製作したプレキャスト部材(PCa 受梁, PCa 床版, PCa 横桁)を運搬・架設し、間詰部分のコンクリート打設, PC 鋼材の緊張により、構造体を完成させる。以下に床版の施工手順を示す。図-5 はその概要を示す。

PCa 受梁, PCa 床版, PCa 横桁の製作

PCa 受梁の運搬架設(2径間分)

杭頭部コンクリート, “PCa 受梁 - PCa 受梁”の間詰コンクリートの打設

PCa 受梁の連結ケーブル緊張(2径間分)

PCa 床版の運搬架設(2径間分)

“PCa 床版 - PCa 床版”および“PCa 床版 - PCa 受梁”の間詰めコンクリートの打設

PCa 床版の誘導路方向および誘導路直角方向の連結ケーブル緊張(2径間分)

～ を繰り返す。直杭式栈橋部のみ、 と の間に, PCa 横桁の架設, 間詰コンクリート打設, 横桁連結ケーブル緊張を実施する。

構造体完成

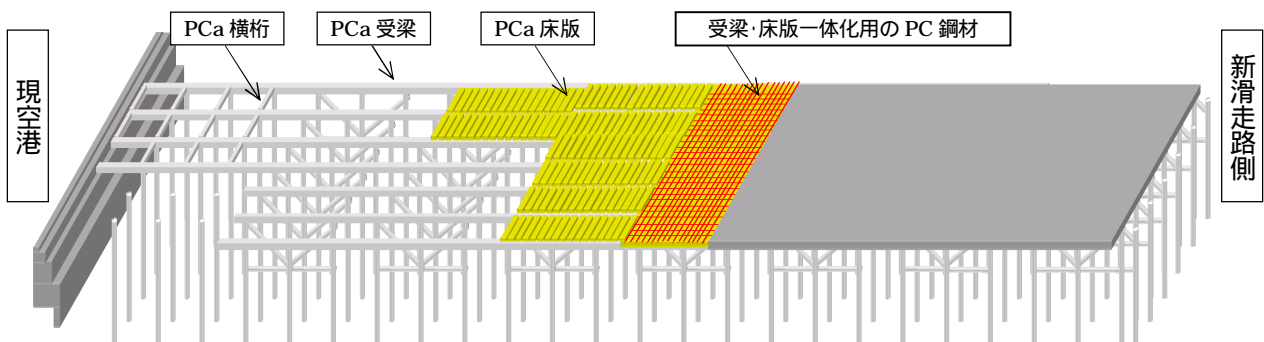


図-5 連絡誘導路 栈橋部の床版施工概要

## 3. 設計上の留意点とその対策

栈橋部床版の設計上の主な留意点として、床版下面の耐久性、間詰部の耐久性、耐震設計の方針、杭頭構造の選定および構造性能、についての対策方法を以下に示す。

### 3-1 床版下面の耐久性

「床版下面は潮風を直接受ける」という自然条件を考慮した耐久性の確保が必要である。以下に示す対応を行うとともに、『土木学会：[2002 年制定] コンクリート標準示方書[施工編] 2.3 塩化物イオンの侵入に伴う鋼材腐食に関する照査』に従い、供用期間中の塩害耐久性を確認した。

#### (1) 最小かぶりの設定

厳しい塩害環境にさらされる床版下面および側面については、鋼材かぶりを『日本道路協会：道路橋示方書・同解説 5章 耐久性の検討』に従い下記のように設定する。

- ・ 塩害の影響度合いと対策区分：S 区分（影響が激しい）
- ・ 最小かぶり：70mm + 塗装鋼材の使用またはコンクリート塗装の併用

#### (2) エポキシ樹脂鉄筋の使用

床版下面および側面に配置する鉄筋は塗装鋼材として、エポキシ樹脂鉄筋を使用する。

#### (3) 水セメント比の低減

塩化物イオンの侵入を抑えるためには、水セメント比を下げ、より緻密なコンクリートとすることが有効である。床版構造に使用するコンクリート（設計基準強度：50N/mm<sup>2</sup>）の水セメント比を 40% 以下とする。

#### (4) ひび割れを許容しない PC 構造

誘導路方向、誘導路直角方向ともに、ひび割れを許容しない PC 構造とする

- 死荷重時：引張応力を発生させない（フルプレストレス）
- 航空機荷重+温度荷重：ひび割れを発生させない（許容引張応力度以下）

### 3-2 間詰部の耐久性

部材のプレキャスト化を図っているため、3種類の場所打ち間詰部がある。鉄筋による連続化、PC 鋼材配置によるプレストレス導入、膨張コンクリートの使用（収縮補償を目的）、の対応を行うことにより、一般部と同等の塩害耐久性を確保した。以下に、場所打ち間詰部の施工方法を示し、図-6 にその構造概要を示す。

#### (1) PCa 受梁-PCa 受梁

- ・ 鉄筋は機械式継手により接続。
- ・ 膨張コンクリート打設後、プレストレスを導入。
- ・ PC 鋼材はカップラーにより接続。

#### (2) PCa 床版-PCa 床版

- ・ 鉄筋の継手にはループ継手を採用。
- ・ 膨張コンクリート打設後、プレストレスを導入。
- ・ 誘導路方向 2 径間分のプレキャスト床板に、連続 PC 鋼材を設置。2 径間毎は、カップラーにより PC 鋼材を接続。

#### (3) PCa 床版-PCa 受梁 - PCa 床版

- ・ 鉄筋の継手にはループ継手を採用。
- ・ 膨張コンクリートを打設後、プレストレスを導入。
- ・ 誘導路直角方向の全幅に、連続 PC 鋼材を設置。

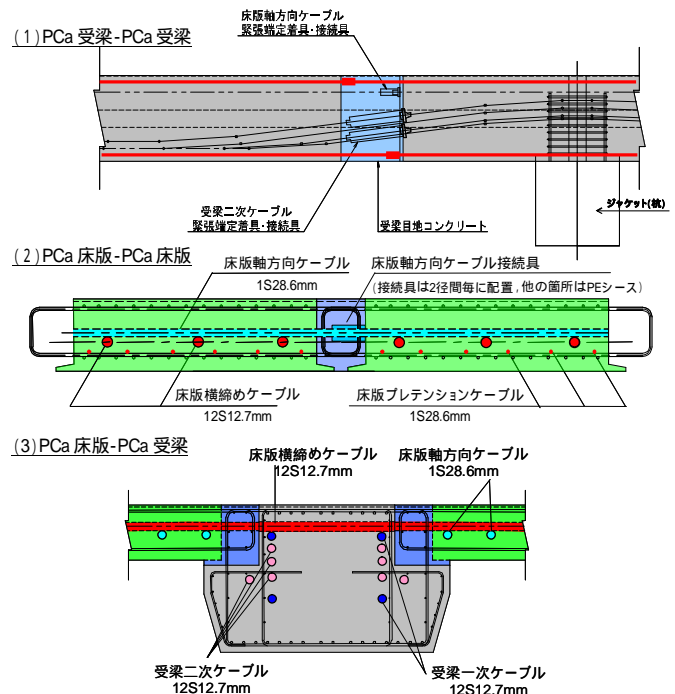


図-6 プレキャスト部材の間詰部の構造

### 3-3 耐震設計の方針（誘導路直角方向の剛性確保）

連絡誘導路栈橋部の床版は、揚圧力により下部工（鋼管）と床版の接合部に発生する引抜き力に対して抵抗する、杭頭およびレグ頭間を結ぶ上弦材の役割をする、という機能が求められるため、下部構造との接合方法は剛結構造とした。そのため、地震時には床版にも大きな断面力が発生する。また、床版の特徴として、誘導路方向に主桁を配置した 1 方向の梁スラブ構造のため、誘導路直角方向の剛性は、誘導路方向に比べて低くなっている点が挙げられる。地震後の早期供用と上述の特徴を

考慮して、以下に示す項目を耐震設計の基本方針とし、地震時の照査を行った。

- ・ 地震時に下部工の塑性化は許容するが、床版に発生する断面力は初降伏モーメント以下とする。
- ・ 誘導路直角方向は、床版が杭部に先行して塑性化しないように剛性を確保する。

### 3-3-1 誘導路方向の照査

床版は誘導路方向に主桁を配置した構造であり、誘導路方向の剛性は高い。図-7に示すように、地震時には下部工の鋼管杭が塑性化するが、上部工に発生する断面力は初降伏モーメント以下であることを照査した。

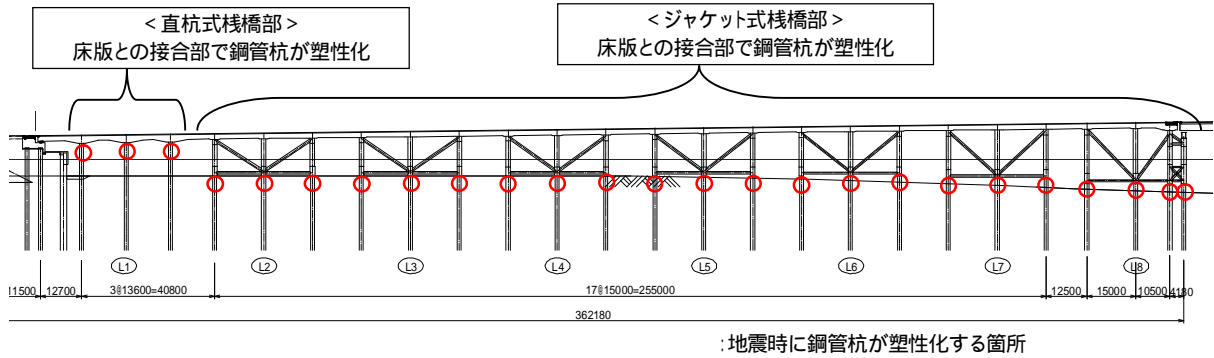


図-7 地震時の塑性化発生箇所(誘導路方向)

### 3-3-2 誘導路直角方向の照査

上部工に発生する断面力が初降伏モーメント以下であることを照査するとともに、床版が杭部に先行して塑性化しない破壊モードとするために、プッシュオーバー解析により破壊モードを確認した(図-8の(a)ではなく、(b)になることを確認)。

直杭式栈橋部は、横桁を設けない場合、床版が杭部に先行して塑性化した(図-8の(a)のモード)。横桁を設置することにより誘導路直角方向の剛性を確保し、上述の基本方針を満足させた。

ジャケット式栈橋部は、ジャケットにより誘導路直角方向の剛性が確保されているため、上述の基本方針を満足した。

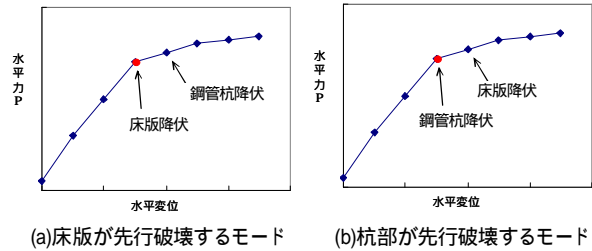


図-8 誘導路直角方向の床版の破壊モード

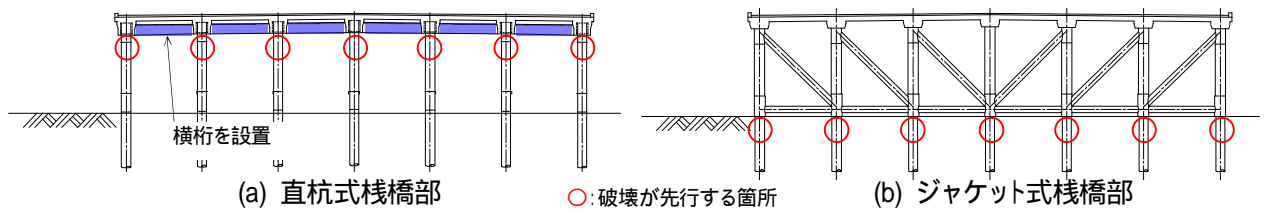


図-9 地震時の塑性化発生箇所(誘導路直角方向)

### 3-4 杭頭構造の選定および構造性能

栈橋構造の違いにより杭頭部に発生する断面力や鋼管径が異なるため、各栈橋の条件に適した杭頭構造を採用した(図-10 参照)。各杭頭構造は、既存の技術を組合せたものであるが、栈橋構造での実績は無いため、3種類の構造確認実験を行い、性能を確認した。以下に、杭頭構造の選定理由と実験の必要性を示す。

#### 3-4-1 直杭式栈橋部への「リブ付き二重鋼管接合構造」の適用理由

ジャケット式栈橋部に比べて杭頭部に作用する曲げモーメント(地震時)が大きく(鋼管は塑性化、図-7参照)、鉄筋コンクリート構造とした場合に杭頭部の主鉄筋量が多くなり、配筋が不可能であった。また、PCa 受梁と杭の接合部の施工誤差を吸収しつつ所定の曲げ耐力を確保する構造が必要である。「リブ付き二重鋼管接合構造」を採用することにより、PCa 受梁と杭との接合は、外側鋼管と内側鋼管の間へ間詰めコンクリートを充填することで可能である。杭の施工誤差は間詰部の隙間を調整することで吸収可能となる。ただし、受梁の桁高は一般部で 1.5mで



あり、この高さでは鋼管を受梁に埋設することができないため、杭頭部の桁高を80cm程度大きくする必要があります。適用は直杭式栈橋部のみとし、ジャケット式栈橋部へは適用しないこととした。

### 3-4-2 ジャケット式栈橋部への「鉄筋コンクリート構造」の適用理由

直杭式栈橋部に比べて杭頭部に作用する曲げモーメント(地震時)が小さいため、鉄筋コンクリート構造が成立する。『日本道路協会:道路橋示方書

12.9.3 杭とフーチングの結合部」の鋼管杭方法Bを基本とした鉄筋コンクリート構造とすることにより、桁高を一般部とほぼ同じにすることが出来る。PCa 受梁と杭との接合は、PCa 受梁に杭頭部主鉄筋を埋込んでおき、PCa 受梁設置後、鋼管内へコンクリートを充填することで可能である。杭の施工誤差は、杭頭部主鉄筋と鋼管との隙間を調整することで吸収可能となる。

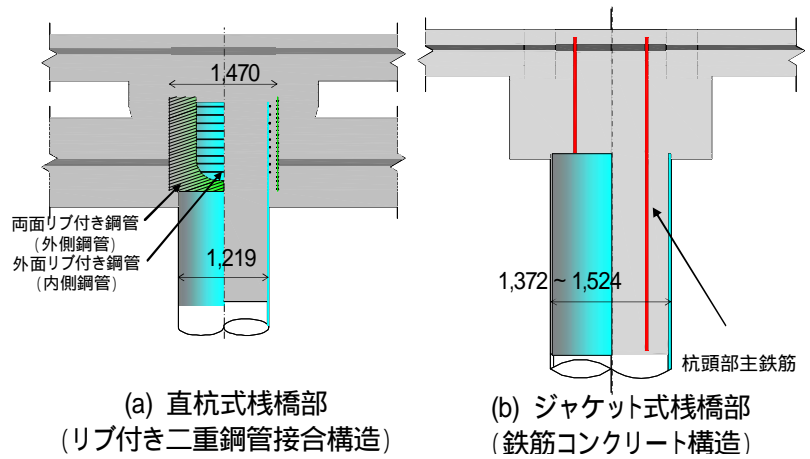
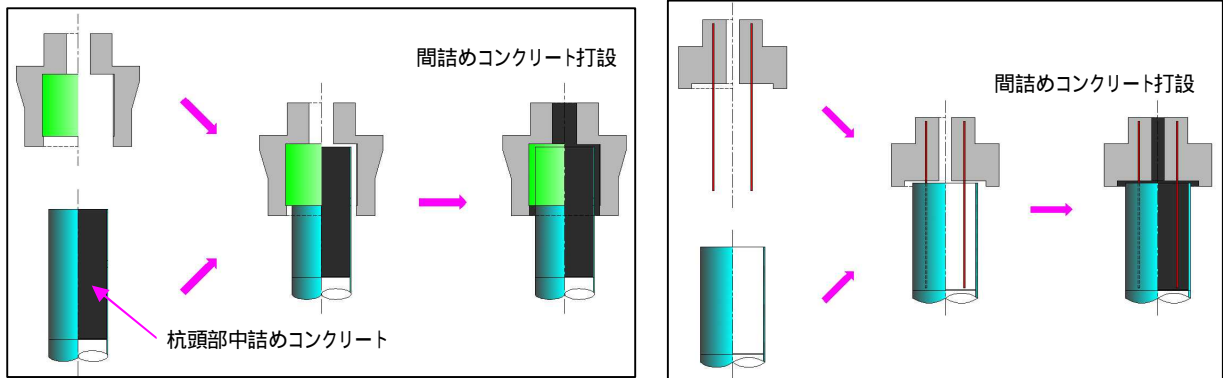


図-10 杭頭構造



(a) 直杭式栈橋部:リブ付き二重鋼管接合構造

(b) ジャケット式栈橋部:鉄筋コンクリート構造

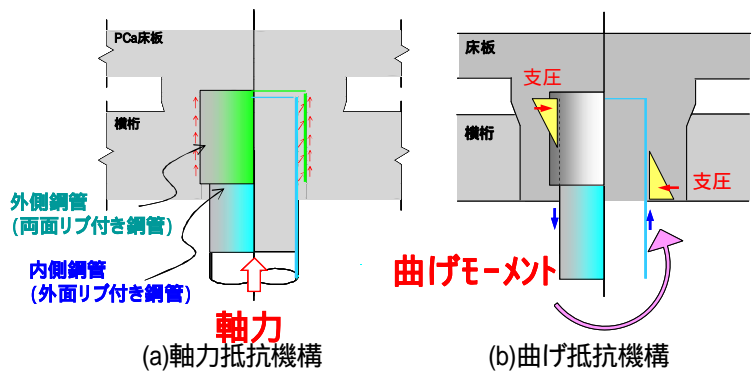
図-11 杭頭接合部の施工手順の概要

### 3-4-3 杭頭構造確認実験の必要性

杭頭構造の性能確認のために行った3種類の実験の必要性について以下に述べる。実験結果については「4. 杭頭構造確認実験」で述べる。

#### (1) リブ付き二重鋼管接合構造の引抜き実験(付着強度の確認)

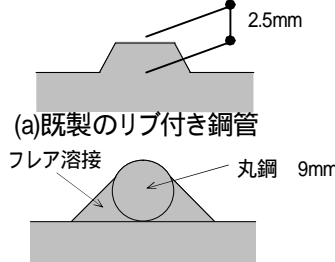
リブ付き二重鋼管接合構造は、主桁に埋込まれた外側鋼管(両面リブ付き鋼管)と、杭である内側鋼管(外面リブ付き鋼管)の間に、コンクリートを打設して連結する構造である。この構造における鉛直荷重の伝達は、外側鋼管の内面リブと内側鋼管の外面リブとの間で、間詰コンクリートを介して行われる(図-12 (a)参照)。既製のリブ付き鋼管の付着強度は確認されているが、本構造に用いられる杭(内



(a)軸力抵抗機構

(b)曲げ抵抗機構

図-12 直杭式栈橋部の杭頭接合構造



(b)丸鋼溶接によるリブ  
図-13 リブ形状の違い

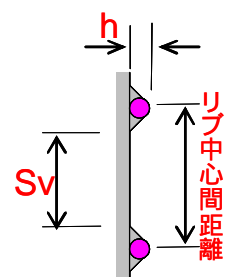


図-14 リブ高さとしリブ間隔

側鋼管)は肉厚が厚いため( $t=24\text{mm}$ ),既製のリップ付き鋼管が製作できない。丸鋼を溶接してリップを製作することとしたが,既製のリップ付き鋼管とリップ形状や寸法が異なる(図-13 参照)。したがって,リップ形状や寸法が異なっても,既製のリップ付き鋼管と同等以上の付着強度を有することを実験で確認する。

本構造に用いるリップは 9mm の丸鋼とし,リップ中心間隔は 110mm とした。これらは,図-14 に示す  $h/S_v$  を 0.1 とするためである( $h=9\text{mm}$ ,  $S_v=110-9*2=92\text{mm}$ )。 $h/S_v=0.1$  とは,既往の文献で付着強度が高く,疲労に対しても良好の性状を示すとされているリップ高さ,リップ間隔の組合せである。

## (2) 直杭式栈橋部 杭頭構造の水平載荷実験

地震後の早期供用を考慮して,「床版が杭部に先行して塑性化しないこと」を耐震設計の基本方針とした(「3-3 耐震設計の方針」参照)。杭頭に全塑性モーメントが作用しても,床版および横桁が設計で想定した損傷レベルにとどまるか,実験で確認する。また,接合部の曲げ抵抗機構は,支圧応力がコンクリートの強度に達すまで抵抗するとしている(図-12(b)参照)。この設計方法で,十分な抵抗機構を有することを実験で確認する。

## (3) ジャケット式栈橋部 杭頭構造の水平載荷実験(せん断強度の確認)

ジャケットと主桁の接合構造を図-15 に示す。鉛直軸力,曲げモーメントに対しては,ジャケット内部のコンクリートと鉄筋の応力がジャケット内側のリップに伝達して抵抗する。せん断力に関しては,ジャケット斜材の軸力がせん断力として作用するため接合部近傍で大きくなる。図-16 は地震時曲げモーメント図であるが,斜材付根部分でモーメントが反転しているのが判る。せん断力に対しては,せん断スパンが短いディープビームとして設計することとした。

ディープビームのせん断耐力式(以下,ディープビーム式)で本構造のせん断耐力を評価する上で,以下の懸念事項を実験で確認し,設計の妥当性を検証する。

- コンクリート標準示方書に従って円形断面を矩形断面へ変換し,ディープビーム式による算出したせん断耐力評価の妥当性。
- ディープビーム式におけるせん断スパンの設計値の妥当性。
- 本接合構造のジャケット-主鉄筋間の重ね継手の健全性。

## 4. 杭頭構造確認実験

### 4-1 リップ付き二重鋼管接合構造の引抜き実験(付着強度の確認)

#### 4-1-1 実験の概要

##### (1) 試験体概要

試験体は,実構造の 2/3 モデルとした。試験体の構造配筋図を,図-17 に示す。試験体のリップは, 6mm の丸鋼を用い,リップ高さ( $h$ ),リップ間隔( $S_v$ )をそれぞれ実物の 2/3 とした。使用したコンクリートは実構造の設計基準強度と等しくし,最大粗骨材径は実構造の 2/3 とした。

##### (2) 載荷方法および計測

載荷は4台の5000kN ジャッキを上下スタブ間に配置して,単調載荷で行った(写真-1 参照)。載荷荷重はロードセルにて計測し,コンクリートと内側鋼管間の相対変位,ならびに内側と外側の鋼管は,ひずみを計測した。

#### 4-1-2 実験の結果

得られた荷重-変位関係より,付着長さを 400mm(全定着長),288mm(有効定着長)として算定した平均付着応力-すべり量の関係を図-18 に示す。「既往の実験(二重管)」は,既製のリップ付き鋼管を使用した二重管接合構造の試験体,「既往の実験(リング補強筋)」は,既製のリップ付鋼管の周囲にリング補強筋を配置した試験体での平均付

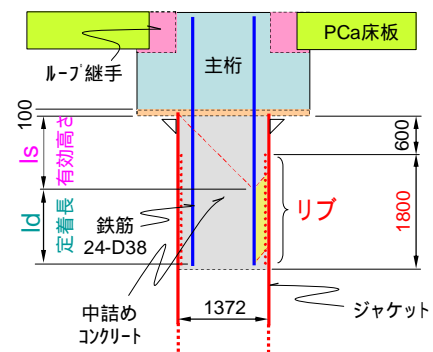


図-15 ジャケット式栈橋部の杭頭接合構造

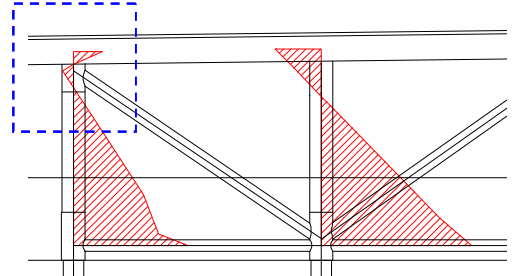


図-16 地震時の曲げモーメント図



写真-1 載荷装置(引抜き試験)

着応力-すべり量の関係である。本構造に用いるリップ付き二重鋼管接合構造の付着強度が、既製のリップ付き鋼管と同等以上の強度を有していることを確認した。許容付着強度(設計値)は、リング補強筋によるリップ付き鋼管の値であり、「日本道路公団:鋼管・コンクリート複合構造橋脚設計マニュアル」にしたがって算出した。

許容付着強度(設計値) 1.9N/mm<sup>2</sup>(既製のリップ付鋼管の許容付着強度)

実験で得られた付着強度 12.1N/mm<sup>2</sup>(定着長:全定着長さ 400mm の場合)

16.8N/mm<sup>2</sup>(定着長:有効定着長さ 288mm の場合)

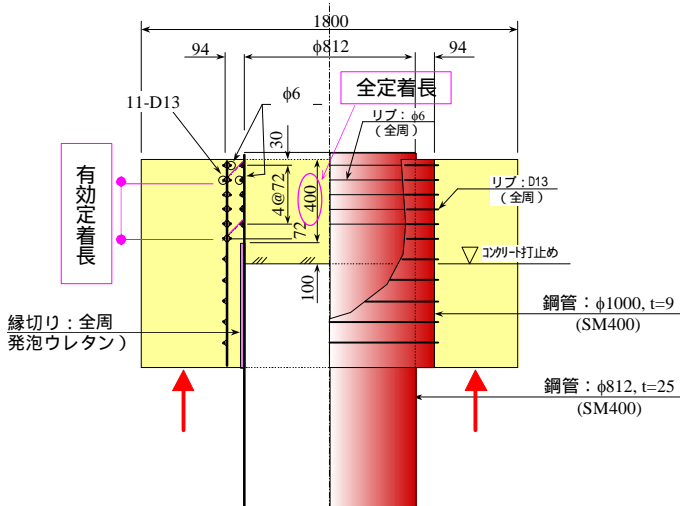


図-17 試験体概要(引抜き実験)

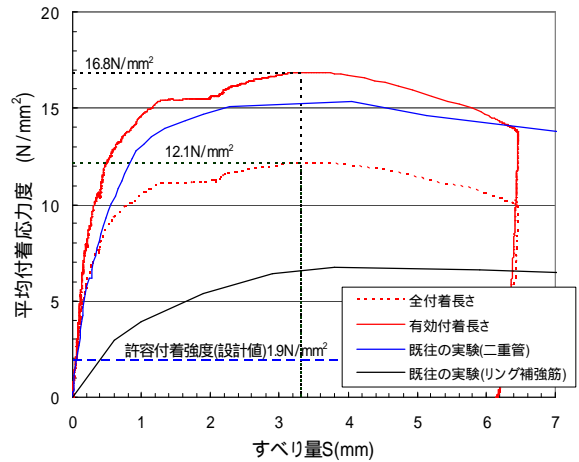


図-18 平均付着応力-すべり量の関係(引抜き実験)

## 4-2 直杭式栈橋部 杭頭構造の水平載荷実験

### 4-2-1 実験の概要

#### (1) 試験体概要

試験体は、以下のように設定した。

- ・ 試験体の寸法は、実物の 1/2 とした。
- ・ 誘導路直角方向の試験体模擬範囲は、杭間の支間中央までとした。実物が 10.0m であるため、試験体は 5.0m とした。
- ・ リップは 6mm の丸鋼を溶接し、 $h/Sv$ (図-14 参照)が実物と等しい 0.1 とした。
- ・ 軸力の設定は、施工順序や地震時の軸力変動を考慮して、床版に発生する断面力が実物と等価になるように決定した。

#### (2) 載荷装置と載荷方法

載荷装置を図-19 に示す。載荷方法は、部材角が 1/200, 1/100, 2/100, 3/100, 4/100 では、各 1cycle の交番載荷を行い、最後にジャッキストローク限界(部材角:6.5/100)まで一方向に載荷した。

#### 4-2-2 実験の結果

荷重-変位関係を図-20 に示す。部材角が 1/200 において設計で想定した鋼管埋込み部の剥離、横桁の曲げひび割れが発生するものの、鋼管が全塑性モーメントに達する水平力を作用させても、床版および横梁の鉄筋は降伏することなく、弾性の範囲内であることを確認した。また、最大部材角の R=6.5/100 まで載荷しても、著しい耐力低下、ならびに接合部に大きな損傷は認

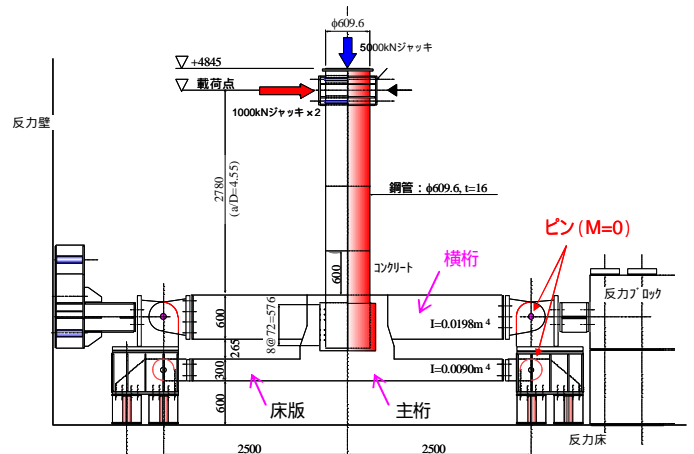


図-19 載荷装置図(直杭部水平載荷実験)

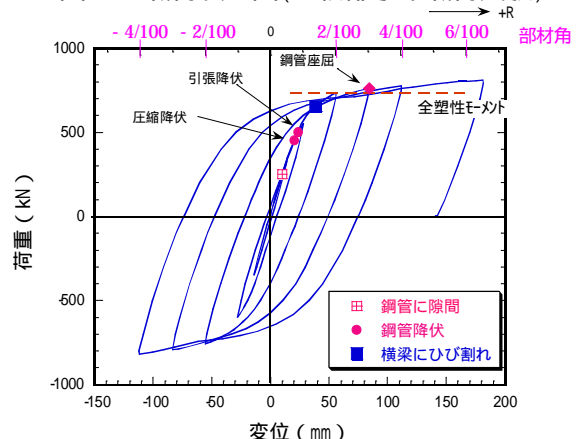


図-20 荷重 - 変位関係(直杭部水平載荷)



められなかった。このことから、今回提案する二重管接合構造は、接合部位置の鋼管が全塑性モーメントに達するシナリオ地震時でも、十分耐えることを確認した。参考に、載荷終了後の鋼管の座屈状況を写真-2に示す。

#### 4-3 ジャケット式栈橋部 杭頭構造の水平載荷実験(せん断強度の確認)

##### 4-3-1 実験の概要

###### (1) 試験体

試験体は、以下のように設定した。

- ・ 試験体の寸法は、実物の 1/2 とした。
- ・ ジャケット栈橋部の斜材角度が 33 ~ 45 ° の範囲である。試験体の斜材の角度は 35 ° とした。
- ・ せん断スパン比は、実物が 0.277 に対し、試験体は 0.281 とした。
- ・ リブは 6mm の丸鋼を溶接し、 $h/Sv$ (図-14 参照) が実物と等しい 0.1 とした。
- ・ 鉛直力は地震時の最小軸力相当の 250kN とした。

###### (2) 載荷方法

地震後の健全性とディーブーム式の妥当性に着目して、図-21 に示すようなディーブーム式による計算値を基準とした正負交番の載荷を 2 軸試験機で行った。載荷状況を写真-3 に示す。

##### 4-3-2 実験の結果

荷重-変位関係を図-22 に示す。同図の右側縦軸はディーブーム式で算出したせん断耐力に対する比率である。このせん断耐力は、実験日に実施したコンクリートの材料試験結果に基づいて計算した値である。

載荷能力である 2,500kN まで載荷しても、荷重 - 変位関係は非線形性を示していない。接合部のせん断強度は 2,500kN 以上であり、コンクリート標準示方書のディーブーム式を用いて算出された接合部のせん断耐力  $Vd$  ( $b=1.3$ ) = 1491kN の少なくとも 1.7 倍を有していることがわかった。また、部材係数  $b$  を 1.3, 1.0, 1/1.3 として載荷しても破壊しない。このことから、本接合部のせん断強度はディーブーム式のばらつきの範囲以上に大きいことを示している。これらのことから、ディーブーム式は、本接合部のせん断耐力を十分控えめに評価すると考えてよい。

##### 5. あとがき

連絡誘導路栈橋部の床版は、航空機が 11.5 万回 / 年 (最大 400ton) 走行するという厳しい荷重条件に加えて、床版下面が潮風を直接受けるという厳しい塩害環境にさらされる構造である。その要求を満足し、工期内の施工を可能にする構造として PC 梁スラブ構造を採用した。今後は工事実施に向け、設計で要求している品質を確保しつつ、関係各位のご指導の下に、さらに品質の高い構造物の構築を目指して努力していきたいと考えています。

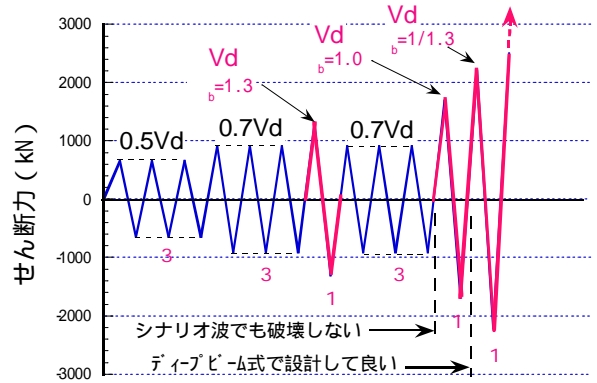
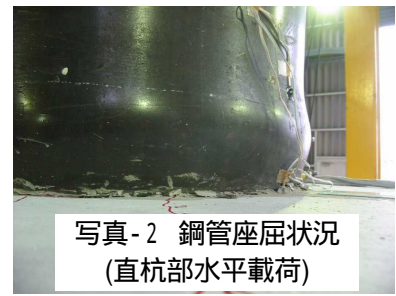


図-21 載荷プログラム(ジャケット部水平載荷)



写真-3 載荷状況(ジャケット部水平載荷)

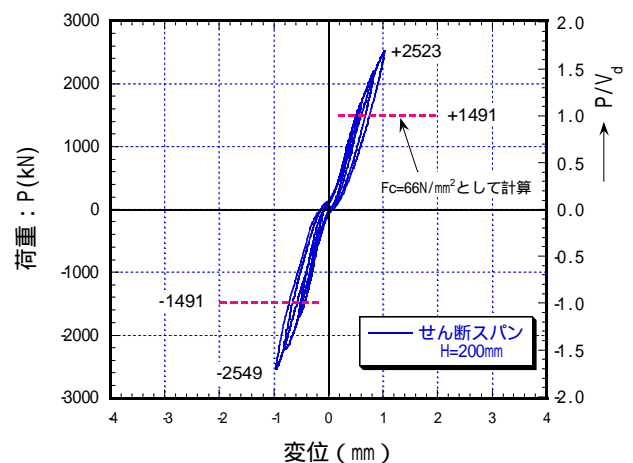


図-22 荷重-変位関係(ジャケット部水平載荷)