

2枚鋼板タイプ鋼・コンクリート複合主塔分離定着構造の 実験的検討

Experimental Study on Steel-Concrete Composite Structure with Separated Two Steel Plates for the Anchorage of Stay Cables in Main Towers

技術研究所 野並 優二 YUJI NONAMI
技術研究所 篠崎 裕生 HIROO SHINOZAKI
土木設計部 中積 健一 KENICHI NAKATSUMI

斜張橋やエクストラードード橋の主塔は一般的に、PC鋼材を縦横に配置したPC構造が用いられているが、施工が煩雑であることが課題であった。著者等は、これを解決する目的で斜材張力を鋼板に負担させる複合主塔分離定着構造を考案した。本論文では、1列に配置された斜材の張力を2枚の鋼板で受け持つ構造について実物大試験体の载荷により耐荷挙動を確認した。実験の結果、設計荷重時において、コンクリートにひび割れが生じないこと、斜材降伏荷重および斜材破断荷重において荷重を保持し得ることを確認した。本文では、本構造の耐荷挙動や鋼板とコンクリートの一体化で用いている鉄筋を用いたずれ止めの挙動について分析と考察を行った。

キーワード：複合構造，鉄筋ジベル，ずれ止め，鋼板孔

In general, the stay cables anchorage in the main towers are prestressed structure with reinforced by longitudinal and lateral PC tendons. But, the construction of those structures very complicated and needs to be improved. To solve this problem, the authors developed the steel-concrete composite anchorage system in which stay cable force was resisted by a pair of steel plates. The full scale test specimen was used to confirm its structural behavior. The test result showed that there was no crack on the test specimen under the load of serviceability limit state, and it was able to bear the yield force and tensile strength of stay cable. Besides, analytical studies were carried out to investigate structural behavior of that proposed structure and shear behavior of the connecting area between the steel plate and the concrete which was used reinforcement bar dowels.

Key Words: Composite Structure, Reinforcement Bar Dowel, Shear Connector, Steel Plate Hole

1. はじめに

斜張橋やエクストラードード橋の主塔定着構造において、従来の分離定着方式では、斜材張力を受け持つために、軸方向および直角方向に多くのPC鋼棒および鉄筋を配置する必要がある。そのため、コンクリート断面および重量が大きくなってしまったり施工が煩雑になるなどの課題があった。そこで、筆者らは、斜材張力を鋼板で受け持つ鋼とコンクリートの複合分離定着構造を開発した。

鋼とコンクリートの接合部には、ずれ止めとして鋼板に設けた鉄筋外径よりも少し大きな径の貫通孔に、鉄筋

を挿入してエポキシ樹脂で固定したものを用いた（以下、鉄筋ジベルと呼ぶ）。スタッドのように溶接部がないため、疲労破壊の懸念がないこと、また、孔あき鋼板ジベルに比べ、鋼板孔による断面欠損が小さいことが採用の理由である。

ここでは、1列に配置された斜材の張力を2枚の鋼板で受け持つ2枚鋼板タイプ的主塔構造について実物大試験体の载荷によって耐荷挙動を検証した。そして、定着部としての性能を確認するとともに、鉄筋ジベルの挙動について分析と考察を行った。

2. 鋼・コンクリート複合主塔定着構造の概要

(1) 構造の概要

図-1 に、エクストラードロード橋の例と主塔断面の比較を示す。従来の主塔構造は、軸方向鉄筋、帯鉄筋に加え、斜材定着具設置のための鉄骨、斜材張力を受け止める PC 鋼材を縦横に配置する構造である。鋼殻を用いる方法も採用されることがあるが、コスト増となる。これに対して、鋼・コンクリート複合主塔構造は、斜材定着部を有する 2 箇所コンクリート柱を、鋼板で接合する構造である。鋼板は、鉄筋ジベルでコンクリートと一体化する。斜材張力は鋼板が負担するため橋軸方向の PC 鋼材が不要となり、施工の合理化が可能である。

(2) 定着部の設計と鉄筋ジベルの設計せん断耐力

本定着構造の設計は、①斜材引張強度時の荷重 P_u において鋼板が降伏しないこと（鉄筋ジベルによる欠損を考慮するとともに、鋼板孔間で発生するせん断力の照査含む）、②設計荷重時 ($0.7P_u$) において、後述する鉄筋ジベルの許容せん断力を超えないこと、③終局荷重時 (P_u) において、鉄筋ジベルの設計せん断耐力を超えないこと、を照査することとした。この際、鋼板面の摩擦は無視する。橋軸直角方向については、斜材張力によって生じるコンクリートブロック背面の引張力に抵抗するように、横締め PC 鋼棒を配置することとした。この

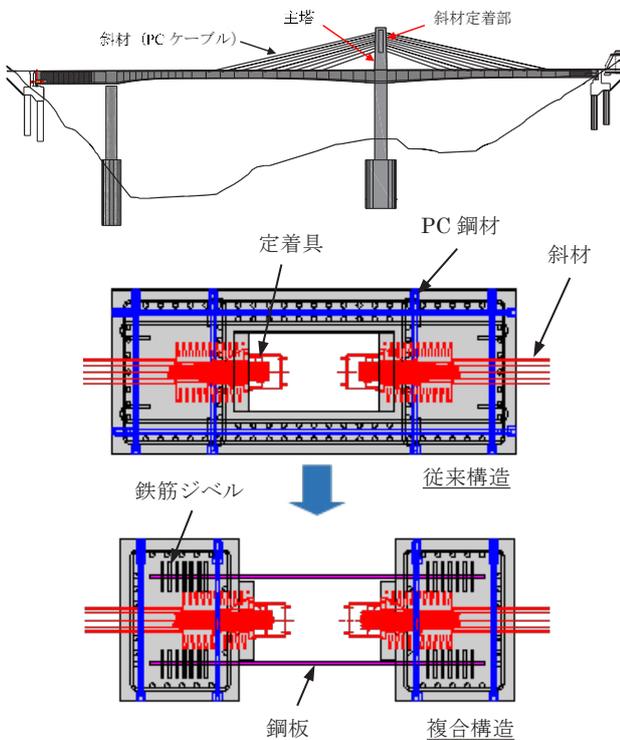


図-1 鋼・コンクリート複合主塔分離定着構造

横締め PC 鋼棒は、鋼板とコンクリート間の目開きを防止する効果も期待している。

鉄筋ジベル (SD345, 降伏強度 391N/mm^2 , 引張強度 578N/mm^2) のせん断耐力は、図-2 に示す押し抜き試験で確認した²⁾。コンクリートブロックは $W500 \times B500 \times H400\text{mm}$ で、鋼板 (SM490) は 40mm 厚である。鋼板表面には、鋼板とコンクリートの付着や摩擦を低減するため、グリースを塗布した。コンクリートの圧縮強度は 65.7N/mm^2 であった。荷重は漸増繰り返し荷重とした。試験にあたり、鉄筋ジベルのひずみを計測した。押し抜き試験のずれ変位と荷重の関係を図-3 に示す。

ずれ変位 $0.5 \sim 1.0\text{mm}$, 荷重が $200 \sim 300\text{kN}$ までほぼ線形の挙動を示しており、それ以降徐々に剛性が低下している。ずれ変位 15mm , 荷重 628kN で鉄筋が破断した。鉄筋の破断は、鋼板両面の 2 箇所生じており、最大荷重は、鉄筋の実引張強度で計算した破断荷重の 2 倍 (図中の引張破断耐力) とほぼ一致した。

以上の通り、鉄筋ジベルのせん断抵抗挙動は、十分な長さを有するスタッドが引張破断する挙動と類似していることから、スタッドの設計せん断力³⁾を参考に、鉄筋

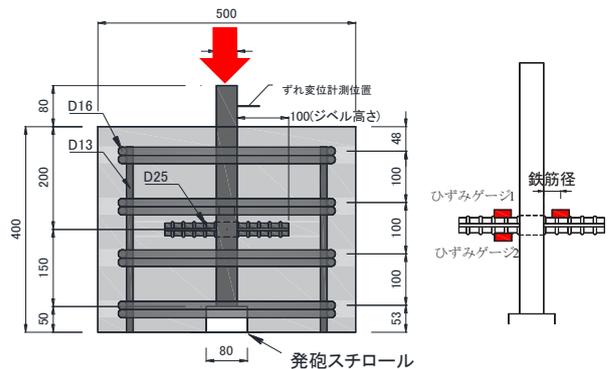


図-2 鉄筋ジベルの押し抜き試験

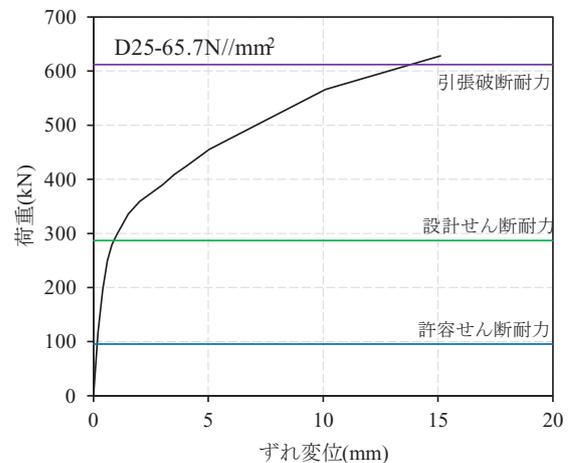


図-3 荷重とずれ変位の関係

ジベル（1面あたり）の設計せん断耐力および許容せん断耐力を以下のように設定した。

$$V_{psud} = (A_s \times \sigma_{su}) / \sqrt{3} \quad (1)$$

$$V_{ps} = V_{psud} / 3 \quad (2)$$

ここに、 V_{psud} ：鉄筋ジベルの設計せん断耐力(N)、
 V_{ps} ：鉄筋ジベルの許容せん断耐力(N)、 A_s ：鉄筋の断面積(mm²)、 σ_{su} ：鉄筋の引張強度(N/mm²)

(3) 試験体の設計と諸元

試験体の形状および配筋を図-4に示す。試験体は、支間約170m、斜材システム27S15.2($P_u=7,100\text{kN}$)の2面吊りのエクストラード橋を想定し、斜材1段分を切り出したものとした。荷重は、水平分力のみを模擬した。

両端のコンクリートブロックの大きさは、 $W2,000 \times B1,365 \times H1,000\text{ mm}$ で、厚さ40mmの2枚の鋼板で接続した。コンクリートブロック間の距離は、使用するジャッキの形状から860mmとした。2枚の鋼板とコンクリートブロックは、鉄筋ジベルで一体化した。貫通孔に鉄筋をエポキシ樹脂で固定するにあたっては、図-5に示すように、鉄筋を鋼板孔壁に接触するよう配置し、せん断力が鉄筋から直に鋼板に伝達されるように配慮した。なお、前項の押し抜き試験も同様の配慮をしている。

鉄筋ジベルの配置本数は、27S15.2の設計荷重 $0.7P_u(4,933\text{kN})$ および終局時($7,100\text{kN}$)に対して、それぞれ式(2)、式(1)で計算したせん断耐力を確保できるように設定した。押し抜き試験結果で示したように、鉄筋ジベルは、2面で破壊し、せん断耐力も2面分として計算することができる。しかし、本試験体の場合、斜材張力が作用するのは2枚の鋼板に挟まれた内側のコンクリート部分である。したがって、1枚の鋼板の片面の鉄筋ジベルにのみせん断力が作用するものとして設計した。実際には、コンクリートは一体となっているので、もう一方の面の鉄筋ジベルにもせん断力は作用することが考えられるが、設計上これは無視した。算定結果により、4箇所ある鋼板接合部それぞれに56本の鉄筋ジベルを配置することとした。

横締めPC鋼棒($\phi 32$, B種1号)の緊張力は、NAPP工法を用いることを想定し、1本当たり400kNとした。コンクリートは、設計強度 40N/mm^2 のものを使用し、載荷試験時の圧縮強度は 59.9N/mm^2 であった。

(4) 載荷試験の概要

載荷は、コンクリートブロック間に油圧ジャッキ（最

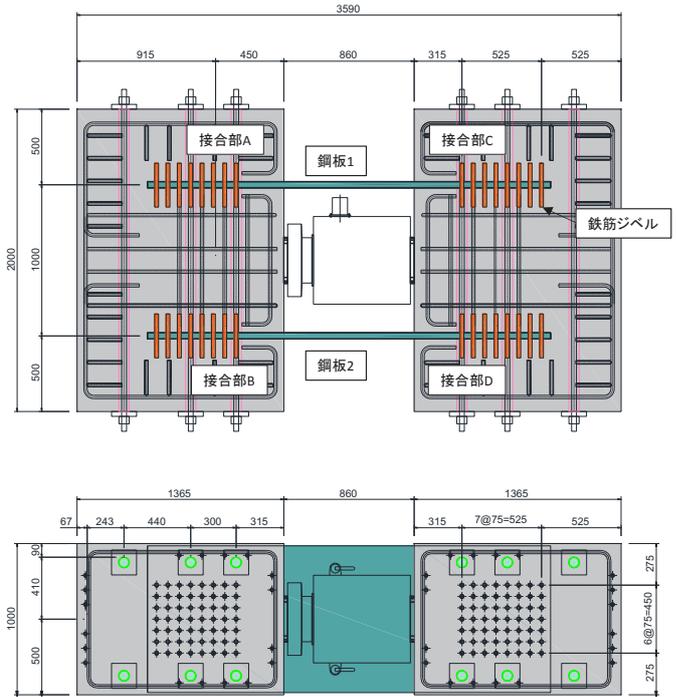


図-4 試験体形状

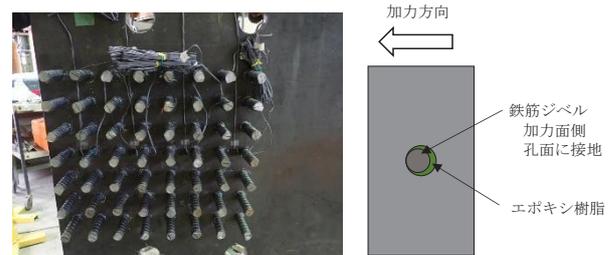


図-5 鉄筋ジベルの固定

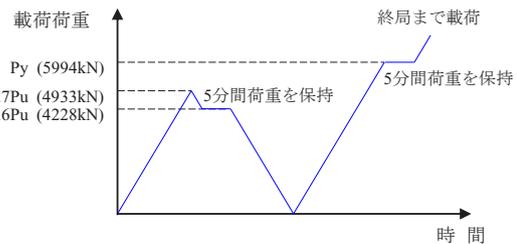


図-6 載荷荷重

大荷重 10,000kN)を配置し、押し広げることで行った。載荷時には、試験体が水平方向に滑らかに移動できるように床との間にテフロンシートを挟んだ。載荷荷重は、図-6に示すように、設計荷重である $0.7P_u(4,933\text{kN})$ まで載荷後、クリープ乾燥収縮進行後を想定した $0.6P_u(4,228\text{kN})$ まで除荷して、5分間荷重を保持した。変状のないことを確認した後、0kNまで除荷し、 $P_y(5,994\text{kN})$ まで載荷後、再度5分間荷重を保持、その後破壊まで載荷を行った¹⁾。

表-1 複合主塔構造評価基準と評価結果

| 荷重段階 | 評価基準 | 結果 |
|--------------------------|--|----|
| 設計荷重(0.7P _u) | 躯体にひび割れが生じない | ○ |
| 斜材降伏荷重(P _y) | ひび割れ幅が0.2mm以下 定着具に有害な変形、損傷、めり込みを生じないこと | ○ |
| 斜材破断荷重(P _u) | 5分間荷重を保持し得ること、 定着具に有害な変形、損傷、めり込みを生じないこと | ○ |

計測項目は、載荷荷重および鋼板と鉄筋ジベルのひずみ、さらに、試験体上面での鋼板とコンクリートのずれ変位などである。

試験結果は、文献¹⁾を参考に、各荷重段階で表-1のように基準を定め、これを確認することによって評価した。

3. 試験結果および考察

(1) 耐荷挙動および試験体破壊状況

荷重とジャッキ伸びの関係を図-7に示す。載荷試験後の試験体上面の破壊状況および定着部周辺の破壊状況を図-8に示す。図-7中の鉄筋ジベル耐力(計算値)とは、鉄筋ジベルの設計せん断耐力にジベル本数を乗じた値である。

荷重とジャッキ伸びの関係について、載荷初期はジャッキ伸びが比較的大きく増加する傾向が見られた。これは、ジャッキ頭部に組み込まれた球座の動きやジャッキと試験体の接触面での“なじみ”などが影響していると考えられる。ジャッキ伸び2~3mm以降は、ほぼ荷重に比例していた。

0.7P_uまで載荷した後、0.6P_uに荷重を落とし5分間保持した。その時点で試験体にひび割れは生じておらず、また、荷重保持中のジャッキ伸びの増加はなかった。その後、除荷してP_yまで載荷して5分間荷重保持した。この時点で、コンクリート上面に数本のひび割れが生じた(図-8の①)が、その幅は0.2mm以下であり、定着具付近の損傷やめり込みなどは生じなかった。

その後荷重を増加すると上面のひび割れ本数が増加した(図-8の②)。P_uにおいて荷重を5分間保持した際も定着具付近の損傷やめり込みは生じていなかった。8000kNを超えると、荷重の増加に対してジャッキ伸びの増加が顕著になった。そして、9427kNにおいて、②のひび割れが顕著になるとともに、荷重が低下したため載荷を終了した。最大荷重はP_uの1.32倍である。試験後に確認すると、図-8に示すように定着具のめり込みが見られた。めり込みは、図-8試験体写真の右側のブロックで最大18mmであり、リブキャストアンカー背面のコンクリートの押し抜き破壊と考えられた。

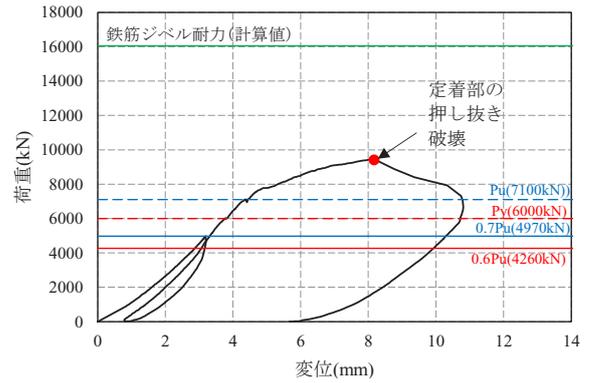
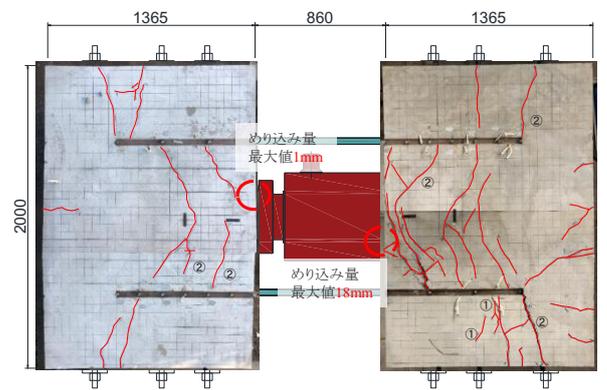


図-7 荷重とジャッキ伸びの関係



ひび割れ発生荷重
ひび割れ① 6000kN ひび割れ② 7100kN



図-8 試験体破壊状況

試験体右側

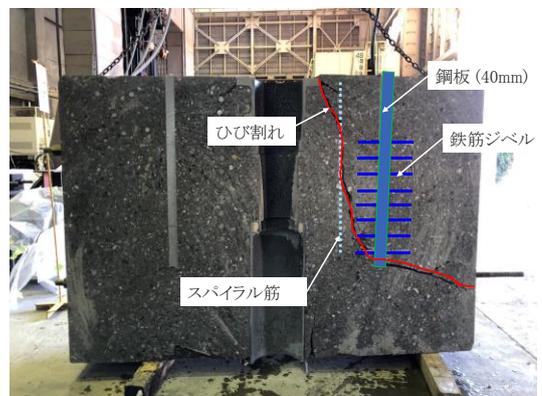


写真-1 試験体切断面の状況

写真-1は、図-8右側のコンクリートブロックを水平方向に切断した切断面の状況である。リブキャストアン

カーから生じたひび割れ（図中赤線）は、スパイラル筋位置に沿って進展し、鋼板端から外側（図右方向）のコンクリート表面に達していた。ひび割れは、鉄筋ジベルを避けるように進展していることから、鉄筋ジベルが本来有する大きなせん断抵抗力を発揮する前に、リブキャストアンカー背面のコンクリートが押し抜き破壊したものと考えられる。このことは、鉄筋ジベルのみの耐力（約 17500kN）よりかなり小さな荷重で破壊していること、また、リブキャストアンカーの押し抜き破壊耐力（土木学会の押し抜き試験方法による）は、 P_u の概ね 1.3 倍（9427kN）であることから明らかである。

以上の結果から、斜材引張強度 P_u までの挙動は表-1 の評価基準をすべて満足しており、定着部としての性能を確認することができた。

（2）鋼板のひずみ分布

図-9 に鋼板のひずみ分布を示す。図-9 左のグラフは、鋼板 1（図-4 参照）のひずみ分布を、右のグラフは鋼板 2 のひずみ分布を示している。ひずみ値は、鋼板表裏に貼ったゲージからの出力の平均値である。図には、コンクリートから露出している部分の鋼板ひずみの計算値も併記した。

鋼板中央のコンクリートから露出している部分の計測値は、計算値とほぼ一致していた。コンクリート内の鋼板ひずみは、荷重端から離れるにしたがって急激に低下

し、鋼板端部ではほぼゼロに収束していた。これは、鋼板の摩擦抵抗と鉄筋ジベルによるせん断抵抗の両者により鋼板の引張力に抵抗しているためと考えられる。

（3）鉄筋ジベルのひずみ

鉄筋ジベルのひずみを図-10 に示す。当該ひずみは、写真-1 において、リブキャストアンカーからの押し抜きのひび割れが跨いだ鋼板に設置した鉄筋ジベルのものである。荷重端に近い方から 3 本目、5 本目、7 本目となっている。

3 本目と 5 本目においては、ひずみは最大でも 1,200 μ 程度であり、10,000kN の荷重荷重においても降伏していない。7 本目においては、ジャッキ伸びが急増し始めた 8,000kN 程度から、ひずみが顕著に増加しており、この時点で、押し抜き破壊にともなうひび割れが鉄筋ジベルを跨いだことが示している。

（4）鉄筋ジベルの負担せん断力

鉄筋ジベルが負担しているせん断力の分布を図-11 に示す。部位は、接合部 A と接合部 D（図-4 参照）で、比較的密にゲージを設置した区間である。鉄筋ジベルの負担せん断力は、図-2 の鉄筋ジベルの押し抜き試験において、ジベル鉄筋に貼付したひずみゲージの挙動と、図-10 のひずみ挙動から推定した。

鉄筋ジベルの負担せん断は、ばらつきが大きいものの、

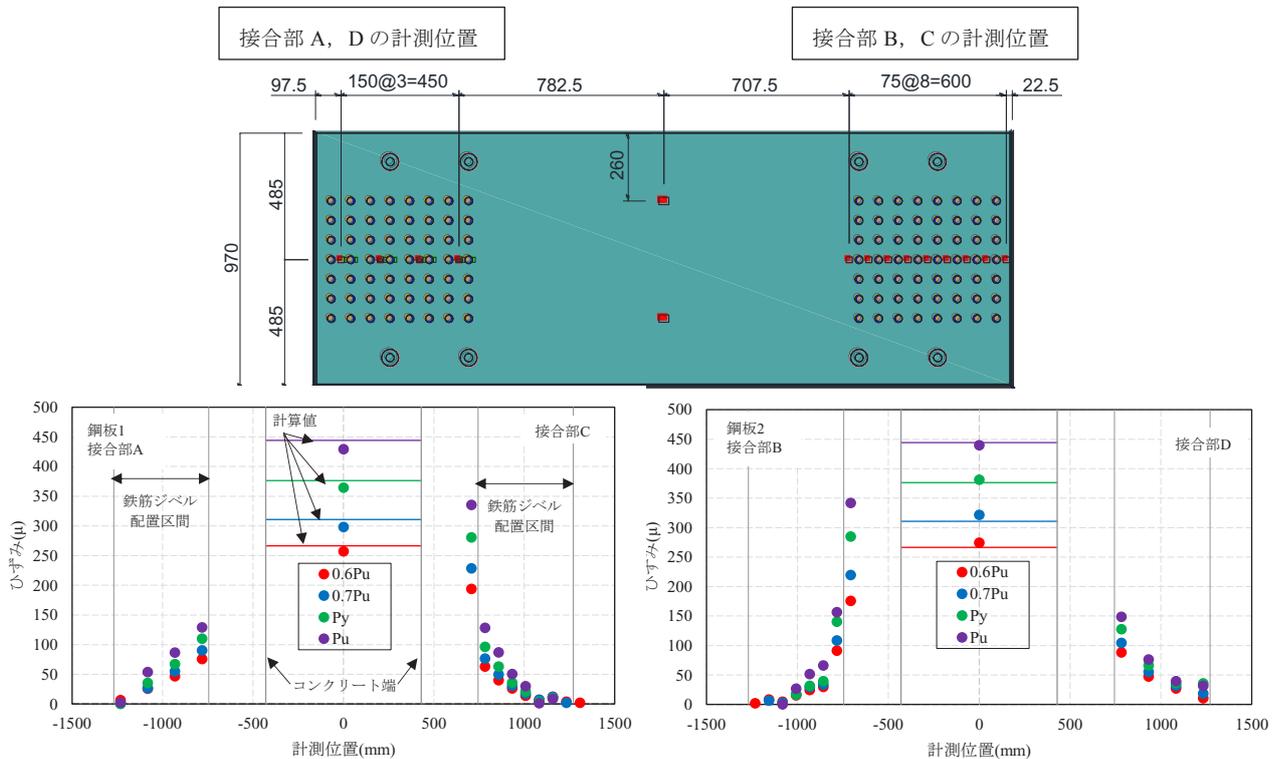


図-9 鋼板ひずみ分布

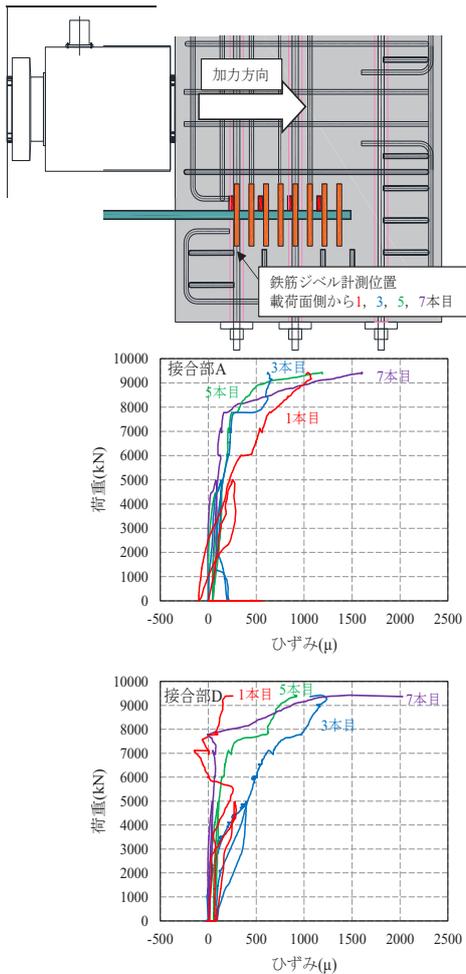


図-10 鉄筋ジベルひずみと荷重の関係

載荷端側で大きく載荷端から離れるにしたがって低下する傾向が見られた。図中赤の点線は、 $0.7P_u$ 時の鉄筋ジベルの許容せん断耐力計算値、青の点線は、設計せん断耐力計算値である。 $0.7P_u$ において、部分的に許容せん断耐力を超える部分があるが、平均的には概ね許容値と一致していた。一方、 $0.7P_u$ から P_y までの負担せん断力の増加はわずかであり、 P_y で想定していた設計せん断耐力よりもかなり小さな値であった。これは、鋼板面の摩擦の影響などが考えられる。

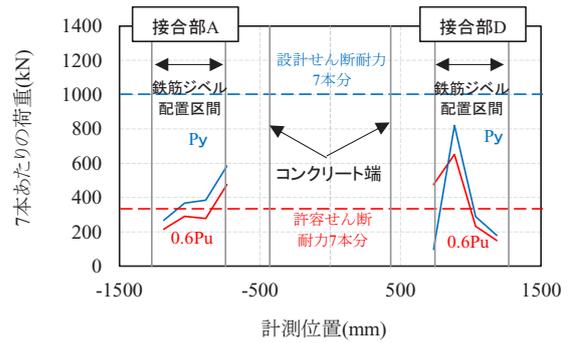


図-11 せん断力分担割合

4. まとめ

施工の省力化を目的として、2枚鋼板タイプの鋼・コンクリート複合主塔分離定着構造を開発した。本構造の実物大試験体の載荷試験を実施し、以下の知見が得られた。

- 1) 本定着構造は、あらかじめ設定した評価基準（設計荷重時にひび割れが生じないこと、斜材降伏荷重時にコンクリート表面ひび割れ幅が 0.2mm 以下で定着具に有害な変形損傷めり込みがないこと、斜材破断荷重時に5分間荷重を保持し、定着具に有害な変形損傷めり込みがないこと）を満足した。
- 2) 破壊形態は、定着具の押し抜き破壊で、最大荷重は斜材破断荷重の約1.3倍であった。

参考文献

- 1) プレストレストコンクリート設計施工基準・同解説、日本建築学会、1998
- 2) 野並、篠崎、中積：鋼板孔と鉄筋からなるずれ止めせん断耐力に関する実験的研究、土木学会第73回年次学術講演会（投稿中）
- 3) 複合構造標準示方書2014年制定、日本土木学会、2014