

## 論文 鋼管・コンクリート複合構造橋脚模型のせん断試験

田中浩一\*1・今泉安雄\*2・渡辺将之\*3・大内一\*4

**要旨：**橋脚工事の省力化・急速施工を目的に開発された鋼管・コンクリート複合構造橋脚は、新たな橋脚工事への適用が進められつつある。兵庫県南部地震による道路橋の甚大な被害をふまえ、大規模地震に対する本構造の耐震設計法の整備とともに設計マニュアルの作成が求められている。そこで帯鉄筋代替として用いるPCストランド量と鋼管がせん断耐力に及ぼす影響に着目し、柱型模型による正負繰返し水平加力試験を行った。その結果、鋼管のせん断力負担もありPCストランドの全強を考慮して求めた設計式より相当高い強度を得、最大荷重以降もダクタイルな破壊性状を示すことが分かった。

**キーワード：**複合構造高橋脚，鋼管，PCストランド，正負繰返し載荷，せん断耐力

## 1. はじめに

本構造のせん断設計を考える時、PCストランドおよび鋼管の負担力評価が問題となる。前者については建築分野でこれまで $\sigma_y=1,500\text{N/mm}^2$ 程度までの高強度せん断補強筋を対象にした実験[1]が行われてきたが、PCストランドはそれ以上の強度であり断面形状も異にしている。後者は設計上、鉄筋と同様の曲げ補強材としての役割をしており、施工時には鉄筋工や型枠工の省力化に寄与するだけでなく、スリップフォームによる急速施工のための反力架台としての役割もしている。このように主に施工性の向上に寄与してきた鋼管のせん断力負担分を明確にすることにより、本構造をより経済的に設計することが可能となる。

鋼管のせん断力負担分の確認のため、鋼管内グラウト充填した梁型模型によりせん断スパン内での破壊を目指した実験があるもののせん断破壊に至っていない[2]。このような背景のもとPCストランド量と鋼管の有無をパラメータに柱型模型による正負交番繰返し水平加力実験を行った、その影響を検討した。

## 2. 試験内容

試験体は鋼管の有無と換算帯鉄筋比(PCストランドを帯鉄筋(SD345)で置き換えた値、 $p_w^{eq}$ )をパラメータにした。試験体一覧を表-1に、試験体形状寸法(せん断スパン比  $a/D=2.5$ )と配筋状況を図-1に示す。各試験体の全鉄筋比 $P_t$ は3.11~3.40%で鋼管を有する試験体の全鋼管比 $P_t$ は1.57%である。試験区間の鋼管内部は実状とあわせ中空とし、フーチング内のみグラウト注入している。また、その端部は鉄板に溶接定着、一方天端では特別な定着はしていない。主筋はせん断破壊を先行させるため、高強度鉄筋(ゲビンデスタープ D26 B種)を用い、下端は溶接定着、天端はボルト定着を行った。

加力は一般性をもたせるため部材角( $R$ =加力点水平変位/柱高さ)で2/1000刻みで $R=3/100$ ま

\*1 (株) 大林組 技術研究所 構造第一研究室、工修(正会員)

\*2 日本道路公団 福岡建設局 建設部 構造技術課課長代理

\*3 日本道路公団 東北支社 建設部 構造技術課課長代理(正会員)

\*4 (株) 大林組 技術研究所 構造第一研究室主任研究員、工博(正会員)

表-1 試験体一覧

| No.    | 鋼管      | PCストランド量 |        |                |
|--------|---------|----------|--------|----------------|
|        |         | ピッチ      | $P_w$  | $P_w^{eq}$ *1) |
| S-02N  | 無 (中実)  | @90mm    | 0.04%  | 0.2%           |
| S-02V  | 無 (ボイド) | @90mm    | 0.04%  | 0.2%           |
| S-007T | 有       | @250mm   | 0.014% | 0.07%          |
| S-02T  | 有       | @90mm    | 0.04%  | 0.2%           |

\*1)  $P_w^{eq} = P_w \times (\sigma_{py} / \sigma_{sy})$   
 $\sigma_{py}$ : PCストランド降伏応力度  
 $\sigma_{sy}$ : 鉄筋 (SD345)の降伏応力度

表-2 コンクリートの配合

| 水セメント比<br>W/C(%) | 細骨材率<br>s/a(%) | 単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) |      |     |     |       |
|------------------|----------------|--------------------------|------|-----|-----|-------|
|                  |                | 水                        | セメント | 細骨材 | 粗骨材 | 混和剤   |
| 58.1             | 51.6           | 168                      | 289  | 940 | 890 | 1.012 |

粗骨材最大寸法 13mm

表-3 コンクリートの材料試験結果

| 試験体        | S-02N | S-02V | S-007T | S-02T |
|------------|-------|-------|--------|-------|
| 圧縮試験 (MPa) | 42.9  | 43.8  | 43.4   | 44.8  |
| 引張試験 (MPa) | 3.23  | 3.80  | 3.64   | 3.39  |
| 弾性係数 (GPa) | 29.3  | 29.8  | 29.2   | 28.5  |
| 材令 (日)     | 82    | 89    | 102    | 111   |

表-4 鋼材の種類と引張試験結果

|             | 主筋 *1)   | 鋼管(SS400)           | PCストランド   |
|-------------|----------|---------------------|-----------|
|             | D26      | $\phi=114.3, t=2.8$ | 2本より2.9mm |
| 降伏応力度 (MPa) | 1056 *2) | 274                 | 1,852 *2) |
| 引張強度 (MPa)  | 1179     | 417                 | 2,032     |

\*1) 主筋には高強度鉄筋 (ゲビンデスターブ) を用いた。  
 \*2) より線方向に貼付したひずみゲージ測定値をもとに0.2%永久伸びに対する耐力より求めた。

で正負交番繰返し水平載荷した。せん断耐力に繰返し回数が及ぼす影響は小さいと考え、各1 サイクルずつとした。また本構造橋脚の軸力レベルは試設計算結果から  $\sigma_o = 10 \sim 15 \text{ kgf/cm}^2$  と小さいため、軸力は導入していない。使用材料は、コンクリートは呼び強度24MPa、粗骨剤最大寸法は13mmで普通ボルトランドセメントを用いた。コンクリートの配合を表-2に、材料試験結果を表-3に示す。用いた鋼材の種類と引張試験結果を表-4に示す。

### 3. 試験結果

#### 3.1 荷重-変位と破壊状況

代表的な荷重-変位の関係を図-2~3に示す。図中には道路橋示方書によるせん断耐力の計算値 [3] を示す。計算の際、せん断補強筋の強度としてPCストランドの材料試験結果に基づく降伏強度を用いている。なお計算値には鋼管のせん断力負担は考慮していない。コンクリート負担分については全幅有効とした場合と、鋼管幅部分を無視した有効幅による場合の両者を示した。いずれの試験体もせん断ひび割れは  $R = \pm 4/1000$  時で発生した。最大荷重は試験体S-02Tの場合正荷重時のみ  $R = 14/1000$  時で、それ以外はいずれも  $R = \pm 12/1000$  時であり、計算耐力をはるかに上回っている。充実断面の試験体S-02Nは最大耐力時にPCストランドが破断し、その後も徐々に破断してい

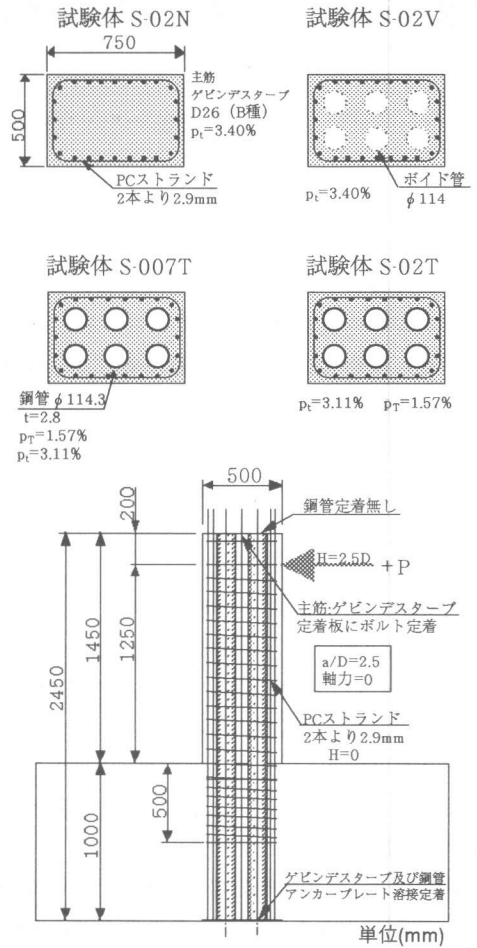


図-1 試験体形状寸法と配筋状況

き耐力も大きく低下する。それ以外の試験体は急激な低下がみられなかった。それは他の試験体は鋼管或いはボイド側方のかぶりコンクリートが剥落し、PCストランドの付着がゆるんだため、破断は極めて少ないか或いは破断に至らなかったことが一因として考えられる。図-3に示すように特に鋼管を有する試験体は、せん断破壊ではあっても最大荷重後も比較的ダクタイルな性状を示している。試験体S-02Nと試験体S-02Tの試験終了後の破壊状況を写真-1、写真-2に示す。前者の場合、繰返し载荷により2方向にせん断ひび割れが入っており、PCストランドの付着切れや破断により拘束を解放された中腹部コンクリートかぶりが剥落するものと考えられる。後者の場合は鋼管側方のコンクリートは断面欠損もあり、せん断応力が高くなり易い。全体のせん断ひび割れとは別に、この部分に局部的に斜めひび割れが入り鋼管に沿う形で成長する。繰返し载荷により局所2方向にひび割れた帯は特にかぶり部分が終局時に剥離していくものと考えられる。なお、この剥離は鋼管を有しないボイド試験体S-02Vでも同様に観察された。

諸荷重一覧を表-5に示す。計算値は道示式を基本とし、最大荷重のみ土木学会式[4]による値も参考に示す。斜めひび割れ発生荷重は各試験体とも大きな差はみられなかったが、ボイドを有する試験体S-02Vは若干小さい。PCストランドの降伏は、充実断面の試験体S-02Nが最も小さい部材角で生じていた。最大荷重は正負でばらつきが生じた試験体もあったが、試験体S-02Tが最も大きい値を示した。

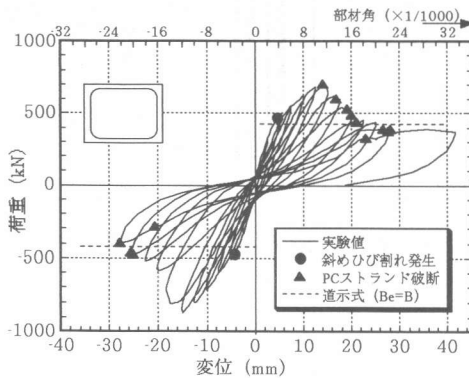


図-2 荷重と変位の関係 (試験体S-02N)

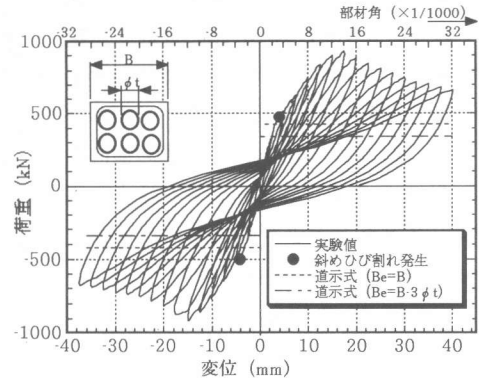


図-3 荷重と変位の関係 (試験体S-02T)

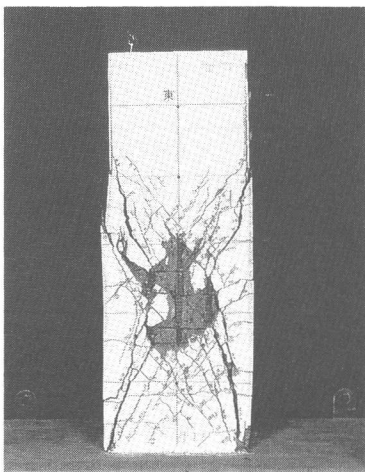


写真-1 せん断試験終了後 (試験体S-02N)

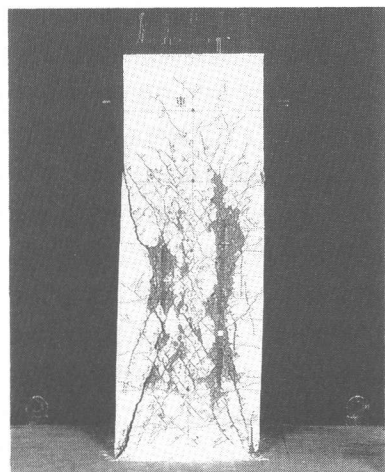


写真-2 せん断試験終了後 (試験体S-02T)

表-5 諸荷重一覧

(上段正荷重時/下段負荷重時)

| 試験体    | 斜めひび割れ発生荷重 (kN) |                |              | PCストランド降伏荷重 (kN)  |      |                                   |              |               |      | 最大荷重 (kN)                   |              |               |      |                             |              |               |      |      |      |
|--------|-----------------|----------------|--------------|-------------------|------|-----------------------------------|--------------|---------------|------|-----------------------------|--------------|---------------|------|-----------------------------|--------------|---------------|------|------|------|
|        | 実験値             | 計算値<br>Vc.cal  | 実/計          | (道形式との比較)         |      |                                   |              |               |      | (道形式との比較)                   |              |               |      | (土木学会式との比較)                 |              |               |      |      |      |
|        |                 |                |              | 実験値 <sup>3)</sup> |      | 計算値 <sup>4)</sup><br>(Vc+Vpc).cal |              | 実/計           |      | 計算値 <sup>5)</sup><br>Vu.cal |              | 実/計           |      | 計算値 <sup>6)</sup><br>Vu.cal |              | 実/計           |      |      |      |
|        | 荷重              | 部材角<br>×1/1000 | 計1<br>Vc+Vpc | 計2<br>Vc'+Vpc     | 実/計1 | 実/計2                              | 計1<br>Vc+Vpc | 計2<br>Vc'+Vpc | 実/計1 | 実/計2                        | 計1<br>Vc+Vpc | 計2<br>Vc'+Vpc | 実/計1 | 実/計2                        | 計1<br>Vc+Vpc | 計2<br>Vc'+Vpc | 実/計1 | 実/計2 |      |
| S-02N  | 470             | 208            | 2.26         | 681               | +10  | 427                               | 427          | 1.59          | 1.59 | 706                         | 12           | 427           | 427  | 1.65                        | 1.65         | 563           | 563  | 1.25 | 1.25 |
|        | 471             | 208            | 2.26         |                   |      |                                   |              |               |      |                             |              |               |      |                             |              |               |      |      |      |
| S-02V  | 411             | 124            | 3.31         | 698               | +12  | 427                               | 343          | 1.63          | 2.03 | 740                         | 12           | 427           | 343  | 1.73                        | 2.16         | 566           | 425  | 1.31 | 1.74 |
|        | 432             | 124            | 3.48         |                   |      |                                   |              |               |      |                             |              |               |      |                             |              |               |      |      |      |
| S-007T | 441             | 124            | 3.56         | 672               | -12  | 287                               | 203          | 2.34          | 3.31 | 815                         | 12           | 287           | 203  | 2.84                        | 4.01         | 425           | 285  | 1.92 | 2.86 |
|        | 457             | 124            | 3.69         |                   |      |                                   |              |               |      |                             |              |               |      |                             |              |               |      |      |      |
| S-02T  | 472             | 124            | 3.81         | 848               | -16  | 427                               | 343          | 1.99          | 2.47 | 927                         | 14           | 427           | 343  | 2.17                        | 2.70         | 568           | 427  | 1.63 | 2.17 |
|        | 499             | 124            | 4.02         |                   |      |                                   |              |               |      |                             |              |               |      |                             |              |               |      |      |      |

- 1) 斜めひび割れ発生荷重は、目視観察により行った。  
 2) 計算値は道路橋示方書のコンクリート寄与分(有効幅を用いて計算)の値とした。  
 3) PCストランドのひずみが、降伏ひずみ(材料試験結果から求めた耐力を材料試験結果から求めた弾性係数で除した値)に達したときとした。  
 4) 計算値は道路橋示方書のコンクリート寄与分+帯鉄筋の寄与分の値とした。また、Vcは全幅、Vc'は有効幅を用いて計算した値。  
 5) 鋼管は考慮せず。Vc,Vc'は4)と同じ。  
 6) 計算値はコンクリート標準示方書のコンクリート寄与分+帯鉄筋の寄与分の値とした。Vc,Vc'は4)と同じ。

### 3.2 PCストランドのひずみ分布

基準試験体S-02Tに関して最大荷重時と側面のコンクリートが剥離し始める部材角R=16/1000におけるPCストランドのひずみ分布を図-4に示す。PCストランドは、最大荷重時にはほぼ降伏ひずみに達しており、1.0D(D=500mm)付近で卓越している。ウェブコンクリートが剥離する段階では、最大荷重時に比べややひずみが小さい。また他の試験体でも同様の傾向を示していた。なおPCストランド降伏ひずみは、ストランドより線方向にゲージを貼付し別途に行った引張キャリブレーション試験により定めている。

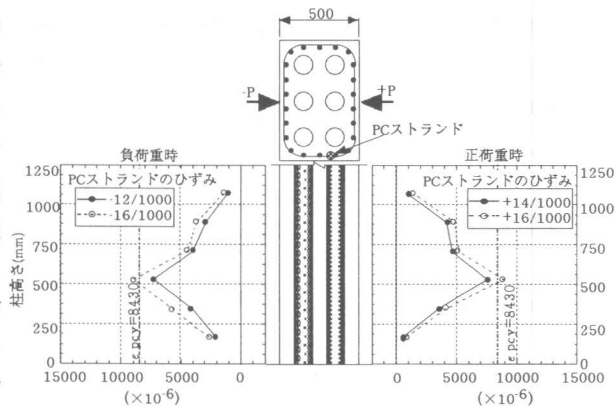


図-4 PCストランドのひずみ分布 (試験体S-02T)

### 3.3 セン断耐力

せん断耐力と $p_w^{eq}$ の関係を図-5に示す。なおせん断耐力は各試験体とも正負の内小さい方で定義した。図中には道路橋示方書による計算値を参考に示した。

試験体S-02NとS-02Vの比較からポイドによる影響は殆どない。また試験体S-007TとS-02Tの比較から $p_w^{eq}$ による補強効果はみられる。試験体S-02TとS-02Vの耐力差が鋼管の影響であり約200kN強の増加を示していた。鋼管の存在により0.07%程度のPCストランド量でも0.2%程度のPCストランドで補強した充実断面試験体S-02Nと同程度の耐力を有すること、また鋼管を有する0.2%PCストランド補強試験体は、同じPCストランド量を有する充実断面試験体に対し約25%の耐力増をしている。

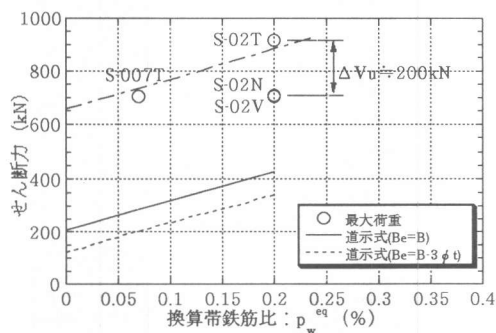


図-5 セン断耐力と $p_w^{eq}$ の関係

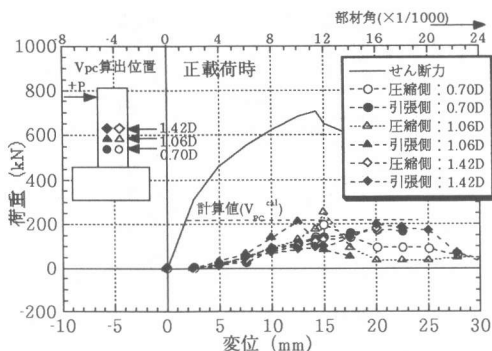


図-6 PCストランドのせん断力負担分  
(試験体S-02N)

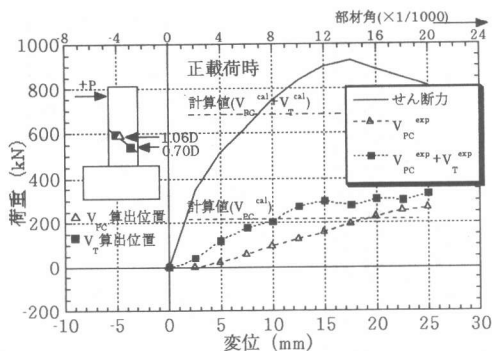


図-7 PCストランドと鋼管のせん断力負担分  
(試験体S-02T)

### 3. 4 せん断力負担割合

試験体S-02NのPCストランドのせん断力負担を図-6に示す。これはPCストランドの測定ひずみに見かけの弾性係数と断面積を乗じて、 $45^\circ$ トラス理論により求めた値を各測点毎に示している。図中の破線は降伏強度を用いた値である。PCストランドは最大荷重時 ( $R=12/1000$ ) 近傍ではほぼ全降伏強度を發揮していることがわかる。

図-7には試験体S-02TにおけるのPCストランドと鋼管のせん断力負担分を示す。次式に示すPCストランドの計算耐力 ( $V_{PC}^{cal}$ ) と、それに鋼管の純せん断強度 ( $V_T^{cal}$ ) を累加した計算耐力をそれぞれ図中に示した。

$$PCストランドの計算耐 (V_{PC}^{cal}) = 2 \times A_{PC} \cdot \sigma_{pey} \cdot d / (1.15 \cdot a) \quad (1)$$

$$鋼管の純せん断強度 (V_T^{cal}) = (A_T / 2) \cdot (\sigma_{ty} / \sqrt{3}) \times (n_c + n_t) \quad (2)$$

$$鋼管のせん断力負担分 (V_T^{exp}) = [n_c \cdot \tau_{xy} \cdot (A_T / 2)]_{comp.} + [n_t \cdot \tau_{xy} \cdot (A_T / 2)]_{tens.} \quad (3)$$

ここで、 $A_{PC}$ 、 $\sigma_{pey}$  はそれぞれPCストランドの断面積、降伏強度、 $d$  は有効高さ、 $a$  はストランドのピッチである。また  $\sigma_{ty}$  は鋼管の降伏強度、 $A_T$  は鋼管断面積、 $n_c$ 、 $n_t$  はそれぞれ圧縮側および引張側鋼管の各本数である。また実験値としての鋼管のせん断力負担分  $V_T^{exp}$  は図中に示す区間で  $45^\circ$  の破壊面を想定し、左右鋼管の負担せん断力の和として求める。貼付した3軸ひずみゲージによりウェブ位置でのひずみ ( $\epsilon_x$ 、 $\epsilon_y$ 、 $\gamma_{xy}$ ) を求め、2軸の弾塑性応力-ひずみ構成式によりせん断応力度  $\tau_{xy}$  を求め、圧縮側と引張側を合算して算出した。

図中の (■) は、PCストランドと鋼管の合せん断力である。PCストランドは計算耐力に達しているが、鋼管は純せん断強度を發揮するまでには至っていない。

次にポイドによるコンクリートの損失せん断力と鋼管の負担せん断力の関係について考察する。前者を試験体S-02Nと試験体S-02Vの差として与えたもの、そして後者を試験体S-02Tと試験体S-02Vの差として与えたものを図-8に示す。本試験体の場合鋼管のせん断力負担分が

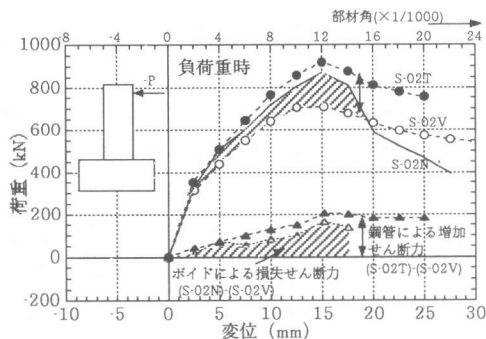


図-8 鋼管とポイドのせん断力負担分

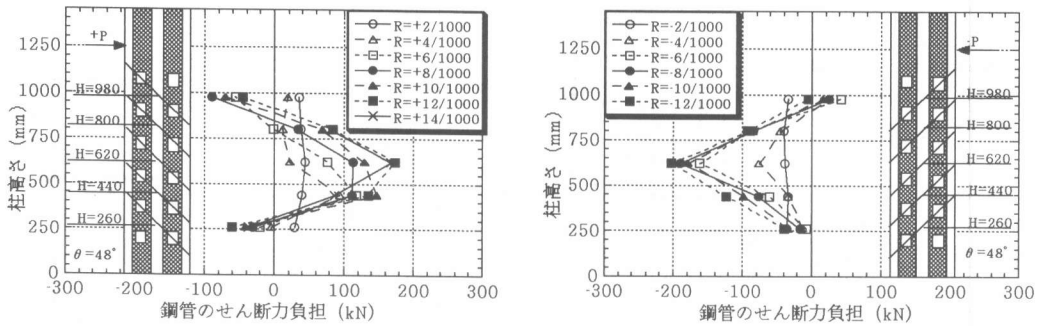


図-9 鋼管の高さ方向せん断力負担分布 (試験体S-02T, 左図:正荷重時, 右図:負荷重時)

ポイドによるせん断力損失分を上回っており、ポイドによるせん断耐力低下を鋼管が補っている。

試験体S-02Tの鋼管の高さ方向の負担せん断力分布を図-9に示す。図中に示すように45°ひび割れ線に沿う左右鋼管の合せん断力を、その平均高さ位置でのせん断力として示している。各鋼管の負担せん断力は式(3)の方法により算出した。鋼管のせん断力はせん断ひび割れの卓越する1/3~1/2柱高さ部で卓越する傾向にあり、平均せん断応力度(=  $V_T^{exp} / (B \cdot D)$ )は最大で0.44MPaに達している。

#### 4. 結び

高さ40~80m級の試設計橋脚をもとに、全引張鉄筋比 $P_s=3.11\sim3.40\%$ 、全鋼管比1.57%、ポイド率20%程度の断面を想定し、 $B/D$ (断面幅/高さ比)1.5、 $a/D$ (柱高さ/断面高さ比)2.5で、換算帯鉄筋比 $P_w^{eq}=0.07\sim0.2\%$ と鋼管の有無をパラメータに、繰返し加力によるせん断破壊試験を行った。その結果次の結論を得た。

- ① せん断補強筋として用いたPCストランドは最大耐力近傍で全強度を發揮しており、道示式および土木学会のせん断耐力評価式にPCストランドの降伏強度まで考慮しても、繰返し載荷試験で得られたせん断強度と比較し、十分安全側にせん断耐力を評価できる。その理由としてコンクリート負担分 $V_c$ が実際にはより高いこと、鋼管の負担が大きいことが挙げられる。
- ② 断面内に鋼管を配置することにより、最大荷重以降も比較的耐力低下は少なくダクタイルなせん断破壊性状を示した。これは、鋼管側方部コンクリートが剥落し、ストランドの付着がなくなって破断しにくくなることと、鋼管の存在によるためといえる。
- ③ 鋼管の存在もあり、 $P_w^{eq}=0.07\%$ の小帯鉄筋量でも十分せん断ひび割れは分散し、 $P_w^{eq}=0.2\%$ の場合と同様の破壊性状を示す。
- ④ 鋼管のせん断力負担について、実用設計式が今後の課題となる。

#### 参考文献

- [1] 福原正志ほか：鉄筋コンクリート部材における高強度せん断補強筋の補強効果に関する実験研究-はりの曲げせん断実験-、日本建築学会論文報告集、第320号、pp12-20、1982.10
- [2] 田中浩一、大内一：鋼管・コンクリート複合構造橋脚模型の繰返し曲げ載荷試験(その2)、土木学会第51回年次学術講演会講演概要集第5部、pp.1022-1023、1996.9
- [3] (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編、pp134-135、1996.12
- [4] (社)土木学会：コンクリート標準示方書 設計編、pp57-58、1991.9