

(59) 支圧板方式を用いた複合ポータルラーメン橋剛結部に配置された孔あき鋼板ジベルの力学的挙動に関する実験的研究

山田 貴男¹・川元 悠平²・山口 隆司²・山田 金喜³
・曾田 信雄³・水上 善晴³・佐合 大¹・谷 一成¹

¹正会員 (株)高田機工 技術本部 (〒556-0011 大阪市浪速区難波中2-10-70)

E-mail: t_yamada@takadakiko.co.jp

E-mail: d_sagou@takadakiko.co.jp

E-mail: k_tani@takadakiko.co.jp

²正会員 大阪市立大学大学院 工学研究科都市系専攻 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本3-3-138)

E-mail: kawamoto@brdg.civil.eng.osaka-cu.ac.jp

E-mail: yamaguti@civil.eng.osaka-cu.ac.jp

³正会員 東日本高速道路(株) 東北支社 (〒980-0021 仙台市青葉区中央3-2-1)

E-mail: k.yamada.ad@e-nexco.co.jp

E-mail: n.soda.aa@e-nexco.co.jp

E-mail: y.mizugami.aa@e-nexco.co.jp

背面土を有する複合ポータルラーメン橋においては、橋台の剛結部基部に損傷を生じた場合、損傷の発見及び復旧が難しいなどの構造的課題がいくつか挙げられる。そこで著者らは、施工品質向上及び剛結部の合理化を目指すとともに、維持管理の確実性と容易さに配慮して、剛結部天端で損傷させる孔あき鋼板ジベルを配置した支圧板方式による剛結部構造を提案している。本研究では、孔あき鋼板ジベルに着目した剛結部の構造実験と孔あき鋼板ジベルの性能検証を目的とした要素実験を行い、構造性能や終局強度に至るまでの挙動を確認した。実験の結果、提案する剛結部構造は所定の終局耐力を保有し、鉄筋や鋼桁が降伏し、最大耐力に達した後も、孔あき鋼板ジベルの高いせん断抵抗が発揮され、躯体と支圧板の離間を防ぎ、冗長性の観点からも有効であることがわかった。

Key Words : portal rigid-frame bridge, rigid connection, static test, bearing plate, Perfo-bond rib shear connectors

1. はじめに

我が国の鋼道路橋では公共工事の縮減に伴う初期建設コスト削減のみならず、平成 24 年度の道路橋示方書にも示されるように維持管理の確実性と容易さが求められてきている。既設の鋼橋では、橋台付近の桁端部に鋼材の腐食・疲労による損傷や経年的な劣化が発生する頻度

が高い傾向にあり、伸縮装置からの漏水に起因する鋼桁や支承の腐食、橋座・狹隘部の滞水や土砂堆積、支承機能不全に起因する疲労亀裂などの問題点が挙げられる(写真-1.1, 写真-1.2)。

これらの桁端部の問題を解消できる構造として、近年、我が国では、中小スパンの単純桁橋において鋼ポータルラーメン橋の採用が増えてきている。鋼ポータルラー



写真-1.1 伸縮装置の漏水



写真-1.2 支承の腐食



写真-2 鋼ポータルラーメン橋



写真-3.1 橋台背面クラック

写真-3.2 剛結部施工性

ン橋は、写真-2 に示す通り背面から土圧を受ける下部構造と上部構造が剛結された単径間のラーメン橋であり、背面土圧により構造系が拘束される点に構造的な特徴を有する。また、鋼桁とコンクリート橋台とを剛結することにより、支承と伸縮装置を省略できることから、建設時の初期コストやライフサイクルコストの削減とともに維持管理性が容易になることが期待できる。

しかしながら、背面土を有する鋼ポータルラーメン橋においては、橋台の剛結部基部に損傷が生じた場合、損傷の発見及び復旧が難しい点、剛結部コンクリートの施工における配筋性の悪さやコンクリートの充填性に起因する品質確保の難しさなど、いくつかの課題が挙げられる(写真-3.1、写真-3.2)。

そこで著者らは、施工品質向上及び剛結部の合理化を目指すとともに、維持管理の確実性と容易さに配慮して、剛結部天端で損傷させる孔あき鋼板ジベル(以下 PBL)を配置した支圧板方式による剛結部構造を提案し研究してきた¹⁰⁾。本稿では、提案構造の PBL に着目した剛結部の構造実験と孔あき鋼板ジベルの性能検証を目的とした要素実験を行い、構造性能や終局強度に至るまでの挙動を確認したので報告する。

2. 支圧板を用いた提案構造の特徴

著者らの提案する剛結部構造を図-1に示す。本構造は鋼桁を直接橋台部に埋め込まず、支圧板を介して貫通鉄筋を有するPBLのみを橋台部に埋め込む構造となっている。

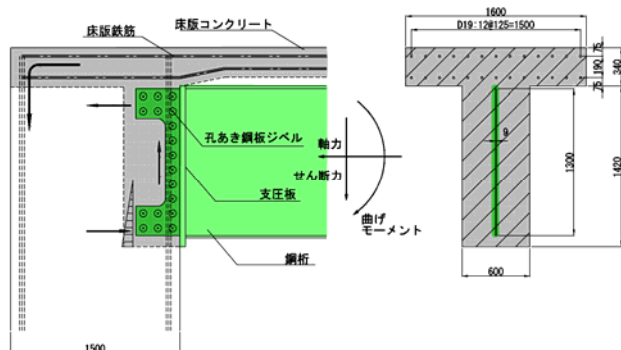


図-1 提案する剛結部構造の概要図

鋼ポータルラーメン橋の剛結部作用力は負曲げと軸圧縮力が支配的であることから、提案構造における床版鉄筋が上フランジ側の引張力に抵抗し、PBLにより補剛さ

れた支圧板が下フランジ側の圧縮力に抵抗する。また、軸圧縮力は支圧板全体で抵抗するとともに、せん断力の伝達は、支圧板背面のPBLにより抵抗する。このような構造を採用する利点として、以下のものが挙げられる。

①貫通鉄筋を有するPBLは高いせん断耐力と靱性が期待できるため³⁾、終局時における脆性的なせん断破壊を防ぐことができる。②橋台コンクリートへの埋め込み部が、縦方向に配置したPBLのみであり、また埋め込み長を短くできるため、剛結部鉄筋の配筋性が向上し、コンクリートの充填性が改善する。また、従来構造（桁埋込構造）よりずれ止め数を削減できるといった利点がある。

③下フランジ側の圧縮力に対して、桁埋め込み方式では、鋼桁背面のコンクリートかぶりが薄くフランジ端断面が小さいため、早期にクラックが橋台に生じるが、提案方式では支圧板全体で抵抗することから、橋台背面コンクリートへのクラック発生に対するリスクが低減できる。

④大規模地震時において、予期せぬ繰り返し交番荷重が発生した場合でも、下フランジ側のPBLが高いずれせん断抵抗をすることで冗長性を発揮できる。

上記の通りPBLは本構造において重要な役割を果たすことから、PBLに着目した実験を実施している。

3. PBLの要素実験

(1) 要素実験の概要

提案構造の構造実験を実施するにあたり、まずPBLの要素特性を明らかにすることを目的として押抜き試験を実施した。PBLのせん断耐力算定式は各種提案されているが、それらは頭付きスタッドの押抜き試験方法を参考にした試験体がいられっており、基本的には合成桁に用いられるPBLを対象としているものが多い。しかし、鋼桁とRC橋台とを剛結するポータルラーメン橋では、PBL周辺は鉄筋コンクリートに囲まれており、拘束度が高いと考えられる。中島ら⁴⁶⁾は、PBLが実際のポータルラーメン橋に用いられる場合を想定し、PBLをコンクリートブロックで取り囲むタイプの供試体を用いて押抜き試験を行い、そのせん断耐力評価式の提案を試みている。

本稿では、ポータルラーメン橋に適用する PBL の挙動と、剛結部構造実験の要素実験を兼ねて、中島らの提案する試験法を参考にし、実際の構造に適用する孔径を用いて PBL の押抜き試験を行い、実構造に適用する際の孔径・貫通鉄筋の有無が孔あき鋼板ジベルのせん断耐力に与える影響について確認を行った。

(2) 要素実験の試験体

試験体の形状を図-2に示す。コンクリートブロックは、中島らの実験で、ひび割れが発生しないとされた寸法を採用し、孔径 ϕ は、中島らが確認した $\phi 50$ 、 60 、 70 の間を

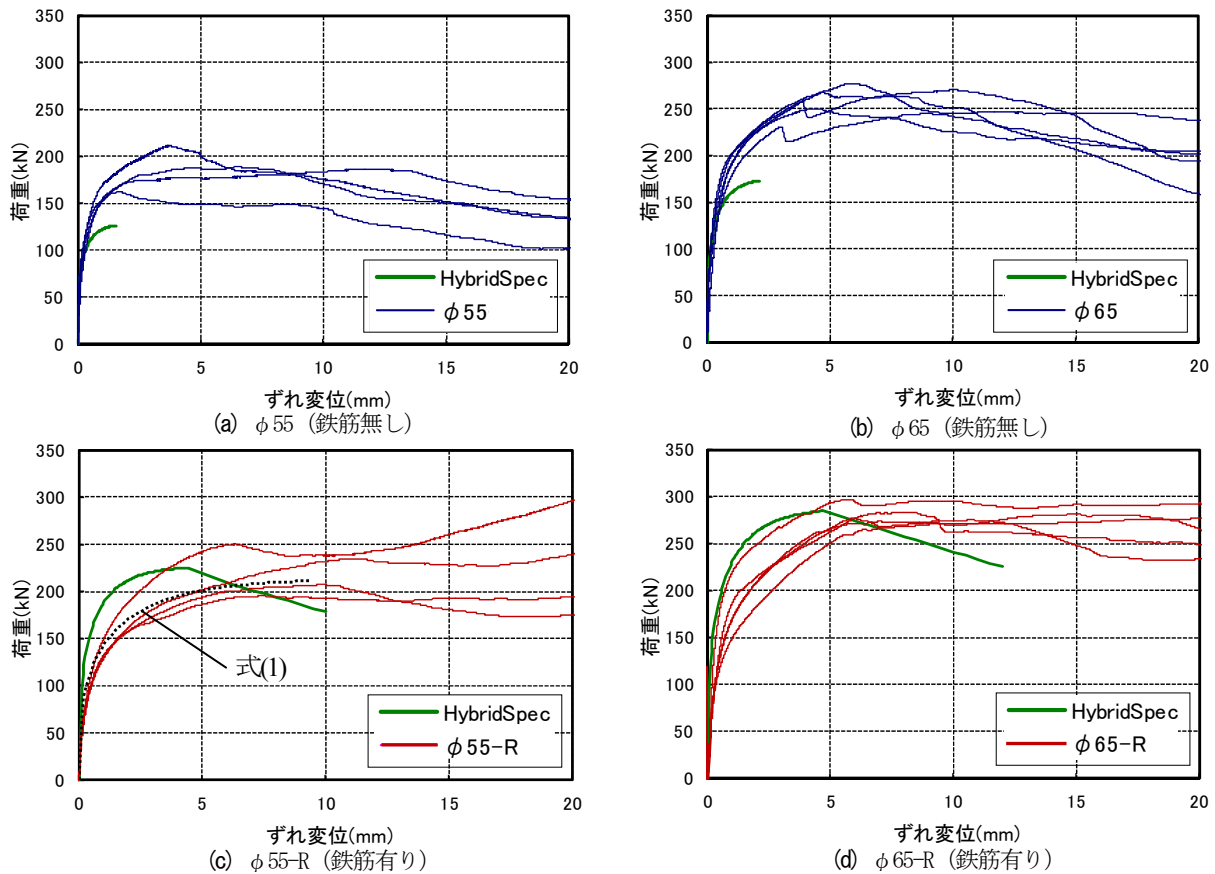


図-4 複合構造標準示方書式との比較

下回る傾向にある。これは、既往の研究でも考察されているように⁷⁸⁾、貫通鉄筋の存在により、孔内の粗骨材混入量が少なくなるためと考えられる。

また、せん断力-ずれ変位関係より、最大せん断耐力に到達した後は、貫通鉄筋無しの場合は、徐々にせん断抵抗力が落ちてゆくのに対し、貫通鉄筋有りの場合は、ばらつきはあるものの、せん断抵抗力は余り低下しない。これは、**写真-4**の実験後の孔近辺の断面を確認するとわかるように、貫通鉄筋が無い場合は終局状態において、孔部に若干隙間が生じるほど孔内コンクリートがずれ変形するのに対し、貫通鉄筋が有る場合は隙間が無いかわり鉄筋が曲がりだしており、鉄筋による孔内コンクリートの拘束と鉄筋の曲げ抵抗によりせん断抵抗力が低下しなかったためと考えられる。

試験後にコンクリートブロックを観察したところ φ65 の供試体では**写真-5**に示すように、コンクリートブロック側面の底部からひび割れが発生していたが、このひ



写真-5 φ65(-R)供試体のコンクリートブロックひび割れ

び割れ発生による著しい耐力低下は見られなかった。

以上の結果より、要素実験で試験した供試体において、せん断耐力は、せん断抵抗面積とは相関性があり、拘束効果の高い橋台などに埋め込んだ場合、拘束効果によるせん断耐力の上昇効果を受けていることがわかる。逆に拘束効果の影響が高くなるほど、貫通鉄筋の影響度合は小さくなる。また、貫通鉄筋が存在することで孔内コンクリートへの粗骨材混入量が少なくなる可能性がある。しかし、最大せん断耐力に到達した後は、せん断抵抗力の低下は鉄筋無しに比べ小さくなる。また拘束するコンクリートの寸法効果については、今回、同一寸法のブロックによる比較実験のみであり確認できなかったため、今後の検討課題といえる。

なお、後述する構造実験の孔あき鋼板ジベルに作用するせん断力をずれ変位から推定するため、要素実験を実施したφ55-Rの孔あき鋼板ジベルのせん断力-ずれ変位関係を、複合構造標準示方書式³⁾と実験値から算出すると次の通りである。要素実験の平均値と複合構造標準示方書式の(解6.3.4)式及び(解6.3.6)式より、

$$V_{psud}=213.9(\text{kN}), \quad \delta_{ps0}=9.4(\text{mm}) \quad (\text{実験値})$$

$$\delta_{ps0}=0.067(d/t)\phi \quad (\text{解6.3.4})$$

$$\alpha=50/(d/t) \quad (\text{解6.3.6})$$

$$\alpha/\phi=3.35/\delta_{ps0}=3.35/9.4=0.356$$

$$V_{ps}=V_{psud} \times \{1 - e^{-(\alpha \cdot \delta_{ps}/\phi)}\}^{\beta}$$

$$=213.9 \times \{1 - e^{-(0.356 \cdot \delta_{ps})}\}^{1/3} \cdots \text{式(1)}$$

許容設計抵抗荷重に対する荷重比－変位関係

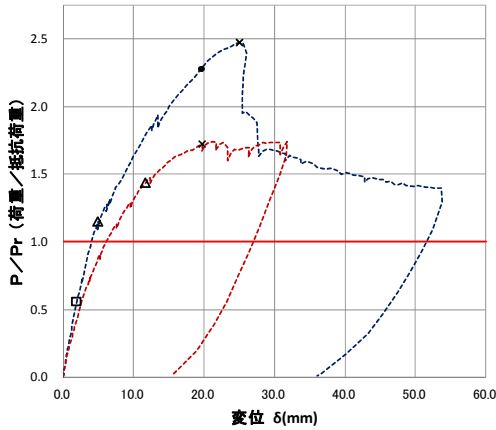
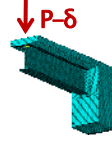


図-6 許容設計抵抗荷重に対する荷重-変位関係



- 試験体①(床版有)
- 試験体②(床版無)
- 床版ひび割れ
- △ 橋台ひび割れ
- 床版鉄筋降伏
- x 下フランジ降伏
- $P/Pr=1$



試験体① 試験体②

表-5 抵抗形態毎の荷重

荷重状態	記号	試験体①	試験体②
許容設計抵抗荷重	P_a	320.9	270.4
床版ひび割れ荷重	P_{sc}	179.9	—
橋台ひび割れ荷重	P_{ac}	369.5	388.9
床版頂部ひび割れ荷重	P_{tc}	511.1	192.2
PBLコバ降伏荷重	P_{py}	541.5	208.2
橋台鉄筋降伏荷重	P_{ay}	弾性	弾性
床版鉄筋降伏荷重	P_{dy}	732.5	—
下フランジ降伏荷重	P_{sy}	794.2	466.2
最大荷重	P_{max}	794.2	471.6



(a) 背面コア削孔



(b) 削孔断面

写真-9 床版鉄筋付着



(a) 剛結部床版上面



(b) 剛結部橋台背面



(c) 剛結部橋台前面



(d) 剛結部頂部

写真-8.1 床版有り試験体①のクラック進展状況



(a) 剛結部橋台前面



(b) 剛結部橋台背面



(c) 剛結部橋台前面



(d) 剛結部前面下側

写真-8.2 床版無し試験体②のクラック進展状況

許容設計抵抗荷重の1.7倍程度であった。

いずれも剛結部前面側の鋼材（鉄筋・鋼桁）が降伏して最大耐力に達しており、コンクリートが崩壊して耐力が低下することはなかった。このことから通常の鉄筋コンクリート断面と同様に鋼材降伏で耐力が決定され、剛結部前面側の断面で照査を行えばよいことがわかる。

更に荷重－変位関係の図をみるとわかるように、床版有りの試験体①では、最大耐力に達した後、耐力が一時的に低下するが、床版無しの試験体②の荷重レベルまで低下すると、荷重低下は落ち着き変位が増大してゆく挙動となる。これは床版鉄筋の抵抗力が無くなったことで耐力が低下したが、代わりに剛結部に埋め込まれた変形性能を有する PBL が抵抗していることを示しており、終局状態到達後の荷重支持能力として効果があり冗長性が期待できるといえる。

なお荷重低下の原因については写真-9 に示す通り、試験後に提案構造の橋台背面上部をコア削孔し断面観察を行った結果、床版鉄筋配置面に水平クラックが発生し、

これが背面を貫通したことで床版鉄筋の付着が切れ耐力が低下したと考えられる。床版鉄筋と橋台鉄筋天端の配筋については、今後の検討課題である。

実験終了後の試験体の状態およびコンクリートのクラック発生状況を写真-10に示す。床版有りの試験体①は、写真-8.1(d)に示すように剛結部頂部と剛結部背面頂部に発生しているクラックが大きい。鋼桁支圧板付近には目立ったクラックは発生していない。一方、床版無し

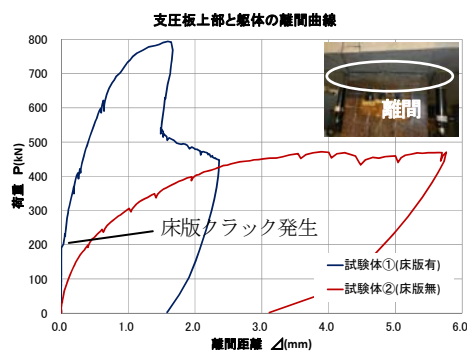


(a) 試験体①(床版有)

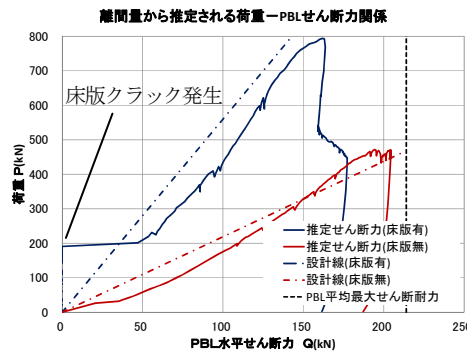


(b) 試験体②(床版無)

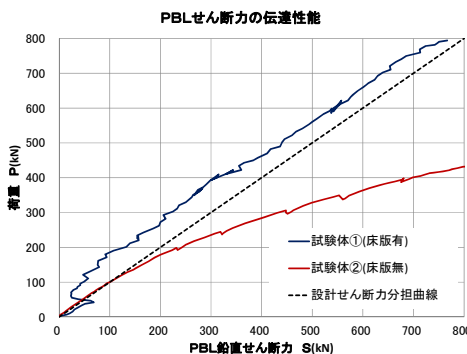
写真-10 試験後のクラック発生状況



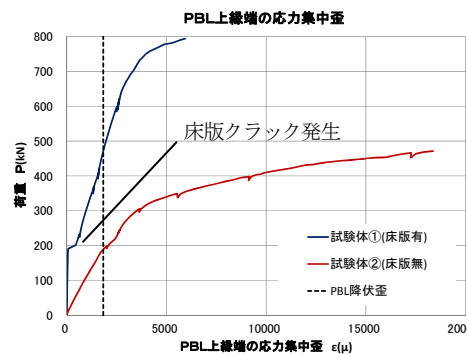
(a) 支圧上部と躯体の離間関係



(b) 離間から推定した PBL 水平せん断力関係



(c) 3 軸ゲージから推定した PBL 鉛直せん断力関係



(d) PBL 上縁端歪の応力集中状況

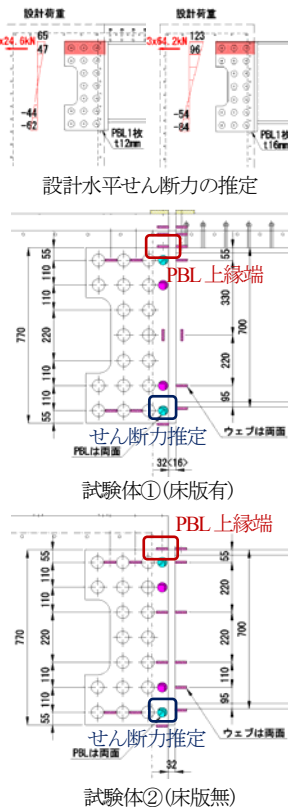


図-7 荷重漸増に対する PBL の挙動曲線

の試験体②では、橋台に埋め込まれた引張側PBLの周囲に放射状のクラックが発生しており、PBLからコンクリートへ押し抜きせん断力が作用していることがわかる。従ってPBLの埋め込み長さを決定する際は、コンクリートの押し抜きせん断破壊に対する安全性を考慮して決定する必要がある。クラック発生状況の比較より、床版がある場合は、床版鉄筋が主要な引張側の荷重抵抗に寄与し、床版が無い場合は、PBLが主たる引張側の荷重抵抗に寄与していることがわかる。

(3) PBLの力学的挙動

荷重漸増に対するPBLの力学的挙動を図-7に示す。床版下の上部支圧板と躯体の離間関係を示した図-7(a)を確認すると、床版無しの試験体②では、初期荷重段階より離間が始まるのに対し、床版有りの試験体①では離間が発生せず、約200kNの荷重に達し床版にひび割れが発生する荷重段階から徐々に離間が生じる。さらに400kNの荷重時の離間量を比較すると、試験体①では0.2mm程度に対し、試験体②は2.0mmであり、床版があることで離間量が10分の1程度に抑えられることがわかる。

この離間量をPBLのズレ変位量と考え、要素実験で推定した貫通鉄筋有りのφ55孔あき鋼板ジベルのせん断力—ずれ変位関係式(1)を用いて、上段PBLの孔ジベル1個に作用する平均水平せん断力を推定した結果を図-7(b)に示す。PBLを考慮したRC断面計算より求めた上段PBLの孔ジベル1個に作用する設計水平せん断力と実験値を

比較すると、概ね一致する結果が得られた。したがって、構造実験と要素実験におけるコンクリートの拘束状態は、ほぼ同じような状態にあると考えられ、要素実験の妥当性が確認できる。また、図-7(b)に示す床版無しの試験体②に作用するPBLの孔ジベル1個に作用する設計水平せん断力は、床版有りの試験体①の約2倍以上であり、床版がある場合は、PBLの偶力に対する荷重分担が半分以下になっていると推定できる。

PBLの圧縮側に配置した3軸ゲージよりPBLに作用する鉛直方向のせん断力を推定した結果を図-7(c)に示す。この結果より、床版有りの試験体①及び床版無しの試験体②のいずれも鉛直荷重の漸増に対して、PBLが主たるせん断抵抗を示していることがわかり、PBLがせん断力の伝達に重要な役割を果たしたことが確認できる。また床版無しの試験体②が試験体①よりせん断力の負担が大きいのは、試験体①の床版がせん断力に抵抗する負担分だけ大きいと推定できる。なお、荷重が増加してゆくと鋼材が降伏し歪が増大してゆくため、せん断力の推定値も増加してゆく。

PBLの上縁端コバ面に配置した歪ゲージの挙動を図-7(d)に示す。この結果より、床版無しの試験体②では、床版有りの試験体①に比べてPBLの上縁端コバ面の歪が大きく増加している。しかしながら、いずれの試験体もPBLの降伏歪1826μに達した後もしばらくは弾性挙動を示し、降伏歪から2倍の4000μ程度の歪に達した後、降伏挙動を初めて示す。これはPBLのコバ面が局所的には

降伏するが、PBL上側の鋼材がある程度、完全降伏するまでは、PBLが偶力に対して抵抗するためと考えられる。従って、PBL上縁端コバ面の応力集中は局所的であり、PBLのずれせん断抵抗に対する影響も見られないことから、限定的なものであるといえる。

5. 結論

PBLを配置した支圧板方式の鋼ポータルラーメン橋剛結部の力学特性について、得られた結果を以下に示す。

1) 拘束度の高いコンクリート中の PBL 押し抜き試験を実施した結果、せん断耐力はせん断抵抗面積とは相関性をもつが、貫通鉄筋の有無については相関性が低くなった。これは、拘束効果の影響が高くなるほど、貫通鉄筋の拘束による影響度合いが低くなり、逆に貫通鉄筋が存在することで PBL 孔内コンクリートへの粗骨材混入量が少なくなり最大せん断耐力が低下すると考えられる。なお、拘束するコンクリートの寸法効果によるせん断耐力への影響については、今後検討する余地がある。

2) 提案構造の終局時に至るまでの破壊挙動と PBL の力学的挙動の確認を目的として構造実験を実施した結果、床版有りの試験体①では許容設計抵抗荷重の 2.5 倍以上、床版無しの試験体②では 1.7 倍以上の耐力をそれぞれ有することがわかった。また通常の鉄筋コンクリート断面と同様に鋼材降伏で耐力が決定され、剛結部前面側の断面で照査を行えばよい。最大耐力に達した後は、一時的な耐力低下は見られるが、剛結部に埋め込んだ PBL が靱性のある抵抗を示す。なお耐力低下の原因は、剛結部天端の断面観察より、床版鉄筋面に発生した水平クラックが橋台背面を貫通することで床版鉄筋の付着が切れたことが原因と推定できる。床版鉄筋と橋台鉄筋天端の配筋については、今後の検討課題である。

3) PBL の力学的挙動について確認した結果、床版がある場合は、床版下の上部支圧板と躯体の離間は抑えることができる。PBL は主としてせん断力に対して抵抗し、床版と連携して補助的に引張側偶力に対して抵抗することができる。また、PBL の上端コバ面には応力集中が見られるが、床版鉄筋が有効に作用する常時使用領域では、その影響度合いは小さい。

今回の実験は、剛結部設計において支配的となる常時の作用力を想定した耐力や静的な挙動の確認を目的として実験を行ったが、今後の課題は、予期せぬ地震力に対して冗長性が発揮されるかの確認を目的とした交番荷重による実験などを行う必要があると考えている。

参考文献

- 1) 山口,松村,川元,佐合,山田,谷：支圧板方式による鋼ポータルラーメン橋の剛結部に関する解析的検討，第 66 回年次学術講演会 CS2-007，2011.9.
- 2) 山口,川元,谷,山田,佐合：定着部の違いによる鋼ポータルラーメン橋の剛結部に関する力学的挙動について，第 67 回年次学術講演会 CS2-005，2012.9.
- 3) 土木学会：2009 年制定複合構造標準示方書，2009.12.
- 4) 橋本,中島,鈴木,小関：拘束度の高い押抜き試験に基づく孔あき鋼板ジベルの強度評価，第 66 回年次学術講演会，2011.9.
- 5) 中島,小関,橋本,鈴木,ゲン：単純な押抜き試験に基づく孔あき鋼板ジベルのせん断耐力評価，土木学会論文集 A1(構造・地震工学)Vol.68 No.2，2012.
- 6) (社)日本鋼構造協会：頭付きスタッドの押抜き試験方法(案)とスタッドに関する研究の現状，1996.11.
- 7) 橋本,小関,中島,鈴木：孔あき鋼板ジベルのせん断耐力に及ぼすコンクリートブロック寸法及び孔内骨材の影響，第 38 回関東支部技術研究発表会，2011.3.
- 8) ゲン,橋本,中島,鈴木：貫通鉄筋の効果に着目した孔あき鋼板ジベルの押抜き試験，第 67 回年次学術講演会，2012.9.

EXPERIMENTAL STUDY ON THE MECHANICAL BEHAVIOR OF PERFO-BOND RIB SHEAR CONNECTORS IN THE RIGID CONNECTION OF A STEEL-CONCRETE COMPOSITE PORTAL RIGID FRAME BRIDGE

Takao YAMADA, Yuhei KAWAMOTO, Takashi YAMAGUCHI, Kaneyoshi YAMADA, Nobuo SODA, Yoshiharu MIZUGAMI, Dai SAGO and Kazunari TANI

The rigid connections of a steel-concrete composite portal rigid frame bridge have some difficult problems to solve, such as discovery and recovery of the damage caused from the bottom of the rigid connection behind of the bridge abutment which has a back fill. Therefore, a new type of the connection detail with a bearing plate stiffened by perfo-bond rib shear connectors has been proposed by the authors. The proposed connection detail has the characteristics such as improvement of construction quality and rationalization of the rigid connection and maintenance of reliable and easy. In this study, effectiveness and applicability of the proposed rigid connection detail was examined by experimental study focusing on the mechanical behavior of it up to the ultimate limit state. As a result, it is found that the proposed connection detail using bearing plate stiffened by perfo-bond rib shear connectors has redundancy and the ultimate strength required.