論文　曲げモーメントを受けるプレキャスト・現場打ちコンクリート接合部材の力学特性

丹羽　穂高[*1]・黒田　一郎[*2]・古屋　信明[*3]・松葉　美晴[*4]

要旨：本研究では，プレキャスト(PCa)部材と現場打ちコンクリートとの間の合理的な継手構造の提案を目的とし，曲げモーメントが作用する場合を想定して検討を行ったものである。着目点は，PCa 部材の工場から現場への輸送性や現場における施工性を向上させるため，継手部での鉄筋軸力を確実に伝達することを条件に，PCa 部材からの鋼材突出長さをできるだけ短くすることに置いた。静的曲げ載荷実験を中心とした検討の結果，ループ状の鉄筋を用いる継手構造や，鋼板や高力ボルトを用いた継手構造によって，優れた耐荷性能，変形性能を発揮させる可能性があることを明らかにした。

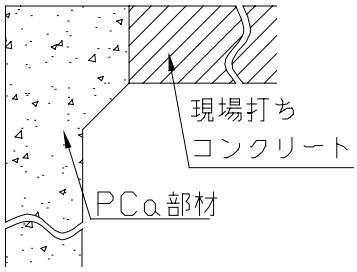
キーワード：プレキャスト，継手構造，静的曲げ載荷実験，耐力，変形性能

1.　はじめに

ボックスカルバート等の断面の大型化に伴い，その陸上輸送の便から，プレキャスト（以下 PCa とする）部材を分割して製作し現場にて結合する必要が生じる。現場において結合する代表的な方法の一つとして，PC 鋼材による緊張力を用いて PCa 部材同士を固定・結合する方法があげられるが，地下のボックスカルバートのように現場での施工条件が厳しいケースでは PC 鋼材の緊張作業が困難となることも想定される。

そこで，設置された PCa 部材にコンクリートを現場で打ち継ぐことにより大断面の鉄筋コンクリート部材を形成するというアイデアが生まれる(**図－１**に例を示す)。その際，現場打ちコンクリート部と PCa 部の間で曲げモーメント，せん断力等の断面力が確実に伝達されなければならないが，曲げモーメントによって生じる鉄筋軸力を両者の間で確実に伝達させることはまず必須の要求である。

しかし，工場から現場までの PCa 部材の輸送工程において，従来の重ね継手のような PCa 部材からの鋼材突出長が大きな継手構造では，最大輸送可能部材寸法の上で非効率である。すなわち，PCa 部材の輸送時の寸法を出来るだけ大きくするためには，部材からの鋼材突出長ができるだけ小さく，しかも鉄筋の軸力を確実に伝達しうる継手構造の開発が必要となる。



図－１　ボックスカルバート隅角部における打継ぎ

そこで本研究では，鋼材突出長をより小さくしうる継手構造として，鉄筋のループ構造を利用した方式，高力ボルトによる接合方式，ならびに孔あき鋼板を介して鉄筋を接続する方式を提案し，これらの継手構造を用いた接合部を有する梁部材の静的曲げ載荷実験を行ない，その曲げ耐荷特性・変形特性について検討し，可能性を考察した。

ここで**図－1** に示すようなボックスカルバート隅角部では，曲げモーメントと同時に作用す

*1 羽田コンクリート工業（株）　技術部技術課　(正会員)
*2 防衛大学校助教授　建設環境工学科　工博　(正会員)
*3 防衛大学校教授　建設環境工学科　工博　(正会員)
*4 羽田コンクリート工業（株）　開発グループ

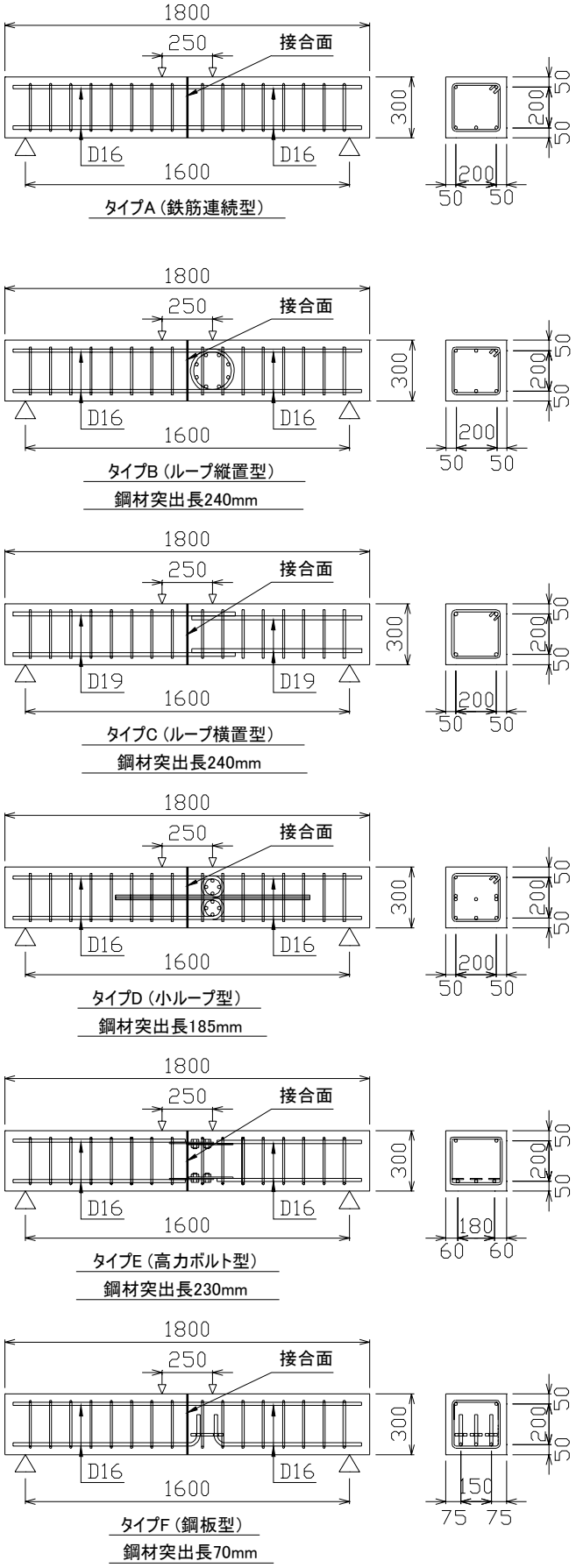
るせん断力の確実な伝達も重要であるが，本研究では曲げ耐荷特性の基礎的な把握を目的とし，継手部に曲げモーメントのみを作用させた実験を行った。

2. 実験概要

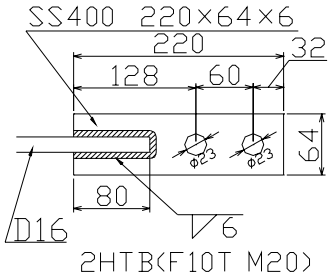
図－2に実験に用いたコンクリート梁供試体の概要図を示す。供試体は，PCa 部材と現場打ちコンクリート部の接合面を模するために，まず， PCa 部材として梁スパン左半分のコンクリートを打設し，24 時間後に残る右半分のコンクリートを現場打ち部として打設することによって，スパン中央に接合面を設けている。タイプ B～F 供試体では，PCa 部材側(図中の左半分)から現場打ち側(右半分)に向かって，鉄筋がそれぞれの必要長だけ突出している。

これらの内，タイプ B～D 供試体はループ状の鉄筋を用いた継手構造である。タイプ B 供試体(ループ縦置型)では，1 本物の鉄筋を所定のループを描くように 180°曲げることによって引張鉄筋と圧縮鉄筋を形成しており，これは PCa 床版の接合に用いられているのと同様の形式である。次のタイプ C 供試体(ループ横置型)でもループ鉄筋が用いられているが，タイプ B とは異なり，鉄筋ループを水平横置きに配することによって，圧縮鉄筋と引張鉄筋での径や配筋量が異なる場合でも対応可能とした方式である。

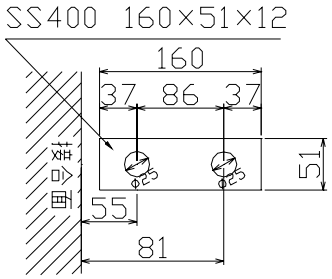
タイプ D 供試体(小ループ型)は，タイプ B と同じくループ鉄筋を縦置きしている。しかし，ループ鉄筋の曲げ半径を小さくして圧縮鉄筋と引張鉄筋が別物になっており，両鉄筋の径や配筋量が異なる場合でも対応可能な方式である。このタイプ D では，土木学会コンクリート標準示方書 [1)]の鉄筋曲げ半径の規定を満たす必要があるため，実構造においては梁の



図－2　供試体概要図



図－３タイプ E 詳細



図－４　タイプ F 詳細

有効高と鉄筋径の組合せによっては採用不可能となるケースもあるが，今回は問題がない。

ループ鉄筋を用いたこれらの継手構造では PCa 側からの鋼材突出長さは鉄筋ループの直径以上となる（具体的には**図－２**に示した）。

タイプ E および F は，PCa 部材と現場打ちコンクリート部の鉄筋を，鋼板を介して接続するようにした継手構造である。タイプ E(高力ボルト型)では，鉄筋端部にすみ肉溶接(**図－３**)した鋼板同士を高力ボルトによって接合するものであり，PCa 部材側からの鋼材突出長さは高力ボルトの数量(本実験では 2 本)とその頭部寸法によって支配される鋼板寸法によって決まり，前述のタイプ B～D のループ鉄筋を用いた継手構造に比べて短くなっている。すみ肉溶接の仕様，鋼板と高力ボルトの諸元は，鉄筋が耐えうる引張力に対して，現行の道路橋示方書鋼橋編 [2)]の諸規定に準拠して決定した。なお，このすみ肉溶接は鉄筋を配筋する前に工場で行なうことにより，現場溶接に伴う施工上の各種不具合(溶接姿勢，露天，溶接機器の配置など)を避けることが可能である。

最後の，タイプ F(鋼板型)は，タイプ E よりさらに簡易な継手構造であり，鋼板(**図－４**)にあけた孔に，端部を曲げた鉄筋を通すことによって軸力を伝えようと試みたものである。

表-1　材料諸元

コンクリート圧縮強度(PCa側)	60.6 N/mm^2
コンクリート圧縮強度(現場打側)	59.8 N/mm^2
粗骨材最大径(PCa側/現場打側)	20 mm
鉄筋規格(D16/D19/D10)	SD295
鉄筋降伏強度 D16	332 N/mm^2
鉄筋降伏強度 D19	321 N/mm^2

残るタイプ A 供試体は比較基準用供試体であり，接合面を越えて軸方向鉄筋を梁スパンの全長に渡って連続させたものである。すなわち，通常の RC 梁とこのタイプ A の違いは，スパン中央に接合面(打継面)を持っている点のみである。

図－２に示す各供試体(タイプ A～F)はすべて鉄筋量をほぼ等しく設定し（主鉄筋比 0.8%），せん断補強筋として D10 のスターラップを 100mm 間隔で配して，せん断余裕度（＝せん断で破壊する荷重÷曲げで破壊する荷重）約 2.3 の曲げ引張型の設計となっている。**表－１**に使用したコンクリートおよび鋼材の材料諸元を示す。

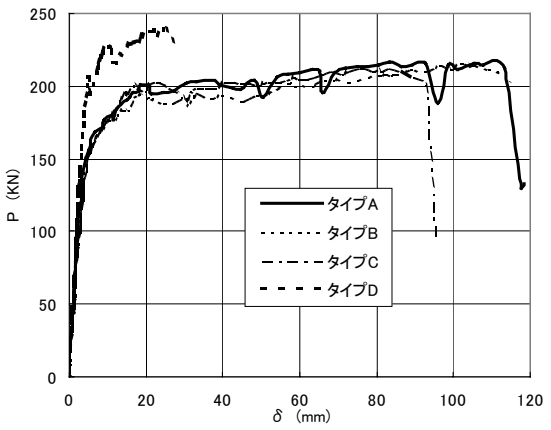
これらの梁供試体をスパン 1600mm で単純支持し，スパン中央の接合面を挟むように載荷点間隔 250mm で 2 点対称曲げ載荷の静的載荷を行った。加力は門型フレームに取り付けた油圧ジャッキ（能力 500kN）と手動油圧ポンプを用い，交番載荷ではなく単調に荷重を増加していく一方向載荷を行った。

3.　実験結果と考察

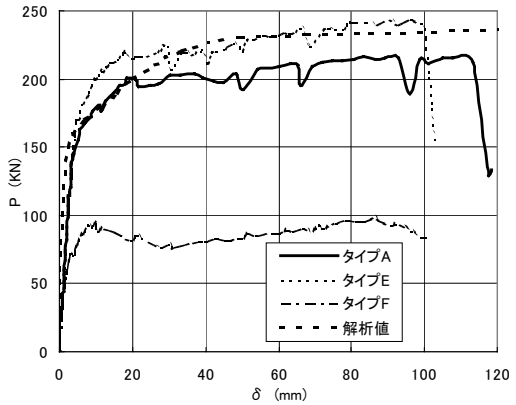
3.1　荷重－変位関係

各供試体の荷重－変位関係を**図－５(a)**および**(b)**に示す。

図－５(b)に併記する解析値はタイプ A 供試体を対象とした FEM の結果である。解析は８接点４辺形要素（要素数 108）を用い，コンクリートの応力－ひずみ関係は土木学会コンクリート標準示方書 [1)]を参考として２次曲線で近似



図－５(a)　荷重－変位関係

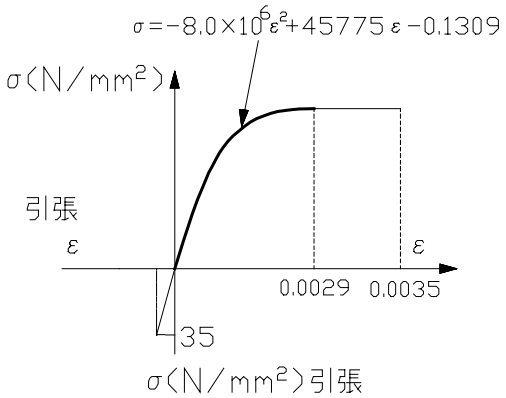


図－５(b)　荷重－変位関係

し（**図－６**），鋼材の応力－ひずみ関係は完全弾塑性を仮定した。接合面には圧縮力のみを伝達するボンドリンク要素を配することによって，接合面の不連続性を考慮した。解析値はタイプA 供試体の実験値と概ね一致しているが，変位20mm 以降ではやや大きめの値を示しており，材料特性や接合部の厳密なモデル化が必要である。

さて，鉄筋が梁全長に渡って連続したタイプA 供試体，ならびに，タイプ B(ループ縦置型)とタイプ C(ループ横置型)供試体は，ほぼ同じ荷重－変位関係をたどり，いずれも接合面付近の引張鉄筋の破断によって終局に至った。このことから,ループ鉄筋を用いることによって(ループの縦置，横置に関わらず)，連続した鉄筋と同等の曲げ耐荷性状を発揮しうることが確かめられる。

ただし，ループ鉄筋の曲げ半径を小さくした



図－６　コンクリートの応力－ひずみ関係

タイプ D 供試体(小ループ型)は変位が 20mm を超えた時点で，せん断スパンにおいて斜めひび割れが卓越し，せん断破壊に至った。**図－２**に示したように，タイプ D では，ループを形成するために折り曲げた鉄筋（計５本）が他の鉄筋に連続せずに，十分な定着長を確保すべく供試体内を水平に走っているため，接合面付近での鉄筋比が大きくなっている。この鉄筋群は，曲げひび割れが進んだ終局状態では中立軸の上昇により剛性に寄与することになるため，梁が支点付近でのせん断破壊を生じることになったと考えられる。このことからループ鉄筋を用いた継手構造では，タイプ B，C のように軸方向鉄筋間でループを形成することが，耐荷性能上有利であると結論できる。

なお，ループ鉄筋を用いたタイプ B，C，D 供試体は，**図－２**に示すようにループ中に直交する補強鉄筋を挿入している（タイプ B，C，D 供試体いずれも D16 を８本)。これらの補強鉄筋を持たない供試体についても実験を行ったが，ほぼ同じ耐荷・変形性能を示した（詳細は紙面の都合上省略)。ループ直径が余り大きくないという本実験の範囲ではループ内の補強鉄筋の影響は認められなかったのであるが，梁の有効高さが増加してループが大きくなる場合の補強の必要性やその効果などは今後の課題としたい。

次に，鋼板を介して鉄筋軸力を伝えることを目指したタイプ E および F 供試体を，タイプ A 供試体と比較する(**図－５(b)**)。すみ肉溶接と高

力ボルトを用いたタイプＥ供試体は，タイプＡ供試体よりやや大きな耐力を示しつつほぼ同等の荷重－変位関係をたどり，引張鉄筋の破断によって終局に至った。このタイプＥでは，鉄筋端部の軸力はすみ肉溶接によって鋼板に伝わり，さらに高力ボルトを介して他の鉄筋端部の鋼板に伝達しているが，鋼道路橋の溶接や高力ボルト添接に対する規定に準拠した設計を行うことによって，十分に接合部の曲げ耐荷性能を発揮しうることがわかる。一方，施工の簡略化を目的として，折り曲げた鉄筋を孔あき鋼板の孔に通しただけのタイプＦ供試体は，タイプＡ供試体の半分以下の耐力しか発揮しなかった。この供試体では，最後まで鉄筋が破断することなく，荷重の増加とともに孔あき鋼板の孔から鉄筋が抜け出し，接合面において梁が折れ曲がることによって終局状態に至った。

次に，**図－７**に各供試体の最大耐力を示す。せん断破壊したタイプＤ供試体を除外して各供試体を比較すると，タイプＦ供試体以外はすべて同等の最大耐力を持っていることが明らかである。

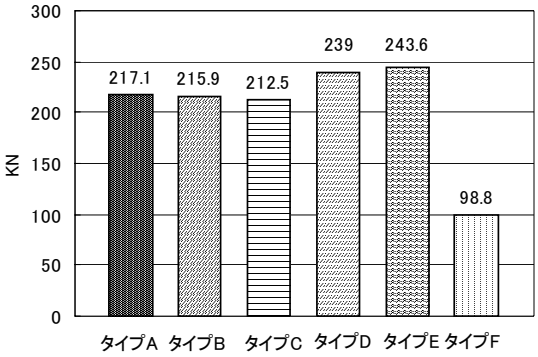
3.2　変形性能

曲げ載荷時の各供試体の変形性能を比較するために，各供試体の塑性パラメータ μ_1 および μ_2 を次に示す式(1)および(2)によって定義して算出し，**図－８(a)**および**(b)**に示す。

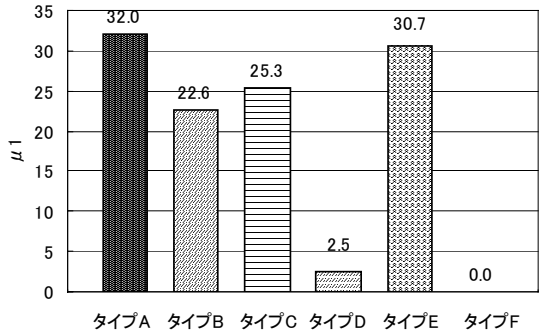
$$\mu_1=(\delta_{80}-\delta_y)/\delta_y \qquad (1)$$

$$\mu_2=(\delta_{80}-\delta_B)/\delta_B \qquad (2)$$

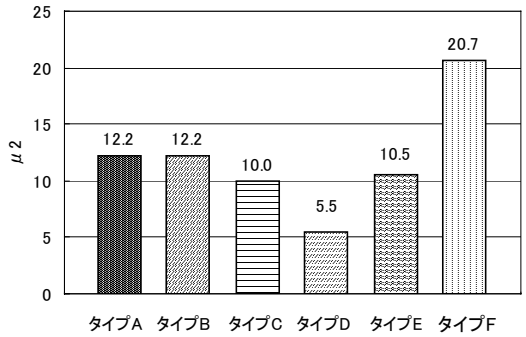
ここで，δ_y は引張鉄筋が降伏に達した時の変位，δ_{80} は荷重が最大荷重を過ぎてその 80%まで低下した時の変位，δ_B は荷重が最大荷重に達する前にその 80%になった時の変位である。前述したように，タイプＦの載荷の際には引張鉄筋は降伏せず，孔あき鋼板から鉄筋が抜け出すことによって終局状態に達した。そのため，塑性パラメータ μ_1 を示す**図－８(a)**では，タイプＦの値は示していない。塑性パラメータ μ_1 および μ_2 いずれにおいても，タイプ B，C および E は，タイプＡと同等かやや下回る程度の値を示



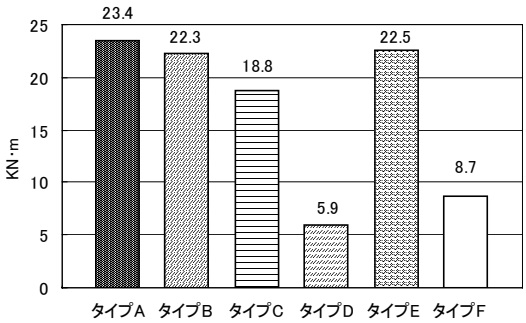
図－７　最大耐力



図－８(a)　塑性パラメータ μ_1



図－８(b)　塑性パラメータ μ_2



図－９　吸収エネルギー Ea

しており，十分大きな変形性能を示している。せん断破壊に至ったタイプDはどちらの塑性パラメータも小さな値を示しており，鉄筋が降伏に至らなかったタイプ F は塑性パラメータ μ_2 は見かけ上大きな値を示しているが,最大荷重,変形性能上は落第である。

次に，実験は交番載荷ではなく一方向載荷で行ったが，各供試体の終局に至るまでの耐荷・変形性能を評価するために，上述の式(1)，(2)で説明した δ_{80} になるまでの荷重－変位関係(**図－５(a)，(b)**)の積分値（P－δ曲線の面積）を算出して，これを**図－９**にまとめた。これによれば，前述の最大耐力，塑性パラメータともに良好なタイプ B(ループ縦置型)，C(ループ横置型)および E(高力ボルト結合)が，載荷による変形時にタイプAにほぼ匹敵する量のエネルギーを吸収しており，これらの継手構造が大きな荷重に耐えつつ粘り強く変形するという，優れた特性を持つことが明らかとなった。

3.3　接合面の開口性状

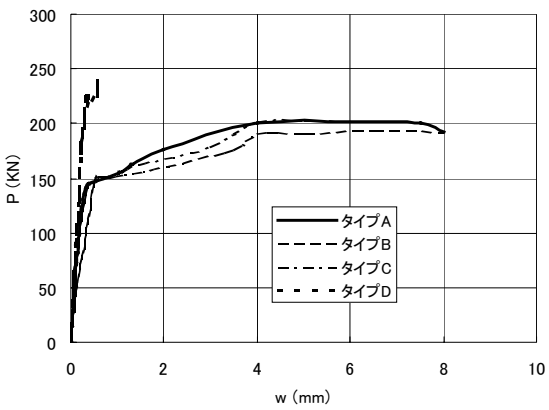
図－１０に，荷重－接合面開口幅の関係を示す。接合面開口幅はパイゲージを用いて測定した。パイゲージは引張鉄筋の高さに設置した。タイプ E 供試体(高力ボルト型)は終局に至るまで接合面がほとんど開口しなかったため**図－１０**には示していない。また，タイプ F(鋼板型)は載荷の早い段階でパイゲージを固定したかぶりコンクリートが剥落したため開口幅の測定ができなかった。**図－１０**に示したタイプ A～D 供試体を比較すると，せん断破壊したタイプ D(小ループ型)を除いてほぼ同様の性状を示していることが確認できる。

4.　まとめ

本研究では，PCa 部材と現場打ちコンクリート部の接合部に対して施工上有利な継手構造を提案し，その曲げ耐荷特性を検討した。本研究により得られた知見を以下にまとめる。

(1) ループ鉄筋を用いた継手構造，および鋼道路橋に関連した諸規定に従って設計された鋼板と高力ボルトによる継手構造では，耐荷特性，変形性状の両面で良好な性能を発揮しうる。

(2) 上述(1)の継手構造により，PCa 部材からの鋼材突出長を従来の重ね継手よりも小さく押さえた接合部の実現が可能になると期待される。その結果，PCa 工法の部材輸送時ならびに施工時の両方における経済性・施工性を向上させることが期待できる。



図－１０　荷重－開口幅関係

なお，今後の課題としては，（ａ）PCa 部材および現場打ちコンクリート部の寸法や材料諸元(例えば強度など)を変化させた体系的な検討，（ｂ）ボックスカルバートなどの実構造への適用を前提とし，せん断力や軸力も同時に作用させた条件下での検討，（ｃ）ループ補強束鉄筋の効果などが挙げられる。また，（ｄ）本実験では PCa 部と現場打ち部のコンクリート強度，材令をほぼ同一としたが，材令差による乾燥収縮等の問題を踏まえた検討も必要となる。さらに（ｅ）実際の施工では PCa 部から突出した鋼材と現場打ち部の鋼材の配置に誤差が生じることも想定されるが，その吸収方法についても今後の検討課題と考えている。

参考文献

1) 土木学会：コンクリート標準示方書構造性能照査編，土木学会，2002
2) 日本道路協会：道路橋示方書鋼橋編，日本道路協会，2002