

論文 I 型断面フレキシブル RC 橋脚の水平耐力に及ぼす横方向鉄筋の効果に関する研究

高 文君*1・大塚 久哲*2・福永 靖雄*3・川崎 啓史*4

要旨 : I 型断面フレキシブル RC 橋脚の橋軸直角方向水平耐力の評価に資する基礎的な実験として、同耐力に影響を与えるパラメータとして柱帯鉄筋間隔と壁横方向鉄筋に着目し、縮尺模型の水平単調漸増載荷実験を行った。実験では、主に各供試体のひび割れ発生状況、鉄筋・表面ひずみ、荷重変位関係を測定・観測し、横方向鉄筋の効果を考察した。また、FEM 解析結果と実験値との比較も行った。

キーワード : フレキシブル RC 橋脚, 水平耐力, 横方向鉄筋, FEM 解析

1. 序言

I 型断面フレキシブル橋脚とは、山間地の高速道路高橋脚などに用いられる、橋軸方向にフレキシブルな橋脚のことである。本橋脚の橋軸直角方向せん断耐力の評価に関し、著者らは文献 1)において、慣行のせん断耐力評価式に従えば、例えば後述の標準断面では実験値の 60% 程度しかせん断耐力を評価できないことを示し、有効 RC 断面の取り方や評価対象鉄筋に関して、改良の余地があることを指摘した。

本研究は、当該橋脚の合理的な水平耐力評価式を得るための基礎研究として、既存の I 型断面フレキシブル RC 橋脚の縮尺模型を作製して、柱帯鉄筋と壁横方向鉄筋が水平耐力に及ぼす影響について実験したものである。

2. せん断耐力実験の概要

2.1 はじめに

本実験は、I 型断面フレキシブル RC 橋脚を模擬した縮小模型供試体を作製し、橋軸直角方向に水平単調漸増載荷を行い、各供試体のひび割れ発生状況、破壊メカニズム、荷重変位曲線、鉄筋ひずみについて観察・測定した。

これらの結果から、水平耐力および靱性に影響を与えるパラメータ及び横方向鉄筋補強効果について考察する。

2.2 実験概要

2.2.1 実験ケース

本実験の供試体は、横方向鉄筋が水平耐力に及ぼす影響を確認するための、柱の帯鉄筋と壁の横方向鉄筋（壁の帯鉄筋に相当する）をパラメータとした供試体である。表－1 に実験ケースを示す。供試体 No.1 を標準断面とし、供試体 No.2 と No.3 は柱の帯鉄筋を増やした供試体、供試体 No.4 は壁の横方向鉄筋を増やした供試体、供試体 No.5 は逆に壁の横方向鉄筋を減らした供試体としている。図－1 に供試体 No.1 の配筋状況を示している。

2.2.2 供試体概要

各供試体の橋脚部の高さは 2000mm、横方向長さ（幅）は 1000mm である。壁部分の内法高さは 1800mm、内法長さは 500mm、厚さは 60mm である。両側柱の断面寸法は 200×250mm の矩形断面である（図－2 参照）。梁及びフーチングに関しては、載荷によって橋脚の壁や両側柱より先に破壊することがないように十分な配筋と断面寸法を確保している。

表－1 実験ケース

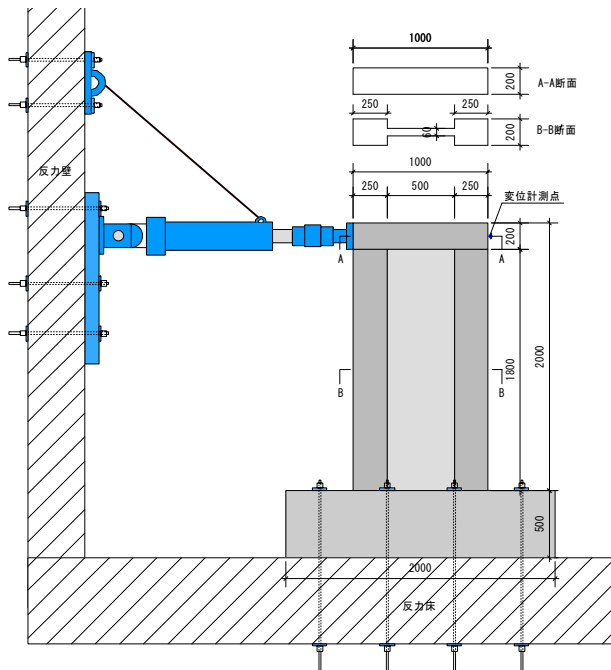
供試体 No.	鉄筋径及び配筋間隔（鉄筋比（％））				備考
	柱主鉄筋	柱帯鉄筋	壁縦方向鉄筋	壁横方向鉄筋	
1	6-D16, 2-D10 (2.67)	D6ctc120 (0.26)	5-D10 (1.19)	D13ctc120 (1.76)	標準断面
2	6-D16, 2-D10 (2.67)	D6ctc60 (0.53)	5-D10 (1.19)	D13ctc120 (1.76)	柱帯鉄筋を 2 倍
3	6-D16, 2-D10 (2.67)	D6ctc40 (0.79)	5-D10 (1.19)	D13ctc120 (1.76)	柱帯鉄筋を 3 倍
4	6-D16, 2-D10 (2.67)	D6ctc120 (0.26)	5-D10 (1.19)	D13ctc60 (3.52)	壁横鉄筋を 2 倍
5	6-D16, 2-D10 (2.67)	D6ctc120 (0.26)	5-D10 (1.19)	D10ctc120 (0.99)	壁横鉄筋を約 1/2 倍

*1 九州大学大学院 工学府建設システム工学専攻修士課程（正会員）

*2 九州大学大学院 工学研究院建設デザイン部門教授 工博（正会員）

*3 西日本高速道路（株）九州支社 保全サービス事業部 改良グループ

*4 八千代エンジニアリング（株）総合事業本部 構造・橋梁部 技術第 4 課



図－２ 荷重装置の概要と供試体寸法

頂部鉛直変位，頂部の荷重直角方向変位を，フーチングの浮き上がり等の不具合の確認を目的としてフーチングの水平変位，鉛直変位，荷重直角方向変位を測定した。鉄筋ひずみゲージは，柱主鉄筋，柱帯鉄筋，壁縦方向鉄筋，壁横方向鉄筋に貼付した。ひずみゲージは鉄筋の表裏に貼り付け，両者の計測値を平均している。また，供試体の表面状況を確認するため，引張柱，壁，圧縮柱にそれぞれコンクリート表面ゲージを貼付した。ひび割れに関しては，荷重ステップごとにひび割れ本数及び幅を記録している。

3. 実験の結果

3.1 ひび割れ状況

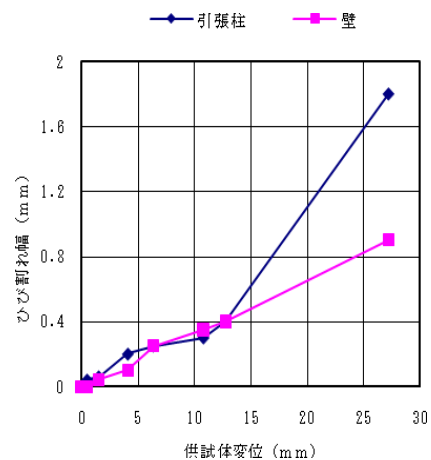
各供試体の引張柱基部，壁，圧縮柱基部のひび割れ発生荷重の比較を表－４に示す。引張柱及び壁ひび割れ幅の進展状況を，例えば供試体 No.1 に関して示すと図－３を得る。各供試体の最大耐力荷重付近のひび割れ状況は写真－１のようであり，各供試体の引張柱及び壁のひび割れ本数の増加状況は図－４のようであった。

ひび割れ本数は荷重－変位曲線の第２折点（詳細は 3.3 に記述）まで急激に増加し，以後の本数増加はほとんどない。これに対して，図－３と図－４ (a) の比較から明らかに，ひび割れ幅はひび割れ本数の増加が止まると急激に増加していく。No.3 のひび割れ本数は，No.1 や No.2 に比較して多く，これは柱帯鉄筋間隔の影響と思われる。

また，No.5 のひび割れ本数は，No.1 や No.4 と比較して多く，これは壁横方向鉄筋の直径を小さくしたことと，

表－４ 各供試体のひび割れ発生イベント時の荷重の比較

供試体 No.	各イベント時の荷重 (kN)		
	引張側柱にひび割れ発生	壁に斜めひび割れ発生	圧縮側柱にひび割れ発生
1	40	90	160
2	60	90	170
3	60	60	130
4	60	90	230
5	60	80	120



図－３ 供試体 No.1 の引張柱及び壁におけるひび割れ幅の進展状況

表－３に見られるようにコンクリート強度が小さいことが原因と思われる。

3.2 破壊状況

各供試体の破壊状況を写真－２に示す。各供試体の破壊形式には大きな差異はなく，引張側柱の水平ひび割れが壁へ伸展して斜めひび割れとなり，圧縮側柱へ進展して，柱基部の縁端部のコンクリートが剥離・欠落して，最終的には破壊音と共に柱基部がせん断破壊した。供試体 No.1 から No.4 では，最大耐力以降ある程度耐力は維持され続けたが，供試体 No.5 は壁の横方向鉄筋量が最も少なく，壁及び圧縮側柱での斜めのせん断ひび割れが顕著であり，最大耐力以降の耐力の維持が他の供試体に比較すると小さかった。

各供試体とも最後は脆性的な破壊であり，曲げ破壊とも異なる様相を示した。

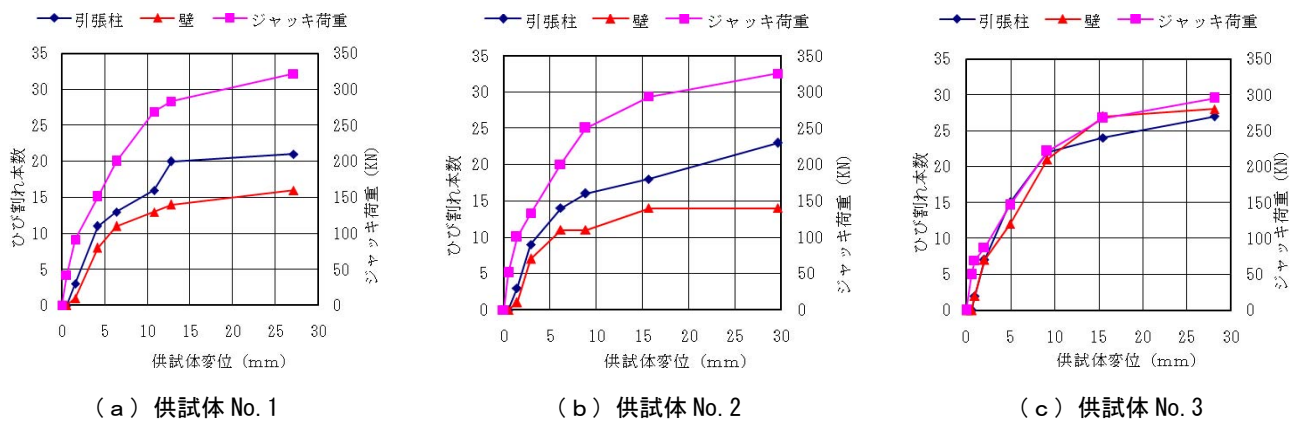
3.3 荷重－変位曲線

各供試体の荷重－変位曲線関係を図－５に示す。同図は，ひび割れ線をコンクリート表面に描画中に低下した荷重と再載荷時の荷重回復過程を削除してなめらかな線としている。荷重はジャッキ先端のロードセルにより



(a) 供試体 No. 1 (b) 供試体 No. 2 (c) 供試体 No. 3 (d) 供試体 No. 4 (e) 供試体 No. 5

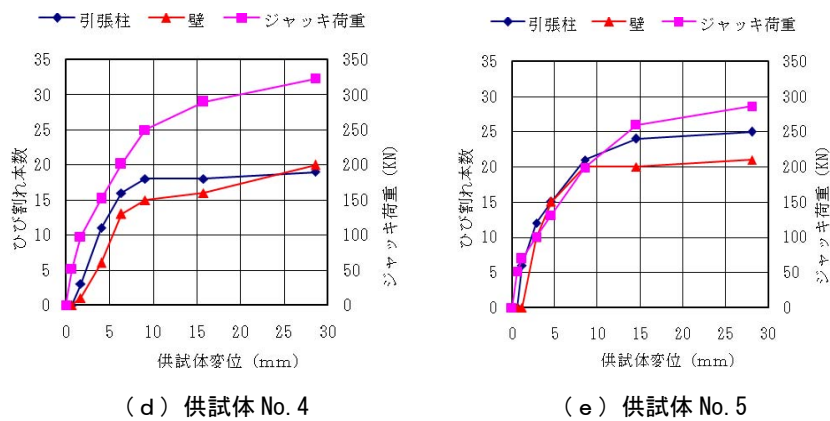
写真－１ 各供試体の最大耐力荷重付近の正面ひび割れ状況



(a) 供試体 No. 1

(b) 供試体 No. 2

(c) 供試体 No. 3



(d) 供試体 No. 4

(e) 供試体 No. 5

図－４ 各供試体の骨格曲線及びひび割れ本数の増加傾向

計測した荷重であり、変位は供試体頂部の載荷点反対側の水平変位を変位計で計測した値である。

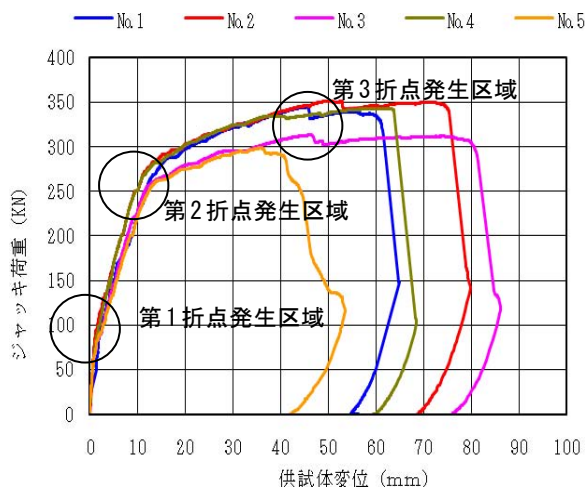
引張側の柱にひび割れが発生した後の一次剛性変化はわずかで、壁にひび割れが発生する 90kN 前後が第 1 勾配 (第 1 折点まで) となっている。第 2 勾配には、供試体により若干の差が生じながら、引張側の柱主鉄筋や壁縦方向鉄筋が降伏し始め (図－6 参照)、250kN 付近で剛性に大きな変化が生じている。ここで、観察された事象は壁横方向鉄筋の降伏である。第 2 折点の出現荷

重が、供試体 No.3, 5 と No.1, 2, 4 とで差が見られるのは、表－3 に示したように両グループでコンクリート強度が異なるからと思われる。その後、骨格曲線は第 3 次勾配となり、緩やかに荷重は増加する。

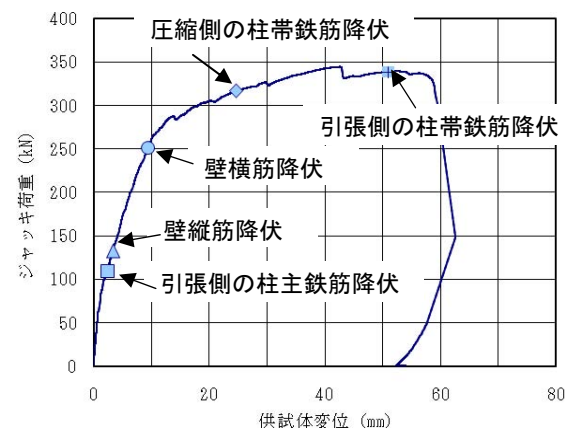
耐力を最も早く失うのは、壁の横鉄筋が少ない No.5 であり、I 型断面フレキシブル RC 橋脚の水平耐力の靱性を確保するためには、壁横方向鉄筋が重要であることが分かる。しかし、壁の横鉄筋を標準供試体 No.1 の 2 倍とした供試体 No.4 の靱性は、No.1 と比べてあまり伸びて



(a) 供試体 No. 1 (b) 供試体 No. 2 (c) 供試体 No. 3 (d) 供試体 No. 4 (e) 供試体 No. 5
写真－2 各供試体の破壊状況



図－5 各供試体の荷重－変位曲線



図－6 供試体 No. 1 の各鉄筋降伏点

ならず、横方向鉄筋の効果に上限のあることも分かる。

柱帯鉄筋を増加させた No.2 と No.3 の靱性は伸びており、柱帯鉄筋の効果のあることが知られる。柱帯鉄筋の量に関しては、No.2 は No.1 の 2 倍、No.3 は No.1 の 3 倍であり、柱帯鉄筋も壁横方向鉄筋同様に効果の上限がある結果となっている。

3.4 各鉄筋の状況

荷重－変位曲線上において各鉄筋が降伏した点を例えば供試体 No.1 に関して示せば図－6 のようである。ここで対象としている鉄筋は、引張側柱の主鉄筋、壁の縦（鉛直方向）鉄筋、壁の横（水平方向）鉄筋、圧縮側柱の帯鉄筋、引張側柱の帯鉄筋であり、各鉄筋のうち初めて降伏した点をプロットしている。他の供試体の各鉄筋の降伏もこの順序で降伏した。

ここで既往の耐力算定式との比較を行う。まず、曲げ部材としての骨格曲線を道路橋示方書耐震設計編²⁾に従って算出すれば、曲げ降伏荷重は 184kN、曲げ終局荷重

は 247kN となった。一方、供試体全断面をせん断に対して有効と考えてせん断耐力を算出すると 280kN となった。（文献 1）に示したように、コンクリートの有効断面積を壁厚×供試体全幅、帯鉄筋の有効な部材を両側の柱のみとしてせん断耐力を算出すると、210kN となり、実験値の約 60%となる。）

以上の計算値と図－6 とを比較すれば、柱間の壁の存在により供試体全体の剛性の低下は遅れること、壁横鉄筋が降伏した後に剛性の低下が現れるが、この荷重は供試体全断面を有効と考えたときのせん断耐力に対応すること、その後も荷重は伸び続け引張側柱の帯鉄筋降伏後に荷重が急激に低下すること、などが知られる。

4. 有限要素解析による実験の検討

4.1 解析モデル

コンクリート系構造を対象とした FEM 解析ソフトを利用した。コンクリートは 4 節点平面応力要素でモデル

化し、鉄筋は配置方向ごとの剛性層に置換（層状置換）させてコンクリートの平面応力要素に重ね合わせた。コンクリートの圧縮応力とひずみの関係には修正 Ahmad モデルを、コンクリートの引張応力とひずみの関係にはテンションスティフニング特性を考慮した出雲モデルを、さらにひび割れ面のせん断伝達モデルには Al-Mahaidi モデルを用いた。解析における材料特性値には表-2、3 に示す実験値を用いた。

解析では水平荷重を頂部の一節点（実験の载荷中央点に対応）に漸増载荷して、プッシュオーバー解析を行う。フーチング下面の節点の変位拘束点である。

4.2 解析結果

図-7 に FEM 解析から得られた供試体 No.1 の荷重－変位曲線を示す。実験結果と比較すると、最大変位量を除いて、解析は実験の挙動とおおむね一致しているが、解析の 2 次剛性は実験結果より若干大きく、壁横方向鉄筋の降伏（荷重 270kN 付近、変位 10mm 付近）に伴う剛性変化点の変位や最大耐力時の変位に差が生じている。実験においては、荷重 250kN 付近から橋脚とフーチングの境界にひび割れが発生し始め、鉄筋の抜け出しが生じている可能性がある。しかし、解析ではコンクリートと鉄筋は完全付着としており、鉄筋の抜け出しによる変位が考慮されておらず、これが実験値との差の 1 つの理由

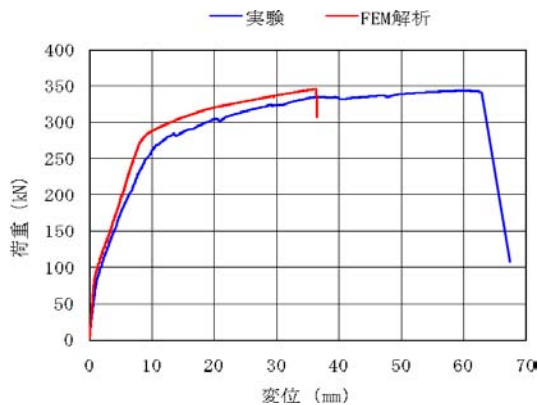


図-7 供試体 No. 1 の荷重－変位曲線

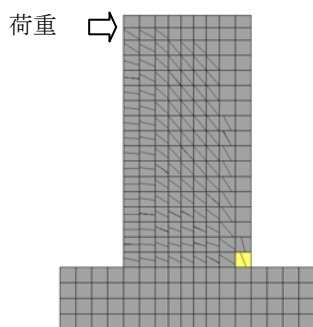


図-8 供試体 No. 1 の FEM 解析終了時のひび割れ図（格子は要素分割を示す）

と考えられる。

図-8 に供試体 No.1 の FEM 解析終了時のひび割れ図を示す。図中の黄色の要素はコンクリートが軟化した要素である。実験と解析を比較すると、各供試体ではほぼ同様なひび割れ状況となっており精度良くひび割れ状況を再現できている。実験では圧縮側柱基部のせん断破壊によって最大耐力後に急激な耐力低下が生じているが、解析では圧縮側柱基部コンクリートの軟化によって最大耐力後に急激な耐力低下が生じており、破壊形態が異なっている。

5. まとめ

I 型断面フレキシブル RC 橋脚の模型供試体に対して行った単調水平漸増载荷実験によって得られた主な知見を以下に示す。

- 1) 各供試体は、水平曲げひび割れから斜めせん断ひび割れが進展した。曲げ降伏が先行したが、明確な剛性の低下は、壁の横鉄筋が降伏した後であった。
- 2) 剛性低下後も緩やかに荷重は増加し、引張側柱の帯鉄筋降伏後に、荷重が急激に減少した。現象的には圧縮側柱基部が局部的にせん断破壊の様相を呈した。
- 2) 各供試体において、ひびわれ発生荷重、ひび割れ進展状況に大きな差は見られなかった。
- 3) ひび割れ本数及びひび割れ幅の進展傾向として、壁横方向鉄筋が降伏する第 2 折点まではひび割れ本数の増加が顕著であり、それ以降はひび割れ幅の増加が顕著となる。
- 4) 柱帯鉄筋量や壁横方向鉄筋量を増加させることによって、最大耐力はほとんど変化しない。しかし、柱帯鉄筋量の増加に伴って変形性能の改善が認められた。
- 5) 有限要素解析によって、荷重－変位曲線をおおむね推定可能であるが、終局変位の正確な評価は困難である。

謝 辞

本研究は西日本高速道路（株）と九州大学の共同研究として行った。西日本高速道路（株）の今村壮宏氏及び供試体作成にご協力頂いた株式会社富士ピー・エスに謝意を表す。また、本実験に協力いただいた九州大学技術職員山崎智彦氏及び研究室諸兄に感謝する。

参考文献

- 1) 川崎・大塚・福永・今村・山崎：耐震壁を有する門型 RC 高橋脚の水平せん断力向上に関する研究，土木学会第 65 回年次学術講演会講演概要集 V，2010.9
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書耐震設計編，2002.3