

論文 RC 部材の接合部におけるずれせん断破壊性状

野見山 佳彦*1・三木 朋広*2・二羽 淳一郎*3・西垣 義彦*4

要旨: 本研究では、接合部に貫通鉄筋およびせん断キーを有する RC 部材の静的単調 2 面せん断試験を対象として、接合部に界面要素を用いた 3 次元有限要素解析を行なった。実験は、せん断キーで破壊を生じさせるため、載荷点を接合部、支点をウェブ上面に設定した。解析結果から、ずれせん断耐力に対するスターラップの貢献分は、ハンチ筋による貢献分と比較してやや高いことがわかった。また、せん断キーは、キー自体が破壊に至るまでウェブ部と床版部の一体性を保つことを、界面要素より得られるずれ変位から確認した。
キーワード: プレキャスト, 3次元非線形有限要素解析, ずれせん断, 2面せん断試験

1. はじめに

近年、コンクリートを用いた橋梁を軽量化し、施工を省力化できる合理化構造として、上部工にプレテンション・プレキャストウェブを採用する構造が注目されている。しかし、この構造では、場所打ちコンクリートの床版部とプレテンションウェブ部間に接合部が生じる。この床版部とウェブ部の一体性を確保するため、図-1 に示すように、ウェブ部のスターラップを上床版内で定着させ、接合部の補強筋として用いている。さらに、ウェブ部に突起を設けて、上床版にせん断力を伝達させるためのせん断キーを設置している¹⁾。実施工において、ウェブ部は上床版に埋め込まれているため、構造上、ハンチ筋がウェブ部を貫通しており、ずれせん断耐力を向上させることが報告されている²⁾。すなわち、プレキャストウェブと場所打ちコンクリート間の接合部では、せん断力の伝達機構が複雑であり、この接合部におけるずれ挙動を評価することが困難である。そのため、スターラップ、ハンチ筋およびせん断キーをパラメーターとした RC 部材接合部のずれ挙動を把握し、ずれせん断耐力に対するそれぞれの貢献分を評価することが必要となる。特に、上床版に埋設されたウェブ部の破壊性状を把握するためには、非線形有限要素解析を用いた検討が有効であると考えられる。

本研究では、実構造物における貫通鉄筋およびせん断キーのずれせん断破壊性状を把握することを目的とし、様々な接合方法を有する供試体を用いた静的単調 2 面せん断試験を実施した。さらに、その実験を対象として、3 次元非線形有限要素解析を行なった。そして、接合部をモデル化した界面要素のずれ変形から、ずれせん断破壊性状の検討を行なった。対象とした実験は、A シリーズおよび、B シリーズに分かれており、供試体寸法および載

荷方法が異なっている。A シリーズを対象とした解析では、実験結果から解析結果の妥当性を検討した。また、B シリーズを対象とした解析では、実構造物と同等の貫通鉄筋およびせん断キーのずれせん断破壊性状を把握し、検討を行なった。

2. 解析概要

2.1 解析対象

図-2 は、解析対象とした供試体の概要図である。供試体は、打継面で目粗しを施したウェブ部を床版部に埋め込んだ接合部を有する RC 部材である。表-1 に供試体概要を示す。ここで示す接合面鉄筋比は、各接合面ごとに算出した値であり、実構造物と同等の値である。A シリーズでは、接合方法として、コンクリートの付着のみの供試体、異形鉄筋 D10 を貫通鉄筋（スターラップおよびハンチ筋）として用いた供試体に分かれている。B シリーズでは、異形鉄筋 D13 を貫通鉄筋として用いた供試体、スターラップとせん断キーを組み合わせた供試体で構成されている。A および B シリーズともに、ウェブ部が供試体底部から 50 mm の位置で床版部の内部に設置されており、床版部

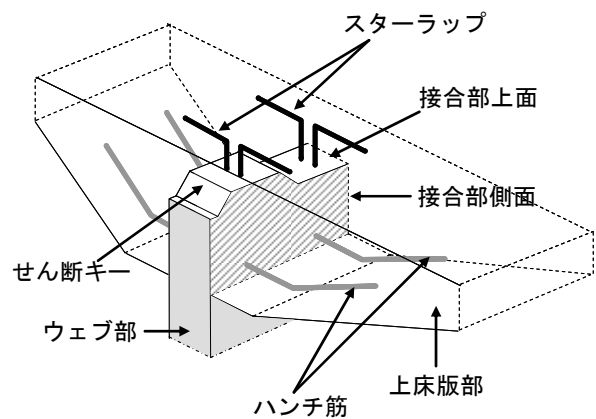


図-1 プレテンションウェブ橋断面図

*1 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (正会員)

*2 神戸大学大学院 工学研究科市民工学専攻准教授 博士 (工学) (正会員)

*3 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻教授 工博 (正会員)

*4 (株)ピーエス三菱 技術本部土木技術部長 (正会員)

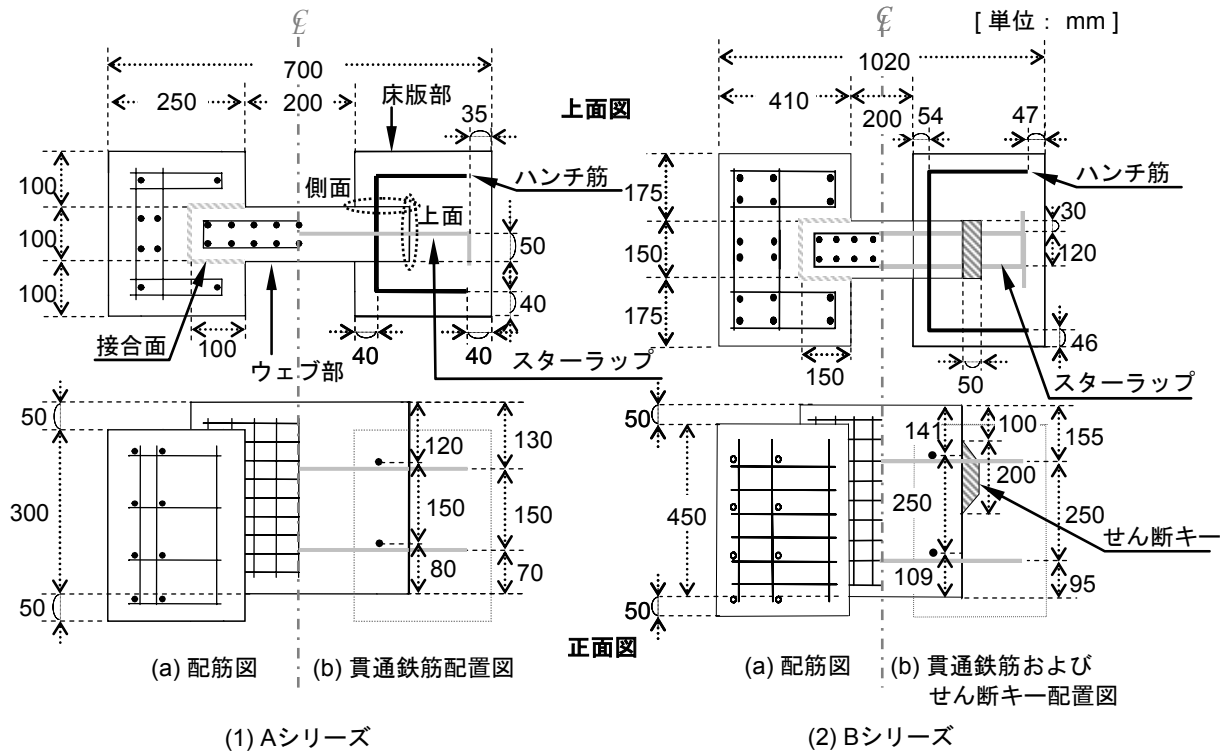


図-2 供試体概要図

表-1 供試体概要

供試体名称	接合方法	接合面鉄筋比(%)	
		上面	側面
A	A-N 付着のみ	—	—
	A-S スターラップ	0.45	—
	A-H ハンチ筋	—	0.45
	A-S+H スターラップ+ハンチ筋	0.45	0.45
B	B-S スターラップ	0.75	—
	B-H ハンチ筋	—	0.37
	B-S+H スターラップ+ハンチ筋	0.75	0.37
	B-S+UK スターラップ+せん断キー	0.75	—

において供試体を支持していることになる。図-3 に荷重方法を示す。A シリーズおよび B シリーズは、荷重方法が異なる。B シリーズでは、せん断キーで破壊を生じさせるため、支点位置を変更し、ウェブ端部に支点の中心を合わせた。支点は可動支点とし、さらに水平方向の拘束を除去することを目的として、テフロンシートを設置した。図-4 に変位計設置状況を示す。変位計 I は、床版部に固定されており、直接、ウェブ部と床版部のずれ変位（以下、直接ずれ変位）を計測するものである。変位計 II は、ウェブ部上面と床版部のずれ変位（以下、上面ずれ変位）を計測するものである。このとき、床版部に固定した変位計にワイヤの一端をつなぎ、ワイヤと床版部の接触を小さくす

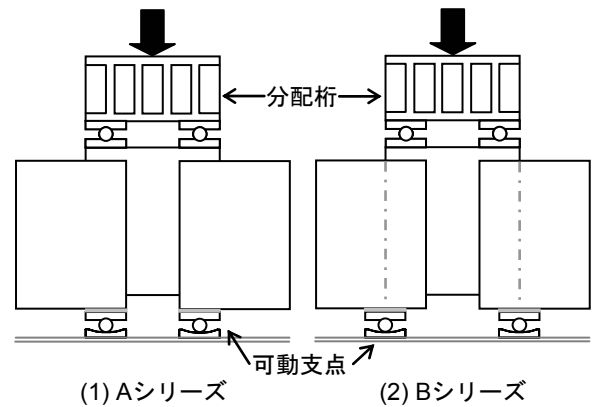


図-3 荷重方法

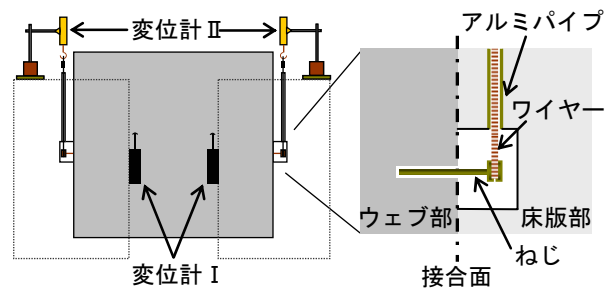


図-4 変位計設置状況

るためにアルミパイプを通してウェブ部にそのもう一端をつなぐことで、上面ずれ変位を直接計測することを試みた。A シリーズでは変位計 I および II を用い、B シリーズでは変位計 I のみを用いた。

2.2 解析モデル

本研究では、汎用有限要素解析プログラム DIANA を

用いて 3 次元非線形有限要素解析を行った。図-5 に要素分割図を示す。なお、解析対象である供試体の対称性を考慮し、供試体の 1/4 を解析することとした。A シリーズと B シリーズの要素寸法はほぼ同等とした。また、図-5(b)に示すように、せん断キーについても実際の形状を再現した。コンクリート要素は 8 節点アイソパラメトリックソリッド要素を用い、鉄筋には 2 節点埋込み鉄筋要素を用いた。また、厚さ 1 mm の界面要素をウェブ-床版間（接合部のずれを考慮）、載荷板-供試体間および支承板-供試体間の 3 箇所を用いた。

解析において、荷重は変位制御で行い、支点の水平方向の拘束はないものとした。求解法として線形剛性収束法を用い、繰返し計算におけるひずみエネルギーの総和の変化量が、そのステップの 1 回目の収束計算時の値の 0.1 % 以下となった際に収束と判定した。

2.3 材料モデル

(1) ひび割れモデル

コンクリートのひび割れは、固定ひび割れモデルで表現し、ひび割れ後のせん断剛性低減係数 β を 0.005 とした。

(2) コンクリートモデル

表-2 に用いたコンクリートの材料特性を示す。コンクリートの構成則として圧縮側には、Thorenfeldt モデルを用いた。引張側には、Hordijk モデルを用いた。引張破壊エネルギー G_F は、ウェブ部を 0.15 N/mm、床版部を 0.10 N/mm とした。平均ひずみは、ひび割れ幅を平均要素幅 h_{cr} (=25 mm) で除することで算出した。

(3) 3 軸応力下の破壊基準

コンクリートの 3 軸応力状態を考慮するために、破壊基準として圧縮側には Drucker-Prager モデル、引張側には Rankine モデルを採用した (図-6)。

(4) 鉄筋モデル

表-3 に用いた貫通鉄筋の材料特性を示す。鉄筋とコンクリートは、完全に付着すると仮定した。構成則には、降伏強度 f_y に達するまでヤング係数 E_s の弾性挙動を示した後に、剛性を $0.01E_s$ とするバイリニアモデルを採用した。

(5) 界面要素の構成則

界面要素は、直方向 n とせん断方向 t に抵抗するばね状モデルである (図-7)。構成則は、応力-変位関係で表される。直方向は引張側、圧縮側ともに剛性 D_n とし、引張強度到達以後は破壊エネルギー G_F を考慮した軟化モデルを用いた。せん断方向は、剛性 D_t でせん断強度 f_s に到達後、床版部とウェブ部間の打継面が 3 次的に拘束されていることを考慮し、軟化を伴って剛性が 0 となるモデルを用いた。また、Coulomb の摩擦モデルを用いて、粘着力 $c=f_s$ 、内部摩擦角 $\phi=30^\circ$ とした (図-8)。また、鉄筋が貫通する位置の界面要素には、鉄筋の材料

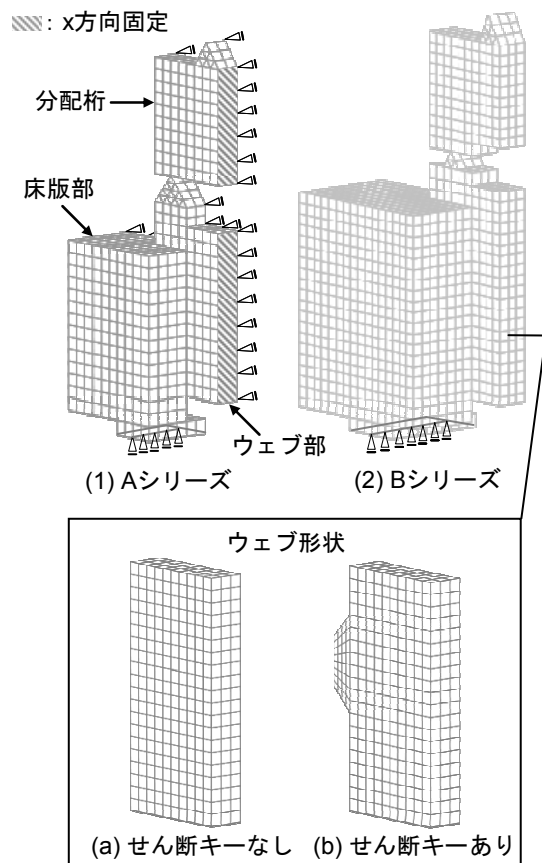


図-5 要素分割図

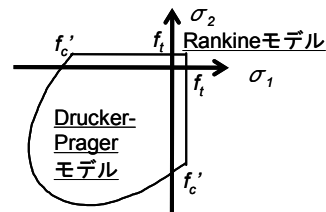


図-6 破壊基準

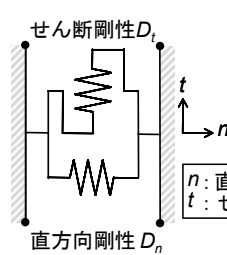


図-7 界面要素

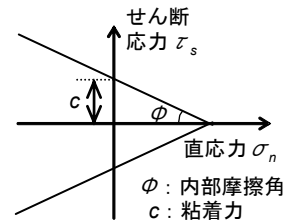


図-8 摩擦モデル

特性を累加した要素を適用した。表-4 に用いた界面要素の材料特性を示す。 D_n は、床版部のコンクリートのヤング係数を界面の厚さ (1 mm) で除したものとした。引張強度および圧縮強度は既往の研究³⁾を参考に、ウェブ部より圧縮強度の低い床版部のコンクリート強度のそれぞれ 0.7 倍とした。せん断剛性 D_t とせん断強度 f_s について、A シリーズでは A-N 供試体の初期剛性を D_t 、荷重の最大値 (以下、 P_{max}) を接合面全面積で除した値を f_s

とした。B シリーズでは、既往の研究⁴⁾における寸法、コンクリートおよび貫通鉄筋の材料特性が同等の供試体から算出された値を D_c および f_c として採用した。また、軟化曲線は、A-N 供試体のポストピーク挙動を良好に予測できるような曲線を設定した。

3. 実験結果と解析結果の比較

3.1 A シリーズ

図-9 に、A シリーズの実験および解析から得られた荷重-直接ずれ変位関係を示す。供試体の破壊形態は、実験および解析ともにすべての供試体においてずれせん断破壊を示した。図-9 に示すように、解析結果は、 P_{max} にやや差異が見られるものの、初期剛性および P_{max} 後の挙動を概ね良好に予測できたと考えられる。貫通鉄筋を有する供試体 (A-S, A-H, A-S+H) の P_{max} を過小評価した原因として、貫通鉄筋の接合部拘束による、接合部のせん断強度向上効果を過小評価したことが考えられる。石原ら⁵⁾は、接合部に垂直方向の拘束力が、目粗しを行なったコンクリート接合部のせん断伝達メカニズムに大きな影響を与え、せん断強度を向上させることを報告している。本研究の解析モデルでは、内部摩擦角により、接合部垂直方向の圧縮力によるせん断強度の向

上を表現した。しかし、実際に供試体に発生したと考えられる拘束効果に対応したせん断強度の向上は、再現できなかった。各種検討を行った結果、このような単純なモデルでは再現できない挙動であると考えられる。

図-10 に、A-H 供試体の荷重-上面ずれ変位関係に関して、実験結果および解析結果を示す。図-9(3)および図-10 を比較すると、荷重-直接ずれ変位関係と荷重-上面ずれ変位関係の剛性に差異があることが確認できる。つまり、上面より側面が先行してずれていると考えられる。この現象は、他の供試体についても同様のことが確認できた。また、解析結果から得られる荷重-直接ずれ変位および上面ずれ変位関係についても、同様に剛性の差異が確認できた。ここで、解析を通して得た上面ずれ変位は、実験において上面ずれ変位を計測した位置と同位置である上面の中心部における界面要素のウェブ側節点の y 方向変位と隣り合う床版側節点の y 方向変位の差として算出している。この結果から、界面要素から得られる接合部内のずれ挙動は、妥当であることが確認できた。

3.2 B シリーズ

(1) 荷重-直接ずれ変位関係の比較

図-11 に、B シリーズの実験および解析から得られた荷重-直接ずれ変位関係を示す。供試体の破壊形態は、

表-2 コンクリートの材料特性

供試体名称	ウェブ部			床版部			
	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	
A シリーズ	A-N	71.8	4.5	34.7	57.6	3.5	33.4
	A-S	70.1	4.0	30.5	50.0	3.6	32.7
	A-H	67.2	4.3	35.2	56.8	3.5	32.8
	A-S+H	65.3	4.3	35.2	56.8	3.5	32.8
B シリーズ	54.9	3.7	31.7	44.7	3.4	27.8	

表-3 貫通鉄筋の材料特性

シリーズ	鉄筋名称	降伏強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
A	D10 SD345	370	185.1
B	D13 SD345	380	183.9

表-4 界面要素の材料特性

シリーズ	引張強度 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	引張破壊エネルギー (N/mm)	せん断強度 (N/mm ²)	せん断剛性 (N/mm ³)
A	床版部強度の0.7倍 ³⁾	0.10	1.7	60	
B	床版部強度の0.7倍 ³⁾	0.10	2.5	450	

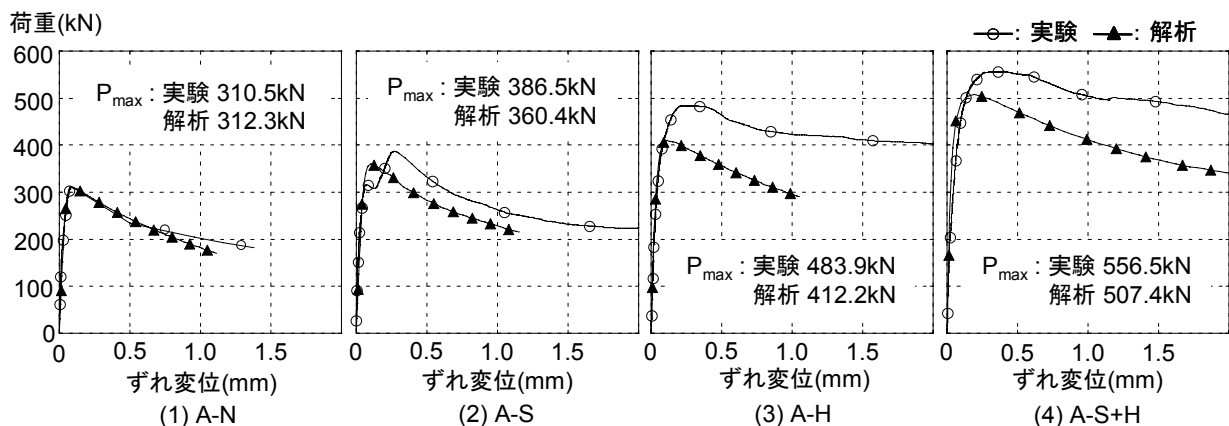


図-9 荷重-直接ずれ変位関係に関する実験値と解析値の比較 (ただし、縦軸は同一)

実験および解析ともにすべての供試体においていずれせん断破壊を示した。図-11 に示すように、解析結果は、A シリーズの解析結果と同様に、 P_{max} にやや差異が見られるものの、初期剛性および P_{max} 後の挙動を概ね良好に予測できたと考えられる。

B-S および B-H を比較すると、いずれせん断耐力に対する貢献分は、スターラップを用いた供試体 (B-S) がやや高いことがわかった。また、B-S+UK と B-S における P_{max} の差は、いずれせん断耐力に対するせん断キーの貢献分と考えられる。そこで、実験および解析を比較すると、実験で 353 kN、解析で 374 kN とほぼ等しく、せん断キーの貢献分を良好に予測できることがわかった。

(2) 貫通鉄筋のみの供試体の接合部挙動

図-12 に B-S, B-H および B-S+H の界面要素から得られた接合部上面および側面のずれ変位と荷重の関係を示す。ここで解析を通して得られた側面ずれ変位は、側面の中心部における界面要素のウェブ側節点の y 方向変位と隣り合う床版側節点の y 方向変位の差として算出した。図-12 に示すように、接合部は弾性挙動 (①) を示した後、上面および側面はほぼ同時にずれ始める (②)。その後、スターラップを有する B-S および B-S+H 供試体については、上面の変位が伸びず、耐力の上昇 (③) が見られるが、B-H 供試体については耐力の上昇が見られ

ない (④)。図-13 に図-12 で示した B-S および B-H の①~④における界面要素の変形状況を示す。図-13 に示すように、ずれ開始後、B-S および B-H の変形に違いが見られた。これは、支点をウェブ上面に合わせているので、ハンチ筋を配置しても、上面を中心にずれが進行してしまうためである。この結果、B-H は、耐力が増加しなかったと考えられる。実験において、B-H は、脆性的な破壊を生じた。実験は、荷重制御で行っているため、上面を中心としたずれが急激に発生し、脆性的な破壊に至ったと考えられる。ここで、A シリーズおよび B シリーズのずれ変位を比較する。A シリーズでは、上面と側

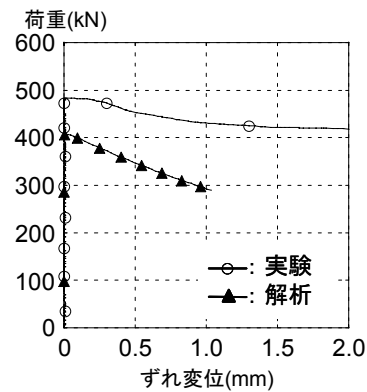


図-10 荷重—上面ずれ変位関係

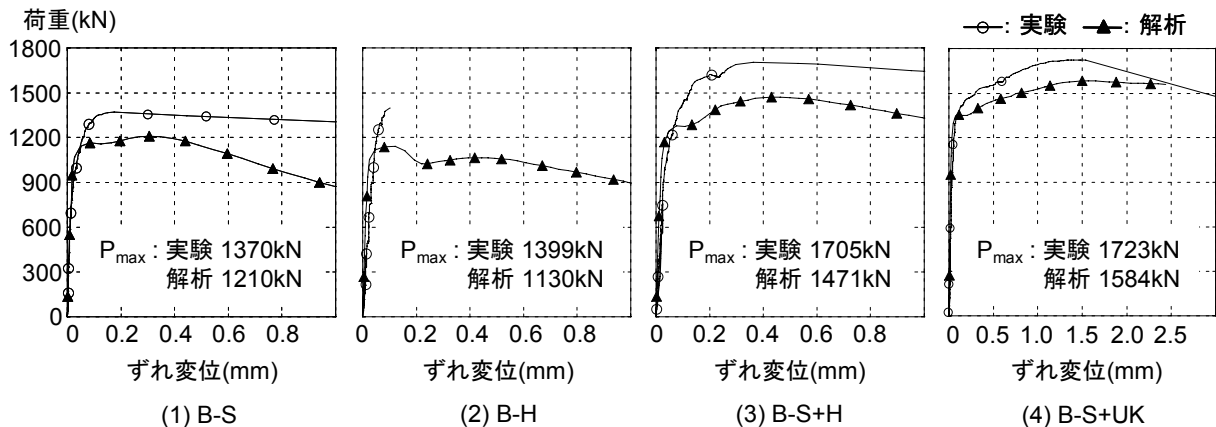


図-11 荷重—直接ずれ変位関係に関する実験値と解析値の比較 (ただし、縦軸は同一)

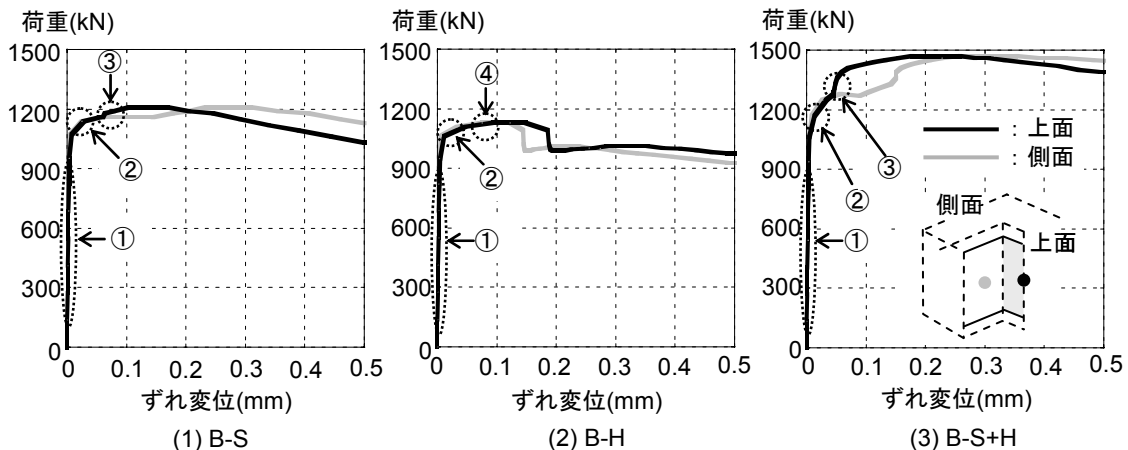


図-12 荷重—上面および側面ずれ変位関係 (貫通鉄筋のみの有する供試体)

面のずれ変位に差異が見られるもの、Bシリーズでは、上面と側面のずれ変位の差異が見られない。つまり、載荷方法の違いにより、接合部のずれ挙動に差異が生じる考えられる。

(3) せん断キーを有する供試体の接合部挙動

図-14は、B-S+UKの界面要素から得られる接合部のずれ変位と荷重の関係を示す。ここで、上面ずれ変位はせん断キーの下部の界面要素のウェブ側節点のy方向変位と隣り合う床版側節点のy方向変位の差として算出した。図-14に示すように、せん断キーを配置すると、接合部のずれ開始後(①)、上面の変形はあまり増加せず(②)、側面の変形のみ増加した(③)。つまり、上面はせん断キーにより、ウェブ部と床版部の一体性が保たれていることが確認できる。その後、 P_{max} (④)に達するとともに上面の変形は増加した。図-15にせん断キーのひび割れ図を示す。ひび割れ図は、主引張ひずみの矢線図を90度回転させたもので、図-14の①、②、④でのひび割れ状況を示している。実験でのひび割れ図も合わせて示す。図-15(1)に示すように、ずれ開始後(①)ではひび割れがあまり見られず、その後せん断キーの上下からひび割れが進展し、終局時(④)にはせん断キー全体にひび割れが進展していることが確認できる。また、 P_{max} までのせん断キー周辺の床版部に生じる圧縮応力は、最大でも21 N/mm²程度であったため、床版部の圧壊ではなく、せん断キーに生じたひび割れの開口によって耐力が決定されたと考えられる。図-15(2)に示すように、実験でも同様のひび割れが確認できたことから、解析はせん断キーを有する供試体の破壊性状を良好に予測できていると考えられる。

4.まとめ

本研究で得られた結論を以下に示す。

- (1) 界面要素から得られた接合部の荷重-ずれ変位関係は、実験結果を良好に予測できることを確認した。
- (2) 載荷点を接合部、支点をウェブ上面に設定した解析結果から、ハンチ筋よりスターラップの方が、ずれせん断耐力に対する貢献分が、やや高いことがわかった。
- (3) せん断キーを配置すると、せん断キーが破壊に至るまで、ウェブ部と床版部の一体性を保つことを界面要素のずれ変位から確認した。

参考文献

- 1) プレストレストコンクリート技術協会：プレテンションウェブ橋設計施工ガイドライン(案)，2004.11
- 2) 雨宮美子ほか：上床版コンクリートとプレテンションウェブ間のずれせん断耐力に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.3，

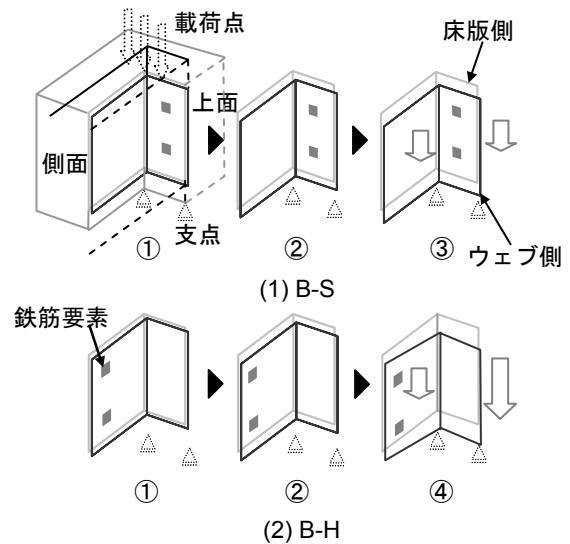


図-13 界面要素変形状況

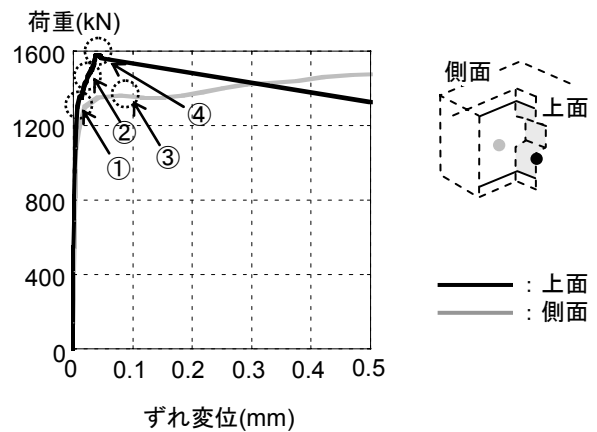


図-14 荷重-上面および側面ずれ変位関係 (B-S+UK)

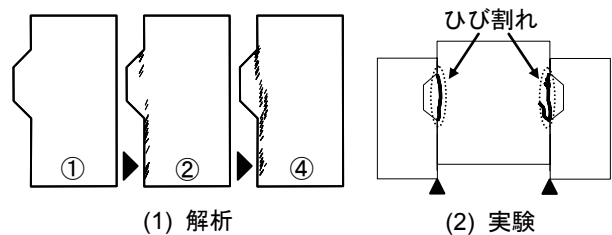


図-15 ひび割れ図

pp.505-510, 2007.7

- 3) 石原利江子ほか：下面に打継面を有するプレキャスト部材の打継面せん断実験，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.17，No.2，pp.189-194，1995
- 4) 野見山佳彦ほか：3次元有限要素解析による接合部を有するRC部材のずれせん断挙動の評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.3，pp.499-504，2007.7
- 5) 石原誠一郎ほか：コンクリート打継ぎ部のせん断伝達機構に関する実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道)，C-2，構造IV，pp.755-756，1998