

論文 形状の異なる打継ぎ面を有する鉄筋コンクリート部材の非線形解析

喜多 俊介^{*1}・三木 朋広^{*2}・松尾 真紀^{*3}・二羽 淳一郎^{*4}

要旨: PC 橋梁の軽量化手法として, ウェブ部材にプレキャストプレテンション部材を用いることが検討されている。その場合, フランジ部の現場打設コンクリートとプレテンション部材間で打継ぎ面が生じることになる。本研究では, 打継ぎ面を有する RC 部材間の接合方法を3通りに変化させた静的単調2面せん断試験をモデルとして, 非線形有限要素解析を行い, 打継ぎ面の形状が及ぼす影響について解析的に把握することを試みた。解析は打継ぎ面に界面要素を配置してモデル化し, 2次元及び3次元の非線形解析を行った。

キーワード: 打継ぎ面, 非線形有限要素解析, 2面せん断試験

1. はじめに

コンクリートはその耐久性, 強度により多くの土木構造物に利用されている。一方でコンクリート構造物は鋼構造に比べ断面が大きくなるため, コンクリートの自重が構造物の形状に大きく影響を及ぼす。近年の構造物の長大化に伴い構造物全体の軽量化が求められている。PC 橋梁においては, 軽量化手法として波形鋼板ウェブ PC 橋のようにウェブ部分を改良することが挙げられる。

波形鋼板ウェブのようにウェブ部分を鋼部材に置換する手法がある一方で, コンクリート部材を改良する手法として, プレテンションウェブ橋梁が挙げられる。プレテンションウェブ橋

梁とは図-1 に示すようにウェブ部をプレキャストプレテンション部材に置換することによってウェブ厚を縮小し, その結果, 橋梁全体として軽量化を図る手法である。しかし, プレテンションウェブ橋梁では, プレテンション部材と現場打ちコンクリート部材間で打継ぎ面が生じ, この打継ぎ面における力学的挙動を知ることが必要となる。また, 打継ぎ面の形状により, 耐力及び挙動が変化すると考えられ, 合理的な接合方法を知ることが必要である。

本研究では, 打継ぎ面を有する RC 部材の, 接合面の形状を, 打継ぎ面の無いタイプ (一体型タイプ), 鉛直の打継ぎ面を有するタイプ (突合せ接合タイプ), キーを設け機械的にせん断抵抗力を向上させたタイプ (キー接合タイプ) の3通りにモデル化した供試体を対象とした静的単調2面せん断試験について, 非線形 FEM 解析を行った。そして, 打継ぎ面の形状が及ぼす影響について解析的に把握することを試みた。

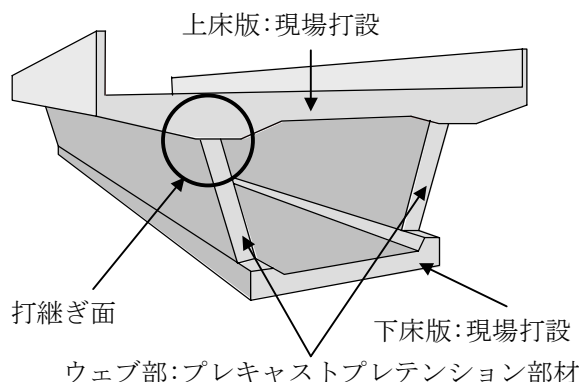


図-1 プレテンションウェブ橋梁の概念図

2. 解析モデル

2.1 非線形有限要素解析

本研究では, 3次元有限要素解析プログラム DIANA を用い, 3次元及び2次元の非線形 FEM

*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 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 工修 (正会員)

*3 東京工業大学大学院助手 理工学研究科土木工学専攻 工修 (正会員)

*4 東京工業大学大学院教授 理工学研究科土木工学専攻 工博 (正会員)

解析を行った。キー接合タイプにおいては、接合が3次元になるため3次元解析のみを行った。解析モデルは対称性を考慮し、2次元解析では1/2モデル、3次元解析では1/4モデルで行った。コンクリート要素として2次元解析では、8節点アイソパラメトリック四辺形要素、3次元では20節点アイソパラメトリック直方体要素を用い、鉄筋には2節点埋込み鉄筋要素を用いた。RC部材同士の接合面には界面要素¹⁾を用い、局所的に弱い領域を設けた。

2.2 材料モデル

(1) RC部材間の界面要素の構成則

界面要素は厚さ5mmのばね状のモデルとし、引張とせん断にのみに抵抗するとした(図-2)。構成則は応力-変位関係で表される(式(1))。

$$\begin{Bmatrix} \sigma_n \\ \sigma_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} D_n & 0 \\ 0 & D_t \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta u_n \\ \Delta u_t \end{Bmatrix} \quad (1)$$

ここで、 σ_n : 引張応力 (N/mm^2)、 σ_t : せん断応力 (N/mm^2)、 D_n : 引張剛性 (N/mm^3)、 D_t : せん断剛性 (N/mm^3)、 Δu_n : 引張変位 (mm)、 Δu_t : せん断変位 (mm) である。目荒しを行った打継ぎ面の強度は、部材コンクリート強度の0.7倍程度であるとされている²⁾。今回の実験では、突合せ接合タイプにおいては打継ぎ面の全体に目荒しを行い、キー接合においては供試体正面及び、背面の打継ぎ面には処理を行わなかった。目荒しを行わなかった打継ぎ面では強度を0.5倍として解析を行った。引張剛性は部材コンクリートと同等とし、せん断剛性は実験結果³⁾より算出した。また、引張強度到達後は完全に応力伝達しないとした ($\sigma_n = \sigma_t = 0$)。

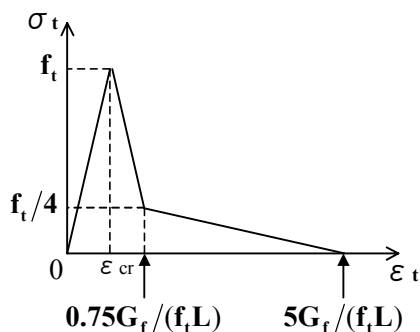


図-4 1/4モデル

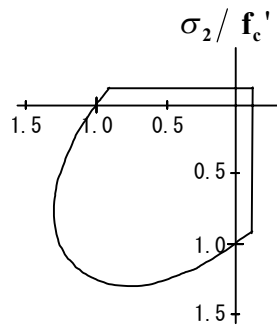


図-5 降伏曲面

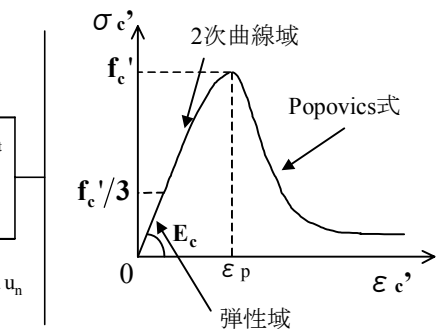


図-3 圧縮モデル

(2) コンクリートの圧縮応力下の構成則

圧縮力を受けるコンクリートは圧縮強度の1/3までは弾性体とし、その点からピークまでは2次曲線で結び、ポストピーク域にはPopovics式⁴⁾(式(2))を使用した(図-3)。ここで、 f_c' : 圧縮強度 (N/mm^2)、 ε_0 : ピークひずみ ($=2000\mu$)、 n_c は式(3)で与えられる。

$$\sigma_c' = \left[\frac{n_c \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)}{n_c - 1 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^{n_c}} \right] f_c' \quad (2)$$

$$n_c = 1 + 0.57(f_c' / 9.8) \quad (3)$$

(3) コンクリートの引張応力下の構成則

引張力を受けるコンクリートには1/4モデル(図-4)を用いた。ひび割れには分布ひび割れモデルを使用した。ここで、コンクリートの破壊エネルギー G_F は、 0.1N/mm とした。

(4) コンクリートの2軸応力下の破壊基準

コンクリートの2軸応力状態を考慮するために、コンクリートの2軸破壊基準として圧縮側はDrucker-Pragerモデル、引張側にはRankineモデルを用いた(図-5)。

(5) 鉄筋

鉄筋には降伏強度に達するまで初期剛性 E_s

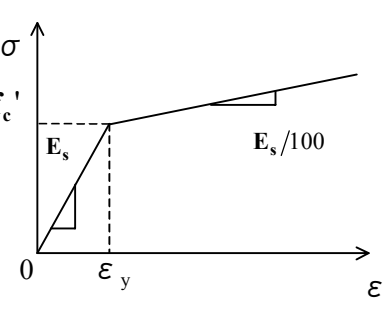


図-6 鉄筋モデル

の弾性挙動をとり、それ以降は E_s の 1/100 の剛性で直線的に応力が増加するバイリニアモデル（図-6）を用いた。

(6) 載荷板、支承板

載荷板、支承板は線形弾性体とし、弾性係数は 1000GPa とした。

3. 実験及び解析概要

3.1 実験概要

図-7 に供試体の概要図を示す。キー接合タイプにおいては実構造物に適用することを想定し、ウェブ部の一部をフランジ内に埋め込ませる形態とし、突合せタイプにおいては、接合面の位置として最も不利と考えられる、ウェブ・フランジ間に接合面を設けた。また、キー接合タイプのみ鉛直方向鉄筋の配置が異なるため、図-7 の上面図、平面図において左側に一体型タイプ、突合せタイプを、右側にキー接合タイプの概要図を示す。打継ぎ面を有するタイプについてはプレキャスト部材を想定するため、先ずウェブ部の打設を行い、1 週間の養生後、現場打設を想定したフランジ部を打設した。ウェブ部の打設時において、打継ぎ面となる箇所に凝結遅延剤を塗布し、脱型後に打継ぎ表面の目荒らしを行った。載荷はウェブ打設の 2 週間後とし、ウェブ部は養生期間が 2 週間、フランジ部は 1 週間とした。全ての鉄筋に SD295A を用い、ずれ止め筋として D13 を 5 段配置した。ずれ止め筋量は「道路橋示方書・同解説」に規定された実現可能な最大量とした。主鉄筋比はウェブ部で 1.4%、フランジ部で 0.47% である。載荷は静的単調 4 点載荷で行い、支点部分はともに可動支点とし水平方向の拘束を取り除いた。

3.2 解析概要

図-8 に要素分割図を示す。3 次元解析においてはフランジ部の奥行き方向に 3 層の要素を配置している。解析は変位制御で行った。求解法として constant stiffness 法を用い、収束判定は不釣り合い力エネルギーの総和と外力エネルギーの和の比が 1.0×10^{-4} 以下で収束とした。解析に用

いた諸物性を表-1~3 に示す。

4 実験及び解析結果

4.1 実験と解析の比較

図-9 に実験及び解析により得られた荷重－載荷点変位曲線を示す。ここで、実験における載荷点変位は支点変位と載荷点変位との差によって定めた。実験において、一体型タイプとキー接合タイプでは耐力にほとんど違いが見られ

表-1 コンクリートの材料特性

f'_c (MPa)	f_t (MPa)	E_c (GPa)
30.0	3.0	25.0

表-2 鉄筋(SD295A)の材料特性

f_y (MPa)	E_s (GPa)
295	200

表-3 打継ぎ面の材料特性

	f_n (MPa)	D_n (N/mm ³)	D_t (N/mm ³)
目荒し	2.1	5000	16.6
処理なし	1.5		

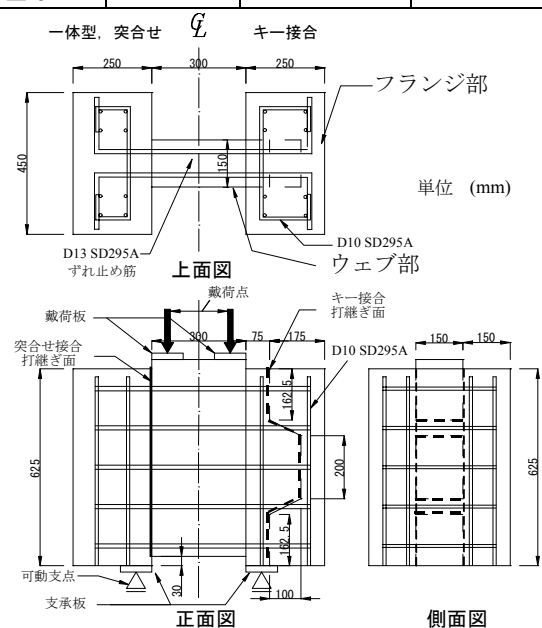


図-7 供試体概要図

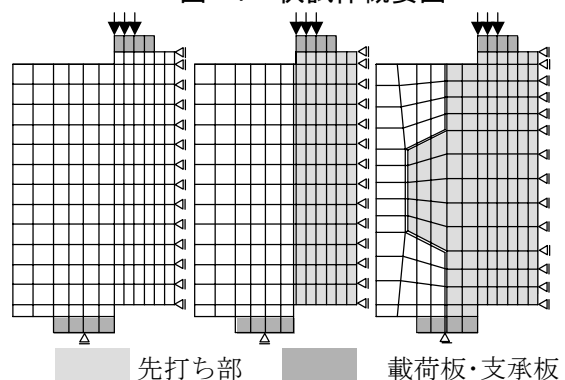
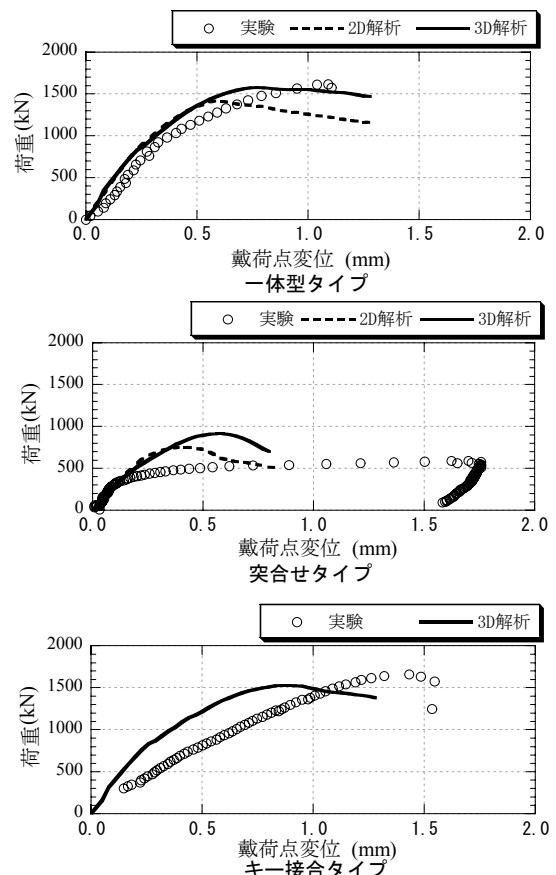


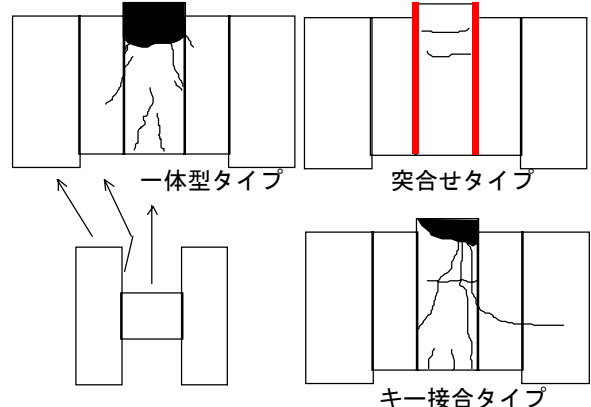
図-8 要素分割図

なかった。変形を比較するとキー接合タイプの方が大きいという結果が得られた。解析においては、一体型タイプとキー接合タイプにおいて、ほぼ同等の耐力が得られた。しかし、共に実験に比べ変形量が小さい結果となった。特に、キー接合タイプにおいてはその変形量の差が大きく出ている。破壊形状としては、一体型タイプとキー接合タイプは、実験、解析ともに載荷点直下のコンクリートの圧壊によって終局状態を迎えている。突合せ接合タイプでは、ウェーブフランジ間に生じたずれにより変形のみが増大し終局にいたる結果となったそのため、実験の荷重－変位曲線は 500kN 程度で、ほぼ横ばいの傾向となった。解析においてはその傾向は見られず、鉄筋降伏と同時にピークを迎え、その後軟化するという結果となった。実験では終局状態において接合面以外のコンクリート部材が健全であったため、耐力は接合面の強度のみに依存すると考えられるが、解析においてはウェブ部分にもひび割れを生じていることから、接合面だけでなく、ウェブ部も耐荷機構に大きく影響したと考えられる。そのため、突合せ接合タイプにおいては解析と実験で挙動が大きく異なると考えられる。図－10 に実験の終局状態におけるひび割れ性状を示す。実験において、一体型タイプでは初期段階に供試体中央下端より曲げひび割れが確認できた。その後、ウェブ中段より斜めひび割れが発生し、載荷点方向に進展した。終局状態においては、せん断ひび割れがフランジ側にも生じているのが確認できる。突合せ接合タイプの実験では、接合面に沿って大きなひび割れが生じ、曲げひび割れ、斜めひび割れは確認できなかった。キー接合タイプは、一体型タイプと同様に、初期に曲げひび割れが生じ、その後斜めひび割れが生じる結果となった。一体型と異なる点として、一体型タイプは斜めひび割れがウェーブフランジ接合部のウェブ側全体にわたり発生しているのに対し、キー接合タイプでは比較的下方から発生したひび割れが大きく進展し、載荷点付近まで達するとい

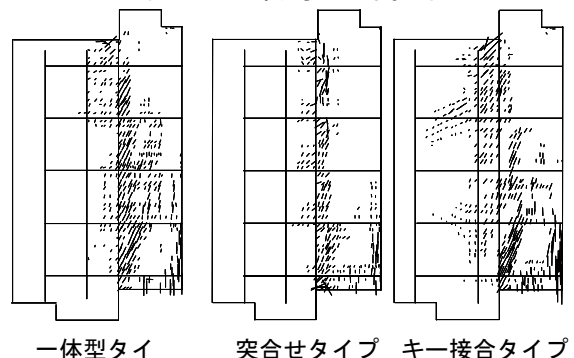
った結果が得られた。解析によって得られた最大荷重時のひび割れ図を図－11 に示す。一体型タイプでは曲げひび割れがウェブ中央下端より



図－9 荷重－変位関係



図－10 終局ひび割れ図



図－11 ひび割れ図

発生し、接合部全体にわたり斜めひび割れが発生している。突合せ接合タイプにおいては、曲げひび割れは生じているものの、接合部付近にひび割れが集中して発生していることが分かる。キー接合タイプでは、一体型タイプと同様にウェブ中央部に曲げひび割れが発生し、ウェーブフランジ下端より大きな斜めひび割れが発生している。また、載荷点直下の隅角部においても大きなひび割れが生じ、キー形状に沿ってひび割れが生じていることが分かる。以上のように、ひび割れ形状は実験に近い結果となったと言える。図-12に解析から得られたウェーブフランジ間におけるずれ止め鉄筋ひずみ分布を示す（図中の高さはフランジ部底面よりの高さ、 P_{max} は各ケースの最大荷重）。これによると、荷重レベルが低い状態では、下段の鉄筋ひずみが大きい傾向にあり、曲げが生じていることが分かる。突合せ接合タイプにおいては、最大荷重時において、上部の鉄筋ひずみも増大している。このことは、突合せ接合タイプのひび割れ図において接合面上部に大きなひび割れが生じていることと一致する。実験においては、ずれ止め筋が、最大荷重時で降伏まで達していなかった。解析においては下端のずれ止め筋が降伏に達している。このことから、せん断面におけるずれ止め筋の効果が実験と解析で異なり、そのことが耐力の違いに現れたと考えられる。荷重レベルが上がるにつれて一体型タイプにおいては、斜めひび割れがウェーブフランジ面の全体から発生していることにより、上部の鉄筋ひずみも増大する結果になった。

4.2 主応力分布

図-13に解析によって得られた最大荷重時の圧縮主応力分布を濃淡で示す。一体型タイプ、キー接合タイプにおいては、載荷点直下の隅角部に応力が集中しているのが分かる。その2つのタイプに関して、ウェブ側の応力分布は同じ傾向であるといえる。しかし、フランジ側においては、一体型タイプがフランジ全体に緩やかに分布しているのに対し、キー接合タイプで、

先打ち部に応力集中している。また、鉄筋上部においても応力集中が見られる。先ほど示したひび割れ図（図-11）においても、一体型タイプでは、フランジ全体に応力が分布することにより、ウェーブフランジ接合部全体に斜めひび割れが発生する結果となったが、キー形状タイプでは、先打ち部に応力集中していることから、

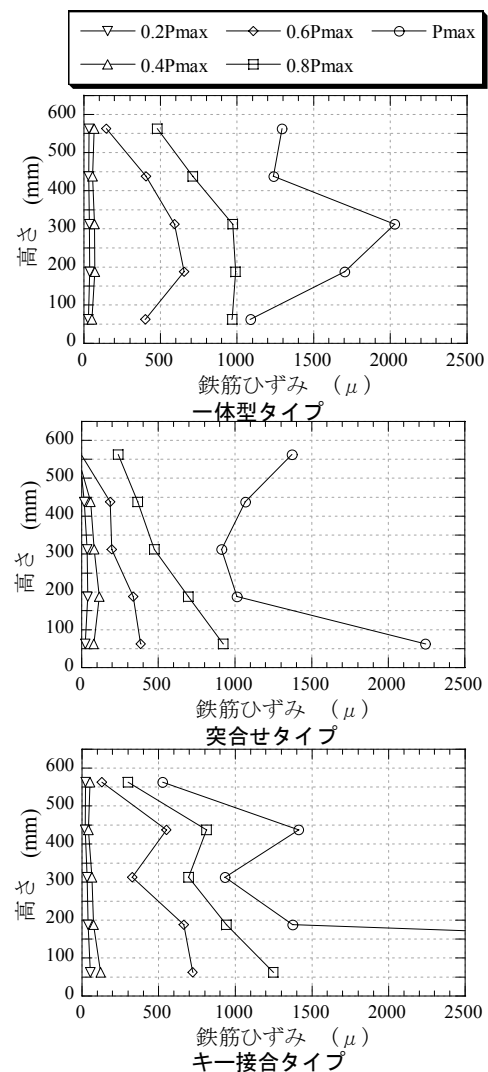


図-12 ずれ止め鉄筋ひずみ

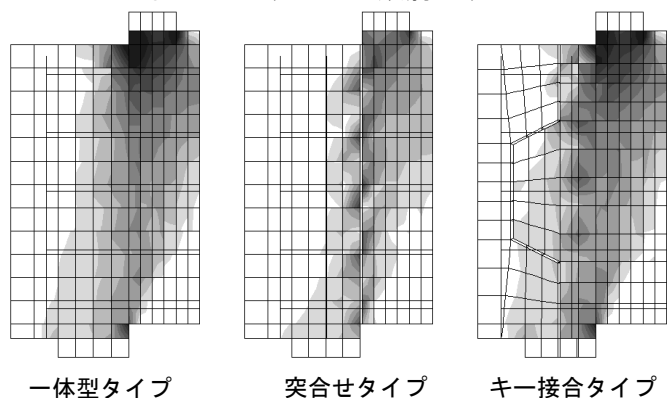


図-13 主応力分布

狭い領域に応力が流れ、ひび割れが局所的に発達するといった結果につながったと考えられる。実験におけるひび割れ性状も同様の傾向にあるため、実験においても同様の応力分布であったと考えられる。

4.3 変形

図-14 に解析による最大荷重時における供試体の変形図を示す。ここで、点線は変形前のモデル形状を示す。これによると、3つのタイプ全てにおいて、曲げによる影響によって支承付近が水平方向に変形をしている。また、一体型タイプ、キー接合タイプの載荷点直下及び、ウェブ下端において要素が大きく変形しているのに対し、突合せ接合タイプにおいてはウェブ要素に大きな変形は見られない。図-15 に突合せ接合タイプ及びキー接合タイプについて、最大荷重時における、モデル全体の鉛直方向変位に対する界面要素におけるせん断方向のずれの割合を示す（図中の太線部はずれ止め筋の位置を示す）。これによると、突合せ接合タイプにおいては、変形が界面要素に集中して起こっていることが分かる。一方、キー接合タイプにおいては、接合面上部において15%程度の変形となっているが、他の部分では変形が集中していない

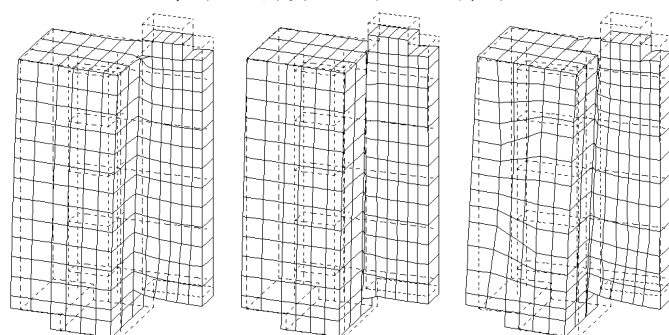


図-14 供試体変形図

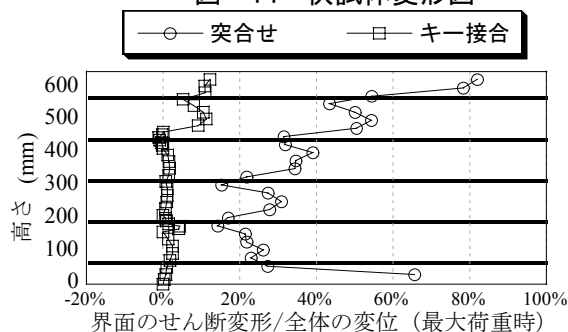


図-15 ずれ止め鉄筋位置の界面要素のせん断変形

いことが分かる。その結果、キー接合タイプは、一体型と同様の変形性状になったと考えられる。また、ずれ止め筋位置で界面要素のせん断変形が減少していることがわかる

5. まとめ

本研究で得られた結論を次にまとめる。

- (1) 2次元及び3次元非線形 FEM 解析により、一体型タイプ及びキー接合タイプの実験と同様の荷重-変位傾向を示すことができた。しかし、突合せ接合タイプでは、実験の耐力機構を表現することができなかった。
- (2) 一体型タイプ、及びキー接合タイプにおいて、3次元解析によって、実験と同様のひび割れ性状を予測することができた。
- (3) 主圧縮応力分布を求めることで、一体型タイプ、キー接合タイプの圧縮力の流れを確認することができ、実験におけるひび割れ性状の違いを説明することができた。また、突合せタイプにおいて、ずれ止め筋の影響が顕著に現れることが確認できた。

謝辞 本研究は、PC 技術協会プレテンションウェブ橋梁研究委員会の研究の一環として行われたものである。関係者各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：コンクリートの破壊特性の試験方法に関する調査研究委員会報告書，pp369-372，2001.5
- 2) 村田二郎，長瀧重義，菊川浩治共著：土木材料コンクリート第3版，共立出版，1983
- 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.189-194，1995.6
- 4) 谷川恭雄，畑中重光：応力下降域における各種コンクリートの応力度-ひずみ度曲線の表示式，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.107-108，1979.9