

# 論文 プレキャストコンクリート構造のせん断伝達メカニズムとスターラップによる補強効果の解析的検討

大野 又稔\*1・中田 裕喜\*2・渡辺 健\*3・田所 敏弥\*2

**要旨:** 鉄筋コンクリート部材を軸方向に配置し、部材間に無収縮モルタル等を打込みして一体化したプレキャストコンクリート構造は、接合部におけるひび割れや接合面のずれ等に起因して、一体打ちの部材よりも耐力が低下する可能性がある。二次元有限要素解析により、プレキャストコンクリート構造のせん断伝達メカニズムに即したモデル化を行い、接合部のスターラップによって、一体打ちの梁と同等以上の耐力となる補強効果を解析的に検討した。接合部位置で軸方向鉄筋が負担するせん断力に応じて、接合部のスターラップを太径化または接合面に近接化することで、一体打ちの梁と同等以上の耐力となることを確認した。

**キーワード:** プレキャストコンクリート構造, 接合部, せん断伝達, 非線形有限要素解析

## 1. はじめに

コンクリート構造物の施工性向上にも寄与する手法として、プレキャスト鉄筋コンクリート部材(以下、PCaRC部材)の適用が挙げられる<sup>1)</sup>。図-1(b)のように、複数のPCaRC部材を軸方向に配置し、無収縮モルタル等をPCaRC部材間に打込みすることで一体化した梁部材では、荷重により接合面のひび割れと軸方向鉄筋に沿ったひび割れが生じて荷重が低下する可能性がある<sup>2)</sup>。有限要素解析により耐力を評価する際には、接合部(接合の影響範囲)におけるせん断力の伝達メカニズムに即したモデル化が必要となる。接合部のせん断力の伝達メカニズムの種類として、圧縮応力に比例して生じる摩擦、ひび割れ開口時に骨材の噛みあい等で生じるせん断摩擦、軸方向鉄筋のダウエル効果、シアキーが挙げられる<sup>1)</sup>。確実にせん断力を伝達するための接合部の補強として、スターラップを配置し、ダウエル効果で生じる軸方向鉄筋に沿ったひび割れを抑制する補強方法が考えられるが、メカニズムに即した配筋方法には至っていない。

本論文では、接合部のスターラップによる補強効果を評価することを目的とした。具体的には、既往のPCaRC

部材を軸方向に一体化した梁の荷重実験<sup>2)</sup>を対象に、二次元非線形有限要素解析によるPCaRC構造の接合部のモデル化を行った。そして、接合部のせん断伝達メカニズムや接合部に配置したスターラップによる補強効果を評価した。なお、本研究では、PCaRC構造の接合部における、摩擦、せん断摩擦、ダウエル効果に着目しており、軸方向鉄筋は継手を介して連続であること、接合面はシアキーを有しておらず平滑であることを前提とした。

## 2. 解析モデルの選定

### 2.1 対象実験の概要

図-1に、解析モデルを選定するために用いた供試体概要を示す。3つのPCaRC部材を軸方向に一体化した梁部材の4点曲げ荷重実験<sup>2)</sup>である。SB30-02は接合面を有さない一体打ちされた鉄筋コンクリート梁供試体である。SB30-02-20は両支点側のコンクリート(図-1(b)中のPCa(L), PCa(R))を打込みし、脱型後に接合面の配置位置に目地材を設置して支間中央のコンクリート(図-1(b)中のPCa(C))を打込みした。そして、脱型後に目地材を除去して無収縮モルタルを注入し、接合面を形成し

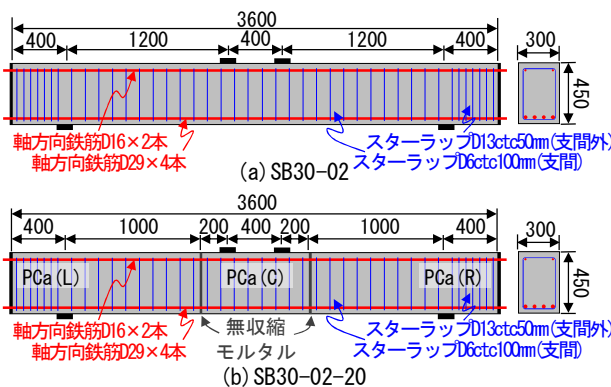


図-1 対象実験の供試体概要

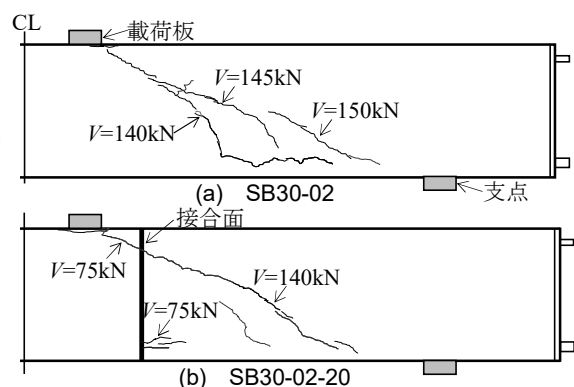


図-2 実験供試体のひび割れ状況

\*1 公益財団法人 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造 修士 (正会員)  
 \*2 公益財団法人 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造 博士 (工学) (正会員)  
 \*3 公益財団法人 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造 博士 (学術) (正会員)

た。なお、PCaRC 部材は、目荒し処理を行わず、表面粗度の小さい目地材を用いることで平滑な端面とした。すなわち、接合部の継手や端面処理の影響を排除し、接合面の摩擦、せん断摩擦、軸方向鉄筋のダウエル効果の影響のみを実験的に評価したものである。

図-2に、実験のひび割れ状況を示す。SB30-02では、せん断力  $V=145\text{kN}$  で斜めひび割れが発生し、 $V=276\text{kN}$  で斜めひび割れが載荷点まで達した後、せん断力が低下した。SB30-02-20では、 $V=75\text{kN}$  で接合面や軸方向鉄筋に沿ったひび割れが、 $V=140\text{kN}$  で支点と接合面の間に斜めひび割れが発生した。その後、 $V=214\text{kN}$  で斜めひび割れおよび接合面から載荷点に進展するひび割れが載荷点まで到達した後、せん断力が低下した。なお、接合面のずれにより、支間中央に生じたひび割れは少ない。

## 2.2 接合面のモデル化

本研究では、二次元有限要素解析プログラムとして DIANA (Ver.10.5) を使用した。図-3 および表-1 に、SB30-02-20 の解析モデルおよび入力情報を示す。なお、材料強度は、材料試験結果を参考に、それぞれ設定した。

接合面における、摩擦およびせん断摩擦をモデル化するため、接合面位置に要素幅（奥行き）300mm のインターフェイス要素（以下、IF 要素）を設け、クーロン摩擦モデルとせん断剛性保持モデルを採用した。せん断剛性保持モデルとは、ひび割れ発生前の初期せん断剛性  $G_1$  に対し、ひび割れ発生後の開口時にはせん断剛性  $G_2$  となるモデルであり、せん断摩擦の影響を表現するものである。

クーロン摩擦モデルの摩擦角  $\phi$  を定めるために、コンクリート標準示方書<sup>3)</sup>の設計せん断伝達耐力式を参考に  $\phi=21.8^\circ$ （摩擦係数  $\mu=0.4$ ）を基本とし、感度分析として  $\phi=5.7^\circ$ （ $\mu=0.1$ ）も検討した。本研究では、特にせん断力の最大値（以下、最大せん断力）に達した時点での挙動に着目するため、クーロン摩擦モデルの粘着力  $c$  とひび割れ強度  $f_t$  を 0 とした簡略なモデルとした。 $G_1$  は、無収縮モルタルの静弾性係数試験結果および厚み 20mm から計算したせん断弾性剛性を参考に、 $400\text{N/mm}^3$  とした。PCaRC 部材の端面は十分平滑としたが、幾分の効果が考えられるため、本検討では、 $G_2$  は十分小さい  $10\text{N/mm}^3$  を基本とし、感度分析として  $400\text{N/mm}^3$  も検討した。

## 2.3 軸方向鉄筋のモデル化

ダウエル効果を表現するために、軸方向鉄筋はせん断力を考慮できるビーム要素とし、コンクリートとの付着および離散ひび割れの影響は 2 層の IF 要素で、平面保持はオーバーラップの IF 要素でモデル化した。

鉄筋は要素長 25mm のビーム要素とし、材料非線形として von Mises 基準の降伏条件を用いた。鉄筋付着の IF 要素の軸方向特性は、島らの付着モデル<sup>4)</sup>を、文献<sup>5)</sup>を参考にかぶりの影響等を考慮して 0.4 倍とした多直線モ

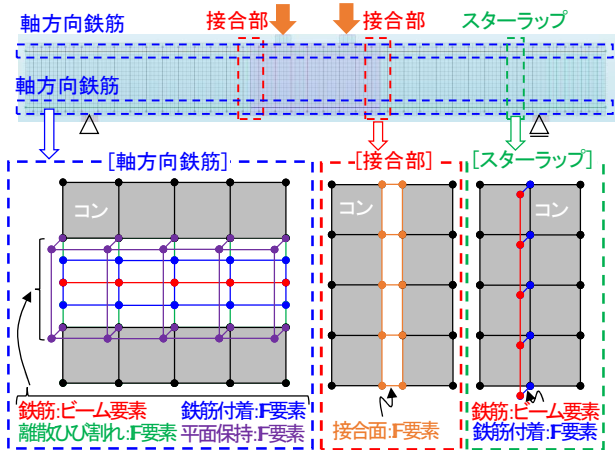


図-3 解析モデル概要 (SB30-02-20)

表-1 解析モデル入力概要 (SB30-02-20)

コンクリート	左右	中央		
ヤング係数 $E$	29.3kN/mm <sup>2</sup>	32.5kN/mm <sup>2</sup>		
ポアソン比 $\nu$	0.2	0.2		
圧縮強度 $f_c$	29.5N/mm <sup>2</sup>	31.8N/mm <sup>2</sup>		
引張強度 $f_t$	2.00N/mm <sup>2</sup>	2.07N/mm <sup>2</sup>		
最大粗骨材寸法 $G_{max}$	20mm	20mm		
要素幅	300mm	300mm		
鉄筋	軸方向引張鉄筋 D29(SD685)	軸方向圧縮鉄筋 D16(SD345)	スターラップ D13(SD345)	スターラップ D6(SD345)
ヤング係数 $E$	196kN/mm <sup>2</sup>	187kN/mm <sup>2</sup>	185kN/mm <sup>2</sup>	190kN/mm <sup>2</sup>
降伏強度 $f_y$	716N/mm <sup>2</sup>	383N/mm <sup>2</sup>	387N/mm <sup>2</sup>	439N/mm <sup>2</sup>
IF要素(接合面)	クーロン摩擦モデル		せん断剛性保持モデル	
パラメータ	$c=0\text{N/mm}^2$ $\phi=21.8^\circ, 5.1^\circ$ $f_t=0\text{N/mm}^2$		$G_1=400\text{N/mm}^3$ $G_2=10\text{N/mm}^3, 400\text{N/mm}^3$	
要素幅	300mm			
IF要素(鉄筋周囲)	鉄筋付着 (軸方向鉄筋)	離散ひび割れ	平面保持	鉄筋付着 (スターラップ)
軸方向(正負)	島モデル×04	剛(※法線 ひび割れ後ゼロ)	剛	島モデル×04
法線方向(圧縮)	剛	剛	軟	剛
法線方向(引張)	剛	[上側]1.0f [下側]0.1f-1.0f	軟	剛
要素幅	鉄筋周長 ×1/2×本数	300mm	300mm	鉄筋周長 ×本数

デルとした。軸方向鉄筋の付着の IF 要素は、鉄筋要素の上下にあるので、要素幅を鉄筋周長の半分の本数分とした。実験で下側軸方向鉄筋に沿って生じたひび割れを表現するため、離散ひび割れの IF 要素の法線方向特性は、圧縮に対しては剛、引張に対してはコンクリートの引張強度の 0.1~1.0 倍とした脆性モデルで入力することとした。これは、曲げによる引張側鉄筋の付着ひび割れの影響を考慮したものであり、下側鉄筋の離散ひび割れ強度が低くなるように設定した。ここで、接合面のずれは、接合面の  $\phi$  と軸方向鉄筋の離散ひび割れ強度に依存するため、両因子の複数の組合せで実験のずれを表現できるものと考えられる。本検討では、 $\phi$  を  $21.8^\circ$  で固定し、軸方向鉄筋の離散ひび割れ強度のみをパラメータとすることで、接合面のずれを簡易に表現することとした。また、離散ひび割れ後は鉄筋付着による拘束が生じないように、鉄筋付着と離散ひび割れを直列 2 層の IF 要素とし、離散ひび割れ後の軸方向剛性を 0 とした。なお、離散ひび割れは、要素幅を 300mm とし、引張強度のみでひび割れの発生を調整した。さらに、二次元モデルのため、軸方向鉄筋部分で重ね梁とならずに平面保持を確保する目的で、

軸方向が剛な IF 要素をオーバーラップして配置した。

## 2.4 コンクリートおよびスターラップのモデル化

コンクリートは、25mm メッシュの平面応力要素でモデル化した。圧縮側には軟化勾配を考慮した放物線曲線、引張側には Hordijk の軟化勾配を適用した引張軟化曲線、ひび割れ面でのせん断伝達には Al-Mahaidi のモデルを適用した。なお、二次元有限要素解析の既往の実績を踏まえ、ひび割れ発生に伴う強度低下、拘束効果、ポアソン変形の非線形性は考慮しないこととした。スターラップのダウエル効果は小さいとして、スターラップのビーム要素と鉄筋付着の IF 要素 1 層を、コンクリート要素にオーバーラップして配置した。スターラップの付着の IF 要素の軸方向特性も、島らの付着モデルを 0.4 倍とした多直線モデルとした。スターラップの付着はオーバーラップして配置したため、要素幅を鉄筋周長の本数分とした。

## 2.5 荷重－変位関係および最大主ひずみ分布

図-4 に、SB30-02 の実験と解析の荷重－変位関係およびたわみ 10mm 時点の最大主ひずみ分布を示す。解析は、上下の軸方向鉄筋の離散ひび割れの引張強度を、コンクリートの引張強度の 1.0, 0.5, 0.1 倍とした結果を示す。なお、ケース名は U (上側鉄筋), D (下側鉄筋) を示す。接合面がなくダウエル効果の影響が小さい SB30-02 では、上下軸方向鉄筋の離散ひび割れの引張強度の変化による最大せん断力への影響が小さい。下側鉄筋の離散ひび割れ強度が 0.1 倍のケースにおいて、部材剛性が幾分乖離しているが、いずれのケースでも実験の部材剛性、最大せん断力、ひび割れ状況を概ね表現できている。

図-5 に、SB30-02-20 の荷重－変位関係と最大主ひずみ分布を示す。解析は、基本入力値のケースと、接合面の  $\phi$ ,  $G_2$ , 下側鉄筋の離散ひび割れ強度を変化させたケースを示す。接合面を有する SB30-02-20 では、摩擦、せん断摩擦、ダウエル効果が連成して影響し、ケースごとに荷重－変位関係およびひび割れ状況が大きく異なることが分かる。図-6 に、SB30-02-20 の  $\phi$  を  $21.8^\circ$ ,  $G_2$  を  $10\text{N/mm}^2$ , 下側鉄筋の離散ひび割れ強度を  $0.1f_t$  としたケースの最大主ひずみ分布の、接合部の下側軸方向鉄筋付近の拡大図を示す。载荷により接合面にひび割れが生じ、軸方向鉄筋のダウエル効果によって軸方向鉄筋に沿ったひび割れが生じた状況を表現しており、また実験の部材剛性、最大せん断力を概ね再現できていることが分かる。

以下の検討では、荷重－変位関係の再現性に基づき、軸方向鉄筋の離散ひび割れ強度を  $0.1f_t$  としたケースを用いて、実験の結果を評価することとする。

## 3. 解析に基づく実験結果の評価

### 3.1 軸方向鉄筋のひずみおよびせん断力分布

図-7(a)と図-8(a)に、SB30-02 と SB30-02-20 の実験

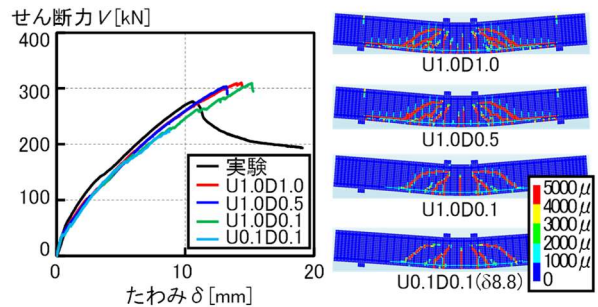


図-4 荷重－変位および最大主ひずみ分布 (SB30-02)

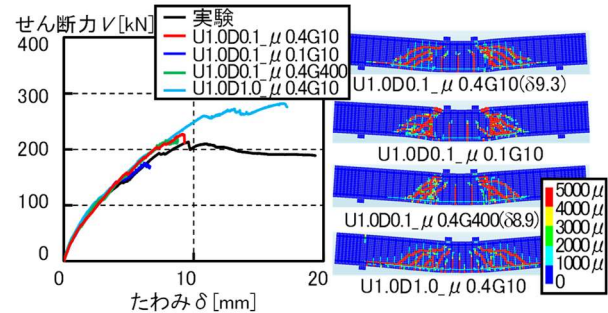


図-5 荷重－変位および最大主ひずみ分布 (SB30-02-20)

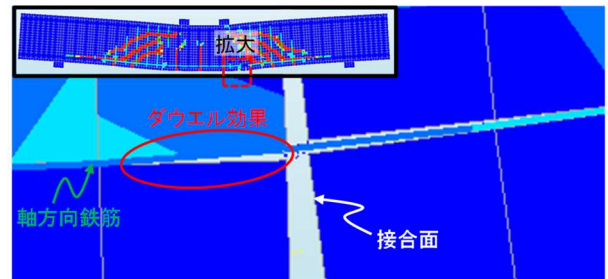


図-6 接合部の下側鉄筋付近のひび割れ (SB30-02-20)

と解析の下側軸方向鉄筋の軸方向ひずみ分布を示す。各荷重における、実験と解析のひずみ分布はおおむね一致していることが分かる。図-7(b)と図-8(b)に、SB30-02 と SB30-02-20 の解析の支間中央から 400mm 付近での下側軸方向鉄筋のせん断力分布を示す。接合面のない SB30-02 では、スターラップ位置でのみせん断力が変化しており、下側軸方向鉄筋に生じるせん断力は比較的小さいことが分かる。SB30-02-20 では、接合部でのダウエル効果により、接合面位置で下側軸方向鉄筋に大きなせん断力が発生していることが分かる。また、接合面から 2 本目のスターラップがある 250mm および 550mm において、せん断力が比較的小さく、接合面に近づくにつれてせん断力が増加する傾向にあることが分かる。一般に、接合部における軸方向鉄筋のせん断力がゼロとなる位置と接合面との距離は、軸方向鉄筋の径の 1.5 倍程度であることが実験的に確認されているが<sup>6)</sup>、解析では軸方向鉄筋の離散ひび割れ強度が実際よりも小さく、本来コンクリート部分で負担するせん断力も軸方向鉄筋が負担しているためと推察された。接合面位置の軸方向鉄筋に生じるせん断力により、軸方向鉄筋に沿ったひび割れが生じ、一体打ちよりも最大せん断力が低くなったと考えられる。

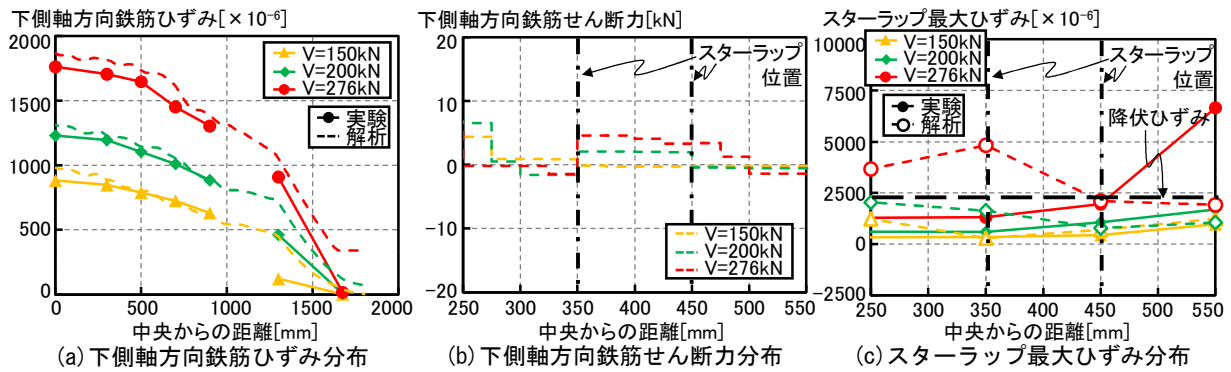


図-7 SB30-02の実験および解析結果

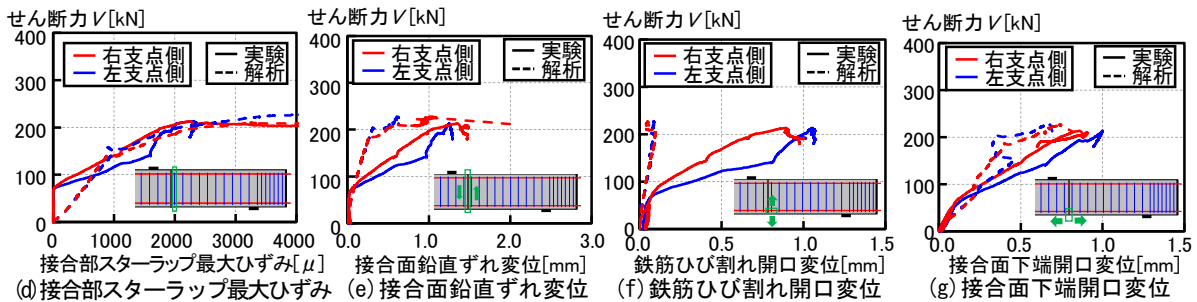
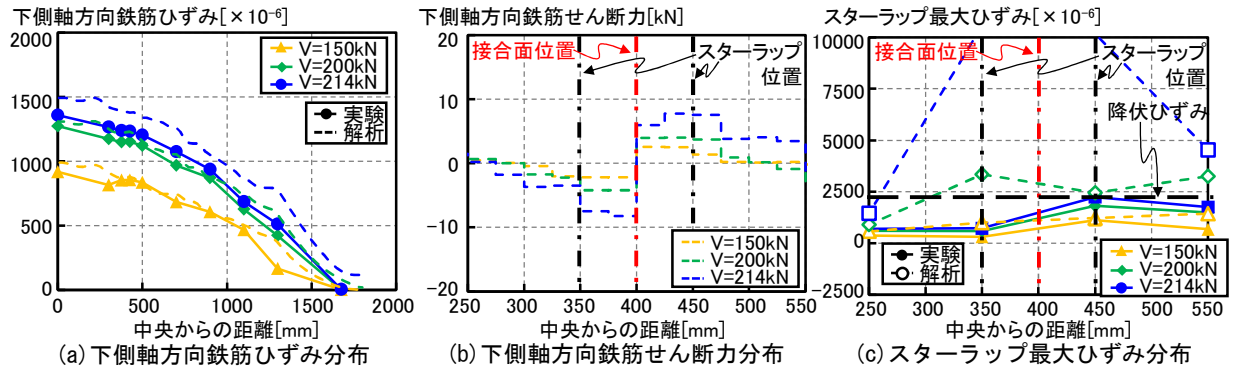


図-8 SB30-02-20の実験および解析結果

### 3.3 スターラップのひずみの最大値の分布

図-7(c)と図-8(c)に、SB30-02 と SB30-02-20 の支間中央から 400mm 付近のスターラップ 1 本あたりのひずみの最大値 (以下、最大ひずみ) の分布を示す。ひび割れとゲージの位置関係でひずみに乖離があるが、 $V=200\text{kN}$  で SB30-02 のスターラップは降伏に至らず、SB30-02-20 は接合面に近接するスターラップに大きなひずみが生じていることが分かる。なお、後述の図-8(d)にも示す通り、SB30-02-20 の実験値も最大せん断力以降にひずみが増大している。

図-8(d)に、SB30-02-20 の接合面の支点側に近接するスターラップの最大ひずみについて、載荷荷重との関係を示す。本検討では接合面のクーロン摩擦モデルの  $c$  と  $f_i$  を 0 としたため、初期での乖離がみられるが、 $V=150\text{kN}$  程度で実験と解析が概ね一致し、最大せん断力程度でひずみが増大していることが分かる。すなわち、SB30-02-20 では、 $V=214\text{kN}$  での接合部のスターラップのひずみ増加に伴い、軸方向鉄筋に沿ったひび割れが拡大して最大せん断力に至ったと推察された。

### 3.4 接合面のずれ、開口および軸方向鉄筋ひび割れ開口

図-8(e)(f)(g)に、SB30-02-20 の接合面の鉛直方向のずれ変位、軸方向鉄筋に沿ったひび割れの開口変位、接合面下端のひび割れ開口変位について、載荷荷重との関係を示す。なお、解析値は実験での亀裂変位計およびパイ型変位計のコマ設置位置の節点間の距離とした。解析の接合面のずれ変位が実験よりも小さく、軸方向鉄筋に沿ったひび割れの開口変位も小さく計算されている。これは、 $\phi$ 、 $f_i$  の値は位置や応力状態等に応じて変動することが適切ではあるが、本検討では最大せん断力の再現に着目し、これらを一律に一定としたことに起因している。接合面の開口変位は、解析が実験よりも若干小さく計算されているが、概ね同程度の開口変位となっている。

以上より、接合部のせん断伝達メカニズムに基づき、接合面、軸方向鉄筋、コンクリートおよびスターラップをモデル化することで、接合部における軸方向鉄筋のせん断力負担および鉄筋に沿ったひび割れといった、PCaRC 構造の接合部特有の挙動を確認した。接合面のずれ変位に関して、 $\phi$  と離散ひび割れ強度による再現精度

については検討の余地があるものの、接合部のスターラップによる補強効果を検討するうえでは、影響は小さいと考えられる。そこで、補強による効果を明確かつ安全側に評価することを目的に、接合面のずれが大きく、ダウエル効果の影響が顕著となる、 $\phi$  を 5.7°、離散ひび割れ強度を  $0.1f_t$  としたモデルに対して、接合部のスターラップによる補強効果を評価することとした。

#### 4. 接合部のスターラップによる補強効果の評価

##### 4.1 解析モデルの概要

3.における SB30-02-20 の検討を踏まえ、軸方向鉄筋に沿ったひび割れを抑制することが梁の耐力向上に有用であることが分かった。そこで、接合部のスターラップによる補強として、スターラップを太径化または接合面に近い位置に配置することで、軸方向鉄筋のせん断力を低減する補強が有効と考えられ、解析的に検討した。

図-9 に、SB30-02-20 の接合部のスターラップによる補強の解析モデルの概要を示す。接合面からスターラップまでの距離を 50mm とし、接合部のスターラップを D13, D19, D25 としたケース、および接合面からスターラップまでの距離を 25mm として接合部のスターラップを D13, D19, D25 としたケースを検討した。なお、接合部のスターラップは、すべて SD345 として計算した。

##### 4.2 解析結果

図-10 に、補強後の荷重-変位関係および最大主ひずみ分布を示す。図-11(a)に、補強後の最大せん断力  $V_{max}$  と一体打ちの解析の最大せん断力  $V_{max0}$  との比 ( $V_{max}/V_{max0}$ ) を、接合部のスターラップの種類ごとに示す。なお、図中の塗りつぶしは、 $V_{max0}$  と同じ荷重 (最大せん断力比 1.0 未満は各ケースの  $V_{max}$ ) での接合部のスターラップの降伏状況を示す。接合部のスターラップの径が太く、また、接合面からスターラップまでの距離が小さいほど、最大せん断力比が大きくなっていることが分かる。また、接合面からスターラップまでの距離が 50mm の場合は D25、距離が 25mm の場合は D19 と D25 で、接合部のスターラップが降伏せず、接合面を有さない SB30-02 と同等以上の  $V_{max}$  となり、接合面のない SB30-02 と類似した最大主ひずみ分布となった。図-11(b)に、 $V_{max0}$  と同じ荷重 (最大せん断力比 1.0 未満は各ケースの  $V_{max}$ ) での接合面のずれ変位を、接合部のスターラップの種類ごとに示す。接合部のスターラップの径が太く、接合面に近接するほど、接合面のずれを抑制している。太径化によりせん断補強鉄筋量が増加しているため、 $V_{max}$  の増加には斜めひび割れが抑制されたことによる効果も含まれると考えられる。しかしながら、特に接合部のダウエル効果によって生じる軸方向鉄筋に沿ったひび割れを抑えて接合面のずれを低減し、接合面でせん断力を十分伝達されたこと

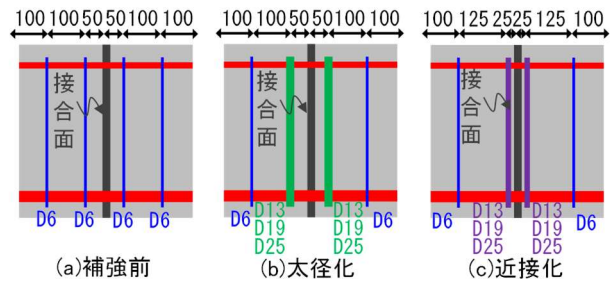


図-9 接合部のスターラップによる補強の解析モデル概要

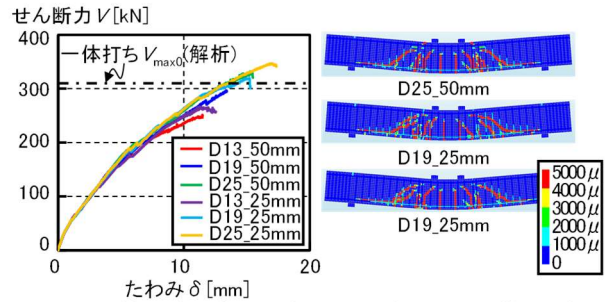


図-10 補強後の荷重-変位および最大主ひずみ分布

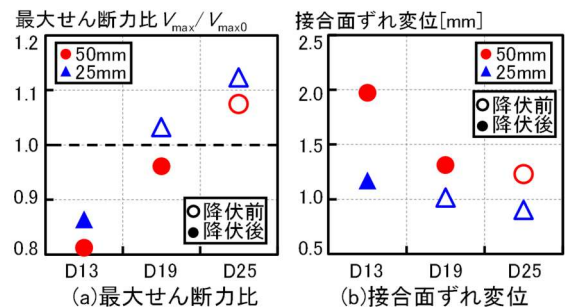


図-11 補強後の最大せん断力比および接合面ずれ変位

が、 $V_{max}$  の増加に寄与していると考えられた。

図-12 に、D25 を接合面から 50mm に設置した解析、図-13 に、D19 を接合面から 25mm に設置した解析における、下側軸方向鉄筋のせん断力分布、支間中央から 400mm 付近のスターラップの最大ひずみ分布、接合部のスターラップの最大ひずみ変化を、補強前と比較して示す。 $V=150kN$  における軸方向鉄筋のせん断力分布に着目すると、補強前と比較して接合面でのせん断力は増加し、接合面から離れるにつれて急激にせん断力が低下し、接合面から近い箇所でせん断力が概ねゼロとなることが分かる。また、補強後の接合部のスターラップは、降伏ひずみに達しておらず、接合部のスターラップがせん断力を多く負担していることが分かる。

このように、PCaRC 構造の接合部を検討することで、接合面を有する梁部材に既存のマクロ式<sup>3)</sup>を適用する際の前条件の整備や、非線形有限要素解析等のより合理的な評価方法の活用を促すことにつながると考えられる。

#### 5. まとめ

(1) PCaRC 部材を軸方向に配置し、無収縮モルタル等で一体化した PCaRC 構造の梁部材に対し、接合部のせん断伝達メカニズムに即した、二次元有限要素解析によるモデルの挙動を確認した。

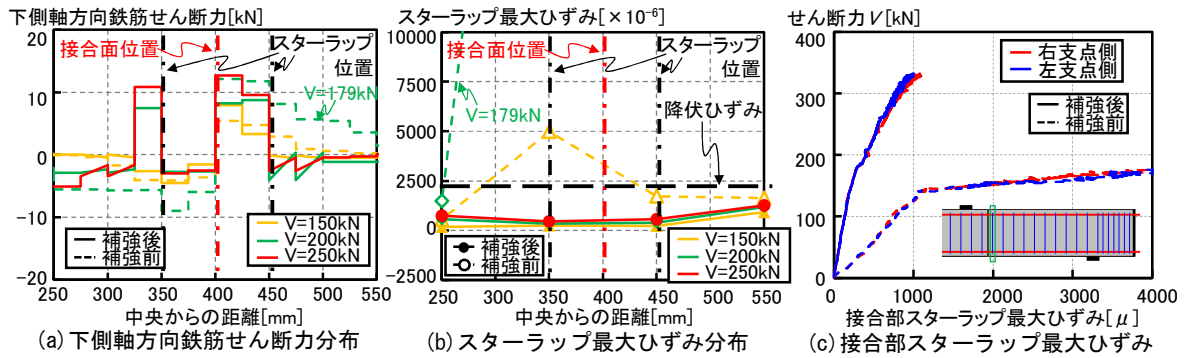


図-12 SB30-02-20 (D25\_50mm) の補強前後の解析結果

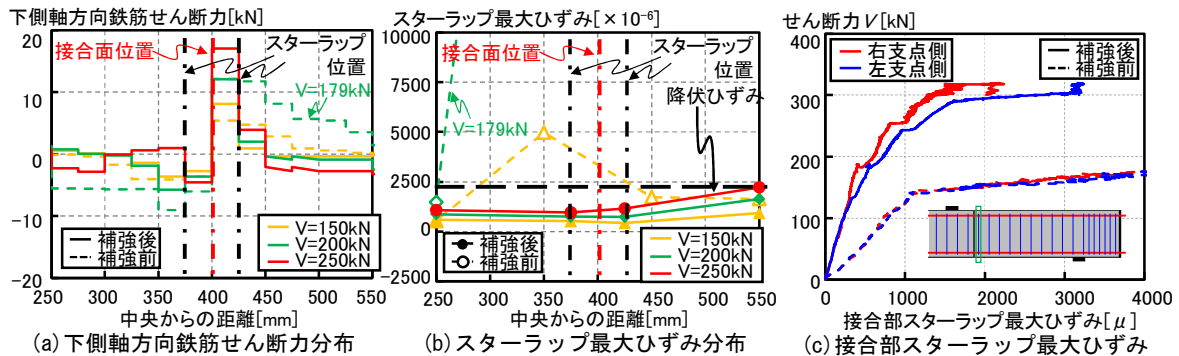


図-13 SB30-02-20 (D19\_25mm) の補強前後の解析結果

- (2) 提案したモデルにより、既往のPCaRC部材を軸方向に一体化した梁部材の4点曲げ荷重実験における、接合部の軸方向鉄筋のせん断力負担および鉄筋に沿ったひび割れといった、PCaRC構造の接合部特有の挙動を確認した。これにより、斜めひび割れが卓越するスレンダーな接合面を有する梁部材の耐力の評価に有用であると考えられる。
- (3) 接合面を有する梁の実験において、ダウエル効果により接合部の軸方向鉄筋に大きなせん断力が生じ、軸方向鉄筋に沿ったひび割れが拡大し、接合部のスターラップが降伏に至ることによってせん断力を負担しきれず、最大せん断力に到達するといった破壊現象を解析的に評価した。
- (4) 接合部のダウエル効果で生じる軸方向鉄筋に沿ったひび割れを抑制し、接合面のずれを低減することが、接合面を有する梁部材の耐力向上に効果的であった。
- (5) 鉄筋により、接合面を有する梁部材の耐力向上を図る場合、梁全体に均一に鉄筋量を増加するのではなく、接合面近傍を局部的に補強することが効果的であることを示した。今回対象とした部材では、接合面から軸方向鉄筋の径の1.5倍程度の範囲に太径のスターラップを配置すること、あるいは接合面に近接してスターラップを配置することで、一体打ちの梁と同等以上の耐力を有していた。
- (6) PCaRC構造の接合部の鉄筋配置による効果を検討することで、接合面を有する梁部材において、既存のマクロ式を適用する際の前提条件の整備や、非線形有

限要素解析など、より合理的な評価方法の活用を促すことにつながると考えられる。

なお、本研究の一部は、国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施した。

#### 参考文献

- 1) 接合面を有するプレキャスト・プレストレストコンクリート構造の設計法研究委員会：接合面を有するプレキャスト・プレストレストコンクリート構造の設計法研究委員会報告書、公益社団法人日本コンクリート工学会，2021.3
- 2) 西尾 悠吾，中田 裕喜，渡辺 健，田所 敏弥：接合面およびせん断補強鉄筋量が単純支持RCはりのせん断耐荷機構に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.43，No.2，2021
- 3) 土木学会：2017年制定コンクリート標準示方書[設計編]，丸善，2018
- 4) 島 弘，周 礼良，岡村 甫：マッシュなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力-すべり関係，土木学会論文集，第378号/V-6，pp.165-174，1987.2
- 5) 飯塚 敬一，檜貝 勇，斉藤 成彦，高橋 良輔：かぶり厚の影響を考慮した異形鉄筋の付着応力-すべり-ひずみ関係，土木学会論文集 E2，Vol.67，No.2，280-296，2011
- 6) 篠田 佳男，河野 一徳，田中 伯明，大野 琢海：平滑な接合面における鉄筋のせん断伝達に関する研究，土木学会論文集，No.571/V-36，pp.57-67，1997.8