論文 スタッドのヘッドが鋼板コンクリート合成版のせん断破壊に及ぼす 影響

伊藤 翼^{*1}·古内 仁^{*2}·高橋 良輔^{*3}·梶原 脩^{*1}

要旨:現在,鋼板コンクリート合成版の設計せん断耐力式には RC 部材の設計耐力式を安全側に近似したものが与えられているが,合成版のせん断耐力はずれ止めの配置方法による影響を受けるために,さらなる合理化を目指す上では合成版特有のせん断破壊メカニズムを解明する必要がある。本研究では,ずれ止めにスタッドを用いた合成版のせん断破壊にスタッドのヘッドが及ぼす影響について実験と解析の両方から検討を行った。その結果,ヘッドによるスタッド引張力の伝達がせん断ひび割れを進展させたこと,スタッド高さが大きくなった際に得られるせん断補強効果にヘッドの有無が影響を与えていることが確認された。 **キーワード**:鋼板コンクリート合成版,頭付きスタッド,スタッドヘッド,せん断破壊,有限要素解析

1. はじめに

鋼板コンクリート合成版(以下,合成版)は、ずれ止 めの適切な配置により鋼板とコンクリートの一体性を確 保することで高い部材剛性を発揮し、鉄筋コンクリート 版と比較して版厚を小さくすることが可能である。また 鋼板が型枠の役割を兼ねることから、施工時における省 力化およびコストダウンを図ることができる。現在、土 木学会の複合構造標準示方書 1)では設計せん断耐力式が 与えられているが、これは RC 部材の設計耐力式を安全 側に近似するために、低減係数によって引張鋼材との付 着性状の違いに起因するコンクリート部のひび割れ分散 性および進展抑制効果の減少を考慮したものとなってい る。しかし、合成版において付着を担うずれ止めの大き さは部材寸法と比較しても無視できるものではなく, 接 合面でのずれ止めとしての機能以外でもまた部材全体の せん断耐荷機構に影響を与えていることが示唆されてい る。黒澤らは、ずれ止めに頭付きスタッドジベル(以下、 スタッド)を用いたロビンソン型合成版のはり部材に対 して載荷試験を行っているが、そのせん断耐力はスタッ ドの高さによって大きく異なることを確認している²⁾。 したがって, 合成版の部材破壊に対する合理的な構造を 目指すならば、ずれ止めが部材全体の破壊に及ぼす影響 を把握した上で合成版のせん断破壊メカニズムを解明す る必要がある。

合成版のせん断破壊性状には種々の要因が影響を及 ぼすと考えられるが、本研究ではスタッドのヘッドと高 さに着目し、それらがせん断破壊にもたらす影響を実験 と FEM 解析の両方から追求することで合成版特有の破 壊メカニズムの解明を試みるものである。実験および解

*1 北海道大学大学院 工学院 (学生会員)
*2 北海道大学大学院 工学研究院助教 博士(工学) (正会員)
*3 山梨大学大学院 総合研究部准教授 博士(工学) (正会員)

析では、スタッドヘッドの有無およびスタッド長を変数 としてその影響を調べることにした。

2. 実験概要

本研究で用いた供試体の形状寸法を図-1 に示す。供 試体は、ずれ止めとして軸径 13mm のスタッド(頭厚 8.5mm, 頭部直径 25mm)を厚さ 6mm の引張補強鋼板 (SS400:実降伏強度 313N/mm²)上に 70mm 間隔で配 置した合成版のはり部材である。供試体数は、表-1 に 示すように4体用意し、実験変数はスタッドヘッドの有 無及びスタッド高さである。供試体の幅 150mm,全長 1200mm(支間長 900mm)および有効高さ 147mm はすべ



供試体	スタッド		最大荷重	
	高さ (mm)	頭の 有無	成八向重 (kN)	破壊形式
No.1	50	有	92	せん断破壊
No.2	30	無	117	せん断破壊
No.3	110	有	170	混合型注)
No.4	110	無	126	せん断破壊

表-1 実験変数および実験結果

注)曲げ降伏後のせん断破壊

表ー2 スタッド材料特性

高さ (mm)	頭の 有無	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)
50	有	431	494
	無	336	446
110	有	421	490
	無	336	446



コンクリートには早強ポルトランドセメント, 天然の 骨材を使用しており,実験室にて混合しスタッド付き鋼 板上に打設した。コンクリート圧縮強度の実測値は,材 齢13日で35.1 N/mm²である。またスタッドの材料特性 は**表-2**に示すとおりである。

荷重は、単純支持された供試体の中央に鋼板を介して 静的に作用させた。また、スタッドには鋼板から 20mm の高さにワイヤストレインゲージを貼り付け、載荷中に スタッドに生じる軸方向ひずみを計測した。

3. 実験結果

3.1 ひび割れ性状

実験結果を表-1 に、各供試体のひび割れ発生状況を 図-2 に示す。破壊形態は、いずれもせん断破壊となっ た。ただし、供試体 No.3 は、載荷点直下で鋼板の降伏が 先行してから破壊に至った。ひび割れの進展状況として は、まず載荷初期に載荷点直下に曲げひび割れが発生し、 その後せん断スパンにおいてせん断ひび割れが発生して いくことが確認された。破壊時には、いずれの供試体も せん断ひび割れが進展し載荷点側へ貫通することで終局 に至った。またヘッドのない No.2 と No.4 の供試体では、 写真-1 に示すように鋼板とコンクリートの間に剥離が 発生した。

3.2 荷重-変位関係

図-3に各供試体の荷重-変位曲線を示す。図中には、 せん断ひび割れ発生点に菱形の記号を付した。なお、せ ん断ひび割れが複数ある場合は、はじめに載荷点近傍ま で進展したせん断ひび割れの値を用いている。それぞれ の供試体で、載荷初期の部材剛性に大きな差は見られな



図-2 ひび割れ発生状況







かった。スタッド高さが 50mm の供試体 No.1 と No.2 で 比較すると,スタッドヘッドのある No.1 のほうが最大荷 重は小さくなった。せん断ひび割れ発生時の荷重はほと



図-4 スタッドひずみ分布 (供試体 No.3)

んど同じであったことからも、スタッド高さが小さい場 合はせん断ひび割れ発生後に、スタッドヘッドがコンク リートの断面積を減少させていること、またせん断ひび 割れを拘束した際にスタッドに生じる引張力をコンクリ ートに伝達させることで、 せん断ひび割れの進展を助長 し結果的に部材のせん断破壊を誘発させているためであ ると考えられる。それに対してスタッド高さが 110mm の供試体では、スタッドヘッドのある No.3 の方がヘッド のない No.4 よりも最大荷重が大きくなった。ひび割れ進 展状況やせん断ひび割れ発生後も荷重が増加したことよ り、ヘッドがありスタッド高さがある程度確保されてい る場合では、せん断ひび割れが発生した際にスタッドが せん断ひび割れ面で発生する斜め引張力に抵抗すること でひび割れの発達を抑制し、支点側に新たなせん断ひび 割れが発生していくことを繰り返した後に破壊に至ると 考えられる。一方でヘッドのない場合では、せん断ひび 割れを拘束する力はスタッドとコンクリートとの間の微 小な摩擦力に依存するため、ヘッドのある場合と比較し てせん断ひび割れの発達を早い段階で許容してしまうと 考えられる。ヘッドがあるにも関わらず No.1 の最大荷重 が小さくなった原因は、スタッドがせん断ひび割れの下 端でしか跨ぐことができず、せん断ひび割れがスタッド 高さよりも上部に達した時点で進展を許してしまうため であると考えられる。

3.3 スタッドひずみ分布

図-4 および図-5 にスタッド高さが 110mm の供試体 No.3 と No.4 におけるスタッドのひずみ分布をひび割れ 状況とあわせて示す。ヘッドありの供試体 No.3 では, 110kN 時から最大荷重時にかけて破壊が生じたスパン内 のスタッドでひずみが大きく増加しているが,これはせ



図-5 スタッドひずみ分布(供試体 No. 4)

ん断ひび割れの開口に抵抗したためであると考えられる。 また終局時には、これらのスタッドの上部において最終 的な破壊を引き起こすせん断ひび割れ(図中赤線)が進 展していることが分かる。スタッド高さが 50mmの供試 体 No.1 についても同様の現象が観察されたことから、へ ッドのある供試体についてはせん断ひび割れを拘束した 際にスタッドに生じる引張力が最終的なせん断ひび割れ の進展を引き起こしていると考えられる。一方でヘッド なしの供試体 No.4 については、供試体 No.3 と比較して 荷重の増加にともなうスタッドひずみ値の増加は小さく なっており、スタッドによるせん断ひび割れ開口に対す る抵抗力が小さいことが分かる。破壊時に鋼板の剥離が 生じていたことからも、 ヘッドのない供試体ではせん断 ひび割れを拘束していたスタッドとコンクリートとの間 で付着切れが発生し最終的な破壊を引き起こしていると 考えられる。

4. 解析概要

4.1 解析条件

本研究では2次元非線形 FEM 解析を行い,載荷試験 を行ったものと同じ供試体を対象に破壊メカニズムの検 討を行った。解析には汎用の有限要素解析ソフトである DIANA9.4.4 を用いた。

解析モデルの要素分割状況の一例を図-6 に示す。解 析対象範囲は部材の対称性からハーフスパンとし、境界 条件として対称軸と支点部の変位にそれぞれ水平方向と 鉛直方向の拘束を与えた。収束計算は Newton-Raphson 法により行い,収束判定値は変位を基準として 10⁻³に設 定した。1 ステップあたりの収束計算の最大反復回数は 100 回とし,収束しなかった場合は不釣合力を次のステ



ップに持ち越して計算している。

4.2 要素

コンクリートと鋼板は8節点四角形平面応力要素を用 いてモデル化し,接合部には6節点直線接合要素を適用 した。スタッドは2節点梁要素を用いており,頭にあた る節点をコンクリート要素,根元にあたる節点を鋼板要 素の節点とそれぞれ共有させた。またヘッドなしのスタ ッドについては,引き抜けを考慮するためにスタッドの 頭の節点とコンクリート節点の間に2節点接合要素を適 用し,後述するようなモデルを適用することで本来はス タッド軸部表面で発生する付着切れをスタッド頭部にお いて擬似的にモデル化を行った。

4.3 材料構成則

コンクリートの応力-ひずみ関係は、圧縮側では放物線 モデル、引張側では Hordijk モデルを適用し、それぞれ 破壊エネルギーを考慮した最大応力後の軟化領域までモ デル化している。また圧縮領域では Drucker-Prager の降 伏判定基準を用いている。ひび割れ発生後のせん断剛性 は一定として、ひび割れ前の 1%まで低減させた。鋼板 とスタッドは完全弾塑性であると仮定し、降伏判定は Von-Mises 基準に基づいている。材料特性値としては、 コンクリートの圧縮強度については実験にて実測した値 (35.1 N/mm²) と同様であり、引張強度は土木学会コン クリート標準示方書の式を用いて圧縮強度から算出した。 算出したコンクリート引張強度は 2.47 N/mm²である。鋼 板の降伏強度は 313N/mm²とし、スタッドの降伏強度に ついては**表-2**のものと同様の値を用いている。

コンクリートと鋼板間の接合要素に適用したせん断応 カ-ずれ関係を図-7に示す。接合部におけるスタッドの ずれ抵抗については、複合構造標準示方書³⁾に記載され ているスタッドのせん断応力-ずれ関係(多直線型に近似 したモデル)を適用した接合要素を図-6に示したよう にスタッド位置(図中赤色)に離散的に配置することで モデル化した。なお適用したせん断応力-ずれ関係は、梁



図-9 荷重-変位曲線(No.3 および No.4)

要素による影響が接合要素でのずれ抵抗に加味されるこ とを考慮しせん断応力を一定の割合で減じている。一方 でスタッド間に配置された接合要素(図中水色)につい ては、初期の付着と付着切れ後の摩擦を考慮したバイリ ニアモデルを適用した。

接合部における鉛直方向の応力-ひずみ関係について は、スタッド位置、スタッド間どちらの接合要素にも引 張側に小さい剛性を与えることで、コンクリートと鋼板 の付着の影響を小さくしている。またヘッドのない供試 No.1 (スタッド高さ 50mm, ヘッドあり)



No.3 (スタッド高さ 110mm, ヘッドあり)



No.2 (スタッド高さ 50mm, ヘッドなし)



No.4 (スタッド高さ 110mm, ヘッドなし)



図-10 最大主ひずみコンター(最大荷重時)

体におけるスタッドの上端とコンクリートとの接合要素 については、ある大きさの応力に達した時点で剛性が 0 となるようなバイリニアモデルを適用することで引き抜 けのモデル化を試みた。

5. 解析結果

5.1 荷重-変位関係

解析から得られた No.1 と No.2 および No.3 と No.4 の 荷重と載荷点変位の関係を,実験結果とあわせて図-8 および図-9 に示す。破壊の判定は、解の収束状況や荷 重-変位関係の推移およびひび割れを表す引張ひずみの 進展状況から総合的に判断した。スタッド高さが 50mm である No.1 の最大荷重値は 86kN, No.2 では 90kN とほ とんど同じ結果となった。実験結果と比較すると, No.1 では実験結果をおおむね再現できているのに対して No.2 では約 70kN の時点で一度荷重が低下しており最大 荷重も小さい結果となった。スタッド高さが 110mm の No.3 では最大荷重は 169kN であり,一度荷重の低下を生 じた後は最大荷重とほとんど同じ大きさの荷重が保持さ れることが確認された。No.4 の最大荷重は 117kN であり No.3 をわずかに過小評価したが,実験結果と異なり約 80kN の時点で剛性が低下した。

5.2 破壊性状

図-10 に最大荷重時における各供試体の最大主ひず みコンター図を示す。本研究では最大主ひずみの分布状 況より,スタッドヘッドがせん断破壊性状に与える影響 について検討を行った。

スタッドヘッドのある No.1 および No.3 では, スタッ

ド上部において水平に高ひずみ領域が広がっており破壊 の主要な要因となっていることが分かる。一方で No.2 および No.4 については、せん断ひび割れの根元から支点 上まで鋼板に沿って大きなひずみが生じているが、これ は実験で剥離が確認された位置と一致する。以上より、 ヘッドが拘束されている場合はコンクリートに伝達され るスタッド引張力により水平ひび割れが発達し破壊に至 ること、ヘッドがない場合にはスタッドの引き抜けによ ってせん断ひび割れ根元部から支点にかけての剥離が生 じることが確認された。

スタッド高さが 110mm の No.3 については水平の高ひ ずみ領域のほかに,載荷点直下において高ひずみ領域が 形成されており,引張鋼板にも大きなひずみが生じてい ることが確認できる。実験における載荷点近傍(載荷点 からの距離 35mm)での鋼板のひずみの実測値を確認し たところ,最大荷重時で約 5800µであった。今回の実験 で用いた鋼板の降伏ひずみはおよそ 1600µ であるので, 最大荷重時には鋼板に降伏が発生していたことが分かる。 解析から得られた荷重-変位関係が脆性的な挙動を示さ なかったことからも, No.3 については曲げとせん断が混 合した破壊モードであると言える。

荷重が 80kN 時における各解析の最大主ひずみコンタ ーを図-11 に示す。ヘッドのある場合で比較すると,ス タッド高さが 50mm の No.1 では破壊時の主要なひび割 れである水平ひび割れがスタッド上部において既に発達 していることが分かる。スタッド高さが 110mm の No.3 ではせん断ひび割れは発達していないことから,スタッ ド高さが 50mm の場合ではスタッドヘッドよりも上の領



図-11 最大主ひずみコンター (80kN時)

域でスタッド引張力の伝達によりせん断ひび割れの進展 を助長することが確認された。一方でヘッドのない場合 では、No.2 と No.4 ともにせん断スパン中央においてせ ん断ひび割れが発達していることが分かる。荷重-変位曲 線より剛性が 80kN 前後で低下していることからも、ヘ ッドのない供試体の解析モデルでは実験と比較してせん 断ひび割れの発達を過大評価していると考えられる。こ れは、実際のスタッドによるせん断ひび割れの拘束は軸 部における付着や摩擦の影響を受けるが、今回の解析モ デルではスタッド要素を頭部と根元の二点によってのみ 部材中に配置しているために解析ではそれらの影響を考 慮できておらず、スタッドによるせん断ひび割れの拘束 力を過小評価しているためであると考えられる。

スタッドヘッドのある供試体では、せん断ひび割れの 発達に対する抵抗力はヘッドによる拘束の影響が相対的 に大きいと考えられるため、今回のモデルによっても精 度良く実験結果を再現できていると考えられる。実際の 挙動をより精度よく再現するためには、スタッド軸部と コンクリート間における付着力やスタッドヘッドによる コンクリート断面積の減少などスタッドのモデル化方法 に更なる改善の余地があると考えられる。具体的なモデ ル化の方法については今後の検討課題としたい。

6. まとめ

ずれ止めにスタッドジベルを用いた合成版に対する

載荷実験および解析から得られた知見を以下にまとめる。

- (1) ヘッドがないスタッドを用いた場合,スタッドの引 き抜けによって接合面での剥離が生じた。
- (2) スタッドヘッドによるスタッド引張力のコンクリ ートへの伝達がせん断ひび割れを進展させる。
- (3) スタッド高さが小さい場合では、スタッド引張力に よる影響が卓越しヘッドのある方が最大荷重は小さ くなる可能性がある。
- (4) ヘッドによる拘束がせん断ひび割れの発達を抑制す るため、スタッド高さが大きい場合ではヘッドがあ る供試体の方が最大荷重は大きくなった。
- 謝辞:本研究の実験を行うにあたり、北海道大学工学部の木村勉技官にご協力いただきました。ここに深く 謝意を表します。

参考文献

- 2012 年制定コンクリート標準示方書 設計編,土木 学会,2012
- 2) 黒澤太一,古内仁,高橋良輔:ずれ止めの高さが 合成版のせん断耐力に与える影響,土木学会第69 回年次学術講演会講演概要集,CS:pp.19-20,2014
- 2014 年制定複合構造標準示方書 設計編, 土木学会, 2014