

論文 鋼板コンクリート合成版における頭付きスタッドのせん断補強効果

伊藤 翼*1・古内 仁*2・高橋 良輔*3

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配置条件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、スタッドヘッドの存在によって破壊時のひび割れ経路が異なること、ヘッドが合成版のせん断耐力に及ぼす影響はスタッド高さや配置間隔によって異な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, せん断耐力, 頭付きスタッド, せん断補強効果, 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、ずれ止めを適切に配置し一体性を確保することで優れた剛性を発揮し、鉄筋コンクリート版と比較して軽量化が可能である。また鋼板が型枠の役割を兼ねることからも、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、合成版の設計せん断耐力式として RC 部材の設計耐力式を安全側に近似したものが示されている。これは、合成版に配置されている補剛材やずれ止めのせん断補強効果が明確となっていないこと、コンクリートと引張鋼材との付着性状の違いに起因するひび割れ分散性および進展抑制効果の減少を考慮して低減されているものと推察される。しかし、合成版において接合部の付着を担うずれ止めが、その本来のずれ止めとしての機能（主として合成効果）以外でも部材全体のせん断耐荷機構に密接に関係していることが既往の研究²⁾において示唆されている。その結果、ずれ止めの配置条件によっては、実際の合成版のせん断耐力は設計耐力に比べて大幅に向上することが確認されている。したがって、部材破壊に対する合理的な構造を追求し、それを可能とする設計耐力式の実現のためには、ずれ止めが部材全体のせん断破壊メカニズムに及ぼす影響を検討する必要がある。

既往の研究³⁾では、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荷重試験を行っており、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。また、ヘッドのないスタッドを用いた供試体の試験結果と比較すると、スタッド高さが大きい場合ではスタッドヘッドは合成版のせん断耐力の向上に貢献するが、高さが小さい場合ではせん断破壊の進行をむしろ促進さ

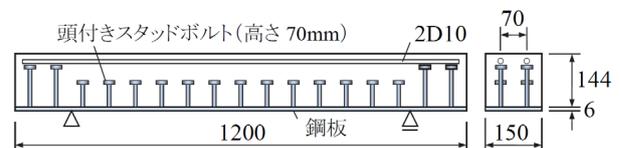
せる可能性があることが確認されている。

本研究では、合成版の破壊性状に影響を与える種々の要因のうち、スタッドの高さと配置間隔に着目した荷重試験および FEM 解析を行い、既往の研究結果とあわせて検討することで合成版特有のせん断破壊メカニズムの解明を試みた。また、スタッドヘッドの有無を変数とすることでヘッドがせん断耐力に及ぼす影響についても同様に検討した。

2. 実験概要

本研究および既往の研究³⁾で用いた供試体の形状寸法の一例を図-1に示す。また実験変数を表-1に示すが、供試体名に下線が引いてあるものは既発表の試験体であり、名称も変更している。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 313 N/mm²）上に配置した合成版のはり部材である。供試体の幅 150mm, 全長 1200mm（支間長 900mm）および有効高さ 147mm はすべて共通とした。すべての供試体の高

供試体 H70-S70-H



供試体 H70-S70-N

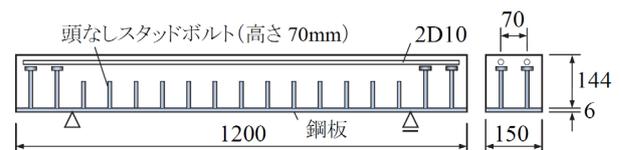


図-1 供試体形状寸法一例(単位:mm)

*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 秋田大学 大学院理工学研究科准教授 博士(工学) (正会員)

表-1 実験変数および実験結果

供試体	スタッド					コンクリート 圧縮強度 (N/mm ²)	最大荷重 (kN)	
	高さ (mm)	配置間隔 (mm)	ヘッド の有無	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)			
H50-S70-H	50	70	有	431	494	35.1	93	
H50-S70-N			無	336	446		117	
H70-S70-H	70		有	359	472	39.2	121	
H70-S70-N			無	345	450		128	
H90-S70-H	90		有	390	466		39.2	155
H90-S70-N			無	345	450			119
H110-S70-H	110	70	有	421	490		35.1	171
H110-S70-N			無	336	446			126
H110-S140-H		140	有	421	490	151		
H110-S140-N			無	336	446	129		

※下線付きは既発表の供試体

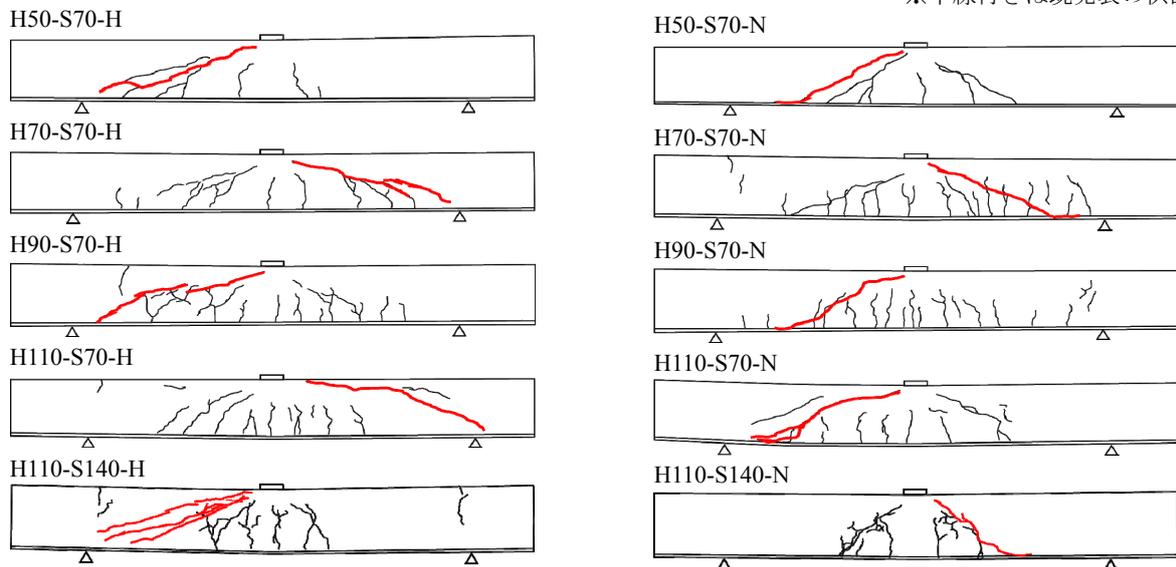


図-2 ひび割れ発生状況 (左:ヘッドあり, 右:ヘッド無し)

さ 110mm の位置に D10 鉄筋が 2 本配置されている。

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、実験室にて練り混ぜスタッド付き鋼板上に打設した。材齢 13 日で実測したコンクリート圧縮強度およびスタッドの材料特性は表-1 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、支点および荷重点に変位計を設置することにより荷重点変位を計測した。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軸方向ひずみを計測した。

3. 実験結果

3.1 最大荷重

各供試体のコンクリート圧縮強度および最大荷重を表-1 に示す。

3.2 破壊性状

各供試体のひび割れ状況を図-2 に示す。図中の赤線は、最大荷重時に進展したひび割れを示している。破壊形態は、いずれもせん断破壊となった。ただし、供試体 H110-S70-H については、荷重点直下において鋼板の降伏が先行してから破壊に至ったことが確認されている。

ひび割れ進展状況としては、まず荷重初期に (1) 荷重点直下から曲げひび割れが発生し、その後 (2) せん断スパン中央付近においてせん断ひび割れが発生することがスタッドヘッドの有無に関わらず確認された。ヘッド有りの供試体の最大荷重時には、(3-1) スタッドヘッドの位置で斜めひび割れから分岐して水平方向に新たなひび割れが発生するとともに、荷重点に向かって斜めひび割れが貫通して終局に至ることが確認された。スタッド高さが大きい場合では、(2) の時点ではせん断ひび割れはスタッドを横切るように発生することからスタッドはセ

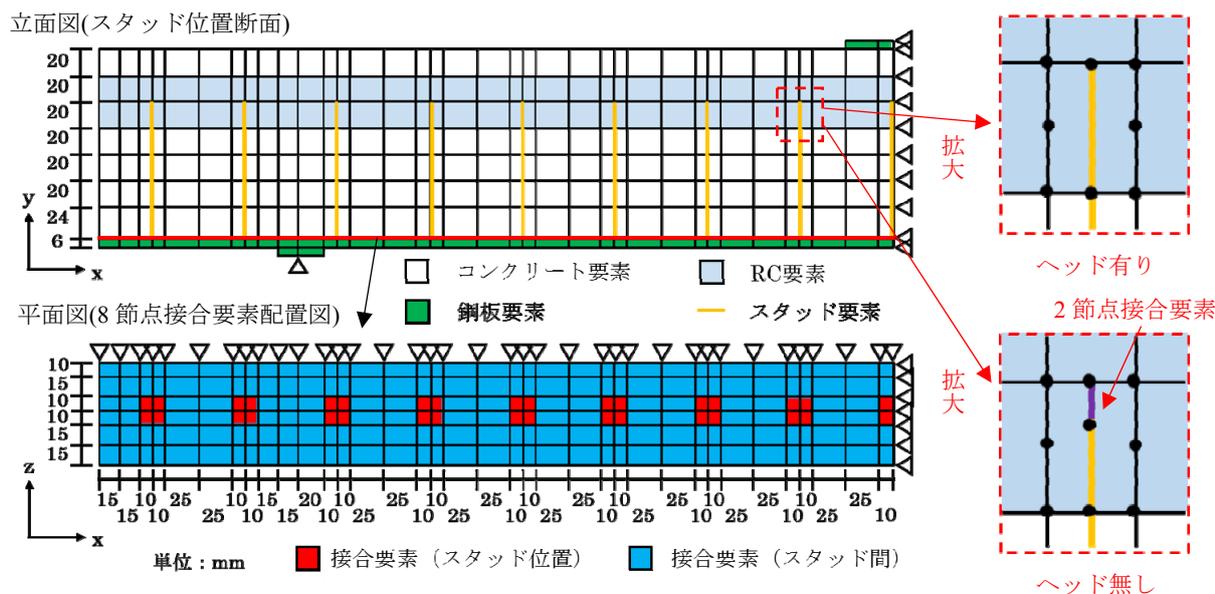


図-4 要素分割状況 (H110-S70-H および H110-S70-N)

せん断ひび割れの開口を防ぐことができるが、その際に発生するスタッド引張力やヘッドによる供試体水平断面のコンクリート断面積の減少によって (3-1) における経路でのせん断ひび割れを誘発すると考えられる。一方でスタッド高さが小さい場合は、せん断ひび割れの下端にヘッドが位置しているためせん断補強効果は期待できないが、最大荷重時には同じ機構によってヘッド部で水平ひび割れが発達して終局に至っていると考えられる。なお、破壊したせん断スパン内においてスタッドひずみが大幅に増加することが確認されたが、スタッドの降伏は確認されなかった。

ヘッド無しの供試体では、(3-2) 鋼板とコンクリートの間の剥離が発生し、(2) のせん断ひび割れと合流して載荷点へと貫通することで終局に至ることが確認された。また、ヘッド有りの場合と比較してスタッドひずみ値の増加はほとんど確認されなかった (最大で 100μ 程度)。

4. 解析概要

4.1 解析条件

本研究では 3 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 DIANA9.6⁴⁾を用いた。

解析モデルの要素分割の一例を図-4 に示す。解析対象範囲は部材の対称性から 1/4 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。収束計算は割線剛性法により行い、収束判定値は変位ノルム比を基準として 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り合い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 節点のソリッド要素を用いてモデル化し、両者の間には 8 節点平面接合要素 (厚さ 0) を適用した。スタッドは 2 節点トラス要素を用いており、根元にあたる節点は鋼板要素の節点と共有させた。もう一端の節点については、ヘッド有りのスタッドの場合は図-4 右上に示したようにコンクリート要素と直接共有させたのに対し、ヘッド無しのスタッドでは図-4 右下のようにコンクリート要素の節点との間に 2 節点接合要素を適用した。この 2 節点接合要素およびスタッド要素の断面積は、直径 13mm の円の面積と同じ値としている。

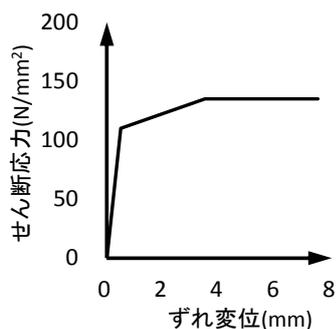


図-5 スタッドのせん断応力-ずれ変位関係

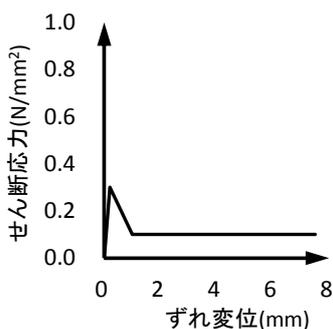


図-6 鋼とコンクリート界面のせん断応力-ずれ変位関係

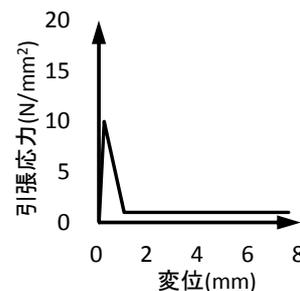


図-5 ヘッド無しスタッドとコンクリート間の 2 節点接合要素の引張応力-変位関係

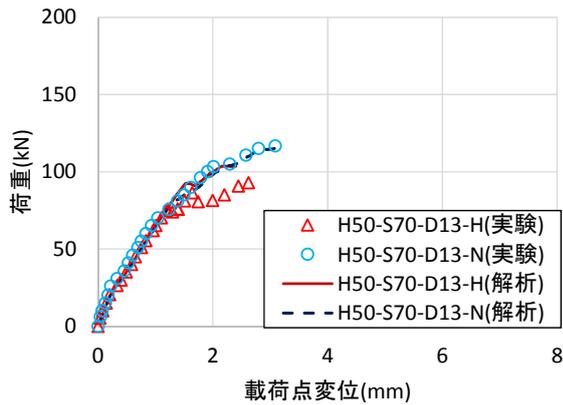


図-8 荷重－変位関係（高さ 50mm，間隔 70mm）

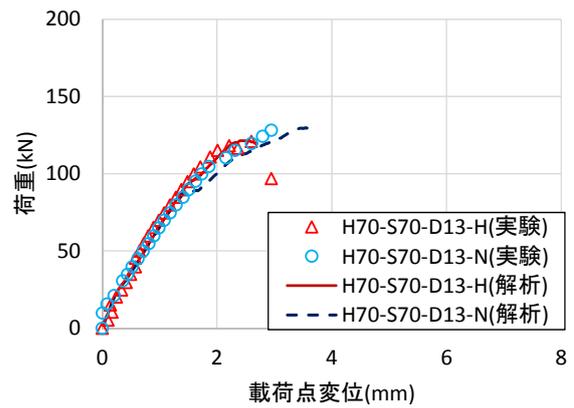


図-9 荷重－変位関係（高さ 70mm，間隔 70mm）

4.3 材料構成則

コンクリートの応力－ひずみ関係は、圧縮領域で放物線モデル、引張領域で線形モデルを適用し、終局ひずみについてはそれぞれ破壊エネルギーを基に決定した。ただし、上側鉄筋を含む要素（RC 要素）では引張軟化の際に付着にともなうテンションステイフニングを考慮している。圧縮領域の降伏判定は Drucker-Prager 基準により行い、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体であると仮定し、降伏判定は Von-Mises 基準に基づいている。コンクリート圧縮強度およびスタッド降伏強度は表-1 と同様であり、コンクリート引張強度は土木学会コンクリート標準示方書⁵⁾の式を用いて圧縮強度から算出した。鋼板の降伏強度は 313N/mm^2 としている。

鋼板とコンクリートの接合面におけるせん断応力－ずれ関係を図-5および図-6に示す。スタッドによるせん断伝達作用については、中島らの研究⁶⁾を参考に図-5に示したようなトリリニア型のモデルで表し、スタッド近傍の接合要素（図-4 中赤色）に適用した。一方で、スタッドの無い接合面の鋼とコンクリート間の付着・摩擦作用については、図-6のようなせん断応力－ずれ関係を適用し、スタッド間（図-4 中水色）に配置することでモデル化した。また、接合面鉛直方向の応力－ひずみ関係については、引張側に極めて小さい剛性をすべての接合要素に与えている。

ヘッド無しのスタッドについては、実験結果よりある程度の引張応力が生じると付着切れによりコンクリートからの引き抜けが発生すると考えられる。よって本解析では、スタッド降伏応力よりも十分に小さな値（10MPa）の引張応力が生じた時点ですべりが発生すると仮定し、ヘッド無しスタッドとコンクリート間に適用した接合要素（図-4 中紫色）に図-7に示した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疑似的に再現することを試みた。

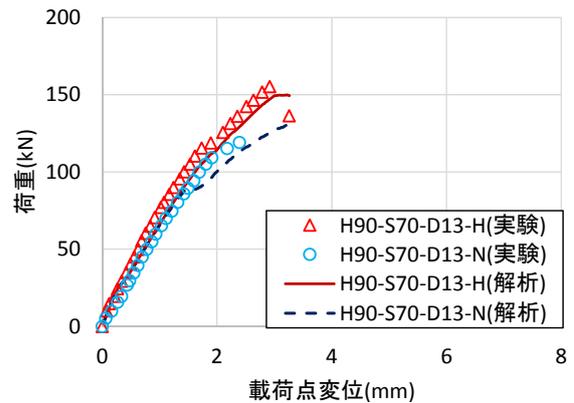


図-10 荷重－変位関係（高さ 90mm，間隔 70mm）

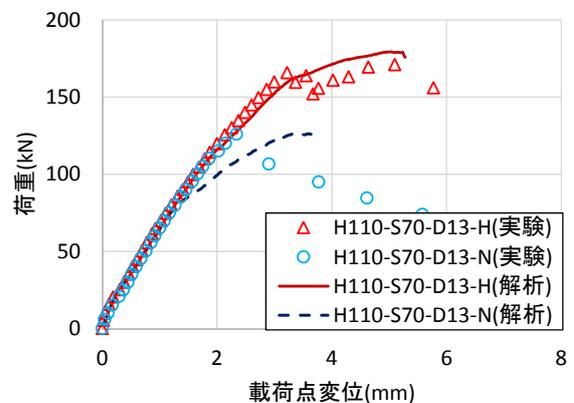


図-11 荷重－変位関係（高さ 110mm，間隔 70mm）

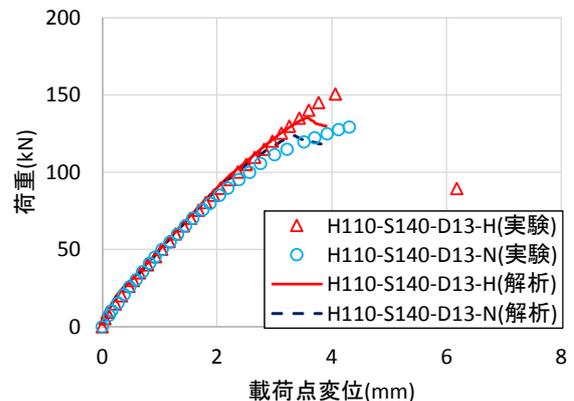


図-12 荷重－変位関係（高さ 110mm，間隔 140mm）

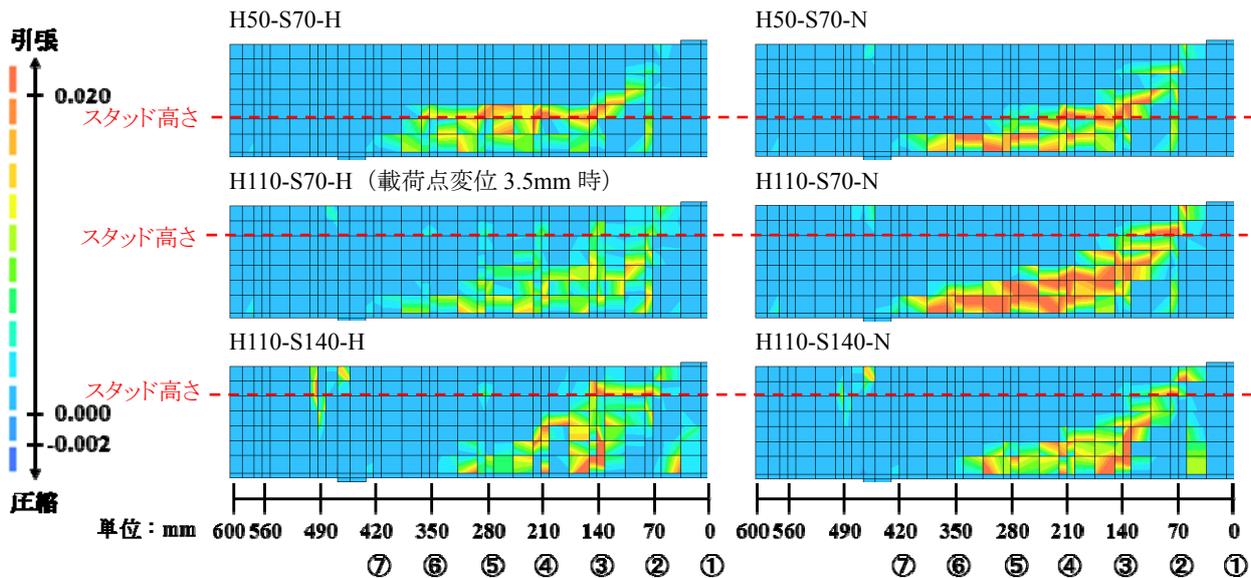


図-13 最大主ひずみコンター（最大荷重直後）

5. 解析結果

5.1 荷重－変位関係

解析結果から得られた荷重と載荷点変位の関係を実験結果とあわせて図-8～図-12に示す。

最大荷重および終局に至るまでの部材剛性の変化は、実験と解析で概ね一致している。載荷点変位が2mmに達するまでの部材剛性を比較すると、スタッド配置間隔が70mmの供試体（図-8～図-11）ではスタッド高さの違いや頭の有無によらずほとんど同じである。一方で配置間隔が140mmの供試体（図-12）では、配置間隔が70mmの供試体に比べて低下している。これは、スタッド配置間隔が大きい場合は鋼コンクリート接合面でのずれが大きくなるためであると考えられる。

5.2 破壊性状

シリーズH50-S70, H110-S70およびH110-S140について、最大荷重直後におけるスタッド位置での断面の最大主ひずみコンターを図-13に示す。ただし、H110-S70-Hについてはひずみ分布が複雑で比較が難しかったことから、最大荷重時よりも前の時点（載荷点変位3.5mm時）におけるコンター図を用いている。

シリーズH50-S70の最大主ひずみコンターを比較すると、ヘッドが有る場合、無い場合ともに載荷点から70mm（図-13中②）のスタッド位置において接合面から垂直方向に引張主ひずみ領域が形成されていることが確認できる。実験結果（図-2）との比較により、これは曲げひび割れによるものと考えられる。また両者に共通して、④位置におけるスタッドの根元部近傍にある要素から載荷点へ向かって斜め方向にひずみ領域が形成されていることが確認できるが、図-2との比較によりこれはせん断ひび割れによるものと考えられる。このひずみ領域は、荷重がおおよそ80～90kNに達した段階で形成されていた

ことが確認されており、H50-S70-Nの荷重－変位関係において剛性の低下が発生した時期と一致する。さらに、H50-S70-Hでは④～⑥位置におけるスタッドヘッド上のコンクリート要素で水平に引張ひずみ領域が形成され最大荷重を迎えたことが確認された。これは、実験時にヘッド有りの供試体の終局時において確認された水平ひび割れを示していると考えられる。一方で、H50-S70-Nでは⑤のスタッド根元部近傍の要素から載荷点にかけて斜めに引張ひずみ領域が形成され最大荷重に達したことが確認された。以上より、スタッドヘッドの有無によって合成版のせん断破壊に至るまでのメカニズムが異なることが本解析においても確認された。これは、スタッド高さが70mmおよび90mmの場合についても同様であった。

次に、シリーズH110-S70で最大主ひずみコンターを比較する。ヘッド無しの場合では、H50-S70-Nとほぼ同様のひずみ分布である。一方でヘッド有りの場合では、スタッドヘッド上の水平引張ひずみ領域は確認されず、載荷板周辺部に高い引張ひずみ領域が形成され最大荷重に至ったことが確認された。スタッドヘッド上で水平ひずみ領域が形成されなかった理由としては、実験と異なり本解析ではヘッドによるコンクリート水平断面の減少が考慮されていないためであると考えられる。またヘッド有りの場合では、スタッド高さよりも低い位置の領域で引張ひずみの値が大きく抑制されていることが確認できる。以上より、スタッド配置間隔が密でありスタッド高さが大きい場合では、スタッドによるせん断補強効果によりせん断破壊の進行が大きく抑制されることが確認された。

シリーズH110-S140については、ヘッドの有無に関わらず③スタッド根元部から載荷点に向かって斜めの引張ひずみ領域が形成されていることが確認できる。またへ

ヘッド有りの場合では⑤スタッド根元部－③スタッドヘッド間で引張ひずみ領域が形成され終局に至ったのに対し、ヘッド無しの場合では⑤スタッド根元部から③スタッドヘッドを経由せずに載荷点方向へ斜めの引張ひずみ領域が形成され終局することが確認された。ヘッド有りの場合の終局時に形成される水平ひずみ領域の範囲は、スタッド配置間隔が70mmの場合と比較して小さいことから、スタッド配置間隔が大きい場合ではヘッドが合成版のせん断破壊に及ぼす影響は小さいと推測される。

5.3 最大荷重

図-14は、スタッド配置間隔が70mmの供試体においてスタッド高さおよびヘッドの有無の違いによる最大荷重の比較を示したものである。図中のプロットが実験値で、実線および破線が解析値であるが、両者の傾向は良く一致している。

ヘッド有りの場合で最大荷重を比較すると、スタッドの高さが大きくなるにつれて上昇することが示されている。それに対してヘッド無しの場合では、スタッド高さおよび配置間隔によらず125kN程度で最大荷重はほとんど一定となった。ヘッドの有無で最大荷重を比較すると、スタッド高さが約75mmで両者の値はほぼ同程度となり、それよりも大きいとヘッド無しの場合と比較してヘッド有りの場合の最大荷重は増加するが、低い場合には逆にヘッド有りの場合の方が小さくなる。

図-15は、スタッド高さが110mmの供試体において、スタッド間隔の違いによる最大荷重を比較したものである。ヘッド有りの場合は、配置間隔が大きくなると最大荷重が小さくなる傾向にあるが、ヘッド無しのスタッドを用いた場合は、上記同様に最大荷重は一定である。

実験および解析結果より、ヘッド無しのスタッドはその配置条件に関わらずせん断ひび割れの開口を抑制する作用はほとんど無いと考えられる。よってヘッドの無いスタッドを有する合成版のせん断耐力がスタッドのせん断補強効果を含まないと仮定すれば、図-14より通常使われている頭付きスタッドは部材高さの半分程度以上の長さがないとせん断補強効果が得られないと考えられる。

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試験および解析から得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 合成版部材の載荷中の剛性の変化は、スタッドのヘッドの有無やスタッド高さによる影響はほとんど無く、スタッドの配置間隔による影響のみ受ける。
- (2) スタッド高さが大きい場合、スタッドヘッドが存在することによりせん断ひび割れの開口が抑制されるが、一方でヘッド位置において斜めひび割れから分岐する水平ひび割れを出現させる。

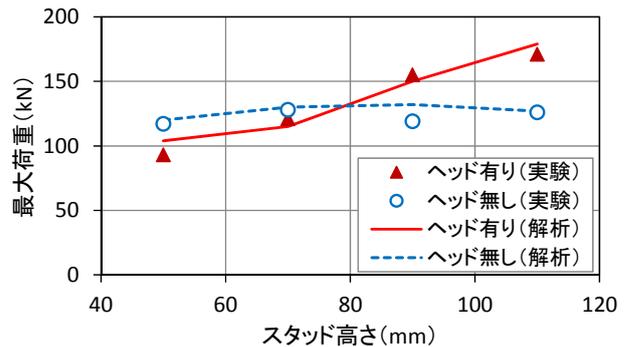


図-14 スタッド高さと最大荷重の関係

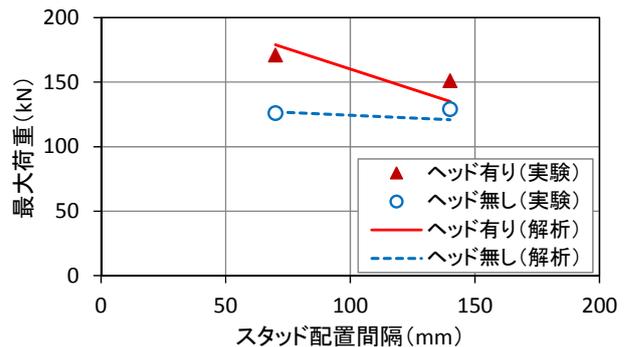


図-15 スタッド間隔と最大荷重の関係

- (3) スタッドヘッドがある場合、スタッド高さが部材高さの半分程度以上の長さがないとせん断補強効果が得られない。

謝辞 本研究の実験をおこなうにあたり、卒論生の梶原脩氏および松尾香咲氏に協力していただきました。ここに、謝意を表します。

参考文献

- 1) 2014年制定複合構造標準示方書 設計編, 土木学会, 2014
- 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
- 3) 伊藤翼, 古内仁, 高橋良輔, 梶原脩: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.2, 2016
- 4) TNO DIANA, User's Manual -- Release 9.6 <<https://dianafea.com/manuals/d96/Diana.html>>
- 5) 2012年制定コンクリート標準示方書 設計編, 土木学会, 2012
- 6) 中島章典, 猪股勇希, 齊川良輔, 大江浩一: 付着, 機械的作用を有する鋼・コンクリート接触面の静的・疲労性状に関する実験的検討, 土木学会論文集 A, Vol.63, No.4, 2007