

孔あき鋼板ジベルの引抜き耐荷挙動のバネモデルによる評価

An Estimation of Pull-out Behavior of Perfo-bond Strips using Spring Model

篠崎 裕生 HIROO SHINOZAKI
 竹之井 勇 ISAMU TAKENOI
 浅井 洋 HIROSHI ASAI
 三上 浩 HIROSHI MIKAMI

本文では、深さ方向に複数の孔あき鋼板ジベルを配した接合部に引抜き力を作用させた場合、各ジベルの破壊形態および耐力がその深さによって異なることを明らかにするとともに、破壊モードごとのジベルの耐力を仮定しその和で引抜き耐力を簡易に評価する手法を提案した。また、これまでの実験結果をもとに、各ジベルを非線形バネに置き換えて耐力を評価する方法が適用できることを確認し、さらに深さ方向にこれまでの倍の数のジベルを配した追加の引抜き実験を実施し、この評価方法の妥当性を明らかにした。

キーワード：孔あき鋼板ジベル、引抜き耐力、非線形バネ

Authors have already clarified the failure mode and ultimate capacity of perfo-bond strips depend on the depth of strip in case that the plural strips were arranged on the line of depth direction, and proposed a simplified method that evaluates pull-out capacities as summations of assumed ultimate capacities of each strip. In this study, we confirmed that nonlinear spring models is applicable for prediction of pull-out behavior as precision method and verified propriety of this method by simulating the results of additional pull-out test which examined the case having greater number of strips than before.

Key Words: Perfo-bond Strip, Pull-out State Capacity, Nonlinear Spring Model

1. はじめに

孔あき鋼板ジベル（以下、ジベルと呼ぶ）は、簡易に比較的大きなせん断抵抗力が得られるため、波形鋼板ウェブ橋や合成桁橋などのずれ止めとして、多く用いられている。これらの使用法は、コンクリート面と平行方向に作用するせん断力が卓越する部材接合部において、このせん断力に抵抗するように、ジベルをコンクリート面に沿って一列に配置することが一般に行われる。一方、コンクリート面に対して垂直方向への引抜き力が作用する接合部材において、ジベルをアンカー材としてコンクリートの深さ方向に複数配置する場合は考えられる。この具体的な例としては、合成構造橋脚基部における鋼材のフーチングへの定着や橋梁上部工における鋼主桁とコンクリート部材との接合部などがある。

ジベルをコンクリートの深さ方向に複数配置して鋼材に引抜き力を作用させた場合の挙動については、既報でジベルの深さによって各ジベルの破壊形態が異なることや引抜き耐力を各ジベル耐力の足し合わせで評価でき

ることなどを報告した¹⁾。

本研究では、ジベルのせん断ずれとせん断抵抗の関係を非線形バネに置き換えて FEM によって引抜き挙動を評価することを試みた。非線形バネを用いることの利点は、ジベルのずれ量が深さ方向で異なることを表現できるため、引抜き力作用点の引抜き量と耐力の関係を精度良く推定できることである。

既報では、深さ方向に最大 3 個のジベルを配置したケースで実験を行ったが、今回、6 個のジベルを配置したケースで追加の実験を行い、非線形バネによる評価の妥当性を検証した。

2. 非線形バネ特性の構築

(1) 鋼板表面の付着力特性

孔あき鋼板ジベルに関する既往の研究^{2)~3)}などでは、鋼板表面の付着を切らないで試験を実施することが一般的である。既報で実施した引抜き試験でも、付着は切らずに実施している。したがって、これらの試験で得られ

た孔あき鋼板ジベルの引抜き力には、ジベル自体のせん断抵抗力に鋼板表面の付着力が加算されたものとなっている。

ジベルのずれ変位とせん断力の関係を非線形バネに置き換える際には、この鋼板の付着力を分離して評価することとした。これは、鋼板の大きさやジベルの間隔が変化したときに鋼板の付着力が引抜き力に与える影響を適切に評価するためである。

鋼板表面の付着特性を確認するために、鋼板のみの引抜き試験を実施した。図-1 に供試体の形状寸法を示す。鋼板の埋め込み長さは 90mm (C0-S) と 230mm (C0-L) の 2 種類としており、これは既報の C1-T, C1-B, C3-1 供試体の埋め込み長さに対応している。したがって、これら 2 つの供試体によりバネモデルに入力する鋼板表面の付着特性を明らかにするとともに、ジベルを有する供試体との差分から、ジベル単体のずれ変位-せん断力関係を導く。

鋼板のみの引抜き試験における荷重方法や拔出し変位の計測方法などは既報¹⁾に示すものと同じである。また、試験時期も同じため、使用材料の特性値も同じである。なお、荷重方法は、コンクリート面からの鋼板の拔出し変位が 0.1mm に達するまで荷重制御による単調荷重を、その後は変位制御により、0.1mm ずつ変位を増加させるごとに荷重をゼロに戻す漸増繰返し荷重を行っているが、グラフは荷重のピークを結んだ包絡線として表示した。

図-2 にジベルなしの供試体の試験結果を示す。埋め込み長さ 90mm の供試体は拔出し量が 0.29mm のときに最大荷重 23.2kN を示した後、ほぼ一定の割合で引抜き力が低下した。後の解析を簡単にするため、以下の式(1)で実験結果を近似した。最大荷重までは指数関数曲線で、それ以降は直線で近似した。

$$\left. \begin{aligned} P &= P_{max} \times (1 - e^{-\alpha \times \delta})^\beta & 0 \leq \delta \leq \delta_{Pmax} \\ P &= P_{max} - \gamma \times (\delta - \delta_{Pmax}) & \delta_{Pmax} \leq \delta \end{aligned} \right\} (1)$$

ここに、 P_{max} は最大荷重あるいは勾配が大きく変化したときの荷重、 δ は拔出し変位、 δ_{Pmax} は最大荷重時あるいは勾配が大きく変化したときの拔出し変位、 α 、 β は係数、である。最小二乗法で C0-S 供試体を近似した結果、 $\alpha = 44$ 、 $\beta = 1.0$ 、 $\gamma = -1.17$ となった。

なお、実験は拔出し変位が 10mm に達した時点で荷重を終了させたが、それ以降も近似した直線の勾配で荷重が低下することとした。

埋め込み長さ 230mm の供試体(C0-L)は拔出し変位が

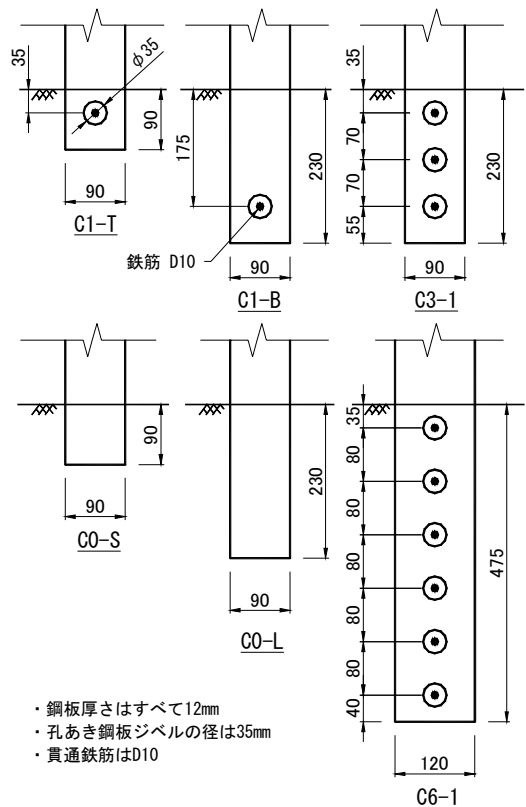


図-1 供試体形状寸法

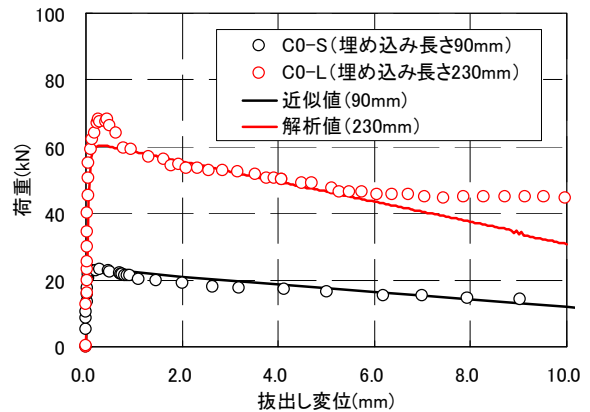


図-2 鋼板のみの引抜き試験結果

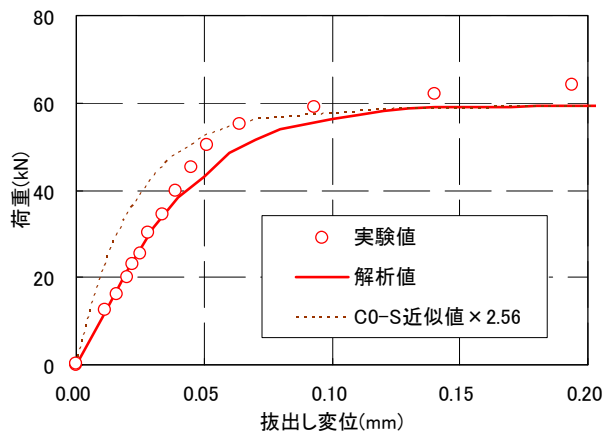


図-3 鋼板のみの引抜き試験結果 (微小変位部)

0.45mm のときに最大荷重 68.2kN を示した後、ほぼ一定の割合で荷重が低下した。C0-S 供試体に対して C0-L 供試体は 2.56 倍の付着面積を有しているため、C0-S 供試体を基準にすると C0-L 供試体の最大荷重は 59.4kN となるが、実験値は若干大きめとなっている。

図には 3. (1) で述べる非線形バネを用いた FEM モデルで解析した結果を併記した。モデルは C0-L 供試体の埋め込み部を 3 分割し、バネ特性として C0-S 供試体の近似値を入力した 3 つのバネで構成した。解析結果は最大荷重付近のオーバーシュートは再現できないが全体の挙動を比較的良好にシミュレーションできていることが分かる。

図-3 は、図-2 の抜け出し変位が 0.2mm までを拡大して表示したものである。図には C0-S 供試体の近似値を単純に 2.56 倍した値を併記した。図より非線形バネを用いた解析値が載荷初期の挙動を精度良く表現していることが分かる。

以上の検討から、鋼板表面の付着力特性については、C0-S 供試体の近似値を基本とすることとした。

(2) ジベル単体のずれ変位－せん断力関係

ジベル単体のずれ－せん断力関係は、以下の手順で求めた。①ジベル付き鋼板 (C1-B, C1-T 供試体) の引抜き試験結果を式(1)で近似する、②①の近似値からそれぞれジベルなしの C0-L, C0-S 供試体の引抜き試験結果の近似値を差し引く。

C1-T, C0-S 供試体から得られた浅い位置にあるジベル単体のずれ－せん断力関係は、上記手順で得られた引抜き変位と荷重の関係をそのまま用いる。しかし、C1-B, C0-L 供試体から得られた深い位置のジベル単体の引抜き変位－荷重関係の変位のなかには、ジベルより上の位置の鋼板の伸びが含まれるため、鋼板のひずみ値(計測値)からその伸びを計算し、引抜き変位から減ずることで、ずれ変位－せん断力関係とした。

図-4 は深い位置にあるジベルの引抜き試験結果と、ジベル単体のずれ－せん断力関係を示したものである。C1-B 供試体は引抜き変位 0.7mm 以降勾配が緩やかになるものの、貫通鉄筋の負担が増加することにより荷重は徐々に増加し続け終局時に貫通鉄筋が破断して荷重が大きく低下した。ジベルは十分に深い位置にあるので、コンクリート表面に損傷は生じていない。実験結果を式(1)で近似した結果、 $\alpha = 4.1$, $\beta = 0.51$, $\gamma = 1.9$ となった。鋼板表面の付着の影響を差し引いたジベル単体の挙動は図-4 に示すとおり鉄筋破断まで緩やかに荷重が増加するものとなった。

図-5 は浅い位置にあるジベルの結果である。引抜き

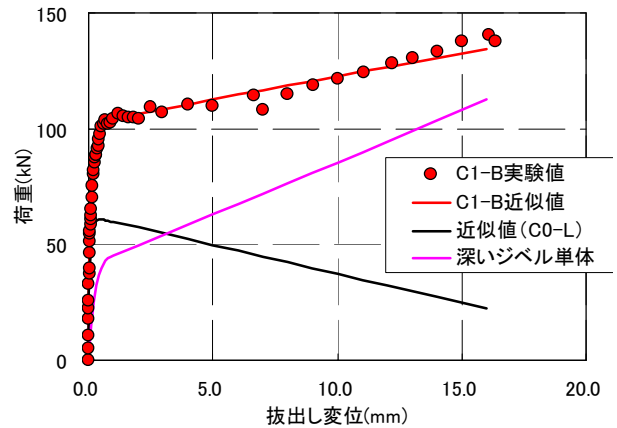


図-4 ジベル単体の抜出し変位と荷重の関係 (深さ 175mm)

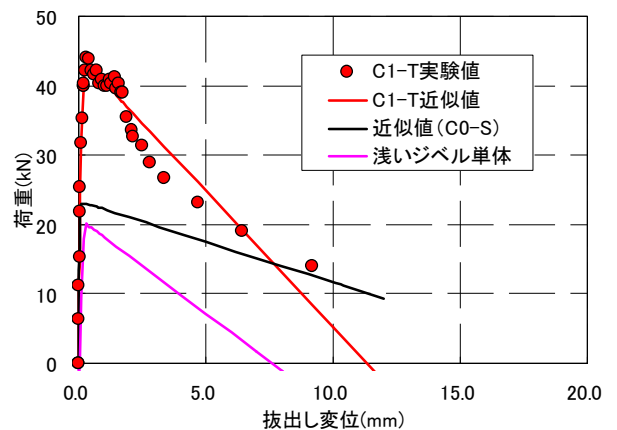


図-5 浅いジベル単体の抜出し変位と荷重の関係 (深さ 35mm)

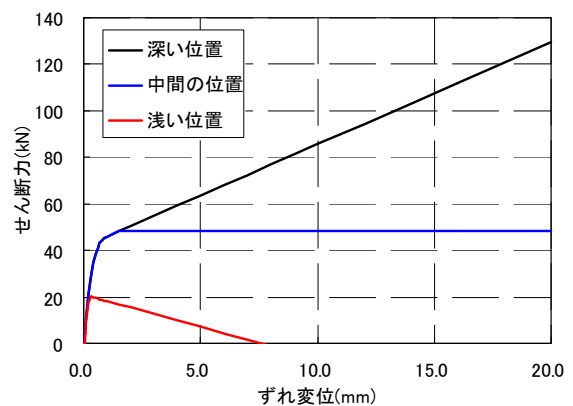


図-6 ジベル単体のずれ変位とせん断力の関係

試験の結果は、拔出し量 0.4mm、最大荷重 44kN に達した後、拔出し量 1.7mm に達したところでジベル付近のコンクリートが広い範囲で浮き上がり、荷重が大きく低下した。ジベルが浅い位置にある場合、ジベルが本来有するせん断耐力を発揮する前にジベルより上方にあるコンクリートが貫通鉄筋とともに持ち上がり、剥離破壊する。したがって、貫通鉄筋への負担がほとんど生じないため、微小な引抜き変位で最大荷重を示した後は、荷重

は単調に低下したものとなっている。

ジベル単体のずれせん断力関係を図-6 にまとめた。中間の位置とは、C3-1 供試体における高さ中央位置のジベルに相当するものであるが、これはこの位置のみにジベルがある供試体の実験をしていないため、浅いものと深いものの中間的な特性を持つものを仮定した。これは C3-1 供試体の破壊状況¹⁾において、中間位置のジベル上方のコンクリートもコーン状に剥離している状況が見られたものの、貫通鉄筋は終局後もコンクリート中にしっかりと定着されており、貫通鉄筋がせん断力に対して応分の負担していることが予想されたためである。設定方法としては、深い位置のジベルの式(1)における P_{max} までは同様に推移し、それ以降は一定のせん断力になるようにしている。

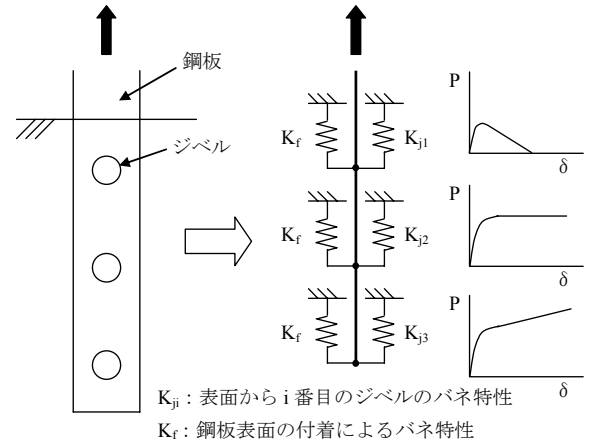


図-7 非線形バネモデル

3. 非線形バネを用いた解析

(1) 解析モデル

非線形バネによる解析モデルの概要を図-7 に示す。鋼板と同じ剛性を持つ棒要素の孔あき鋼板ジベル位置の節点において、鋼板の付着特性をモデル化したバネと、ジベル自体のずれせん断力関係をモデル化したバネを並列に配置する。鋼板の付着特性は、ジベル間距離 (1 箇所のバネが負担する鋼板の表面積) およびコンクリート強度に応じて、図-2 の C0-S 供試体実験結果の近似値を補正する。コンクリート強度の影響については、鋼板とコンクリートの付着強度がコンクリート強度比の平方根に比例するものとして補正した。また、コンクリート表面から 3 番目のジベルよりも深い位置にあるジベルのバネはすべて、3 番目のジベルのバネと同じものを用いた。

(2) 解析結果

a) C3-1 供試体

C3-1 供試体の実験値と計算値との比較を図-8 に示す。実測最大荷重 213kN に対して計算値は 170kN と 2 割程度小さな値となったが、载荷初期の立ち上がりや、貫通鉄筋の破断など全体的な挙動はおおむね良く一致していることが分かる。

b) C6-1 供試体

C6-1 はジベルを 6 個深さ方向に配置した供試体である。図-1 に供試体の形状寸法を示す。C3-1 供試体とジベルの孔径や貫通鉄筋の径は同じであるが、ジベル間隔が C3-1 が 70mm であるのに対し、C6-1 は 80mm としたため、これを鋼板の付着面積が増加していることとして考慮した。試験時のコンクリートの圧縮強度は C3-1 供

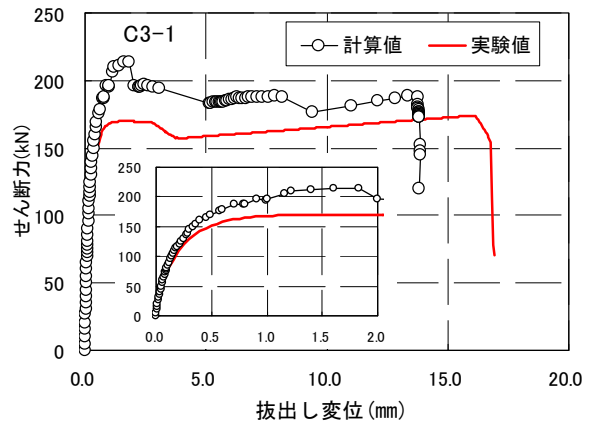


図-8 実験値と計算値の比較 (C3-1)

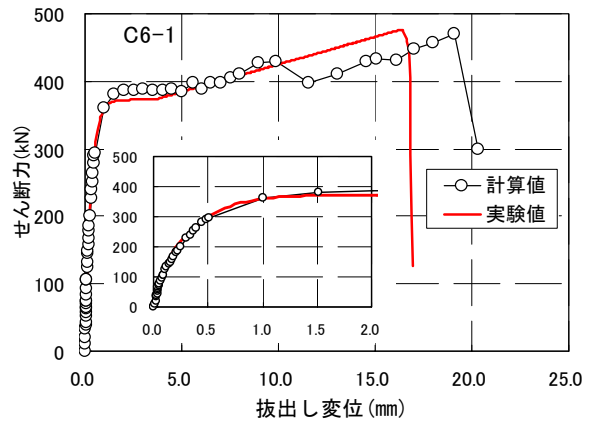


図-9 実験値と計算値の比較 (C6-1)

試体の 41.4N/mm^2 に対して 33.1N/mm^2 であった。

C6-1 の実験結果を図-9 に示す。C6-1 供試体は、拔出し変位 1.5~2.0mm で鋼板付近のコンクリート表面が円周状に浮き上がる現象が見られ、その後荷重の増加が緩やかになった。変位が 10mm に達した時点で先のひび割れの外側に、2 段目のジベルからのコーン破壊によると思われる鋼板を中心とした円周状のひび割れが生じて一時的に荷重が低下した。その後、徐々に荷重が回復し

変位 20mm 付近で複数の貫通鉄筋が破断する音が確認され、荷重が大きく低下したため試験を終了した。

計算値は変位 1.5mm 程度で荷重の増加が緩やかになり、しばらく荷重一定の区間がある。その後、荷重が再び増加し、変位が 16.5mm のときに最大荷重 473kN を示した。実測最大荷重は 470kN であった。計算値は載荷初期の剛性も良く表現できており、モデルの妥当性が検証できた。

図-10 は、鋼板の深さ方向のひずみ分布を計算値と比較したものである。図中の数値は抜きし変位を示す。

計算値によるひずみ分布は、鋼板の深い位置まで実験値の全体的な傾向をよく表現できている。実測値では、表面付近の付着切れが比較的初期に生じており、ひずみの勾配が小さくなっている。これは繰り返し载荷の影響も影響していると考えられる。計算値では、抜け出し変位が 1mm を越えた付近からコンクリート表面に近いジベルのずれ量の増大によりせん断負担が減少し、表面付近のひずみの勾配が小さくなっている。

4. まとめ

孔あき鋼板ジベルのせん断ずれとせん断抵抗の関係を非線形バネに置き換えて FEM によって引抜き耐荷挙動を評価することを試みた。そして、著者らが実施したジベルの引抜き試験結果との比較検討により、その妥当性を検討した。検討の結果、以下のことが明らかとなった。

- ①鋼板表面の付着力による影響と、ジベル自体のせん断抵抗力を分離してバネモデルに反映させることで、精度の高い解析結果が得られた。
- ②ジベルのずれ変位とせん断力の関係および鋼板のずれ変位と付着力の関係は、指数関数と直線の組み合わせでおおむね評価可能である。
- ③ここでの実験の範囲では、コンクリート表面から 2 個目までのジベルについては、コンクリート表面の破壊を考慮したバネのモデル化が必要である。それより深いジベルはすべて同じバネモデルで評価できる。
- ④ジベルを深さ方向に 6 個配置した供試体の解析を当該モデルで行い、その耐力や変形を良い精度で表現でき、モデルの妥当性が検証できた。

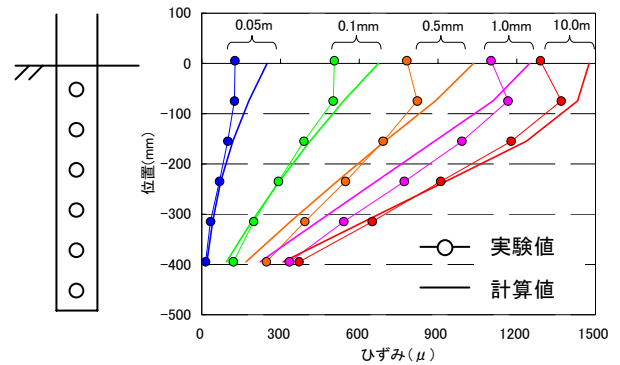


図-10 ひずみ分布の比較 (C6-1)

アンカーなどとしての孔あき鋼板ジベルの用途が今後増加すると考えられる。これらを実際に設計する場合には、終局時の抜きし量や引抜き耐力などの定着部の挙動を精度良く把握し安全性を評価することが必要である。そのためには本文で示したような手法を用いることが必要であり、その一助となれば幸いである。今後、このような設計で必要となるジベルのずれ変位-せん断力関係の汎用モデルを構築して行く予定である。

参考文献

- 1) 篠崎ら：孔あき鋼板ジベルの引抜き耐力に関する実験的研究，三井住友建設技術研究所報告 第 5 号，pp.51-56，2007
- 2) 保坂ら：孔あき鋼板ジベルのせん断特性に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.46A，pp.1593-1604，2000
- 3) 保坂ら：孔あき鋼板ジベルのせん断強度評価式と設計法に関する研究，構造工学論文集，Vol.48A，pp.1265-1272，2002