

3次元弾塑性 FEM による孔あき鋼板ジベルの設計式に関する基礎的考察

A fundamental study on the design formula of perfobond shear connector using 3D elasto-plastic FEM

園田佳巨*・手嶋康博**

Yoshimi SONODA and Yasuhiro TESHIMA

*工博 九州大学大学院教授 工学研究院建設デザイン部門 (〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744 番地)

**パシフィックコンサルタンツ株式会社 交通技術本部 鉄道部 (〒163-0730 東京都新宿区西新宿 2 丁目 7-1)

Recently, many composite structures made of concrete and steel have been developed and various shear connectors are presented in order to increase their load carrying capacity. Among these connectors, a new type of shear connector called “perfobond shear connector” has been developed and design formulas of it are derived by experimental studies. The most popular and fundamental one is presented by Leonhardt. Although the formula of Leonhardt is widely used, it is pointed out that the applicable scope has not confirmed well. Thus, parametric analyses using 3D elasto-plastic FEM for the perfobond shear connector are performed in order to investigate appropriateness and applicable scope of them in this study. Furthermore, shear fracture behavior between rib and concrete is simulated in the analyses.

Key Words: perfobond shear connector, design formula, composite structure, FEM

キーワード: 孔あき鋼板ジベル, 設計式, 複合構造, 有限要素法

1. 序論

従来、橋梁構造物などの構造形式として、鋼構造や RC 構造などが主に適用されてきたが、複数種類の材料を組み合わせ、それぞれの長所を活かした複合構造形式が採用される機会が増加してきている。鋼とコンクリートの複合構造は、RC 構造に比べて自重が軽減できるだけでなく、プレキャスト化により施工の合理化が図れるなど、その利点は大きい。しかし、複合構造は複数の材料から構成されるため、それぞれの材料の境界面で十分な応力伝達を図るためのずれ止めが必要となる。一般に、ずれ止めとして用いられているのは機械的なずれ止めであり、その中でもこれまでに最も広く利用されてきたのは「スタッドジベル」である。スタッドジベルとは、鋼とコンクリートの接合面となる鋼板にアンカーとなる鋼棒を溶接し、コンクリート中に埋め込むことで、ずれ止めの役割を果たすもので、安価で施工が容易であるなどの長所を有している。しかし、スタッドジベルは疲労強度が低いという欠点も指摘されている。そこで、近年では穿孔した鋼板をコンクリート中に埋め込むことで、鋼材とコンクリートの一体化を図る「孔あき鋼板ジベル」の適用事例が増加している^{1)~4)}。孔あき鋼板ジベルは、スタッドジベルと同様に鋼材に溶接して用いるものであるが、スタッドジベルよりも剛性が高く、疲労強度も優れていることが確認されている。また、スタッドジベルと比較して埋め込み高さが低いため、接合部をよりコンパクトな断面として設計できるなどの長所もある。

孔あき鋼板ジベルに関しては、過去の実験的研究から得られた耐力を整理・考察して設計式が誘導されており、複数の研究者により種々の耐力算定式が提案されている。しかし、これらは限られた供試体数で行われた実験から求められた実験式であり、解析的な見地から孔あき鋼板ジベルの耐力や破壊モードなどに関する詳細な検討を行ったものは少なく、その適用範囲については不明瞭な部分が多い。

そこで、本研究では孔あき鋼板ジベルの 3次元弾塑性有限要素解析を行い、既往の設計式の中でも基本的で簡易な式と考えられる Leonhardt の式に関して、その妥当性と適用範囲に関する考察を解析的に試みると同時に、Leonhardt の式では評価できない孔の配置が耐荷特性に与える影響について、解析的な検討を試みた。

2. 孔あき鋼板ジベルの概要

2.1 既往の研究

孔あき鋼板ジベルは、1987 年に Leonhardt らによって提案された接合形式であり、1992 年に合成桁であるベネズエラの Third Caroni Bridge に適用されている。Leonhardt らは、孔あき鋼板ジベルの 2 面押抜きせん断試験を行い、孔中のコンクリートがせん断破壊する場合の耐力と鋼板自体がせん断破壊する場合の耐力を、それぞれ個別の評価式として提案した⁵⁾。Oguejiofor らは Leonhardt らと同様に 2 面せん断試験を行い、頭付きスタッドを用いた実験から導かれた Davies の耐力式を参考にして孔あき鋼板ジベルの

耐力式を示した⁶⁾。また、Medberry らは Oguejiofor らの式に鋼フランジとコンクリートの付着力の影響を考慮することを試みている⁷⁾。孔あき鋼板ジベルの耐力については、国内でも数多くの実験が行われており、保坂らは孔に鉄筋を通すことによる耐力の上昇に着目し、貫通鉄筋の有無による2種類の耐力評価式を提案した⁸⁾。また、望月らは供試体試験と接合部をばねモデルに置換した解析により、PBLの荷重分担率に関する簡易推定法を提案している⁹⁾。このように、孔あき鋼板ジベルの耐力評価式は数多く存在するが、本研究では Leonhardt の式を対象に検討を行った。これは、Leonhardt の式が現在でもしばしば用いられていること、孔あき鋼板ジベルの破壊モードの中でも重要な孔中のコンクリートのせん断破壊にともなう耐力を最も単純な形式で表現していることなどが理由である。

2.2 孔あき鋼板ジベルの抵抗機構

図-1に孔あき鋼板ジベルの模式図を示す。孔あき鋼板ジベルは方向により抵抗機構が異なる。図中のずれ方向および肌離れ方向に関しては、孔の中に充填されたコンクリートのせん断抵抗により鋼とコンクリートの相対的なずれに対して抵抗する。一方、面外方向に関しては鋼板面の支圧力によって抵抗する。一般に設計時に考慮されるのは、ずれ方向と肌離れ方向であり、これまでに提案された耐力式もこれらの方向へのずれ挙動に対するせん断耐力の評価式となっている。

図-2に示すように、ずれ方向に鋼板がスライドした場合、孔中のコンクリートは鋼板面に沿って2面せん断を受ける状態となり、耐力に達すると孔中コンクリートが鋼板面に沿ってせん断破壊し、鋼板と共にずれることが考えられる。一方、孔と孔の間の鋼板断面積が小さく、鋼板の耐力がコンクリートと比較して小さい場合には、コンクリートがせん断破壊する前に鋼板がせん断破壊することも想定される。また、鋼板の板厚が薄い場合には、孔中のコンクリートが鋼板から受ける支圧力がせん断力よりも卓越し、圧壊することも考えられる。今回の検討対象とした Leonhardt の式は、孔中のコンクリートが圧壊しないような板厚を設定することが前提となっているため、本研究では十分な鋼板厚を有し、「コンクリートのせん断破壊」と「鋼板のせん断破壊」の2種類の破壊モードが想定される孔あき鋼板ジベルに限定して検討した。

2.3 Leonhardt の式

Leonhardt の式は以下の形で表される。

$$P_c = 2 \cdot (\pi d^2 / 4) \cdot 0.9 \cdot n \sigma'_c \quad (1)$$

$$P_s = 1.44 A_s \sigma_{sy} \quad (2)$$

ここに、

P_c : 孔中コンクリートがせん断破壊する場合の1孔あたりの耐力(N)

d : 孔径(mm)

n : コンクリートの円柱供試体強度と立方体強度の比

σ'_c : コンクリートの円柱供試体強度(N/mm²)

P_s : 鋼板のせん断破壊に対する耐力(N)

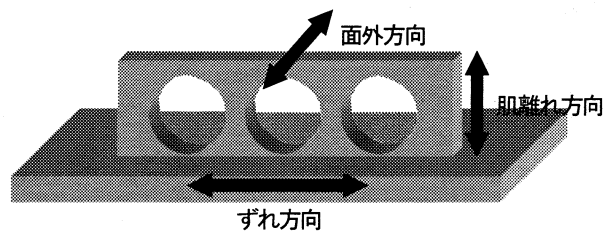
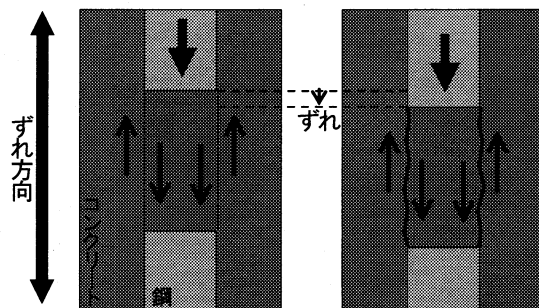
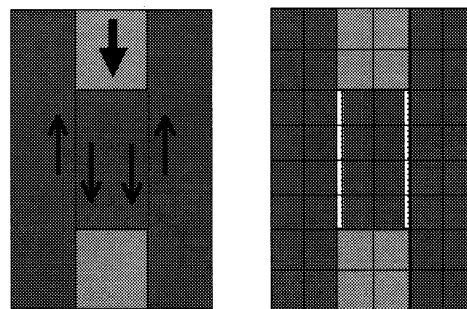


図-1 孔あき鋼板の模式図



(a) せん断破壊前 (b) ずれ発生後

図-2 孔中コンクリートのずれ挙動



(a) 実構造物 (b) FEM モデル

図-3 ずれ要素作成状況

A_s : 孔間の鋼板の断面積(mm²)

σ_{sy} : 鋼板の降伏強度(N/mm²)

2つの式が示すように Leonhardt の式は、2種類の破壊モードに対する耐力評価式から成り立っている。そのため、所定の寸法の孔あき鋼板ジベルに対して、上記2種類の式を用いて計算し、 $P_c < P_s$ の場合はコンクリートのせん断破壊が、 $P_c > P_s$ の場合は鋼板のせん断破壊が生じることになり、 P_c と P_s のうち小さい方の値がその孔あき鋼板ジベルの耐荷力とみなされる。

3. 孔中コンクリートのずれ挙動のモデル化

3.1 提案手法

前述のように、孔あき鋼板ジベルは複数の破壊モードが想定されるが、その中でも最も解析的に再現が困難なのは孔中のコンクリートがせん断破壊する場合と考えられる。FEMは連続体をベースとした解析手法であるため、コンクリートに不連続面が形成され、ずれが生じるような解析には適していない。そのため、このような現象を表現するためには何らかの工夫が必要となる。そこで、図-3に示すように、ここでは不連続面を形成する位置にあらかじめ薄い等方弾性体の要素(以下、ずれ要素と呼ぶ)を作成し、

作用するせん断ひずみエネルギーの増加とともにせん断弾性係数を低減させることにより擬似的にせん断破壊を表現することを試みた。つまり、等方弾性体の[D]マトリックスを体積弾性係数 K 、せん断弾性係数 G により記述し、せん断弾性係数に低減係数 β ($0 \leq \beta \leq 1$) を乗じることで低減させた。なお、本研究では汎用解析ソフト MSC.MARC2005r3 を用いた。せん断弾性係数を低減させる条件として、せん断ひずみエネルギーを用いて、偏差応力の2次不変量 J_2 の増加による β の減少を仮定した。

具体的な J_2 と β の関係を規定することは困難であるが、今回は簡単な仮定のもとで定義した。すなわち、ずれ要素のせん断ひずみエネルギーがコンクリートのせん断耐力時のエネルギーに達した時に β の減少が始まることを仮定した。また、式(1)を用いて孔あき鋼板ジベルの最大耐力時にせん断破壊面が受け持つせん断応力を計算すると、

$$\frac{P}{2 \cdot (\pi t^2 / 4)} = 0.9 \cdot n \sigma'_c$$

となる。 n は 1.1~1.2 程度の値であるので、右辺はほぼ圧縮強度に等しくなる。以上のことから、 β の減少開始時と最大耐力時のせん断ひずみエネルギー W および J_2 は以下のように定義できる。 β の減少開始時の W はコンクリートのせん断耐力を τ_u とすると、

$$W = \frac{1+\nu}{E} J_2 = \frac{\tau_u^2}{2G} \quad \rightarrow \quad J_2 = \tau_u^2$$

となる。なお、コンクリートのせん断強度が一般に圧縮強度の 1/6~1/4 程度¹⁰⁾ であることから、 $\tau_u = \sigma'_c / 4$ とした。最大耐力時の W は

$$W = \frac{1+\nu}{E} J_2 = \frac{\sigma_c'^2}{2G} \quad \rightarrow \quad J_2 = \sigma_c'^2$$

となる。

以上の仮定を用いると、 β の減少開始から最大耐力に至るまでの β - J_2 の間には、図-4 に示すような簡易な線形関係が仮定できる。図-5 に β 減少時の変形状況の模式図を示す。ずれ要素のせん断ひずみエネルギーが小さいうち ($\beta=1$) は、弾性体として荷重伝達を行う。鋼板とコンクリートのずれが大きくなり J_2 が増大すると、 β はほぼ 0 となり、図-5 (b) に示すように大きくせん断変形する。これにより、孔中のコンクリートと外側のコンクリートの間にひび割れ面が形成され、ずれが発生するという実際の挙動を擬似的に表現することにした。

3.2 提案手法の妥当性の検討

(1) 解析対象の概要

3.1 で提案した解析手法について、妥当性の確認のために、過去に行われた実験を参考に比較検討を行った。ここでは、古市らによって行われた孔あき鋼板ジベルの押抜きせん断試験¹¹⁾を対象に、3次元弾塑性有限要素解析に前述の解析モデルを組み合わせ、実験結果の再現性を確認した。古市らによって行われた実験の供試体図を図-6 に示す。実験は孔あき鋼板の鋼板厚さ、孔の中心間隔、鋼板長さをパラメータに複数の供試体で行われているが、ここではその中の1つを対象に比較を行った。対象とした供試体の鋼

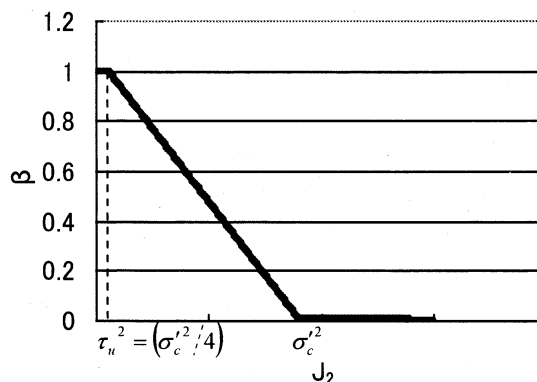
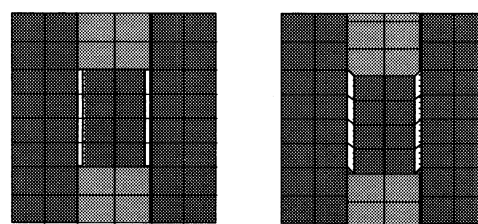
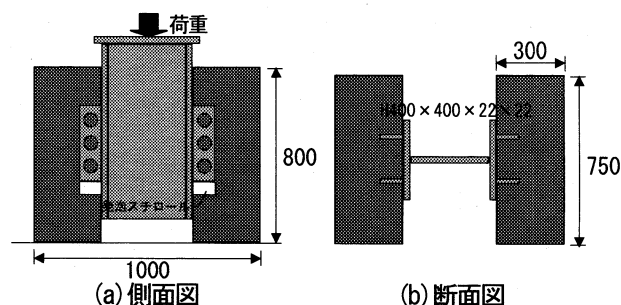


図-4 β - J_2 関係



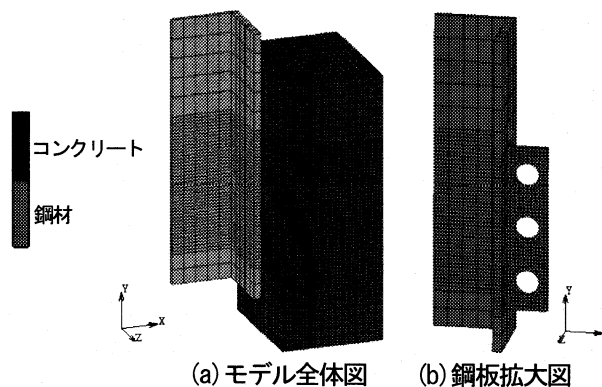
(a) $\beta=1$ (弾性) (b) $\beta=0$ (せん断破壊)

図-5 β 減少時のずれ要素の変形状況



(a) 側面図 (b) 断面図

図-6 押抜きせん断試験供試体図 (単位: mm)



(a) モデル全体図 (b) 鋼板拡大図

図-7 実験モデルの要素分割図

表-1 実験モデルの材料定数

	ヤング率 (N/mm ²)	ポアソン比	圧縮強度 (N/mm ²)	降伏強度 (N/mm ²)
コンクリート	30000	0.2	36.3	-
孔あき鋼板	210000	0.3	-	333

板の寸法は、孔径 60mm、鋼板厚さ 12mm、孔の中心間隔 140mm、鋼板長さ 420mm となっている。なお、この鋼板寸法を用いて式(1)(2)を計算すると、式(1)の値は 646kN、

式(2)の値は 1381kN となり、明らかにコンクリートがせん断破壊することがわかる。ただし、この計算値は鋼板 1 枚あたり (孔 3 つあたり) の耐力である。

(2) 解析モデル

実験供試体を有限要素でモデル化したものを図-7 に示す。解析モデルは供試体の寸法を忠実に再現している。ただし、解析時間の短縮のため、供試体の対称性を考慮して 1/4 モデルとして作成している。つまり、図-6 に示すように実際の供試体には 4 枚の孔あき鋼板が設けられているが、解析モデルには 1 枚のみが含まれている。境界条件は実験と同様にコンクリートの底面を完全拘束し、H 鋼の上面に荷重として強制変位を与えている。材料定数は古市らの実験と同様の数値を与えている (表-1 参照)。材料構成則は、図-8 に示すようにコンクリートは圧縮側で圧縮強度の 0.85 倍で降伏する完全弾塑性モデルとし、引張側では圧縮強度の 0.1 倍を引張強度とし、それ以降は線形軟化を生じるモデルとした。なお、コンクリートの圧壊は想定していないが、これは前述したように Leonhardt の式が圧壊しない程度の板厚を確保することを前提としているためである。鋼材については降伏後の剛性を初期剛性の 1/100 とするバイリニアのモデルにしている。降伏条件についてはコンクリートと鋼材のいずれも Mises の降伏条件を適用している。鋼材とコンクリートの接合面における力の伝達特性については、支圧力のみを伝達し、付着力や摩擦力の影響については考慮していない。

(3) 解析結果および考察

図-9 に荷重と鋼-コンクリート間の相対ずれ関係を示す。本解析に用いたモデルおよび対象供試体は 1 枚の鋼板に孔を 3 つ有しているが、ここで示す相対ずれは中央の孔の中心位置における鋼材とコンクリートの鉛直方向の変位の差を取っている。荷重は鋼板 1 枚あたりが受け持つ荷重である。なお、図中には実験値も示している。これらを比較すると、実験では約 500kN で最大耐力を示し、その後徐々に剛性が低下しているのに対し、解析では約 600kN 付近まで耐力が上昇し、最大耐力時の相対ずれ量も実験値より大きくなっている。また、初期勾配も解析値の方が小さい。この初期勾配や変位量の差は現実には存在する付着力や摩擦力の影響を無視していることが一つの要因であると考えられる。また、最大耐力については、実験値は 500kN 程度であるが、設計式から計算した値は 646kN と解析値に近いものであった。したがって、この耐力差は供試体の個体差による可能性が考えられる。これらの結果から、本解析手法は変形量を精度良く求める目的には適していないが、耐力評価には用いることが可能であると考えられる。

4. 設計式に関する検討

4.1 単一孔鋼板ジベルに対する妥当性に関する検討

(1) 目的

Leonhardt の式は、式(1)(2)に示すように 2 種類の式から成り立っており、それぞれの式の計算値の大小により破

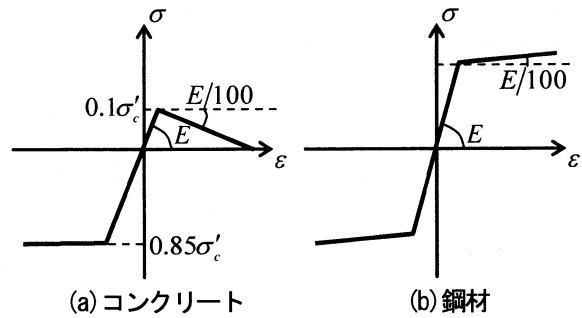


図-8 材料構成則

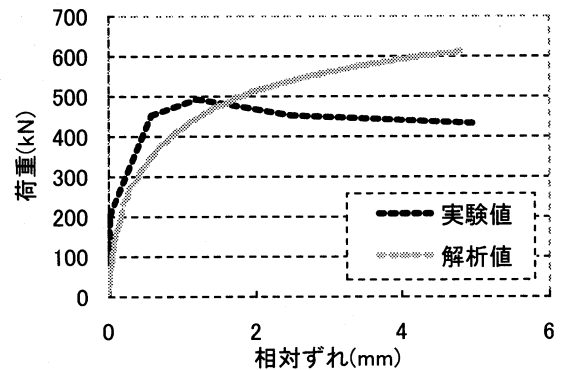


図-9 荷重-相対ずれの実験値と解析値の比較

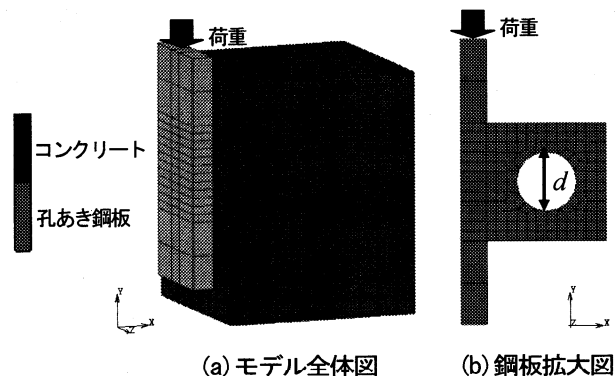


図-10 単一孔モデルの要素分割図

表-2 単一孔モデルの材料定数

	ヤング率 (N/mm ²)	ポアソン比	圧縮強度 (N/mm ²)	降伏強度 (N/mm ²)
コンクリート	28000	0.2	30.0	-
孔あき鋼板	210000	0.3	-	295

壊モードが決定され、小さい方の値が最大耐力となるが、この式は孔径と孔間の鋼板の断面積のみをパラメータとした簡易なものである。ここでは鋼板の寸法を固定し、孔

径を変動させた検討を行い、この式の妥当性について解析的な検討を行った。

(2) 解析モデル

想定した解析モデルを図-10 に示す。このモデルは、200×200×250mm のコンクリートブロック中に 100mm 四方の鋼板に孔径 d の孔を 1 つ設けた孔あき鋼板を埋め込んだ形式となっている。鋼板の板厚は 22mm であり、支圧により孔中のコンクリートが圧壊しないように十分に大

きな板厚を確保している。また、鋼板下面に接するコンクリートは、支圧を除去するために想定される最大相対ずれより大きな押し抜き方向長さの空洞を設けている。よって、このモデルは作用する荷重に対して孔内のコンクリートのみで抵抗することになる。孔径 d は 30～80mm の範囲で 6 つのモデルを作成した。境界条件はコンクリートブロックの底面を完全拘束し、図-10 に示すようにコンクリートの外に出ている鋼板の上面に下向きの強制変位を与えた。解析に用いた材料定数を表-2 に示す。材料定数、降伏条件および異種材料間の接触条件は、3 節で行った解析と同様のものを用いている。なお、4 節で行う解析はいずれも同じ材料条件、接触条件を用いて解析を行っている。

(3) 荷重－相対ずれ関係

単一孔モデルの荷重－相対ずれ関係を図-11 に示す。この図から、孔径の拡大に伴い最大耐力が増加していることが認められる。ただし、耐力の増加は $d=60\text{mm}$ でほぼ頭打ちになり、 $d=80\text{mm}$ では若干低下している。荷重 100kN 以降を見ると、 $d=80\text{mm}$ は $d=60, 70\text{mm}$ よりもわずかに剛性が低い。このことから、 $d=80\text{mm}$ のモデルは他のモデルと破壊モードが異なることが推察される。

(4) 孔あき鋼板の相当ひずみ分布

図-12 に図-11 で荷重がピークに達したときの各孔径モデル鋼板の相当ひずみ分布および変形状況を示す。 $d=70, 80\text{mm}$ は完全にピークに達していないが、ほぼ剛性が失われていると考え、解析終了時の図を示している。図中で黒く表示されている領域は、降伏ひずみ (1.405×10^{-3}) を超過した部分である。この図を見ると、 $d=70, 80\text{mm}$ のモデルでは鋼板の大部分が降伏しており、形状も大きく変わっていることから、明らかに鋼板がせん断破壊を示していることがわかる。 $d=60\text{mm}$ も降伏部位が広がっているが、このモデルでは鋼板の降伏と荷重がピークに達するのがほぼ同時であったため、 $d=60\text{mm}$ が破壊モードが切り替わる境界に近いと推測される。図-11 において $d=60\text{mm}$ までは荷重のピークが明確に表れているため、ここでは孔径 $d=60\text{mm}$ 以下のモデルでコンクリートがせん断破壊を示すものと判断した。

(5) 設計式と解析結果の比較

図-13 に式(1)(2)を用いて本解析モデルの耐力を計算したグラフと、図-11 の各孔径の最大耐力をプロットしたものを示す。図中の凡例がコンクリートの線は式(1)による耐力を、凡例が鋼板の線は式(2)による耐力を、各孔径の鋼板寸法毎に計算したものである。このグラフから、Leonhardt の式を用いると $d=70\text{mm}$ 付近で破壊モードが変化することが示されている。前述の(3)(4)の結果から、解析上では $d=60\text{mm}$ 以下でコンクリートがせん断破壊していると判定されたことから、Leonhardt の式が示す破壊モードと概ね一致していることがわかる。また、最大耐力の値もコンクリートがせん断破壊する領域では良く一致しており、鋼板の孔径をパラメータとした式(1)が定量的にも妥当なものであることが認められる。

以上の結果から、孔を 1 つだけに限定した場合、Leonhardt の式は精度が高い評価式であることがわかった。

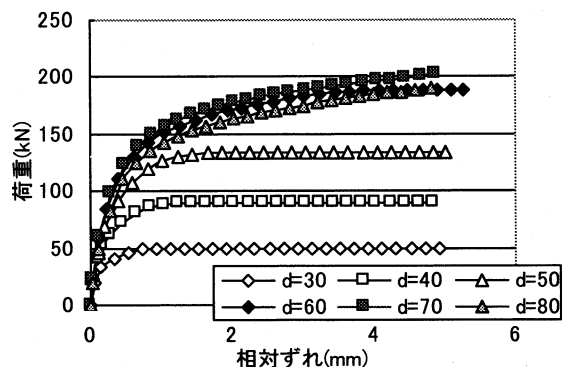


図-11 単一孔モデルの荷重－相対ずれ関係

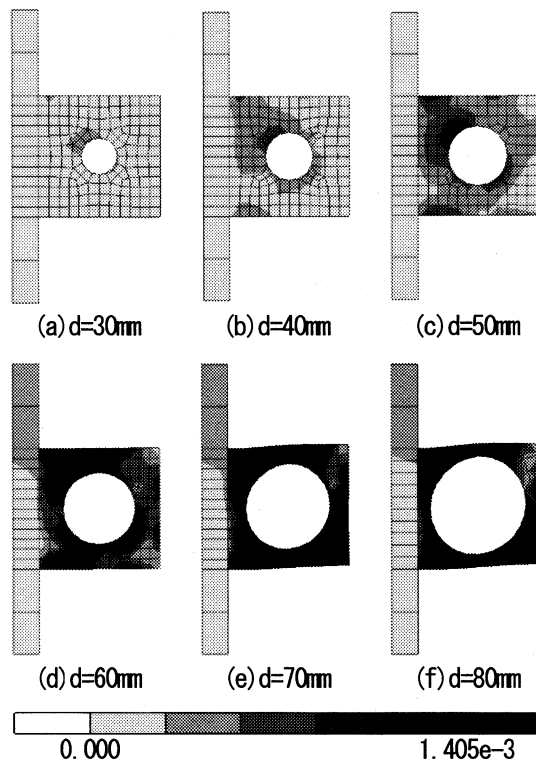


図-12 鋼板の相当ひずみ分布および変形状況

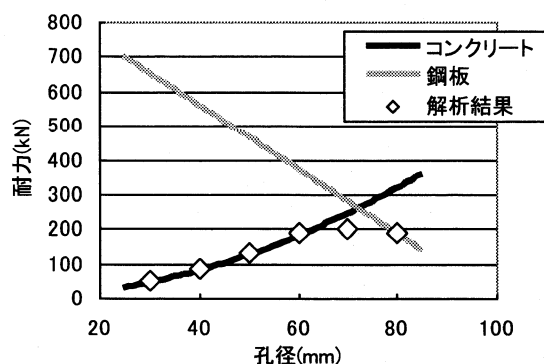


図-13 Leonhardt の式と解析結果の比較

4.2 複数の孔を有する場合の適用範囲に関する検討

(1) 目的

4.1 の結果から、Leonhardt の式の妥当性について概ね確認できた。しかし、Leonhardt の式には孔の配置に関する要因は含まれていないため、鋼板にどのように穿孔しても耐力は変わらないことになる。例えば、孔同士の間隔が近

い場合や、孔が鋼板の縁端に近い場合などにおいて、どの程度まで Leonhardt の式が成立するかは明確でない。そこで、ここでは孔を2つ有するモデルを想定し、孔の間隔と鋼板縁端からの距離をパラメータとした解析を行い、適用範囲に関する考察を行った。

(2) 解析モデル

二孔モデルのモデル図を図-14 に示す。このモデルは $200 \times 160 \times 350\text{mm}$ のコンクリートブロックに孔径 40mm の孔を2つ設けた鋼板を埋め込んだ構造となっている。ここで、前述の2つのパラメータについて、孔間隔 p を変化させるモデルを Case-1、鋼板縁端からの距離 s を変化させるモデルを Case-2 と呼ぶことにする。Case-1 に関しては鋼板縁端からの距離は 40mm に固定し、 p に合わせて鋼板寸法を変化させている。Case-2 では孔間隔を 40mm に固定し、 s に合わせて鋼板寸法を変化させている。なお、いずれのケースも鋼板高さは 60mm 、板厚は 22mm とし、 p と s はそれぞれ $10 \sim 40\text{mm}$ の範囲で変動させ、合計8つのモデルを作成した。ここで、式(1)からコンクリートのせん断耐力 P_c の計算を行うと、このモデルの最大耐力は 159kN となる。式(2)で計算した鋼板のせん断破壊の耐力 P_s は、いずれのモデルにおいてもコンクリートのせん断破壊の耐力と比較して非常に大きな値となるため、ここで作成したモデルは、いずれもコンクリートがせん断破壊することが想定される。境界条件は、単一孔モデルの場合と同様に、コンクリートブロックの底面を完全拘束し、鋼板の上面に下向きの強制変位を与えている。

(3) 解析結果および考察

図-15 および図-16 にそれぞれのケースの荷重-相対ずれ関係を示す。この図から、いずれのケースにおいても最大耐力およびずれ挙動に有意な差は見られなかった。Leonhardt の式から計算した最大耐力は 159kN であるので、孔数が2つの場合も最大耐力の評価は概ね妥当なものであることがわかった。また、 $p=10\text{mm}$ 、 $s=10\text{mm}$ の場合のように、鋼板の断面積が極端に小さい部分ができただけの場合でも、その部分に降伏は認められなかった。これは、前述したように今回用いたモデルがいずれも P_c より P_s が非常に大きいことから、一部に鋼板断面積が小さい部分ができても、その他の断面積が大きい部分で十分な抵抗力を発揮することができるためと推測される。したがって、Leonhardt の式で P_s に P_c よりも十分に大きな値を見込んでおけば、極端に不自然な孔の配置にしない限り、鋼板の降伏は避けられると考えられる。

4.3 孔の荷重分担率に関する検討

(1) 目的

孔あき鋼板ジベルの設計式は、一般的に孔1つあたりのせん断耐力を表している。したがって、設計上では孔あき鋼板中のいずれの孔も均等に作用することが暗黙に仮定されている。しかし、現実には孔の配置や作用荷重によって、それぞれの孔が受け持つ荷重の分担率は異なることが予想される。そこで、ここでは鋼板に孔を多段配置した鋼板を想定し、現実には作用すると考えられる荷重条件のもと

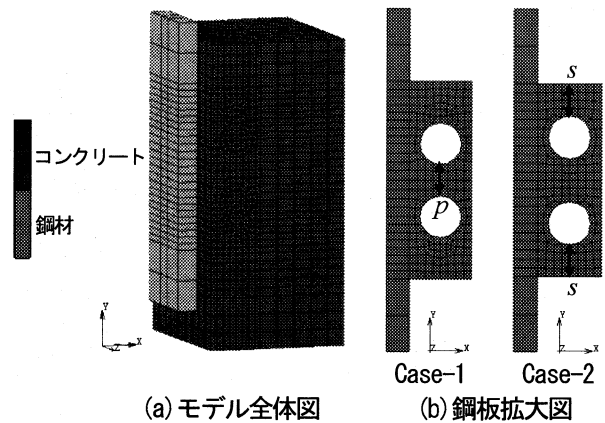


図-14 二孔モデルの要素分割図

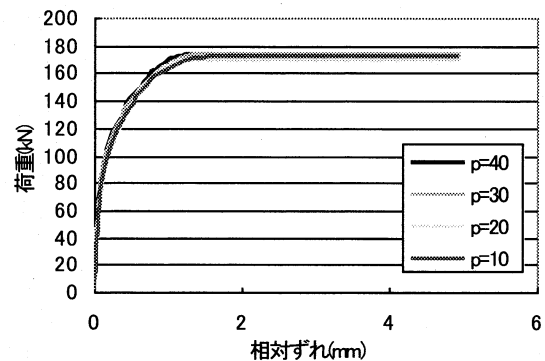


図-15 Case-1 の荷重-相対ずれ関係

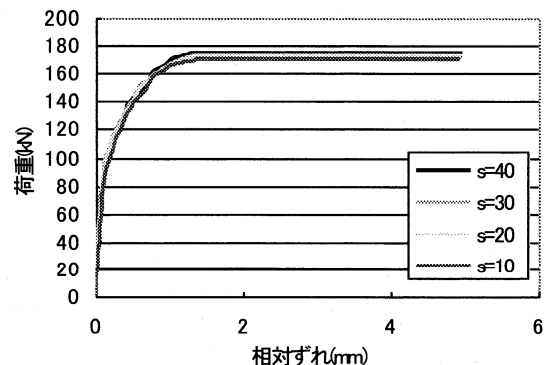


図-16 Case-2 の荷重-相対ずれ関係

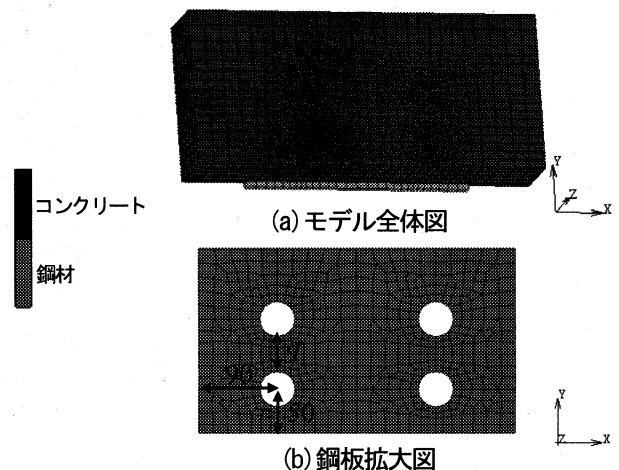


図-17 四孔モデルの要素分割図

で、それぞれの孔がどの程度荷重を受け持つか、解析的に耐荷特性を予測することで、合理的な設計に向けた基礎的な考察を行った。

(2) 解析モデル

図-17に解析モデルを示す。このモデルでは200×560×250mmのコンクリートブロックに孔を4つ設けた鋼板を埋め込んだモデルとなっている。鋼板の寸法は210×360mmであり、厚みは22mmである。孔径はいずれも40mmであり、図-17(b)に示す位置に左右対称に設けている。ここでは上下の孔間隔をパラメータとし、 $q=20\sim80\text{mm}$ の範囲で4つのモデルを作成している。また、このモデルだけは、鋼板下面に接するコンクリート領域に支圧を除去するための空洞を設けていない。これは、荷重条件と共に孔あき鋼板ジベルも現実に近い使用状況を想定したためである。なお、このモデルはZ方向の対称性を考慮し、1/2モデルとして作成している。式(1)から求めた耐力は317kNである。

本検討では、前述したように現実に即した荷重条件を与えるために、図-18に示すように、孔あき鋼板に曲げモーメントが作用する場合と、水平方向にせん断力が作用する場合を想定した。解析モデルに与える境界条件としては鋼板下面に分布荷重と強制変位を与えることにした。拘束条件はいずれの場合もコンクリートの節点のX軸方向両端部における上面と下面を完全拘束した。なお、荷重分担率の考察のために、図-18に示すように各孔に番号を与えた。

(3) 解析結果および考察

図-19および図-20にそれぞれの荷重条件における各孔位置のずれ要素のせん断弾性係数の低減率 β の値を示す。なお、これらの図はそれぞれの荷重条件において、Leonhardtの式で求めた最大耐力に相当する荷重が作用した時の状況を示している。つまり、分布荷重を作用させている場合は引張側の荷重の総和が孔2つ分の耐力に達したときに相当し、強制変位を与えている場合は強制変位に対する反力が孔4つ分の耐力に達したときに相当する。

図-19を見ると、孔1,2の β の値が、孔3,4と比較して明らかに小さいことがわかる。図-4に示すように本解析では J_2 の増加に伴う β の減少を仮定しているため、 β が小さいほどせん断ひずみエネルギーが大きく、孔が受け持つ応力が大きいことになる。したがって、この図の結果から曲げモーメントが作用する場合は引張荷重が作用する側(孔1,2)の方が圧縮荷重が作用する側(孔3,4)よりも荷重分担が大きいことがわかる。これは、圧縮荷重が作用する側では荷重に対して孔内のコンクリートだけではなく鋼板端部がコンクリートから受ける支圧によっても抵抗するためと考えられる。 q を変動させた場合、 q を大きくするほど孔3の値が若干減少するという傾向が見られるが、全体の分担率に大きな影響は見られなかった。

次に図-20を見ると、孔2,4の値が孔1,3の値と比較して小さいことが認められる。このことから、せん断力作用時は外側の孔(孔2,4)の方が内側の孔(孔1,3)よりも負担が大きいことがわかる。また、 q を変動させた場合を比

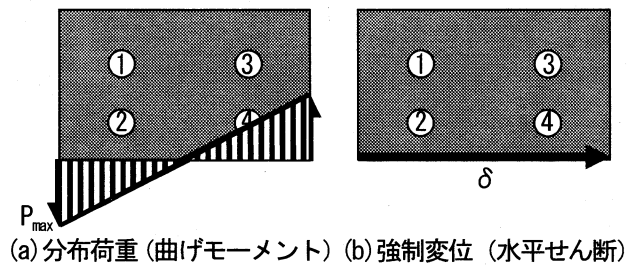


図-18 想定する荷重条件

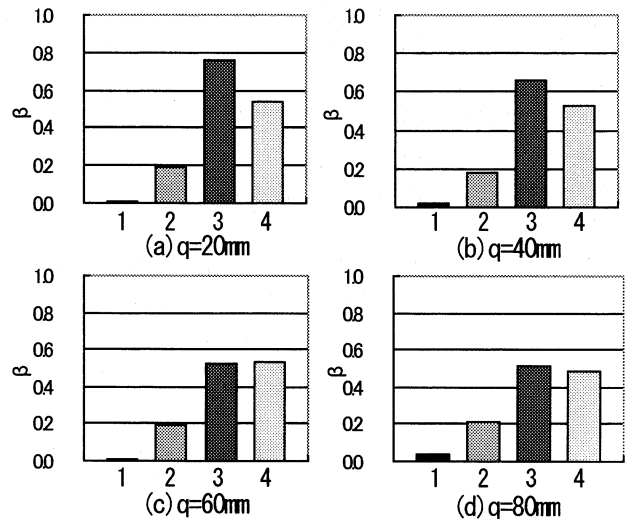


図-19 分布荷重作用時の各孔の β 値

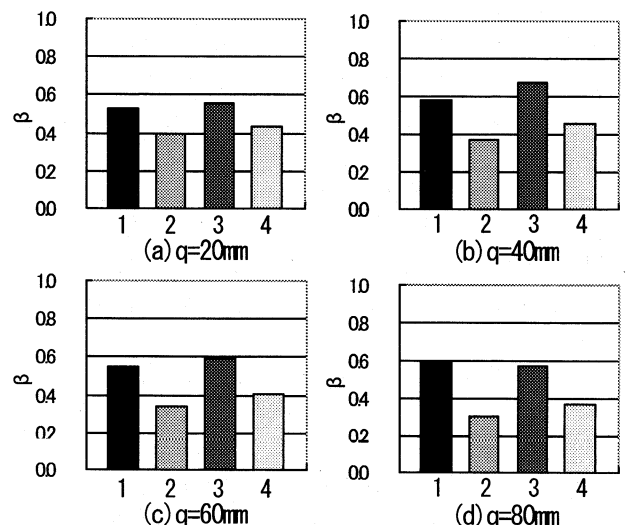


図-20 強制変位作用時の各孔の β 値

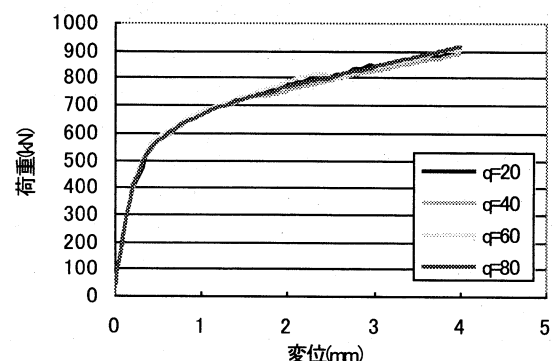


図-21 強制変位作用時の荷重-変位関係

較すると、 q が大きいほど内側と外側の β の差が顕著になっていることがわかる。

以上の結果から、本解析モデルのように孔が複数段に配置されている場合に同一径の孔を設けると、設計耐力時に負担が大きい位置の孔で最初に破壊が生じる可能性があると考えられる。したがって、合理的な孔あき鋼板ジベル構造を考えるためには、鋼板に設ける孔の孔径を荷重分担の大きさに応じて変化させるなどの工夫が有効であると思われる。

また、強制変位作用時の荷重－変位関係を図－21 に示す。このモデルの計算上の最大耐力は 317kN であるが、解析結果では 317kN は弾性範囲内にある。これは、単孔モデルや二孔モデルのように押し抜かれる側の鋼板端部に空洞を設けていないことが原因と考えられる。図－20 から、荷重 317kN 時の各孔の β は平均して 0.5 以下となっているが、それ以降も荷重が大きく増加していることから、現実の構造物に孔あき鋼板ジベルを用いる場合は鋼板端部がコンクリートから受ける支圧力の影響がかなり大きいと考えられる。

5. 結論

本研究では、簡易な孔あき鋼板ジベルの設計式と考えられる Leonhardt の式の妥当性と適用範囲について解析的な検討を行うとともに、同式では検討されていない孔の配置と耐荷特性の関係について基礎的な考察を試みた。本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) コンクリートのせん断破壊面にずれ要素を設けることで、擬似的に孔あき鋼板ジベルのせん断破壊挙動を表現することができることが分かった。
- (2) 孔を 1 つだけ有する簡易なモデルを用いて Leonhardt の式の耐力評価の妥当性について検討を行った結果、最大耐力、破壊モードともに一致する結果が得られた。このことから、Leonhardt の耐力評価式は妥当なものであると考えられる。
- (3) 孔の配置をパラメータとして、孔同士が近い場合や孔が鋼板縁端部に存在する場合の解析を行ったが、鋼板の耐力がコンクリートの耐力よりも大きければ、鋼板がせん断破壊する可能性は小さいことが認められた。
- (4) 複数の孔を多段配置し、曲げモーメントを想定した分布荷重を与えて各孔の荷重分担率を比較すると、引張荷重を受ける側の孔の荷重分担が大きいことが確認された。
- (5) 同様のモデルにせん断力を作用させた場合、コンクリートの内側よりも外側に配置した孔の荷重分担が大きいことがわかった。
- (6) 孔を複数段に配置するような場合には、孔の配置や作用する荷重条件によって孔の荷重分担が変わるため、分担率が大きい位置での早期の破壊を避けるため、負担の大きさによって孔の孔径を変えるなどの工夫が有効であると考えられる。

今回用いた解析手法は簡易なモデル化を行っているため、正確なせん断変形性状を再現するには実験結果などと

照らし合わせたより詳細な検証が必要になると考えられる。また、通常の孔あき鋼板ジベルに用いられる貫通鉄筋の効果を考慮していないため、実務に利用できる知見を得るには、貫通鉄筋の補強効果などを考慮した孔あき鋼板ジベルの耐力評価式や破壊モードなどについて、今後行う必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 保坂鐵矢, 平城弘一, 小枝芳樹, 橘吉宏, 渡辺滉: 鉄道用連続合成桁に用いるずれ止め構造のせん断特性に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.44A, pp.1497-1504, 1998
- 2) 明橋克良, 永田淳, 木水隆夫, 西川孝一: コンクリートの打設方向を考慮した孔あき鋼板のせん断強度特性に関する実験的研究, 鋼構造論文集, 第 8 巻, 第 31 号, pp.81-87, 2001
- 3) 藤井秀樹, 古市耕輔, 一宮利通, 平陽平: 孔あき鋼板ジベルを用いた合成土留壁, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.2, pp.1351-1356, 2002
- 4) 平陽兵: 鋼とコンクリートを一体化する孔あき鋼板ジベルの耐力評価式に関する最近の研究, コンクリート工学, Vol.42, No.3, pp.61-67, 2004
- 5) F. Leonhardt, et al.: Neues, vorteilhaftes Verbundmittel für Stahlverbund-Tragwerke mit hoher Dauerfestigkeit, Beton und Stahlbetonbau, pp.325-331, 1987
- 6) E.C. Oguejiofor and M.U. Hosain: A parametric study of perfobond rib shear connectors, Canadian Journal of Civil Engineering, Vol.21, pp.614-625, 1994
- 7) S.B. Medberry, B.M. Shahrooz: Perfobond Shear Connector for Composite Construction, Engineering Journal, Vol.39, 2002
- 8) 保坂鐵矢, 光木香, 平城弘一, 牛島祥貴, 橘吉宏, 渡辺滉: 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
- 9) 望月秀次, 安藤博文, 宮地真一, 高田嘉秀: 鋼・PC 混合橋 (新川橋) の設計と施工, プレストレストコンクリート, Vol.43, No.1, pp.82-89, 2001
- 10) 小林一輔: 最新コンクリート工学第 5 版, 森北出版, 2002
- 11) 古市耕輔, 平陽兵, 山村正人: 孔あき鋼板ジベルのせん断耐力に関する実験的研究, 鹿島技術研究所年報, 第 46 号, pp.87-90, 1998

(2008 年 4 月 14 日 受付)