論文　孔あき鋼板ジベルのずれ耐荷力に対するかぶりコンクリートの拘束影響に関する一考察

谷　慎太郎[*1]・藤井　堅[*2]・湯藤　洋丈[*3]・伊須田　遼[*4]

要旨：鋼・コンクリート複合構造のずれ止めに用いられる孔あき鋼板ジベルのずれ耐荷力は，ジベル周辺のコンクリートなどによる拘束の影響を受けることが確認されている。ジベル孔径が小さい場合，相対的に孔内コンクリートのせん断抵抗が小さく，ジベル周辺の拘束の影響が大きくなることが考えられる。そこで，ジベル孔径 30mm の試験体を用いた押抜き試験を実施し，かぶりコンクリートによる拘束の影響について検討した。その結果，ずれ耐荷力が複合構造標準示方書に示されるせん断耐力より小さく，かぶりコンクリートの拘束の影響を考慮した既往の研究成果より大きくなる傾向を確認した。

キーワード：孔あき鋼板ジベル，ずれ耐荷力，かぶりコンクリート，拘束力

1. はじめに

鋼・コンクリート複合構造における異種材料間の応力伝達に用いられるずれ止めの一つとして，Leonhardt ら[1)]によって提案された孔あき鋼板ジベル（以下，PBL と呼ぶ）がある。PBL を実構造物に用いるためには，ずれ耐荷力の評価式が必要であり，複合構造標準示方書[2)]には，強度評価式およびせん断力-ずれ変位関係式が規定されている。この示方書に示されている強度評価式は，保坂らの研究[3)]において多数の押し抜き試験結果を回帰解析により求められた評価式が基本となっており，貫通鉄筋がない場合，ジベルの孔径，板厚，コンクリートの圧縮強度のみを変数とし，孔内コンクリートが鋼板面に沿ってせん断破壊する場合は，ジベル孔部分のコンクリートのせん断抵抗のみが考慮されたものとなっている。一方，藤井ら[4)]，中島ら[5)]平ら[6)]などの研究において，孔あき鋼板ジベルのずれ耐荷力は，周辺コンクリートの拘束効果などの影響を受けることが確認されている。そのため，PBL を適用する構造物の部位や部材形状などによって，そのずれ耐荷力は異なることが考えられる。

従来，PBL は合成桁における鋼桁とコンクリート床版のずれ止めとして使用されることが多かったが，近年では，複合ラーメン橋における鋼桁とコンクリート橋脚の接合部や鋼板コンクリート合成版における異種材料間のずれ止め[7)]およびプレキャスト部材同士の接合部[8)9)]への適用など，多岐にわたっている。このうち特に，薄肉部材である合成版への適用やプレキャスト部材同士の接合部への適用などに際しては，小型の PBL を使用した上で，周辺コンクリートの拘束の影響を適切に評価したずれ耐荷力の算定を行うことで構造性や施工性の合理化につながることが考えられる．

そこで本研究では，小径となる孔径Φ30mm の PBL を対象とした押し抜き試験を行い，かぶりコンクリートによる拘束が PBL のずれ耐荷力に及ぼす影響について，実験的検討を行った。

2. 押抜き試験概要

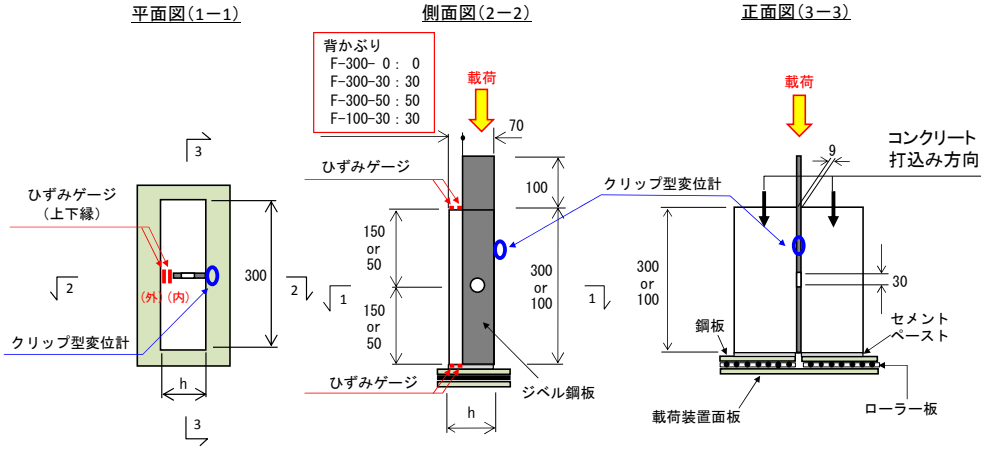
試験供試体は，1 供試体あたり PBL を 1 個設けた供試体（以下，一枚板供試体：F シリーズ）と，藤井らが提案する 1 供試体あたり PBL を 2 個設けた供試体[10)]（以下，十字柱供試体：C シリーズ）の 2 シリーズについて製作した。なお，いずれの供試体も 1 つの PBL に対してジベル鋼板外側 1 箇所にかぶり（以下，背かぶり）を設けた供試体としている。

1 枚板供試体は，背かぶりの拘束の影響に着目し，供試体高さ（載荷方向寸法）300mm のものについて，背かぶり厚を 0mm，30mm，50mm としている。また，背かぶり厚 30mm のものについて，供試体高さを 100mm としたものも製作した。

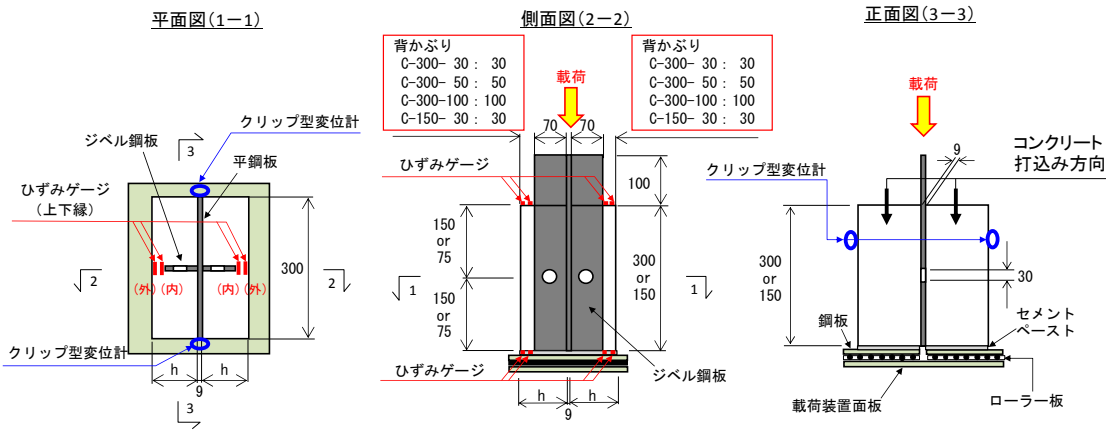
十字柱供試体は，ジベル鋼板を溶接した平鋼板にてコンクリートブロックを 2 分割する形状であり，供試体高さ 300mm のものについて，背かぶり厚を 30mm, 50mm, 100mm としている。また，背かぶり厚 30mm のものについて，供試体高さを 150mm とした供試体も製作した。

いずれの供試体もジベル孔径は 30mm とし，貫通鉄筋は配置していない。また，ジベル鋼板表面は黒皮仕上げのままとし，付着を除去するための処理は行っていない．十字柱供試体については，2 つのコンクリートブロックを確実に分離させるため，平鋼板表面に油性剥離剤を塗

*1 極東興和（株）　営業本部技術企画部技術企画課課長　(正会員)
*2 広島大学大学院　工学研究科社会基盤環境工学専攻特任教授　工博
*3 広島大学大学院　工学研究科社会基盤環境工学専攻
*4 広島大学大学院　工学研究科社会基盤環境工学専攻



図−1　一枚板供試体形状（F シリーズ）



図−2　十字柱供試体形状（C シリーズ）

表−1　供試体諸元

供試体		コンクリート					鋼板	
		長さh mm	高さ mm	背かぶりc mm	試験時強度 (N/mm^2)	最大粗骨材径 mm	板厚 mm	降伏点 N/mm^2
一枚板供試体	F-300-0	70	300	0	62.5	20	9	245以上 (SS400)
	F-300-30	100	300	30	59.5			
	F-300-50	120	300	50	59.5			
	F-100-30	100	100	30	59.5			
十字柱供試体	C-300-30	100	300	30	72.8	20	9	245以上 (SS400)
	C-300-50	120	300	50	72.8			
	C-300-100	170	300	100	72.8			
	C-150-30	100	150	30	72.8			

布し，付着の影響を排除した．**図−1**，**2** に各シリーズの供試体形状と計測項目（箇所）を，**表−1** に供試体諸元を示す。なお，**図−1**，**2** に示すように，供試体と載荷装置面板の間に丸鋼と鋼板で製作したローラー板を設置することで，底面摩擦が生じない要領で載荷を行った。

計測項目については，コンクリートと鋼板のずれ変位および背かぶりコンクリートのひずみに着目した。ずれ変位については，**写真−1** に示すようにクリップ型変位計をコンクリートと鋼板を跨いで設置しその相対変位を

写真−1　クリップ型変位計

測定した。コンクリートひずみについては，ひずみゲージを使用し，背かぶりコンクリートの上下縁を対象として，それぞれ背かぶり表面側（以下，外側）とジベル鋼板側（以下，内側）を測定した。

表－2　ずれ耐荷力

		実験値 (kN)	評価式値				コンクリート物性 ※1 (N/mm²)		
			示方書式		藤井式				
			耐力(kN)	実験値/評価式値	耐力(kN)	実験値/評価式値	圧縮強度	引張強度	弾性係数
一枚板供試体	F-300-0	3.5	90.0	0.04	3.6	0.97	62.5	2.5	2.6×10^4
	F-300-30	18.5	85.7	0.22	9.3	1.99	59.5	2.5	2.6×10^4
	F-300-50	34.4	85.7	0.40	16.1	2.14	59.5	2.5	2.6×10^4
	F-100-30	12.2	85.7	0.14	5.5	2.22	59.5	2.5	2.6×10^4
十字柱供試体	C-300-30	※2 38.3	104.9	0.37	12.3	3.11	72.8	3.4	4.2×10^4
	C-300-50	※2 42.9	104.9	0.41	21.3	2.01	72.8	3.4	4.2×10^4
	C-300-100	※2 59.7	104.9	0.57	48.1	1.24	72.8	3.4	4.2×10^4
	C-150-30	※2 14.7	104.9	0.14	8.5	1.73	72.8	3.4	4.2×10^4

※1　テストピースによる強度試験結果
※2　載荷荷重を1/2とした値

3. 実験結果

3.1 ずれ耐荷力

各供試体のずれ耐荷力について，実験における最大荷重（以下，実験値）と各種評価式により算出したずれ耐荷力（以下，評価式値）の比較を**表－2** に示す。なお，破壊形態はいずれの供試体も鋼板両側面のジベルコンクリートのせん断破壊であった。

表－2 に示す評価式は，式(1)に示す複合構造標準示方書[2]に規定された評価式（以下，示方書式）と式(2)に示す藤井らの研究による各種のコンクリートの拘束因子を抵抗力として表した評価式[4]（以下，藤井式）としている。なお，示方書式と実験値の比較に関して，本実験の条件（孔径，板厚，コンクリート圧縮応力度）は，示方書の適用範囲外であるが,参考として比較を行っている.

$$V=1.60\times d^2\times f'_c/\gamma_b \qquad (1)$$

ここで，V：孔あき鋼板ジベルの孔 1 個あたりの設計せん断耐力（N），d：孔径（mm），f'_c：コンクリートの圧縮強度（N/mm²），γ_b：部材係数（ここでは 1.0 とした）とする。

$$V=V_{int}+2.5\times(T_s+T_{cb}+T_{cu}+T_f) \qquad (2a)$$

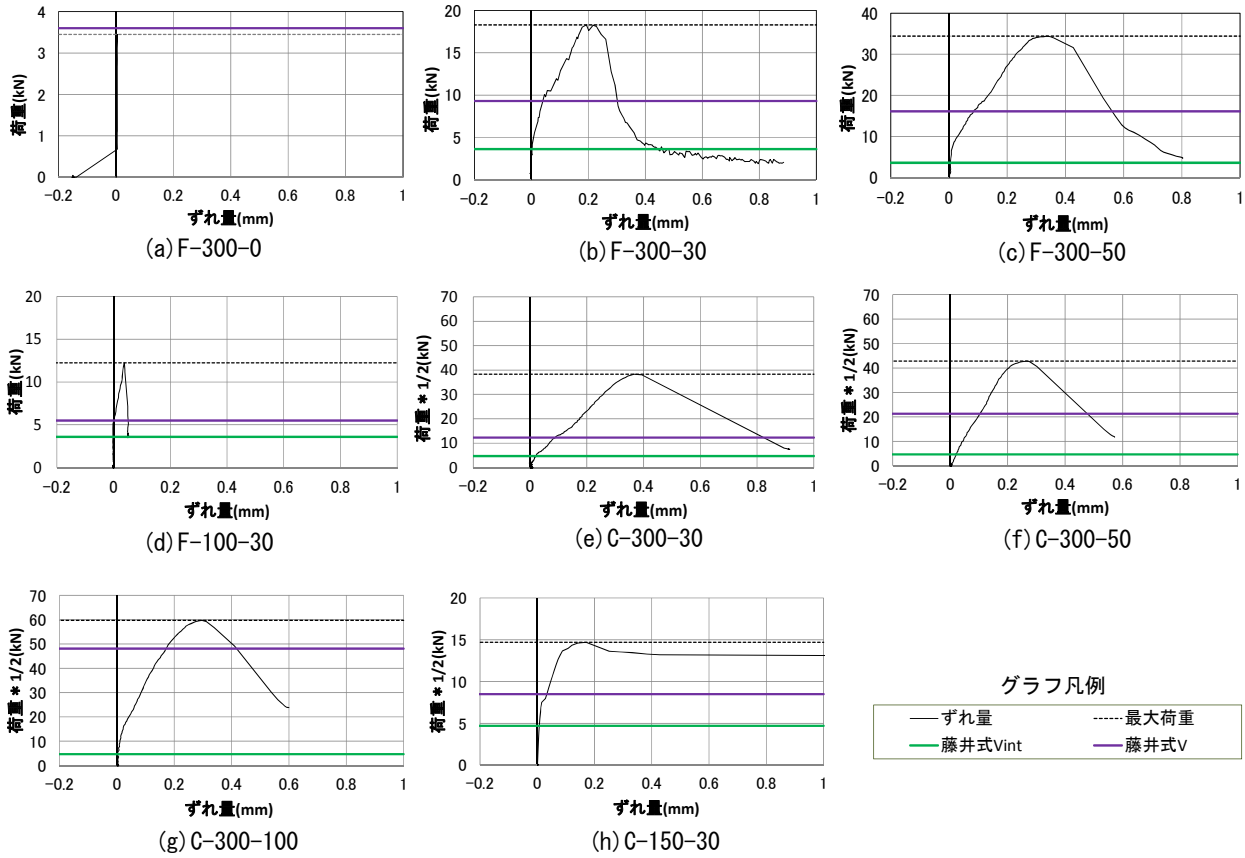
$$V_{int}=2\times\{\pi\times d^2/4+(n-1)\times A_s\}\times\tau_{ct} \qquad (2b)$$

ここで，V：孔あき鋼板ジベルのずれ耐荷力（N），V_{int}：コンクリート拘束力が無い状態のずれ耐荷力（N），T_s：ジベル孔貫通鉄筋による拘束力（N），T_{cb}：背かぶりによる拘束力（N），T_{cu}：上かぶりによる拘束力（N），T_f：供試体の底面摩擦による拘束力（N），d：孔径（mm），n：コンクリートと鉄筋の弾性係数比，A_s：貫通鉄筋の断面積（mm²），τ_{ct}：コンクリートのせん断強度（N/mm²）とする。なお，本検討では，T_s・T_{cu}・T_f・A_s は 0，τ_{ct} は引張強度とした。

表－2 に示す各評価式値について，示方書式（式(1)）は孔径とコンクリート圧縮強度の関数であり，本実験では全ての供試体とも孔径 30mm で統一しているため，各供試体の評価式値の差は各供試体のコンクリート圧縮強度の差によるものである。一方，藤井式（式(2)）は各種拘束の影響を考慮し耐力を算出するものであり，本実験においては，各供試体のコンクリート強度の差のほか，背かぶりの厚さの相違により各供試体の評価式値に差が生じている。

実験値は，いずれの供試体とも示方書式値を大きく下回った。ここで，示方書式は，保坂らの研究による評価式をもとに，さらに他者を含む多数の実験データを用いて再度回帰分析を行い作成されている[2]。その回帰分析に用いられた実験の多くは，供試体底面にモルタルや石膏を敷設した押抜き試験であることから，底面摩擦の影響が含まれた評価式といえる。PBL の押抜き試験においては，底面の摩擦による拘束を除去することでずれ耐荷力が低下することを藤井らは指摘しており[11]，本実験においては，供試体の下側にローラー板を設置し底面摩擦の影響を除去していることから，実験結果が示方書式値を大きく下回ったことが考えられる。

一方，実験値を藤井式値と比較した場合，背かぶりの無い F-300-0 は両者がほぼ一致しており，背かぶりが 30mm と 50mm の供試体は 2～3 倍程度，背かぶりが 100mm の供試体は 1.2 倍,実験値が大きい結果であった。かぶりの有無や大きさでずれ耐荷力に相異が生じることから，本実験の条件のもとでは，背かぶりによる拘束がずれ耐荷力に大きく影響することがわかる。ここで，藤井式による背かぶりによる拘束力は，孔内コンクリートがせん断破壊する際，鋼板面に垂直な方向に作用する周辺コンクリートを押し広げる力を背かぶりが拘束する影響とされており[4]，本実験の条件のもとでは，背かぶりが厚くなるに従い背かぶりの剛性の増加が顕著となりずれ耐荷力が増加することとなる。実験値においても，藤井式による評価式値と同様に背かぶり厚の増加と伴にずれ耐荷力が大きくなる傾向であった。本実験供試体のジベル孔径は，示方書式の適用範囲（35mm～90mm）より小さく，背かぶり厚がジベル孔径と同等もしくはそれ以上であることから，その影響が顕著であったと考えられる。



図－3　荷重-ずれ変位関係

3.2 ずれ変位

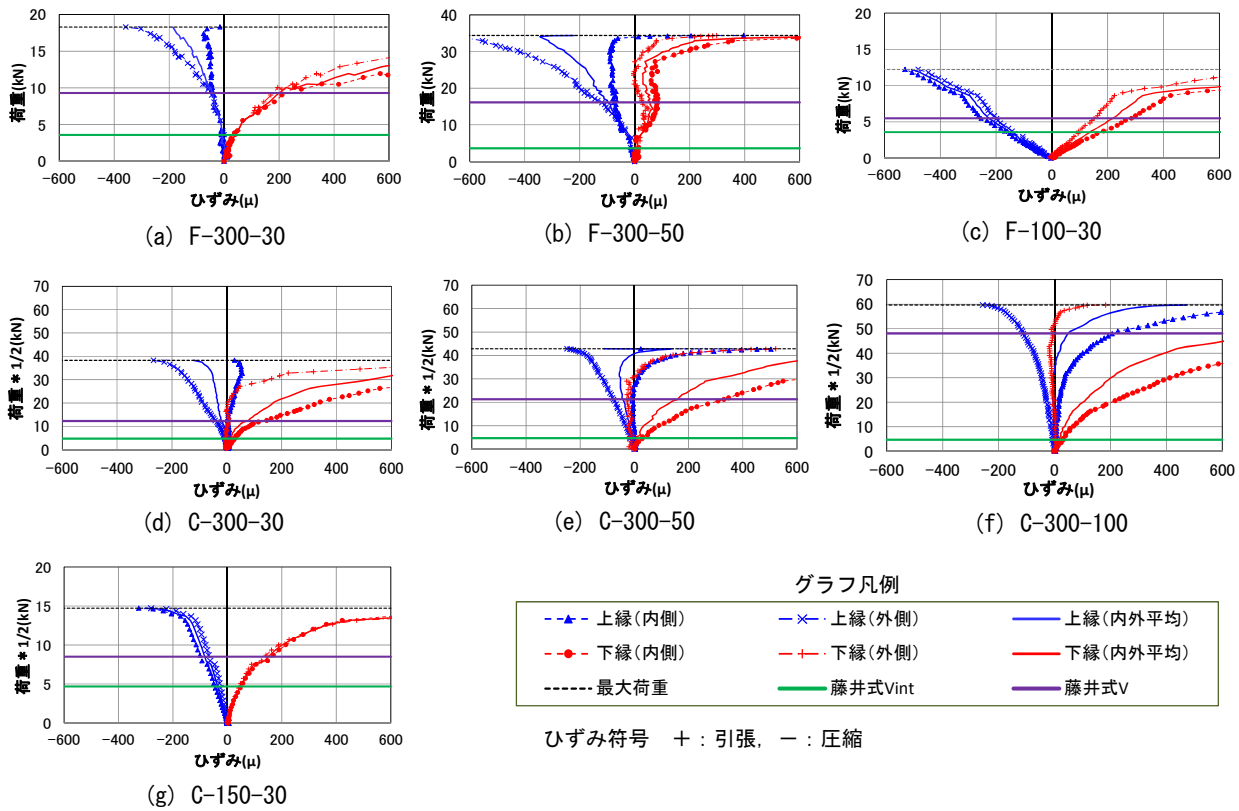
図－3 に荷重-ずれ変位の関係を示す。なお，十字柱供試体におけるずれ変位は，ジベル鋼板が溶接された平鋼板の左右部に設置した 2 つのクリップ型変位計による計測値の平均を示している。また，十字柱供試体については，載荷荷重に対して 2 個の PBL で抵抗するため，図－3(e)～(h)のグラフ縦軸は荷重を 1/2 とした値，すなわち，1 個の PBL が受け持つ荷重を示している（以下，十字柱供試体のグラフについては同様の表記要領とする）。

背かぶりの無い F-300-0 は，ずれ変位がほぼ発生することなく脆性的に破壊した（図－3(a)）。これは，ジベル孔内のコンクリートにせん断ひび割れが発生した後，ずれの発生とともにひび割れが広がろうとするが，その広がり（押し広げ力）を拘束するかぶりコンクリートが無いことから，脆性的に破壊に至ったと考える。背かぶりのある供試体については，概ね藤井式における Vint 程度の荷重（背かぶりの無い F-300-0 の最大荷重程度）程度までずれ変位はほぼ発生せず，その後の載荷によりずれ変位が進展した（図－3(b)～(h)）。これより，藤井式の Vint 程度の荷重でジベル孔内コンクリートのひび割れ発生が生じたと考えられる。一枚板供試体においては，同じ高さの供試体の最大荷重時のずれ変位を比較すると，背かぶりが大きくなるほど，最大荷重およびずれ変位が大きい（図－3(a)～(c)）。十字柱供試体においては，同じ高さの供試体の最大荷重時のずれ変位を比較すると，背かぶりが大きくなるほど最大荷重は大きくなるもののずれ変位は概ね 0.3mm 程度と同程度であり一枚板供試体のものと傾向が異なる（図－3(e)～(g)）。この要因については，まだ解明できていないが，背かぶりが押し広げ力を拘束する影響が相対的に大きい場合，寸法やコンクリートの弾性係数に起因する背かぶりの剛性がずれ変位に影響を及ぼす可能性が考えられる。十字柱供試体に使用したコンクリートの弾性係数は，一枚板供試体のものより 6 割程度大きく（表－2），ずれ変位の発生傾向に相異が生じた可能性があると現時点では考えている。

また，同じ背かぶり厚で高さの異なる供試体を比較すると（図－3(b)，(d)および図－3(e)，(h)），供試体高さが高い方が最大荷重およびずれ変位が大きく，背かぶりの剛性に起因する拘束力が大きくなる影響と考えられる。

3.3 背かぶり上下縁ひずみ

図－4 に押し抜き試験における背かぶり上下縁のひずみの計測結果を示す。なお，十字柱供試体については，1 供試体あたり 2 箇所背かぶりが存在するが，両者の計測結果の傾向に差が無かったことから，代表して片側のも

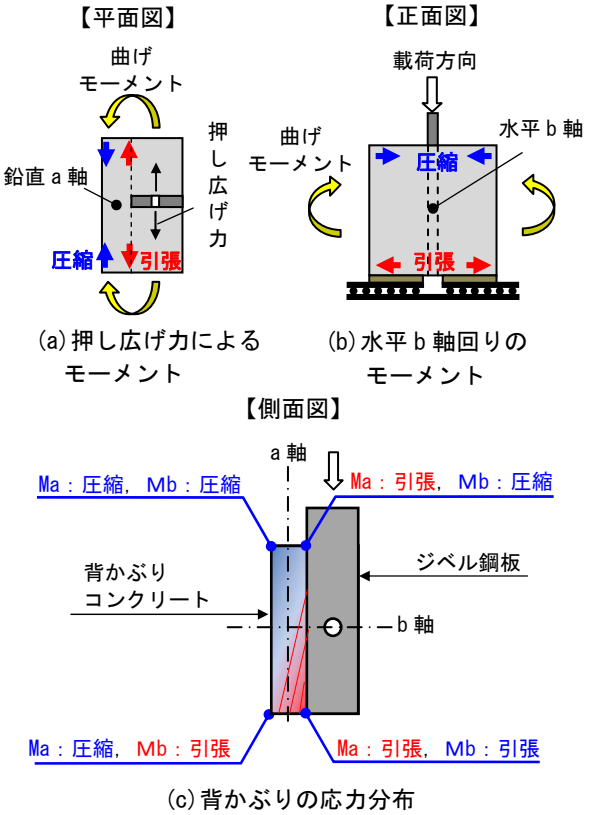


図－4　背かぶり上下縁ひずみ

のを示す。図－4 より，全体的に上縁側が圧縮，下縁側が引張のひずみが発生する傾向にあることがわかる。特に，供試体高さが低い F-100-30 および C-150-30 においては，その傾向が顕著である。このことより，荷重載荷の影響により，背かぶりには，図－5(b)に示すような下縁が引張となる b 軸周りの曲げモーメントが作用していることが示唆される。

また，上下縁それぞれの内側（PBL 鋼板側）と外側（背かぶり表面側）のひずみの発生傾向に着目すると，孔内コンクリートのずれ耐荷力を示す藤井式の V_{int} 相当の荷重以降において，内側と外側のひずみに差が生じており，概ね内側のひずみが引張側となっている。これは，図－5(a)に示すジベル孔位置に作用する押し広げ力によって発生するモーメントの影響と考えられ，藤井式においてはこの作用に対する背かぶりの拘束力 T_{cb} としてずれ耐荷力に考慮されている。なお，供試体高さが小さい F-100-30 および C-150-30 の上縁において，内側と外側のひずみ差は小さいものの，外側のひずみの方が引張側（圧縮が少ない）傾向となっており，その原因については，現時点では未解明である．

これらの結果より，本実験のような供試体下端をローラー板で支持した状態の押し抜き試験において，背かぶりに生じる応力は，図－5 に示すような a 軸および b 軸回りのモーメントが同時に作用する場合の応力分布となっていることが考えられる。



図－5　本実験における背かぶり応力分布の模式図

4. 実験結果からのずれ耐荷力に関する考察

図－5 に示す 2 軸の曲げモーメントが背かぶりに作用した場合，供試体の上側（載荷位置側）は b 軸回りのモーメントによる圧縮応力が作用し，押し広げ力により背かぶりに発生する引張応力をキャンセルすることとなる。このため，b 軸回りのモーメントの影響が大きい場合，供試体下端のジベル鋼板付近の背かぶりにひび割れが生じた後も，供試体上側の圧縮が作用している領域により，押し広げ力を拘束する影響が継続することが考えられる。

ここで，背かぶりに b 軸回りのモーメントが作用する要因を考察する。本実験では鉛直方向下向きに載荷していることから，ジベル孔内コンクリートには下向きの荷重作用が生じ，ずれ止めとして機能している限り，背かぶりにもこの下向きの荷重作用は伝達される。供試体は下端のローラー板を介して鉛直支持された状態であるが，ローラー板はジベル鋼板位置で 2 分割しており中央部に隙間を設けている。このため，荷重作用点位置（ジベル鋼板位置）と下端の反力点位置がずれていることにより，曲げモーメントが作用したと推察する。

本実験結果において，**表－2** に示した藤井式によるずれ耐荷力（評価式値）には，この b 軸回りのモーメントによる背かぶりの拘束の影響を考慮していないため，実験結果が評価式によるずれ耐荷力より大きくなったことが考えられる。

実構造物への適用において，本実験における背かぶりに作用する b 軸回りのモーメントと同様の影響は，適用する構造物の形状寸法や荷重の作用状態などにより，その度合いが異なる。このため，ずれ耐荷力の評価式においては，この影響を個別に評価できるものが望ましく，その定量的な把握は今後の検討課題と考える。

5. まとめ

ジベル孔径 30mm で貫通鉄筋を配置しない孔あき鋼板ジベルの試験体を用いた押抜き試験を実施した。得られた結果を以下に示す。

(1) 今回実施した押抜き試験の条件のものとでは，孔あき鋼板ジベルのずれ耐荷力は，複合構造標準示方書に規定された評価式値より小さくなった。

(2) ジベル孔径 30mm で背かぶり厚が 30mm～100mm の孔あき鋼板ジベルのずれ耐荷力は，かぶりコンクリートによる拘束の影響を考慮した藤井らの研究による評価式より 1.2～3 倍程度大きくなる傾向であった。

(3) 拘束の影響が背かぶりのみの場合において，背かぶりの有無や厚さが，孔あき鋼板ジベルのずれ耐荷力に大きく影響を与える。

(4) 背かぶり厚が 30mm～100mm の範囲において，背かぶり厚が大きい程，ずれ耐荷力は大きくなる。

(5) 供試体高さが 100mm～300mm の範囲において，供試体高さが高く背かぶりの剛性が大きい程，ずれ耐荷力が大きくなる。

(6) 今回実施した孔あき鋼板ジベルの押抜き試験の条件のものとでは，背かぶりには 2 軸の曲げモーメントが作用した状況に類似したひずみが発生する。

参考文献

1) Fritz Leonhaldt，Wolfhart Andrä Hans-Peter Andrä und Wolfgang Harre : Neues，vorteilhaftes Verbundmittel für Stahlverbund-Tragwerke mit hoher Dauerfestigkeit，Beton-und Stahlbetonbau，pp.325-331，12/1987

2) 土木学会：2014 年制定　複合構造標準示方書［設計編］，pp.74-77，pp.581-584，2015.5

3) 保坂鐵矢，光木香，平城弘一，牛島洋貴，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, 2000.3

4) 藤井堅, 道菅裕一, 岩崎初美, 日向優裕, 森賢太郎, 山口詩織：孔あき鋼板ジベルのずれ耐荷力評価式, 土木学会論文集 A1，Vol.70，No.5，pp.Ⅱ_53-Ⅱ68，2014.5

5) 中島章典，橋本昌利，小関聡一郎，鈴木康夫 : 拘束度の高い押抜き試験に基づく孔あき鋼板ジベルの強度評価，第 9 回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム講演集，pp.49-57，2011.11

6) 平陽兵，浅沼大寿，一宮利通，古市耕輔 : 拘束効果を考慮した孔あき鋼板ジベルの耐力評価法, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.2, pp.1225-1230, 2013.7

7) 土木学会 : 複合構造ずれ止めの抵抗機構の解明への挑戦，pp81-83，2014.8

8) 武者浩透，石田有三，山野井毅，山下健 : 三兼池橋－日本初の超高強度繊維補強コンクリートによる連続桁橋－, プレストレストコンクリート, Vol.49, No.5，pp.18-26，2007.9

9) DAK 式プレキャスト壁高欄工法研究会 : DAK 式プレキャスト壁高欄「設計・施工ガイドライン」，2017.3

10) 古川祐輔，藤井堅，道菅裕一，山口詩織 : 孔あき鋼板ジベルの押し抜き試験における各種パラメータのずれ耐荷力への影響，第 9 回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム講演集，pp.58-65，2011.11

11) 深田和宏，藤井堅，豊田正，岩崎初美 : 孔あき鋼板ジベルの終局せん断耐力に影響を及ぼすコンクリート因子, 第 6 回複合構造の活用に関するシンポジウム講演集，pp28-1-28-8，2005.11