# 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

宇都宮大学 〇学生員 小関聡一郎,学生員 橋本昌利,フェロー 中島章典,正会員 鈴木康夫

## 1. はじめに

鋼コンクリート複合構造では、両材料を一体化させ応力 伝達が適切になされる必要があるため、鋼とコンクリート の接合部で生じるずれを防止・抑制しなければならない. その方法として、疲労強度が高いことや、施工性に優れて いるという理由から孔あき鋼板ジベルが注目を集め、その 施工例も増えてきている.

孔あき鋼板ジベルに関する研究が数多くなされ,せん 断耐力に関する強度評価式が提案されてきている<sup>1)</sup>.しか しその際,試験後の試験体には,孔あき鋼板を囲むコンク リートブロックにひび割れが生じている.これは,コンク リートブロックを割裂させようとする力がコンクリートや 帯鉄筋等の拘束因子による拘束力を上回ったために起こっ た現象である.複合ラーメン橋の剛結部などに用いられ る孔あき鋼板ジベルを想定した場合,孔あき鋼板ジベルの 拘束度は既往の研究<sup>2),3)</sup>で行われた試験体より高いと考え られ,既往の強度評価式ではせん断耐力が低く評価されて いる可能性がある.また,孔あき鋼板ジベルを囲むコンク リートブロックの寸法とせん断耐力の関係に着目した検討 はあまり行われていない.

そこで本研究では、まず、孔あき鋼板ジベルを囲むコン クリートブロックの寸法とせん断耐力の関係を確認し、ま た、ひび割れの生じない試験体の寸法を定めるための押抜 き試験を行う(シリーズ1).その結果に基づいて形状を 決定した拘束度の高い押抜き試験体を用いて押抜き試験を 行い(シリーズ2)、実験データを整理および統計処理し、 新たな強度評価式の作成を目的とする.

## 2. シリーズ1の実験

#### (1) 実験概要

孔あき鋼板ジベルを囲むコンクリートブロックの寸法と せん断耐力の関係を確認し、また、ひび割れの生じない試 験体の寸法を定めるため、図−1のようなジベル孔を有す る平鋼板をコンクリートで囲む押抜き試験体を製作した. その際、コンクリートブロックの幅もしくは高さを表−1に 示すように5パターンに変化させた.試験体名の説明を図 −2に示す.詳しくは本研究との関連研究<sup>4)</sup>を参考にして頂 きたい.ここでは試験結果のみについて記す.

## (2) 試験結果と考察

各試験体のせん断耐力を表-1に示す. せん断耐力は最初にせん断力の減少が見られた時の直前のせん断力であり、ずれ変位はせん断耐力時のずれ変位を示している. 図-3にコンクリートブロックの寸法とせん断耐力の関係を示す. 図の横軸はコンクリートブロックの高さ H または幅 B のうち、基準である B4H4 から変化させた値をプロットしている. 縦軸はせん断耐力である. また、図中の緑線は複合構造標準示方書<sup>1)</sup>の中で提案されている式(1)の強

Key Words: 孔あき鋼板ジベル,強度評価式,拘束度,せん断力-ずれ変位関係
 〒 321-8585 宇都宮市陽東 7-1-2 宇都宮大学大学院 Tel.028-689-6210 Fax.028-689-6210



図-2 試験体名 (シリーズ1)

度評価式を用いて算出した本実験のせん断耐力である.

$$V_{psud} = (4.31A - 39.0 \times 10^{3})/\gamma_{b}$$
(1)  

$$A = \frac{\pi d^{2}}{4} (\frac{t}{d})^{1/2} f'_{cd}$$
  
適用範囲 17.3 × 10<sup>3</sup> ≤ A ≤ 152.4 × 10<sup>3</sup>  
ここで、 $V_{psud}$  :せん断耐力 (N)  

$$d : \mathcal{H} \mathfrak{E}$$
(mm)  

$$t : 鋼板の板厚 (mm)$$
  

$$f'_{cd} : \neg \not ) \mathcal{I} - \mathcal{I} \mathcal{O}$$
設計圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)  

$$\gamma_{b} : : 部材係数$$

図-3においては、コンクリートの設計圧縮強度を実験 中に計測したコンクリートの圧縮強度とし、部材係数を1 としてせん断耐力を算出している.図-3よりすべての試験 体が複合構造標準示方書<sup>1)</sup>で示すせん断耐力を上回ってい ることがわかる.また、帯鉄筋に貼付けたひずみゲージか らも大きなひずみは得られなかったことから、本実験にお けるすべての試験体が既往の研究で行われた孔あき鋼板ジ ベルの試験体と比べて拘束度の高い試験体であることがわ かる.なお、実験中にひび割れの生じた試験体は無かった.

	試験体名	В	Н	配筋	d	$f_c'$	t	せん断耐力	ずれ変位
		(mm)	(mm)	(本)	(mm)	$(N/mm^2)$	(mm)	(kN)	(mm)
	B4H4NB-1	400	400	-	50	32.6	12	181.0	5.0
	B4H4NB-2	400	400	-	50	32.6	12	126.9	1.9
	B3H4-1	300	400	4	50	32.6	12	131.5	5.2
	B3H4-2	300	400	4	50	32.6	12	105.6	2.0
シリーズ1	B5H4-1	300	400	4	50	32.6	12	219.0	1.9
	B5H4-2	300	400	4	50	32.6	12	210.7	1.8
	B4H3-1	300	400	4	50	32.6	12	166.1	4.7
	B4H3-2	300	400	4	50	32.6	12	126.0	2.6
	B4H5-1	300	400	6	50	32.6	12	180.6	2.5
	B4H5-2	300	400	6	50	32.6	12	199.3	2.2
	D5C3T12-1	400	400	4	50	29.0	12	159.6	2.7
	D5C3T12-2	400	400	4	50	29.0	12	120.7	3.9
	D5C3T12-3	400	400	4	50	29.0	12	163.2	5.9
	D6C3T12-1	400	400	4	60	29.0	12	188.5	8.5
	D6C3T12-2	400	400	4	60	29.0	12	221.3	8.2
	D6C3T12-3	400	400	4	60	29.0	12	187.8	8.7
	D7C3T12-1	400	400	4	70	29.0	12	257.2	10.5
	D7C3T12-2	400	400	4	70	29.0	12	268.2	10.9
シリーズ2	D7C3T12-3	400	400	4	70	29.0	12	236.2	10.0
	D5C4T12-1	400	400	4	50	48.6	12	207.3	4.3
	D5C4T12-2	400	400	4	50	48.6	12	172.5	2.7
	D5C4T12-3	400	400	4	50	48.6	12	165.1	2.5
	D5C5T12-1	400	400	4	50	53.8	12	190.6	1.8
	D5C5T12-2	400	400	4	50	53.8	12	199.6	2.6
	D5C5T12-3	400	400	4	50	53.8	12	249.7	7.0
	D5C3T19-1	400	400	4	50	29.0	19	108.8	3.6
	D5C3T19-2	400	400	4	50	29.0	19	130.8	2.9
	D5C3T19-3	400	400	4	50	29.0	19	93.6	0.08



図-3 せん断耐力-コンクリートブロックの寸法

## 3. シリーズ2の実験

## (1) 実験概要

シリーズ1よりひび割れの生じない試験体の寸法を定め ることが出来たので、シリーズ2ではシリーズ1でひび割 れが生じなかった B4H4を基本の試験体として強度評価式 算定のための実験を行う.保坂らの研究<sup>2)</sup>を参考にし、孔 あき鋼板ジベルのせん断耐力に大きな影響を与えるとされ ている孔径、コンクリートの圧縮強度、板厚をパラメータ として表-1に示す試験体を作成した.孔径とコンクリー トの圧縮強度はそれぞれ3種類、板厚は2種類とした.帯 鉄筋はシリーズ1と同様に考え、高さ方向に等間隔に4本 とした.試験体名の説明を図-4に示す.平鋼板の寸法は 幅 120mm、厚さ12mm または19mm のものを使用し、ジ



図-4 試験体名 (シリーズ2)

ベル孔径は 50mm, 60mm, 70mm のいずれかとした. コ ンクリート打設前に鋼板にはグリースを塗り, 鋼とコンク リートの付着がせん断力-ずれ変位関係やせん断耐力に与 える影響を極力小さくした. また, シリーズ2ではせん断 耐力のばらつきを考慮し, 各種類 3 体ずつ試験体を製作 した.

## (2) 測定項目

コンクリートと鋼板の相対変位を高感度変位計を用いて 計測する.計測位置は平鋼板上部からコンクリートブロッ ク上面までである.

## (3) 試験方法

油圧ジャッキを有するフレーム載荷試験機を用いて,図 -1に示すように試験体の平鋼板突き出し部上面から荷重 を載荷した.試験体の下には砂を敷き,鋼板の垂直を保た せるとともに,試験体底面と載荷台との摩擦の影響を小さ くさせた.また,コンクリートと鋼板の相対変位が20mm を越えるまで荷重を載荷した.

### (4) 使用材料

帯鉄筋には D10 を使用し,降伏強度,引張強度はそれぞ れ 388N/mm<sup>2</sup>, 507N/mm<sup>2</sup> である.また,鋼板には SS400



を使用した. 板厚 12mm の降伏強度,引張強度はそれぞ れ 364N/mm<sup>2</sup>,450N/mm<sup>2</sup> であり,板厚 19mm の降伏強 度,引張強度はそれぞれ 312N/mm<sup>2</sup>,427N/mm<sup>2</sup> である. 試験中のコンクリートの圧縮強度  $f'_c$  も表-1 に示す.

## (5) 試験結果と考察

本研究で設定したパラメータとせん断耐力との関係について考察を行う.

## a) 孔面積の影響

保坂らの研究<sup>2)</sup>において, せん断耐力は孔面積に比例す るとされている. そこで,本研究で孔面積をパラメータと した試験体を対象とし,説明変数を孔面積,被説明変数を せん断耐力として指数型の回帰モデルを用いて回帰分析を 行い,式(2)を得た.

$$Q_u = 303A^{0.816} \tag{2}$$

ここで、 $Q_u$  はせん断耐力(N)、A は孔面積(mm<sup>2</sup>)を 表している。図–5 は孔面積とせん断耐力の関係を示した ものである。これより本研究の範囲においても孔面積とせ ん断耐力はほぼ比例関係にあると考えられる。

### b) コンクリート圧縮強度の影響

保坂らの研究<sup>2)</sup>において, せん断耐力はコンクリートの 圧縮強度に比例するとされている. そこで,本研究でコン クリート圧縮強度をパラメータとした試験体を対象とし, 説明変数をコンクリート圧縮強度,被説明変数をせん断耐 力として指数型の回帰モデルを用いて回帰分析を行い,式 (3)を得た.

$$Q_u = 24000 f_c^{\prime 0.535} \tag{3}$$

ここで, f'<sub>c</sub>はコンクリートの圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>)を表し ている. 図-6はコンクリートの圧縮強度とせん断耐力の 関係を示したものである.これより,コンクリートの圧縮 強度が増加するにつれ,全体としてせん断耐力の増加が緩 やかになっていることがわかる.これより本研究の範囲に おいてはコンクリート圧縮強度とせん断耐力は比例関係に は無いことがわかった.また,この結果は古内らの研究<sup>3)</sup> に近い結果となった.

## c) 板厚の影響

保坂らの研究<sup>2)</sup>においては、せん断耐力への板厚の影響 は僅かであるとされているが、式(1)の中にも板厚*t*は組 み込まれており、板厚が大きいほどせん断耐力は大きくな る.しかし、表-1に示すように、板厚を厚くすることで せん断耐力が低下する結果となった.そこで、試験体の切



図-8 推定値の比較

断を行い、ジベル孔付近のせん断破壊部分を確認したところ、D5C3T19-1 および D5C3T19-3 の破壊面が全体的に 滑らかで骨材のかみ合わせ抵抗は小さいと考えられるの に対し、D5C3T19-2 の破壊面には凹凸が見られた.また、 D5C3T12-2 と D5C3T19-2 のせん断耐力がほぼ等しいこ とから、本研究の範囲においては、せん断耐力に対する板 厚の影響はほとんどないものと考えられる.

## 4. 強度評価式の提案

本研究における D5C3T19 を除くシリーズ2の実験デー タを統計処理して誘導した強度評価式を式(4)に示す.な お、ここでの統計処理には、平城らの研究<sup>5)</sup>に示されてい る統計処理法を用いている.

$$Q_u = 9.34A f_c^{\prime 0.53} + 44.0 \times 10^3 \tag{4}$$

式(4)の適用範囲は本実験の変数の範囲内であり、孔径が 50~70mm, f' が 29~53.8N/mm<sup>2</sup> である. 図-7 は横軸に 式 (4) で算出した値  $Q_u$ , 縦軸に実験値  $Q'_u$  をとった相関 関係を表したグラフである.その結果,相関係数は0.846 となった. ここで,式(1)と式(4)の強度式の比較を行う. 図-8は横軸にコンクリートの圧縮強度、縦軸にせん断耐 力をとり、3分割した左が孔径 50mm, 中央が孔径 60mm, 右が孔径 70mm の算定結果を比較したものである.式(1) の適用範囲が式(4)の適用範囲を包括していることから, 式(4)の適用範囲内で比較を行っている.これより全体と して,式(4)で算定したせん断耐力の方が式(1)で算定す るせん断耐力より大きくなっている.しかし、コンクリー トの圧縮強度が増加すると両者の値は近づくこととなる. これは、式(1)ではせん断耐力がコンクリートの圧縮強度 に比例するとしているのに対し、式(4)ではせん断耐力が コンクリートの圧縮強度の 0.53 乗に比例する結果となっ



 図−9 せん断力-ずれ変位関係の比較 図−10 せん断力-ずれ変位関係の比較 図−11 せん断力-ずれ変位関係の比較 (D5C3T12)
 (D6C3T12)
 (D7C3T12)

たためである.これより,式(1)は式(4)と比較し,コン クリートの圧縮強度が低い時にせん断耐力を過小評価して いる.よって,複合ラーメン橋剛結部等の孔あき鋼板ジベ ルのせん断耐力を算定する際には拘束度の高い押抜き試験 に基づく式(4)の算定値を推奨する.ただし,シリーズ1 の実験結果からも明らかなように,周囲のコンクリートブ ロックの寸法によってせん断耐力は変化するため,孔あき 鋼板ジベルを拘束する因子の影響を適切に考慮することが 望ましい.

## 5. せん断力-ずれ変位関係の定式化

一般に貫通鉄筋の無い孔あき鋼板ジベルは、せん断耐力 に達するまでは高い剛性を有するが、それ以降はせん断力 が減少する性質があるとされている<sup>1)</sup>. そのため、せん断 力-ずれ変位関係には、適切な形を仮定する必要がある.

そこで、本研究の実験データを用いてせん断力-ずれ変 位関係の定式化を行う.最初にせん断耐力時のずれ変位の 定式化を行った.シリーズ2の板厚19mmの試験結果を除 く全ての結果を対象とし、説明変数を孔径とコンクリート の圧縮強度、被説明変数をせん断耐力時ずれ変位として回 帰分析を行ったところ、せん断耐力時ずれ変位に対するコ ンクリートの圧縮強度の影響はとても低い結果となった. そこで、説明変数を孔径のみとし、回帰分析を行い、式(5) を得た.

$$\delta_{ps0} = 0.355d - 13.9 \tag{5}$$

ここで、 $\delta_{ps0}$ はせん断耐力時ずれ変位(mm)、dは孔径(mm)を表している.次に式(5)で定めたせん断耐力時ずれ変位までのせん断力-ずれ変位関係の定式化を行った.せん断耐力時ずれ変位までを対象とし、説明変数をずれ変位、 孔径、コンクリートの圧縮強度、被説明変数をせん断力として回帰分析を行い、式(6)を得た.

$$Q_{ps} = Q_u (1 - e^{-64\delta_{ps}d^{-1.6}f_c^{\prime 0.6}}) \tag{6}$$

ここで、 $Q_{ps}$ はせん断力(N)、 $\delta_{ps}$ はずれ変位(mm)を 表している.最後に終局ずれ変位を本研究の実験範囲であ る 20mm までと定め、せん断耐力時ずれ変位以降を定式 化する.終局ずれ変位時のせん断力の平均をとるとせん断 耐力の78%の値となった.しかし、せん断耐力時以降荷 重が大きく低下する場合も含めて平均的かつ簡易にせん断 力-ずれ変位関係を表すことを考慮して、終局ずれ変位時 のせん断力をせん断耐力の70%の値と定める.このよう にして得られた式を式(7)に示す.

$$Q_{ps} = Q_{ps}(\delta_{ps0}) \times \left(\frac{20 - \delta_{ps}}{114 - 1.2d} + 0.7\right)$$
(7)

ここで、 $Q_{ps}(\delta_{ps0})$ は式(6)に $\delta_{ps0}$ を代入した値である.図 -9、図-10、図-11は実験値と本研究で提案する式、複 合構造標準示方書<sup>1)</sup>で提案されている式の比較を行ったも のである.ここでは例として孔径の異なる場合について比 較を行っている.この時、せん断耐力は式(4)で導いたも ので統一することで、せん断力-ずれ変位関係のみの比較 を行っている.図-9からわかるように、複合構造標準示 方書<sup>1)</sup>で提案されている式は初期剛性を過大に評価する傾 向があるが、本研究で提案する式は初期剛性からその後の 挙動に至るまで表現出来ていると言える.

## 6. おわりに

本研究では、複合ラーメン橋剛結部等に採用できるよう な孔あき鋼板ジベルの強度評価式を作成するため、拘束度 の高い試験体を用いて押抜き試験を実施した.シリーズ1 の実験では、拘束度を変化させた試験体を用いて押抜き試 験を実施することで、コンクリートブロックの寸法とせん 断耐力の関係を確認し、また、ひび割れの生じない試験体 の寸法を把握することが出来た.シリーズ2の実験では、 シリーズ1で定めたひび割れの生じない拘束度の高い試験 体を用いて押抜き試験を行い、孔あき鋼板ジベルの強度評 価式およびせん断力-ずれ変位関係を定式化し、せん断耐 力やせん断力-ずれ変位関係を概ね再現することが出来た.

今後の課題としては、拘束度を定量的に強度評価式に組 み込むことなどが挙げられる.また、本研究では貫通鉄筋 の無い試験体を対象としているが、貫通鉄筋を有する場合 の実験も行い、データ収集および統計処理し、貫通鉄筋の 及ぼす影響について検討する.

#### 参考文献

- 1) 土木学会: 複合構造標準示方書, pp.64-66, 2009.
- 保坂鐵矢,光本香,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.
- 3) 古内仁,上田多門,鈴木統,田口秀彦:孔あき鋼板ジベルの せん断伝達耐力に関する一考察,第6回複合構造の活用に関 するシンポジウム,2005.
   4) 橋本昌利,小関聡一郎,中島章典,鈴木康夫:孔あき鋼板ジ
- 4)橋本昌利、小関聡一郎、中島章典、鈴木康夫:孔あき鋼板ジベルのせん断耐力に及ぼすコンクリートブロック寸法及び 孔内骨材の影響、第38回土木学会関東支部技術研究発表会 講演概要集,2011.
- 5) 平城弘一,松井繁之,福本**『秀**士:頭付きスタッドの強度評 価式の誘導-静的強度評価式-,構造工学論文集,Vol.35A, pp.1221-1232, 1989.