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 ○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¹⁾. 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^{2),3)}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、 $\mathbf{Z}-\mathbf{1}$ 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 $\mathbf{x}-\mathbf{1}$ に示すように $\mathbf{5}$ パターンに変化させた.試験体名の説明を $\mathbf{Z}-\mathbf{1}$ にきたい、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 1 の中で提案されている式 $^{(1)}$ の強

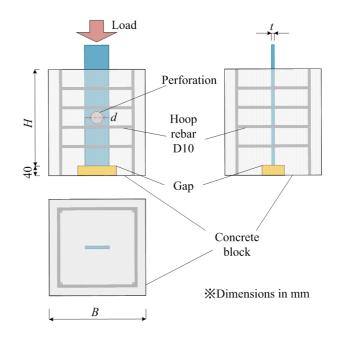


図-1 試験体図



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 $17.3 \times 10^3 < A < 152.4 \times 10^3$

ここで、 V_{psud} :せん断耐力 (N) d :孔径 (mm)

t :鋼板の板厚 (mm)

 f'_{cd} :コンクリートの設計圧縮強度 (N/mm^2)

 γ_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¹⁾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。

+ 1	3+E4 /+	更生
表-1	試験体-	- 覧

				表-1	試験体一覧	1			
	試験体名	B	H	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)
シリーズ1	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
	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
シリーズ 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
	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

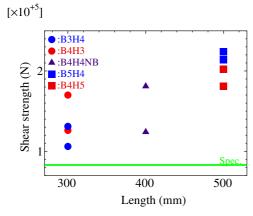


図-3 せん断耐力-コンクリートブロックの寸法

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 2)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 $\mathbf{表}$ -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 \mathbf{Z} -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

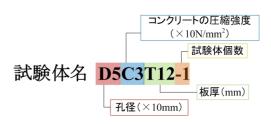


図-4 試験体名 (シリーズ 2)

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

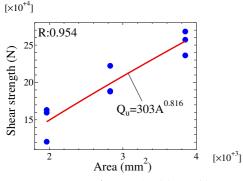
コンクリートと鋼板の相対変位を高感度変位計を用いて 計測する. 計測位置は平鋼板上部からコンクリートブロッ ク上面までである.

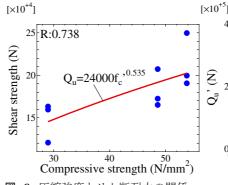
(3) 試験方法

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 $388N/mm^2$, $507N/mm^2$ である。また、鋼板にはSS400





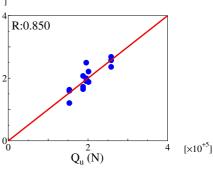


図-5 孔面積とせん断耐力の関係

図-6 圧縮強度とせん断耐力の関係

図-7 強度評価式による整理

を使用した. 板厚 12mm の降伏強度,引張強度はそれぞれ 364N/mm^2 , 450N/mm^2 であり,板厚 19mm の降伏強度,引張強度はそれぞれ 312N/mm^2 , 427N/mm^2 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²⁾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^2)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²⁾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'_c はコンクリートの圧縮強度(N/mm^2)を表している。 $\mathbf{20-6}$ 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 3 1 に近い結果となった。

c) 板厚の影響

保坂らの研究 $^{2)}$ 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

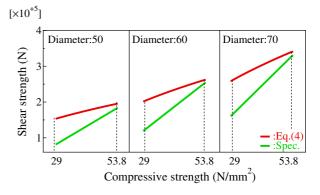


図-8 推定値の比較

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 $^{5)}$ に示されている統計処理法を用いている.

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

式(4)の適用範囲は本実験の変数の範囲内であり、孔径が $50\sim70$ mm, f_c' が $29\sim53.8$ N/mm² 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

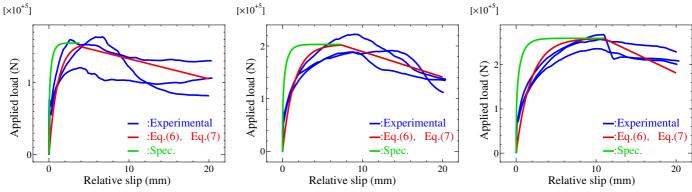


図-9 せん断力-ずれ変位関係の比較 **図-10** せん断力-ずれ変位関係の比較 **図-11** せん断力-ずれ変位関係の比較 (D5C3T12) (D6C3T12) (D7C3T12)

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¹⁾. 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.

$$\delta_{ns0} = 0.355d - 13.9 \tag{5}$$

ここで, δ_{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.

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

ここで、 Q_{ps} はせん断力 (N) 、 δ_{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.

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

ここで, $Q_{ps}(\delta_{ps0})$ は式 (6) に δ_{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 $^{1)}$ 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 $^{1)}$ 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,午島祥貴,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**唀**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.