

(29) パーフォボンドストリップのせん断耐荷機構に関する基礎的研究

Fundamental Study on shear transfer mechanism of Perfobond strips

赤城 尚宏*, 上中 宏二郎**, 鬼頭 宏明***, 園田 恵一郎****

Naohiro Akagi, Kojiro Uenaka, Hiroaki Kitoh, Keiichiro Sonoda

*大阪市立大学大学院, 工学部土木工学科 (〒558-8585 大阪府大阪市住吉区 3-3-138)

**修(工)大阪市立大学大学院, 工学部土木工学科 (〒558-8585 大阪府大阪市住吉区 3-3-138)

***博(工), 大阪市立大学助教授, 工学部土木工学科 (〒558-8585 大阪府大阪市住吉区 3-3-138)

****工博, 大阪市立大学教授, 工学部土木工学科 (〒558-8585 大阪府大阪市住吉区 3-3-138)

Perfobond strip, described herein, is an alternative to ordinary headed stud as a shear connector in steel-concrete composite girders, which is a steel strip with several circular holes punched out to be welded upright on a flange plate of steel girder. This study examined its shear transfer mechanism consisting of aggregate interlock at the hole, bond between the strip and concrete and transverse reinforcement throughout the hole. Therefore, a pull-out shear tests of 13 specimens with plain or embossed steel strips were carried out. Most of these strips had only a hole punched out as a basic study. From the results obtained, contribution ratio of the above three components to their shear transfer mechanism is discussed.

Key words: Perfobond strip, shear connector, pull-out shear test, composite construction

1. はじめに

パーフォボンドストリップとは、合成桁などにおいて慣用の機械的ずれ止めであるスタッドコネクタに代わる物として 1980 年代後半にドイツのレオンハルトら¹⁾により開発されたもので、複数の円孔を設けた帯板を鋼桁フランジ外面上に鉛直に連続溶接施工されたものを指す。その優れたずれ変形特性と簡便な施工性が注目を浴び、種々の検討がなされ、我が国に於いても実施工に至っている。しかしながら、そのせん断耐力の評価式は、開発者であるレオンハルトらの限られた基礎実験結果に基づく経験式を準用しているのが現状であり、基本的な耐荷機構は明瞭でない。そこで、本研究では、レオンハルトらの評価式の妥当性を再検討すると共に、そのせん断耐荷機構を明らかにすべく、その表面の突起の有無を含む鋼帯板とコンクリートの付着条件、円孔径ならびに孔部に貫通する鉄筋(以下、貫通鉄筋と呼称する)の有無を実験変数とした計 13 体の供試体に対し、引抜き型の直接せん断実験を行い、各実験変数がそのせん断耐力に及ぼす影響を検討した。なお、大半の供試体には、その特性を明確にすべく単一孔を設けた鋼帯板を使用した。

2. 既往の関連研究について

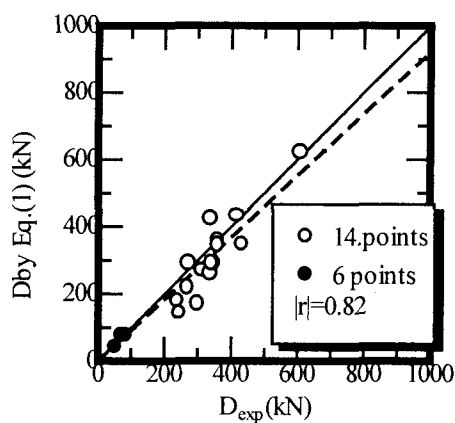
レオンハルトらによるパーフォボンドストリップの 1 孔当たりのせん断耐力の設計値(D)と終局耐力の算定値(D^*)は、帯板の孔の孔径(d)と立方体、円柱供試体でのコンクリート圧縮強度をそれぞれ(β_m, f_c)とすれば各々以下のように与えられる。¹⁾

$$D=1.41d\beta_m, f_c=0.83\beta_m \text{ より}$$

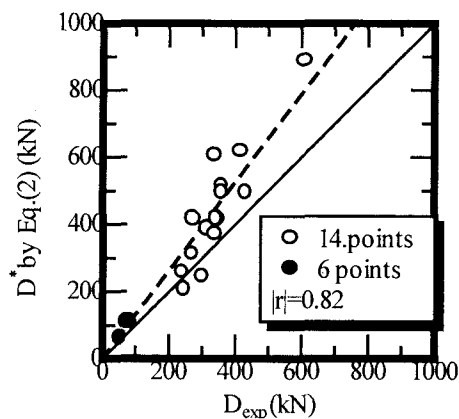
$$D=1.69d^2f_c \quad (1)$$

$$D^*=D/0.7=2.41d^2f_c \quad (2)$$

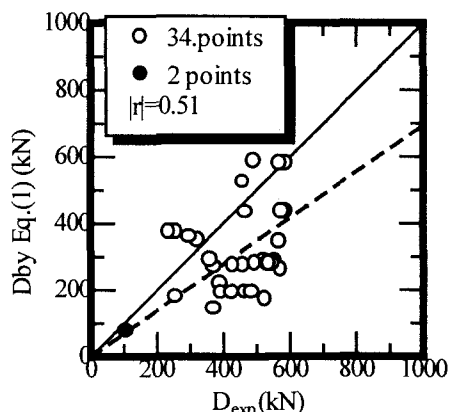
本研究を行う前に他機関で行われた押し抜き型載荷実験成果である全 48^{1),5)}供試体について調査した。図 1 に示すように孔部に貫通鉄筋を有する 34 体とそれのない 14 体に分類し式(1):左列と式(2):右列のようにその相関関係を検討した。その結果、貫通鉄筋のないものは D^* に至らず、 D に整合していること、ならびに貫通鉄筋を有するものは施工性に起因すると思われるばらつきを持つものの平均値は D^* 程度であることが分かった。



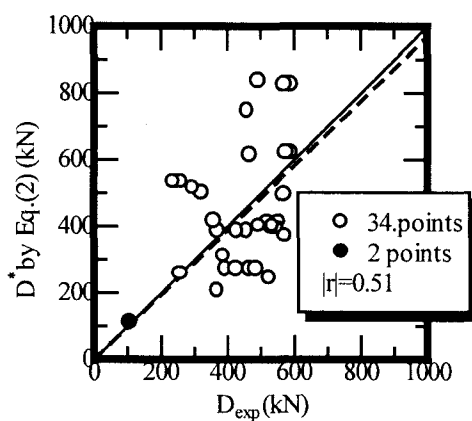
a) 式(1)と貫通鉄筋無しの供試体



b) 式(2)と貫通鉄筋無しの供試体



c) 式(1)と貫通鉄筋有りの供試体



d) 式(2)と貫通鉄筋有りの供試体

図1 既往の実験耐力(●: 本実験, ○: 文献 1)-5))

表1 実験結果一覧

#	Case	Trans. rebar	Bond	f_c (MPa) [1]	Hole diameter (mm)	Shear Strength (kN)			Comparison		
						Predicted		D_{exp} [4]	[4]/[2]	[4]/[3]	[4]/[1] (mm ²)
						Eq.(1) [2]	Eq.(2) [3]				
1*	Case1-1	×	×	29.2	50	123.3	176.0	115.7	0.94	0.66	3962
2*	Case1-2	×	×	29.2	40	78.9	112.7	73.9	0.94	0.66	2531
3*	Case1-3	○	×	29.2	40	78.9	112.7	98.5	1.25	0.87	3373
4*	Case1-4	×	×	29.2	30	44.4	63.4	52.4	1.18	0.83	1795
5*	Case1-5	×	×	29.2	40	78.9	112.7	79.4	1.01	0.70	2599
6*	Case1-6	○	○	29.2	40	78.9	112.7	107.9	1.37	0.96	3695
7*	Case2-1	×	○	29.2	0	—	—	16.1	—	—	551
8**	Case3-1	×	○	22.6	0	—	—	111.3	—	—	4925
9**	Case3-2	×	○	22.6	40	61.1	87.3	99.8	1.63	1.14	4416
10**	Case3-3	○	○	22.6	40	61.1	87.3	149.6	2.45	1.71	6619
11**	Case4-1	×	○	22.6	0	—	—	134.8	—	—	5965
12**	Case4-2	×	○	22.6	40	61.1	87.3	135.8	2.22	1.56	6009
13**	Case4-3	○	○	22.6	40	61.1	87.3	137.1	2.24	1.57	6066

(注) *,**については各々第一期, 二期をしめし, 各期に対応する材料特性は表2を参照されたい.

3.供試体と載荷装置

使用した引抜き型(直接二面)せん断載荷実験(図 2)とは、板圧 19mm の底鋼板を帯板設置面同士と向かい合わせに配置し、その間にコンクリートを打設して供試体を作成し、両鋼板を同時に引抜くように帯板にせん断載荷するものである。尚、鋼板にはグリース塗布とビニール敷設を施した後コンクリートを打設して両材料間の自然付着を除去し、帯板部のみでコンクリートと接合するようにした。またコンクリートの割裂防止用のため補強鉄筋(D10)も配置した。更に帯板の端面とコンクリートとの支圧抵抗を除去するために帯板の両端には長さ 40mm、高さ 100mm、幅 50mm の発泡スチロールを接着した。

与えた実験変数は、付着効果に関して、帯板表面へのグリース塗布の有無；上記 2.を踏まえ貫通鉄筋の有無；式(1)(2)の因子である孔径の大小(30,40,50mm)である(図 4 参照)。ならびに帯板種別(平鋼板、突起高 1mm の縞鋼板と突起高 3mm のリブ鋼板)を用いたものである(図 7 参照)。また二期にわたる実験に使用したコンクリートおよび鋼材の材料特性は表 2 に示す。

4.実験結果と考察

観察された破壊形式は全て孔部コンクリートの二面せん断破壊によるものであった。(図 3 参照) 以下においては、実験耐力 D_{exp} について考察を加える。

4.1 帯板とコンクリートの付着

図 4 における灰色矢印(CASE1-2,1-5 と CASE1-3,1-6)の供試体比較により付着効果について考察する。予め実施した同形状無孔帯板を有する供試体に対する実験耐力(図 7, CASE2-1)より、有孔帯板とコンクリートの付着耐力: D_b は 12.1kN と推定できた。一方、有孔帯板の有する供試体において帯板表面の付着の有無による耐力差すなわち付着耐力を表 3 に示した。更に両付着耐力に対して帯板表面にグリースを塗布しない供試体の耐力との比を同表 $D_b/[b]$ と $[c]/[b]$ に示す。これより、有孔帯板のせん断耐力にしめる自然付着項の割合は 10%程度と言える。

4.2 貫通鉄筋の効果

図 4 における白矢印(CASE1-2,1-3 と CASE1-5,1-6)の供試体比較により帯板の孔部に通した貫通鉄筋の効果を考察する。帯板の孔に貫通鉄筋を通した効果には表 4 に示すように耐力差として明確に出ている。貫通鉄筋を通していない供試体に比べて、貫通鉄筋を通した供試体は約 30%の耐力増加が見込まれる。しかし貫通鉄筋を配置することで鉄筋周囲のコンクリートに鉄筋を起因とした支圧破壊が生じる供試体も見られた。

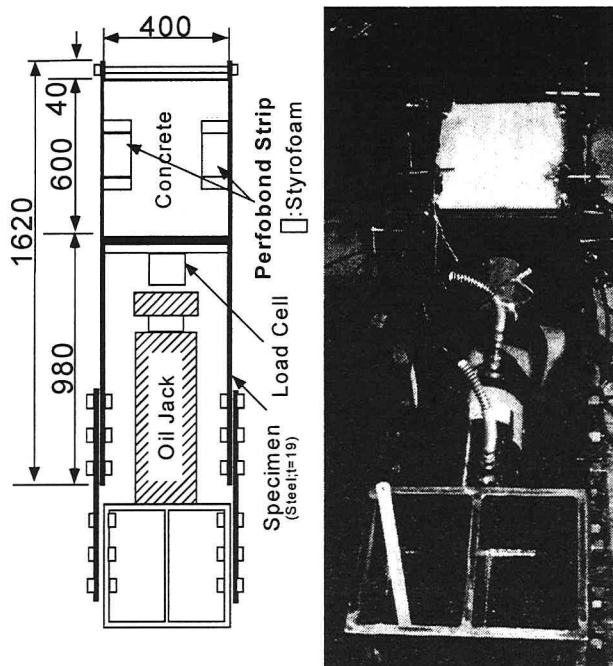
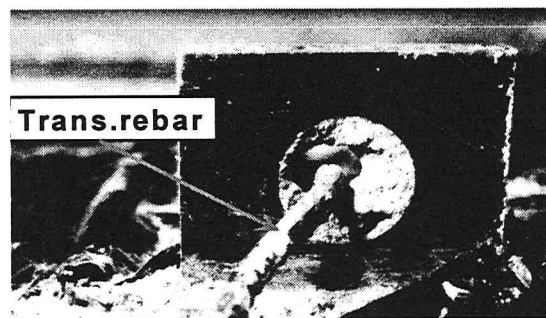


図 2 実験載荷装置図



(a) Case 1-2



(b) Case 1-6

図 3 孔部内コンクリートせん断破壊状態

表 2 材料特性

Test term	f_c (MPa)	E_c (MPa)	f_y (MPa)	E_s (MPa)
1st	29.2	24.8	271	212
2nd	22.6	23.0	302	215

4.3 円孔径の効果

図4における黒矢印(CASE1-1,1-2,1-4)の供試体比較により帯板孔部の効果について考察する。孔径を変化(30,40,50mm)させた供試体の結果は、図5に示すようにレオンハルトらによる式(1)の値に対して整合しているが、孔径:d 自身に比例する傾向も伺える。また、図6より10mm程度ずれば耐力はほぼ孔径に関係なく一定の値に収束しているようである。

4.4 突起付き鋼板の帯板への活用

図7に示すように平鋼板と縞鋼板とリブ鋼板の三種を帯板に用い、かつ各々について帯板に孔の無いもの(CASE2-1,3-1,4-1)、孔の有るもの(CASE 1-5,3-2,4-2)、そして孔に鉄筋を通したもの(CASE 1-6,3-3,4-3)の計9種9体の供試体を比較した。比較に当たってはコンクリート強度の違う供試体があるためコンクリート強度で耐力を除いた値を比較する。孔部の無い供試体については平鋼板を用いたCASE 2-1に比べ突起付き鋼板を用いた供試体は大きな耐力を示したが縞鋼板CASE 3-1とリブ鋼板CASE 4-1ではCASE 4-1の方が大きな値を示した。(表5参照)

一方帯板に孔部を設けた場合は、縞鋼板CASE3-2については無孔の縞鋼板帯板CASE 3-1の方が大きな耐力を示し、有孔のリブ鋼板CASE 4-2の場合はほぼ無孔のものCASE 4-1と同じ値を示している。これは孔部の部分の鋼板がコンクリートに置換したときに縞鋼板では縞鋼板効果がコンクリートのせん断耐力効果を上回り、リブ鋼板に関してはそれらがほぼ同じであった。孔部中央に貫通鉄筋を入れた時の効果としては貫通鉄筋を入れない時と比較して平鋼板、縞鋼板と共に約1.4倍の耐力増加が見られ、リブ鋼板に関してはほぼ同じ値である。突起の効果としては耐力増加と最大体力発揮後の耐力保持が考えられる。耐力増加としては貫通鉄筋の有無に関わらず平鋼板を用いたものに比べて縞鋼板で約1.7倍以上、リブ鋼板で約1.6倍以上の耐力増加が見込まれる。図3に関しては平鋼板CASE2-1はほぼ一定値で縞CASE 3-1、リブCASE 4-1共に10mmずれた後は同じ値に収束している。一方図9では縞CASE 3-2、リブCASE 4-2は10mm程度ずれば平鋼板CASE 2-2のものほとんど耐力に差はなくほぼ同じ値に収束している。貫通鉄筋を通した時には図10に見られる平鋼板CASE1-6、縞鋼板CASE 3-3そしてリブ鋼板CASE 4-3はかなりばらつきがある。これは実験の観察結果から孔部の貫通鉄筋により鉄筋周囲のコンクリートが支圧され供試体コンクリートが破壊されたもの(CASE 1-6, CASE 4-3)と、またその破壊が伴わずに貫通鉄筋が変形していたもの(CASE 3-3)の差が有ると思われる。耐力を保持しながら変形するという点で剛なずれ止めとして縞鋼板に鉄筋を通したもののCASE 3-3は理想的な挙動を示している。

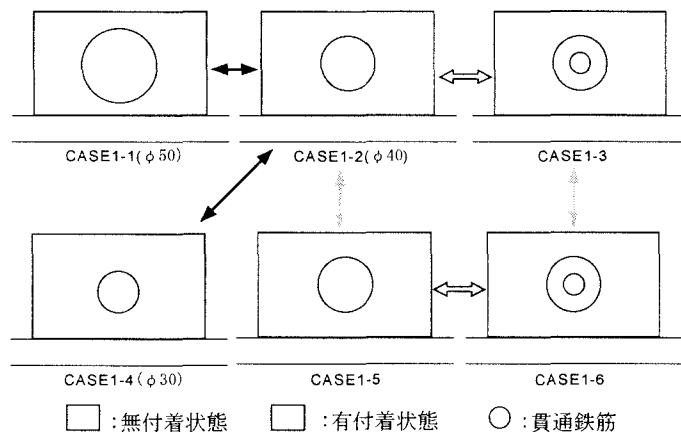


図4 供試体比較図(その1)

表3 付着効果

供試体	D_{exp} (kN)	$[b]-[a]$ (kN)	$[D_b]/[b]$	$[c]/[b]$
CASE1-2	73.9[a]	5.5[c]	0.15	0.07
CASE1-5	79.4[b]			
CASE1-3	98.5[a]	9.4[c]	0.12	0.09
CASE1-6	107.9[b]			

表4 貫通鉄筋の効果

供試体	D_{exp} (kN)	$[b]-[a]$ (kN)	$[c]/[a]$
CASE1-2	73.9[a]	24.6[c]	0.33
CASE1-3	98.5[b]		
CASE1-5	79.4[a]	28.5[c]	0.36
CASE1-6	107.9[b]		

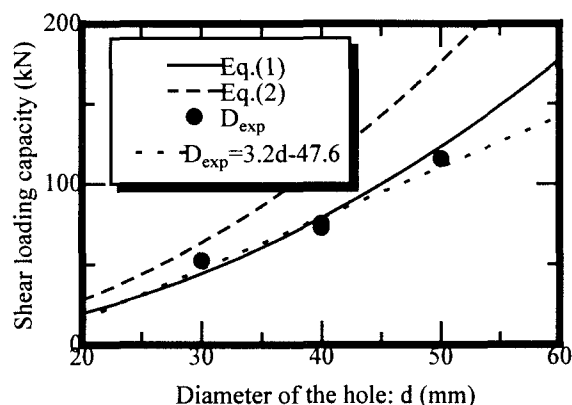


図5 孔径と耐力(平鋼板)

5, まとめ

(1) コンクリートと帯板間に働く自然付着の効果

帯板とコンクリートとの間に働くと思われる自然付着の効果はせん断耐力に対し約 10%程度であった。

(2) 孔内への貫通鉄筋の効果

帯板の孔の中心に通す貫通鉄筋の効果は、約 35%のせん断耐力増加として現れた。これにより貫通鉄筋を有する場合の耐力はレオンハルトらによる耐力式(2)と同等となった。

(3) 円孔径の効果

帯板の孔径の効果は孔面積に比例しレオンハルトらにより提案された設計式(1)に整合し、既往の押し抜き試験結果と同様であった。また耐力値は孔径自身に比例する傾向も認められた。

(4) せん断耐力の分担率

上記(1)～(3)より、平鋼板を用いた通常のパーフォボンドストリップのせん断耐力の分担率は、孔部コンクリートのせん断抵抗：貫通鉄筋の効果：帯板とコンクリートの付着で約 6：3：1 であった。

(5) 突起付き鋼板の帯板への活用

1) 平鋼板を用いたパーフォボンドストリップに比べ突起付き鋼板の縞鋼板は約 1.7 倍以上、リブ鋼板は孔部貫通鉄筋有無でばらつくものの約 1.6 倍以上の耐力増加がある。また、突起付き鋼板を用いることで期待した最大強度発揮後の耐力保持については平鋼板と比較して明瞭な差は見られなかった。

2) 突起付き鋼板の帯板に孔を設けるものと設けないものに明確な耐力増加は見られなかったことから、帯板に突起付き鋼板を用いるときの孔部の設け方に今後の課題を残す結果となった。

3) 貫通鉄筋を設けることにより、平鋼板と縞鋼板では約 1.4 倍の耐力増加が見込まれたが、リブ鋼板の場合では耐力にほとんど変化はなかった。孔部貫通鉄筋を設けるときは結果にばらつきが出ており評価し難いものであった。

表 5 実験結果

CASE 2-1	CASE 1-5	CASE 1-6
551	2599	3695
CASE 3-1	CASE 3-2	CASE 3-3
4925	4416	6619
CASE 4-1	CASE 4-2	CASE 4-3
5965	6009	6066

Unit: $D_{exp}/f_c(\text{mm}^2)$

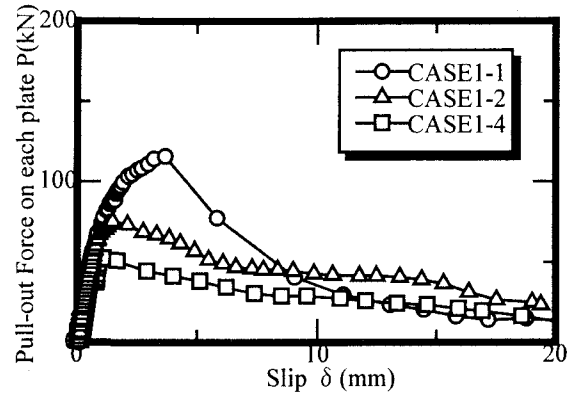


図 6 孔径の異なる供試体の P-δ 曲線

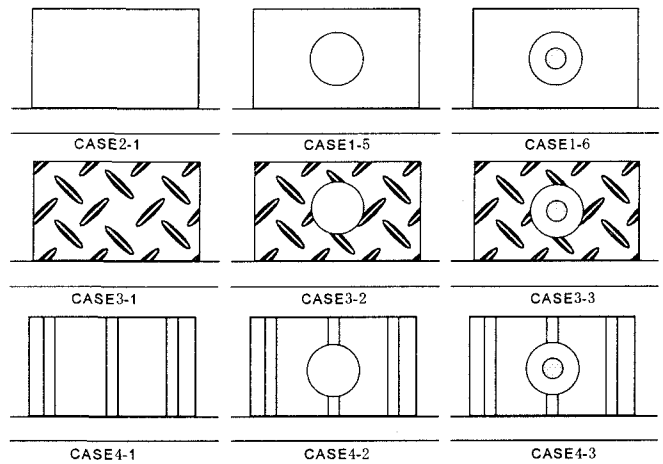


図 7 供試体比較図(その2)

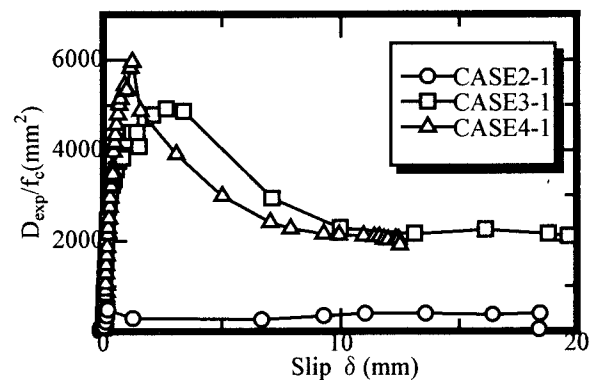


図 8 突起付き鋼板の効果 (無孔)

7)Roberts, S.W. And Heywood, R.J.: An innovation to increase the competitiveness of short span steel concrete composite bridge, Developments in Short and Medium Span Bridge Engineering, 1994.

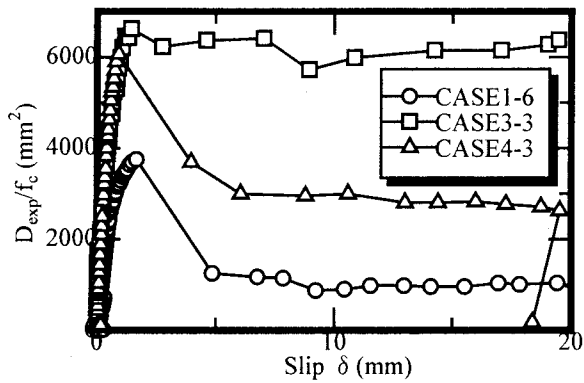


図9 突起付き鋼板の効果 (有孔)

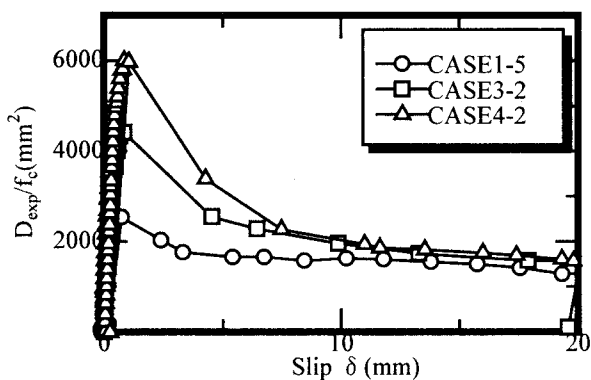


図10 突起付き鋼板の効果 (有孔+貫通鉄筋)

参考文献

- 1)Leonhardt, F. Andra, W., Andra, H and Harra, W. : Neues, vorteilhaftes Verbundmittel für Stahlverbund-Tragwerke mit hoher Dauerfestigkeit, BETON-UND STAHLBETONBAU, pp.325-331, 12/1987.
- 2)Oguejiofor, E.C. And Hosain, M.U.: Perfobond rib connectors for composite bridge, Composite Construction in Steel and Concrete II, ASCE, pp.883-898,1992.
- 3)蛭名貴之, 高橋恵悟, 上平謙二, 柳下文夫: パーフォボンドリブのせん断耐力に関する基礎的研究, 第8回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.31-36, 1998.
- 4)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.
- 5)平陽兵, 古市耕輔, 山村正人, 富永知徳: 孔あき鋼板ジベルの基本特性に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.3, pp.859-864, 1998.
- 6)水口和之, 大浦隆, 芦塚憲一郎, 滝憲司, 古田公夫, 加藤卓也: 本谷橋の設計と施工, 橋梁と基礎, Vol.32, No.9, pp.2-10.