

# 汎用コード MARC を用いたパーフォボンドストリップの せん断伝達機構に関する数値解析的研究

構造工学分野 山岡 悟

## 1. はじめに

近年、土木構造物における複合構造の一つとして鋼材とコンクリートを併用する合成構造が注目されている。併用に際して、これらの部材としての一体的な挙動を保障するために、接合面にずれ止めを配し応力伝達などを円滑に行う必要がある。現在、慣用的なずれ止めであるスタッドに代わる新しいずれ止めとして、Leonhardtらは1980年代後半にパーフォボンドストリップ（以下 PBS）を提案した。PBS とは、合成桁を例に取れば、複数の円孔を設けた鋼帯板を鋼桁フランジ部に垂直に連続溶接し、円孔内部にはコンクリートを充填する。そして、円孔内のコンクリートの 2 面せん断にて抵抗するずれ止めである。PBS は従来の頭付きスタッドに比べて、耐疲労性や施工性、コスト削減など、さまざまな利点を有する。本研究では、この PBS のせん断伝達機構を解明するために、既往研究における実験、及び解析による成果を踏まえ、汎用構造解析コード：MARC を用いて有限要素法(FEM)による弾塑性解析を行った。そして、実験結果との対比により本解析手法の妥当性を検証した上で、実験では計測困難なコンクリート内部、ならびに帯板の応力状態や変形状態を調べた。

## 2. Leonhardt らによる PBS のせん断強度算定式[1]

彼らによって提案された帯板 1 孔当たりのせん断強度算定値：D は、次の通りである。

$$D = \frac{\pi}{4} d^2 \times 1.08 f_c \times 2 \quad (1)$$

ここに、 $d$ ：孔径(mm)

$f_c$ ：円柱供試体圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>)

## 3. 解析手法

### 1) 既往研究における実験の概要と破壊形式

赤城らによる既往研究[2]において、載荷方法の違い、すなわち日本鋼構造協会の頭付きスタッドの押抜き試験方法（案）[3]に示される押抜き試験法と、その欠点を補う形で用いた引抜き試験法の両試験法、および孔数(1~3)、鉄筋の有無を実験変数とする計 12 体の供試体について実験が行われている。実験供試体の詳細、および実験により得られた材料定数を表 1、および表 2 に示す。

さらに実験により得られた破壊状況を図 1 に示す。PBS には想定される破壊形式が 3 つ存在するが、既往研究に

おける破壊形式は、円孔内コンクリートの二面せん断破壊であったことが分かる。

表 1 帯板の詳細

#	Tag	Strip Length (mm)	Number oh Hole	Reinforced Bar
1	pull-1n	100	1	×
2	pull-1r	100	1	D10
3	pull-2n	200	2	×
4	pull-2r	200	2	D10
5	pull-3n	300	3	×
6	pull-3r	300	3	D10
7	push-1n	100	1	×
8	push-1r	100	1	D10
9	push-2n	200	2	×
10	push-2r	200	2	D10
11	push-3n	300	3	×
12	push-3r	300	3	D10

表 2 各種材料定数

Pull-out model			Push-out model		
Concrete			Concrete		
Cylinder Strength $f_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	Elastic Modulus $E_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	Poisson's Ratio (-)	Cylinder Strength $f_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	Elastic Modulus $E_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	Poisson's Ratio (-)
30.4	25300	0.183	22.9	22000	0.183
Steel			Steel		
Yeild Strength $f_{sy}$ (N/mm <sup>2</sup> )	Ultimate Strength $f_{su}$ (N/mm <sup>2</sup> )	Elastic Modulus $E_s$ (N/mm <sup>2</sup> )	Yeild Strength $f_{sy}$ (N/mm <sup>2</sup> )	Ultimate Strength $f_{su}$ (N/mm <sup>2</sup> )	Elastic Modulus $E_s$ (N/mm <sup>2</sup> )
275	430	210000	264	420.2	202000
Reinforcement			Reinforcement		
Yeild Strength $f_{sy}$ (N/mm <sup>2</sup> )	Ultimate Strength $f_{su}$ (N/mm <sup>2</sup> )	Elastic Modulus $E_s$ (N/mm <sup>2</sup> )	Yeild Strength $f_{sy}$ (N/mm <sup>2</sup> )	Ultimate Strength $f_{su}$ (N/mm <sup>2</sup> )	Elastic Modulus $E_s$ (N/mm <sup>2</sup> )
324	439	274000	363	490.7	185000

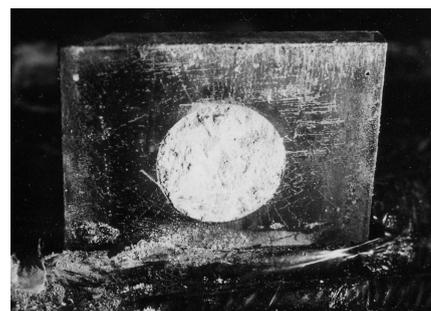


図 1 既往実験の破壊形式-二面せん断破壊

## 2) 実験供試体に対する解析モデル化

解析モデル化に対しては、引抜きモデルでは図 2 に示すようにコンクリート中央部分を対称面とする対象部分と鋼帯板のせん断力载荷方向に添う中央線を対称面とする 1/4 モデルとした。両対称面上の接点は、面内での移動を許し、面外への移動を拘束することで対称条件を満たすものとした (Symmetric Condition 1.2)。また、鋼帯板部の反りを抑制するために鋼帯板の端部の変形を抑制し (Restraint Condition 1)、鋼帯板端部にはせん断方向の拘束を与えた (Restraint Condition 2)。一方、荷重については、コンクリート部の載荷面に強制変位を与える (Loading Condition) ことで対応した。

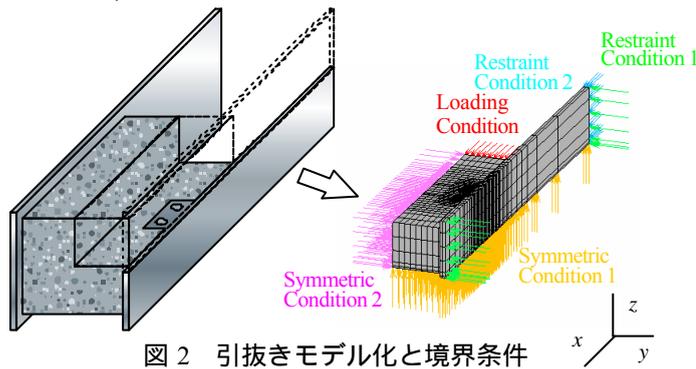


図 2 引抜きモデル化と境界条件

一方、押抜きモデルでは、図 3 に示すように、帯板軸に沿う断面と、鋼フランジ部の中心を対称面とする 1/4 モデルとし、それに伴う境界条件として、まず対称面には引抜きモデルと同様の、節点の面外移動を拘束し (Symmetric Condition 1.2)、次に、既往実験で固定されていたコンクリート底部を同様に拘束する (Restraint Condition 1)。最後にフランジ部端部に強制変位を与え、これを載荷荷重とした (Loading Condition)。

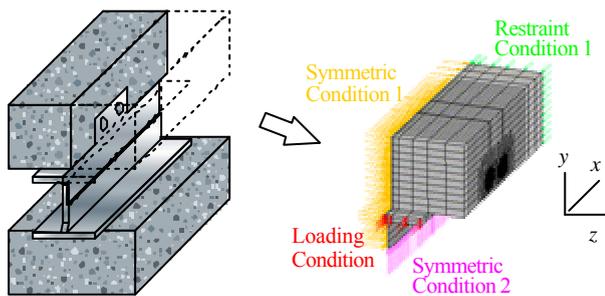


図 3 押抜きモデル化と境界条件

表 3 境界条件詳細

	Pull-out model			Push-out model		
	Ux	Uy	Uz	Ux	Uy	Uz
Symmetric Condition 1	-	-	0	-	-	0
Symmetric Condition 2	-	0	-	-	0	-
Restraint Condition 1	-	0	-	0	-	-
Restraint Condition 2	0	-	-	-	-	-
Loading Condition	-	-	-	-	-	-

## 3) 弾塑性解析に当たっての降伏条件

本研究では降伏曲面として、Drucker-Prager による降伏

条件を選んだ。Drucker-Prager 則は降伏曲面を次式で表す。

$$I_1 + \sqrt{J_2} - k = 0 \quad (2)$$

ただし、

$$= \frac{2 \sin}{\sqrt{3}(3 - \sin)}; k = \frac{6c \cos}{\sqrt{3}(3 - \sin)} \quad (3)$$

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$$

$$J_2 = -(\sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2 \sigma_3 + \sigma_3 \sigma_1)$$

ここに、 $c$  : 粘着力  $\phi$  : せん断摩擦角

$\sigma_i$  : 主応力  $s_i$  : 偏差応力 ( $i=1,2,3$ )

本研究では基本的に、既往実験により得られた材料定数に基づいてモデル化を行っている。しかし、Drucker-Prager の降伏条件については、直接せん断問題の数値解析に実績を有する  $\phi = 37^\circ$ 、 $c = 0.183$ [4]を用いる。これにより Mohr-Coulomb の降伏曲面とそれに内接する Drucker-Prager の降伏曲面を描くと図 4 のように現される。

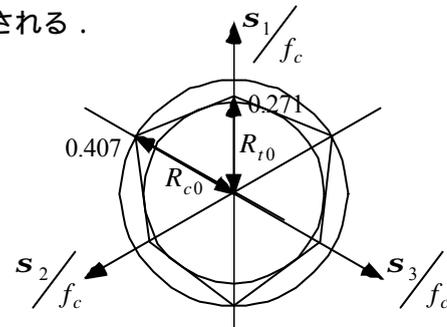


図 4 Drucker-Prager の降伏曲面

## 4) 破壊力学の適用

本研究では擬脆性的な材料であるコンクリートに対して破壊力学パラメータの一つである破壊エネルギーを定義し、これにより求まる軟化曲線によりクラックの概念を導入している。破壊力学パラメータは式(4)に示す CEB-FIP MODEL CODE 1990[5]により定義し、また軟化曲線は分布ひび割れモデルを用いる際の二直線等価一軸応力 ひずみ曲線における係数  $a$  の式(5)[6]により定める。

$$G_f = a_F f_{cm}^{0.7} \quad (4)$$

ここで、 $G_f$  : 破壊エネルギー ( $N \cdot mm/mm^2$ )

$a_F$  : 骨材の最大粒径による係数

$f_{cm}$  : 立方体供試体圧縮強度 ( $N/mm^2$ )

$$a = \frac{2G_f}{s_f \cdot e_t} \quad (5)$$

ここで、 $s$  : 最小要素寸法 (mm)

$f_t$  : 引張強度 ( $N/mm^2$ )

$e_t$  : 引張降伏ひずみ

これにより、本解析で用いた等価一軸応力 ひずみ曲線は図 5 のように表される。

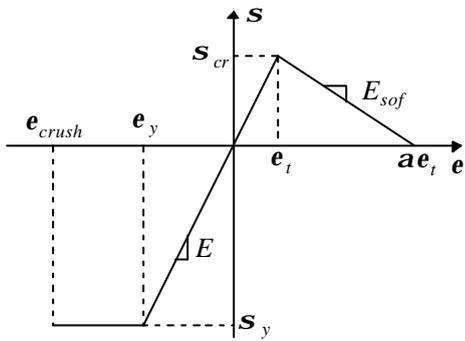


図5 等価一軸応力 ひずみ曲線

#### 4. 既往実験結果との対比検討

##### 1) 最大せん断強度による比較

PBS の特性を評価するに当たって最も重要だと思われる最大せん断強度に着目する．対比検討のため Leonhardt らによる最大せん断強度算定値：式(1)も付け加えた．図6に見られるように，押抜きモデルにおいては概ね良好な結果を与えていた．しかし，引抜きモデルでは2n, 3nを除く全てのモデルでせん断強度が高くなる傾向が見られた．尚，図中 exp は実験結果，ana は解析結果である．

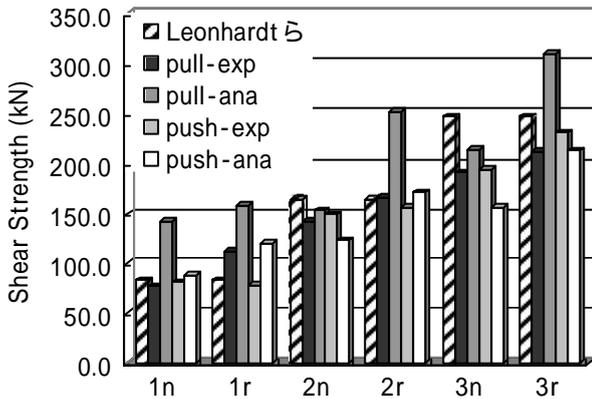


図6 最大せん断強度による比較

##### 2) 荷重 変位関係による比較

次に荷重 変位関係に着目して本解析モデルの妥当性を評価する．これ以降，既往実験における結果で比較的安定していたもののうちの一つを典型例として比較の対象とし，記述する．図7に引抜きモデルのうち1孔を有する貫通鉄筋の無いモデル ( pull-1n )，図8に押抜きモデルのうち1孔を有する貫通鉄筋の無いモデル ( push-1n ) における荷重 変位関係の比較の結果を示す．

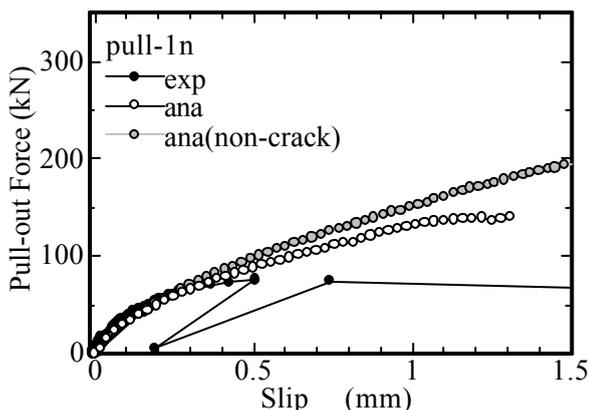


図7 pull-1n P-d

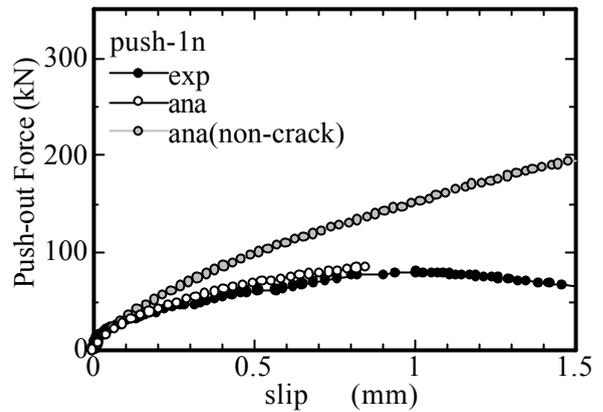


図8 push-1n P-d

両図より，最大せん断強度到達直前までの挙動は比較的良好にモデル化できていることが分かる．しかし，引抜きモデルにおいて，最大せん断強度の比較にも見られたように荷重が上がり続けるという傾向が見られた．これはクラックに関するパラメーターの設定に改善の余地が残っていることが原因であると思われる．

##### 3) 帯板せん断方向ひずみによる比較

図9，図10に引抜きモデル，および押抜きモデルによる帯板せん断方向ひずみを示す．それぞれ貫通鉄筋のある2孔を有するモデルと貫通鉄筋のない1孔を有するモデルの結果である．図から分かるように，帯板近傍の位置によるひずみの大きさの割合など，実験と解析による結果が形状的にほぼ同様の傾向を示した．

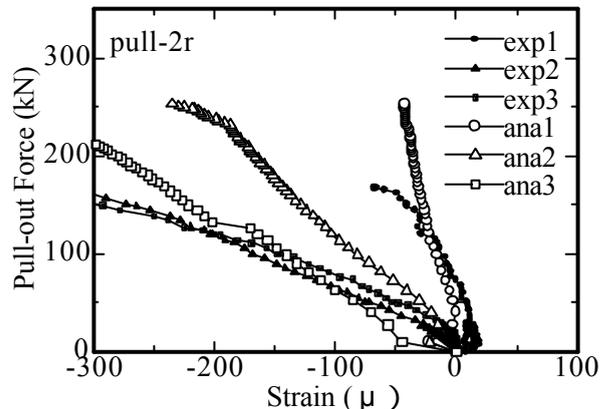


図9 pull-2r 帯板のせん断方向ひずみ

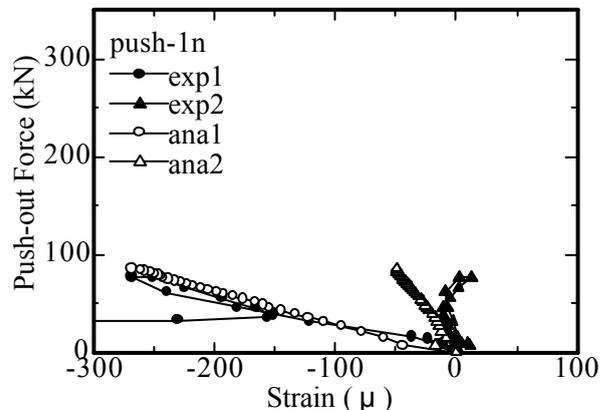


図10 push-1r 帯板のせん断方向ひずみ

##### 4) 貫通鉄筋の引張力による比較

最後に，せん断力と鉄筋の引張力の関係に着目する．この関係においては載荷方法による違いがあまり見られ

なかったため、押抜き荷重方法による 3 孔を有する貫通鉄筋のあるモデル (push-3r) を比較対象の典型例とし、その結果を図 11 に示す。同図より貫通鉄筋の引張力が大きく出ていることが分かる。これは貫通鉄筋のモデル化の際、コンクリートと鉄筋を完全合結としたことが影響しているものと思われる。しかし、鉄筋の位置によるせん断力の負担の割合などは合致しており、本解析モデルが PBS の特徴を捕らえつつも改善の余地が残っているものと思われる。

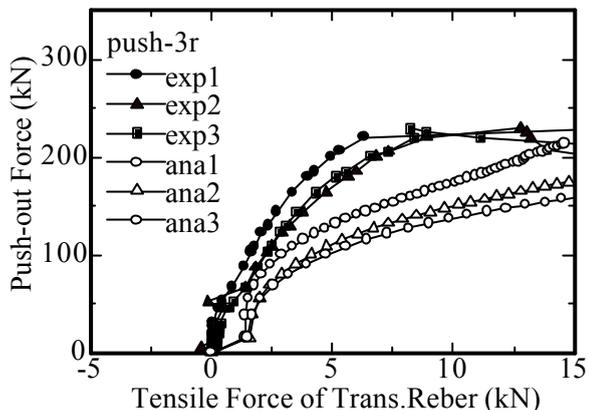


図 11 push-3r 貫通鉄筋の引張力

## 5. 解析結果

既往の実験との比較により解析モデルに一定の妥当性があるものとみなし、両荷重モデルにおける 2 孔を有する貫通鉄筋のあるモデル (pull-2r, push-2r) を典型例にとり、せん断強度到達時の供試体内部の応力状態、変形状態について調べる。

### 1)せん断面におけるせん断方向直応力分布： $s_x$

せん断面におけるせん断方向直応力分布に着目する。図 12, および図 13 はコンクリート部, 図 14, および図 15 は鋼部の各供試体のせん断面における結果である。応力幅は-100N から 100N まで取っており、色が白色に近づくほど引張応力が強く、黒色に近づくほど圧縮応力が強く発生していることを示している。

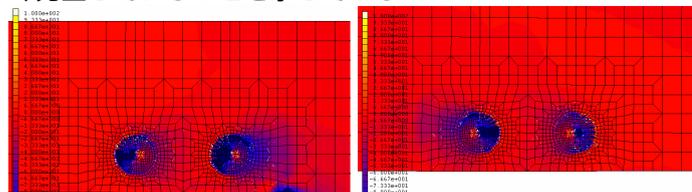


図 12 pull-2r concrete :  $s_x$

図 13 pull-2r concrete :  $s_x$

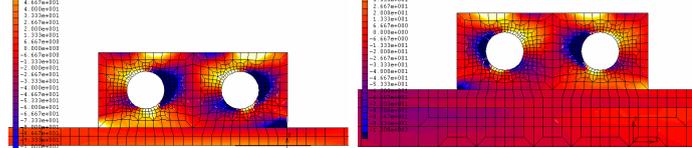


図 14 pull-2r steel :  $s_x$

図 15 push-2r steel :  $s_x$

各図により PBS は鋼板フランジ部まで円滑に応力を伝達していることが分かる。荷重方法の違いについては、フランジ部には応力分布の違いが見られるものの帯板付近の応力分布には違いが見られなかった。

### 2)せん断面におけるせん断応力分布： $t_{xy}$

次にせん断面におけるせん断応力分布に着目する。図 16, および図 17 にコンクリート部, 図 18, および図 19 に鋼部の各供試体の結果を示した。せん断応力の幅はコンクリート部で最大  $20\text{N/mm}^2$ 、鋼部で最大  $150\text{N/mm}^2$  で、黄に近づくほど引抜きモデルの荷重方向である  $x$  軸の正の方向にせん断応力が強く発生していることを示し、黒に近づくほど押抜きモデルの荷重方向である  $x$  軸の負の方向にせん断応力が強く発生していることを示している。

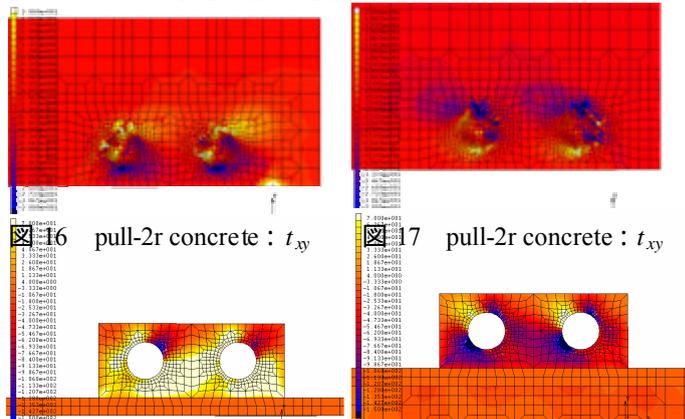


図 16 pull-2r concrete :  $t_{xy}$

図 17 push-2r concrete :  $t_{xy}$

図 18 pull-2r steel :  $t_{xy}$

図 19 push-2r steel :  $t_{xy}$

各図より、コンクリート部円孔部でせん断応力が  $20\text{N/mm}^2$  以上発生しており、三軸状態であることを考慮してもせん断破壊していることが分かる。また各円孔の周りの荷重方向前端部に位置する帯板近傍において、せん断応力がその上下部で逆転しており、円孔中心軸を境に上下でせん断を受けていると言える。

## 6. 結論

- 1) 最大せん断強度、帯板のせん断方向ひずみなど、本研究における供試体の解析モデル化が、実験結果との対比を通して概ね妥当である。
- 2) せん断に抵抗する際、PBS はその応力をフランジ部まで伝えフランジと一体となって抵抗するため、従来の頭付きスタッドに対して耐疲労上の利点を有する。
- 3) 帯板付近における応力分布の違いは見られず、引抜き試験法においても押抜き試験法と同様に PBS の特性を評価し得る。

## 参考文献

[1] Leonhardt, F., et al: Beton-und Stahlbetonbau, pp.325-31 1987. [2] 赤城尚宏: パーフォボンドストリップのせん断伝達機構に関する実験及び数値解析的研究, 大阪市立大学大学院工学研究科修士論文, p.51, 2001 [3] 日本鋼構造協会: 頭付きスタッドの押抜き試験方法(案)とスタッドに関する研究の現状, 日本鋼構造協会, pp.1-24, 1996 [4] 上田真稔: 鉄筋コンクリート部材の離散化解析法に関する研究, 東京大学学位請求論文, pp.28-61, 1995 [5] CEB FIP: CEB-FIP Model Code 1990, First Draft, Bulletin d'Information, pp.2-1-7, 1991 [6] R.J.Cope: Nonlinear analysis of concrete slabs, Pineridge Press, 1986