

# 論文 平鋼シアコネクタによる混合構造接合部における応力伝達に関する基礎的研究

山田 武正<sup>\*1</sup>・辻本 和弘<sup>\*2</sup>・渡辺 宗樹<sup>\*2</sup>・篠崎 裕生<sup>\*3</sup>

**要旨**：鋼材表面に溶接した平鋼をシアコネクタとしてコンクリートとのせん断伝達を図る構造は鋼・コンクリート複合構造物において広く採用されている。しかしながら、鋼部材とコンクリート部材からなる混合構造の接合部への当該構造の適用性に関しては明らかでない部分も多い。筆者らは、混合構造物の接合部における鋼部材の応力伝達に関する基礎的研究として、既往の研究成果および数値実験により、非線形 FEM 解析および伝達マトリクス法による計算で実験を再現できること、および定着部の応力伝達特性にはシアコネクタ間隔および定着長が支配的な要因であることを確認した。

**キーワード**：混合構造, シアコネクタ, 応力伝達, FEM 解析, ひび割れ, 定着長

## 1. はじめに

複合構造における鋼材とコンクリートの一体化は、スタッドジベル等のずれ止めによるせん断伝達により図るのが一般的であった。一方、近年、鋼材に突起あるいは開口を設けることによってせん断伝達を図る構造が広く用いられるようになってきている。鋼殻ケーソン構造、鋼・コンクリート合成床版などの鋼・コンクリートサンドイッチ構造では山形鋼あるいは平鋼をシアコネクタとしてせん断伝達を図る構造およびその設計法が示されている<sup>1)</sup>。これらの合成構造ではシアコネクタに作用するせん断力は構造物に生じる曲げモーメント分布に基づいて発生する鋼材軸力の変化分であるために、各シアコネクタで比較的均等にせん断力を負担する場合を想定している。鋼部材とコンクリート部材からなる混合構造の接合部ではせん断力は大きく変化することが確認されており<sup>2)</sup>、このような構造に適用する際のガイドラインとしては必ずしも十分ではない。Chuar 等はシアコネクタの個数、間隔などをパラメータとした実験を実施し、シアコネクタを複数配置した場合の伝達力とずれ

変位の関係性を評価する方法を提案した<sup>3)</sup>。本論文は、まず、この研究成果に基づいて、ここで提案する数値解析モデルの適用性を検証する。続いて、適用性が検証された解析モデルを用いてシアコネクタに関するパラメータを変化させた数値実験を実施し、混合構造接合部の軸力伝達の観点からシアコネクタの伝達特性を考察する。

## 2. 既往の研究概要<sup>3)</sup>

### 2.1 試験方法の概要

シアコネクタを複数配置した場合の応力伝達特性について図-1に示す引抜き一面せん断試験が実施されている。この試験では高さ 300mm、幅 150mm の梁状のコンクリート躯体の上面に複数枚の平鋼状のシアコネクタを取付けたベッドプレート(厚さ 6mm)が設置されている。試験では、ベッドプレートの左端を反力架台に固定し、躯体の上下 2 点で鉛直方向の変位および回転を拘束した状態でコンクリート躯体を左端から右方向に押すことにより、ベッドプレートの左端に引張力を作用させている。試験のパラメータは、シアコネクタの個数、間隔、厚さ、高さおよび

\*1 三井住友建設 (株) 土木本部 土木設計部 (正会員)

\*2 三井住友建設 (株) 土木本部 土木設計部

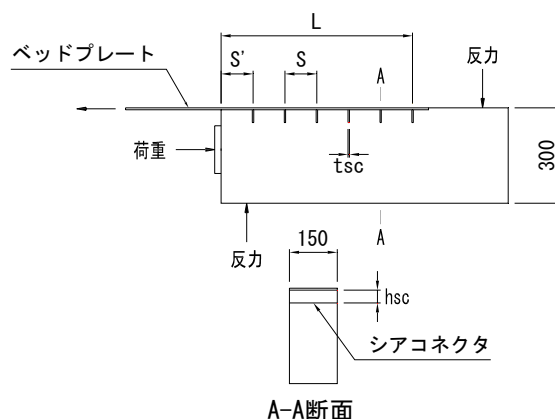
\*3 三井住友建設 (株) 技術研究所 (正会員)

ベッドプレートの定着長である。なお、コンクリート強度は試験によって異なるが 20～30N/mm<sup>2</sup> 程度である。

## 2.2 研究成果の概要

実験およびその解析から得られた研究成果を以下に抜粋する。

- (1) 荷重作用端に近いシアコネクタから破壊が逐次生じるという進行性破壊を示す。
- (2) 各シアコネクタの最大伝達力と変位の関係は同一の関係式で表される。
- (3) シアコネクタ間隔が大きいほど一つのシアコネクタの伝達耐力および剛性が增大する。
- (4) シアコネクタの厚さは剛性には影響を与えるが、耐力に及ぼす影響は小さい。



シアコネクタ個数 :	n = 2, 4, 6, 7, 8, 10
シアコネクタ間隔 :	S = 100mm, 150mm
シアコネクタ高さ :	h <sub>sc</sub> = 20mm
シアコネクタ厚さ :	t <sub>sc</sub> = 1.2mm, 2.3mm
載荷端からの距離 :	S' = 100mm, 200mm
定着長 :	L = 300, 500, 600, 800, 900, 1000mm

図－1 Chuar 等の実験概要

## 3. 数値実験ツールの適用性検証

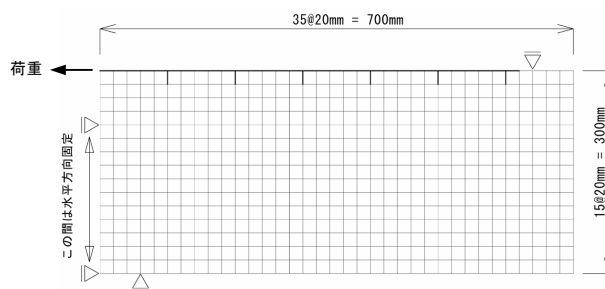
上述の研究成果に基づいて、数値実験で採用する解析ツールの適用性を検証した。

### 3.1 解析方法

#### (1) 非線形 FEM 解析

コンクリートのひび割れ挙動には、分散ひび割れによる非直交固定ひび割れおよび回転ひび割れを採用し、ひび割れ発生以降のひび割れ直交方向の挙動は破壊エネルギーに基づいた線形軟化でモデル化した。また、非直交固定ひび割れモデルにおける新たなひび割れが発生する限界角は 45°、ひび割れ発生以降のせん断残存剛性率は 1%とした。回転ひび割れモデルにおいては、ひび割れ面上においてせん断ひずみが生じないようにひび割れが回転し、主ひずみ軸と材料主軸が一致するようにせん断剛性が定義されている。なお、鋼材を von Mises の降伏条件による完全弾塑性でモデル化した。

圧縮領域における挙動については 2 つの構成モデルを考えた。モデル A としては 1 軸状態のコンクリートの応力-ひずみ関係<sup>4)</sup>に適合するように von Mises の降伏条件を用いて非線形挙動はすべて塑性ひずみにより表現することを考えた。一方、モデル B は、前川らが開発した弾塑性破壊構成則<sup>5)</sup>を著者らが汎用 FEM 解析コード



図－2 FEM 解析モデル(SN-6)

DIANA に組み込んだモデル<sup>6)</sup>である。この構成則はコンクリートの非線形挙動を弾性の損傷と塑性ひずみによって表現したものであり、種々の応力状態におけるコンクリートの挙動を適切に再現できるモデルと言われている。数多くの多様な応力状態での精緻な実験に基づいて、損傷の程度は弾性ひずみの関数として、塑性ひずみは応力が開放された時の残留ひずみとして定義どおりに解釈し、弾性ひずみの偏差成分に比例するものとして、また、ダイラテンシーは弾性体積ひずみと損傷程度に依存するものとして規定されている。

解析では図－2に示すように鋼材を 2 次の梁要素、コンクリートを 2 次の平面応力要素でモ

デル化し、要素長は 20mm を基本とした。また、鋼材とコンクリートの境界は剥離と滑動を考慮するために、これらの力に対して抵抗しない界面要素を用いた。なお、解析は増分変位 0.01 mm の変位制御で行った。

## (2) 伝達マトリクス法による計算

シアコネクタにおける伝達力とずれ変位の関係が規定されれば、この関係と鋼材の軸剛性によって軸方向の鋼材の軸力、伝達力および変位を伝達マトリクス法による求めることができる。本論文では、以下の手順による伝達マトリクス計算についても実施した。

図-3 の節点  $i+1$  について考えると式(1)および式(2)で表される。

$$\{V\}_i^E = \begin{Bmatrix} u \\ N \end{Bmatrix}_i^E = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{L_i}{EA} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ N \end{Bmatrix}_i^S = [T]_i \{V\}_i^S \quad (1)$$

$$\{V\}_{i+1}^S = \begin{Bmatrix} u \\ N \end{Bmatrix}_{i+1}^S = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -Ks_{i+1} & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ N \end{Bmatrix}_i^E = [P]_i \{V\}_i^E \quad (2)$$

ここに、 $u$  : 変位、 $N$  : 軸力

$L$  : 部材長、 $E$  : 弾性係数、 $A$  : 断面積

$Ks$  : シアコネクタ剛性

$[T]$  : 部材マトリクス、 $[P]$  : 節点マトリクス

添字  $S$  : 部材の始点側、添字  $E$  : 部材の終点側  
 なお、シアコネクタの伝達力とずれ変位はシアコネクタの仕様によって異なると考えられるが、非線形 FEM 解析結果に基づいてシアコネクタの厚さおよび間隔が共通の試験体 (Series SN) に対して図-4 に示す関係を採用する。ここで、 $P_1$  はコンクリートの弾性限界、 $P_{max}$  はコンクリートのせん断強度が引張強度に等しいとして算出した伝達耐力である。

上記の関係を部材全長にわたって表すと式(3)が得られ、始点と終点での境界条件を与えることによって全ての点での変位と軸力が得られる。

$$\{V\}_n^E = [T]_n [P]_{n-1} [T]_{n-1} \cdots [T]_2 [P]_1 [T]_1 \{V\}_1^S \quad (3)$$

計算においては、式(3)を式(4)の増分形式で表し、増分計算をすることにより各シアコネクタ

での破壊の進行を評価した。

$$\Delta\{V\}_n^E = [T]_n [P]_{n-1} [T]_{n-1} \cdots [T]_2 [P]_1 [T]_1 \Delta\{V\}_1^S \quad (4)$$

## 3.2 既往の実験と解析との比較

### (1) 荷重—変位関係

図-5 に荷重—変位関係について、実験結果、FEM 解析結果および伝達マトリクス法による計算結果を示す。

図より、モデル A、B ともにひび割れが顕在化し始める前まではよく一致するが、それ以降は相違する。モデル A は圧縮領域のコンクリートの挙動をすべて 1 軸応力状態での応力—ひずみ

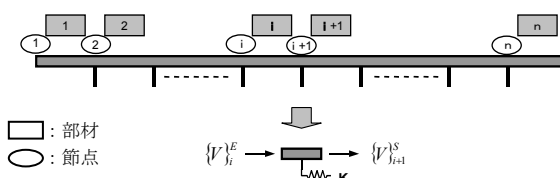


図-3 伝達マトリクス計算の模式図

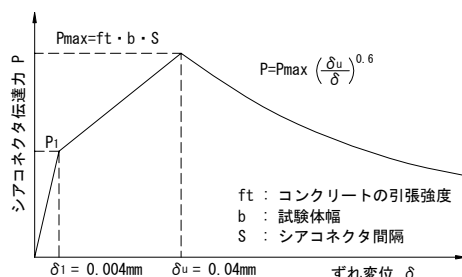


図-4 シアコネクタの伝達力—変位関係

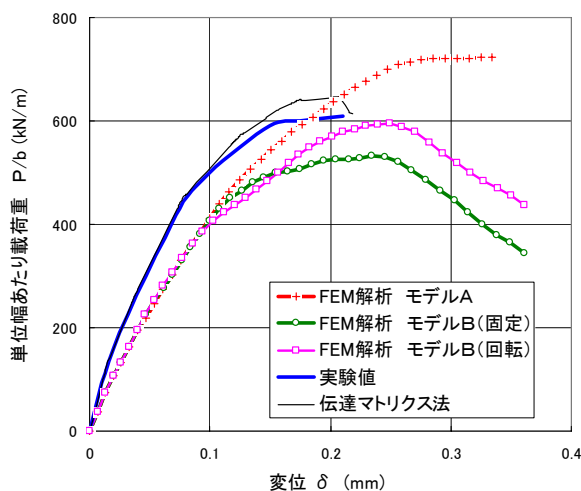


図-5 荷重—変位関係 (SN-6 試験)

関係から規定しているために曲げ破壊などの解析には適合するが、せん断破壊を評価することは困難であることを示すものと考えられる。これに対し、モデル B はひび割れモデルによって異なり、せん断剛性残存率を 1% とした非直交固定ひび割れモデルは最大荷重を 10% 程度小さく評価するが、回転ひび割れは最大荷重を精度よく再現できている。

一方、伝達マトリクス法は、荷重をやや大きめに評価するものの、荷重-変位関係を比較的適切に評価できていると考えられる。このように、シアコネクタの伝達特性を適切に設定すれば比較的簡易な伝達マトリクス法による計算でも境界条件の影響が大きい場合には十分に実現象を評価できるものとする。

### (2) 伝達耐力

Series SN におけるシアコネクタによる伝達耐力の実験値と解析値の比較を図-6 に示す。なお、ここでは載荷端に最も近いシアコネクタは境界条件の影響を受けるために文献<sup>3)</sup>と同様にこれを除外して伝達耐力としている。

FEM 解析値としては耐力の評価において最も優れる回転ひび割れを用いたモデル B の結果を示すが、実験値を精度よく再現できることがわかる。また、伝達マトリクス法による計算結果は、伝達耐力を高く評価するものの、シアコネクタ戸数の増加に比例して伝達耐力が増大するという傾向をよく再現している。

### (3) ひび割れの状況

実験と同様に FEM 解析においても載荷端に近いシアコネクタよりひび割れが発生し、逐次遠

い側へ広がるといいう進行性破壊を示した。図-7 に各モデルによる解析の最大荷重時直前におけるひび割れ状況および載荷端シアコネクタの変位がほぼ等しいモデル A の状況との比較を示す。モデル A ではシアコネクタから斜め 45° 方向に発達するひび割れが多く見られるが、モデル B(固定ひび割れ)では斜め 45° 方向に発生するひび割れとともに水平方向に発達するひび割

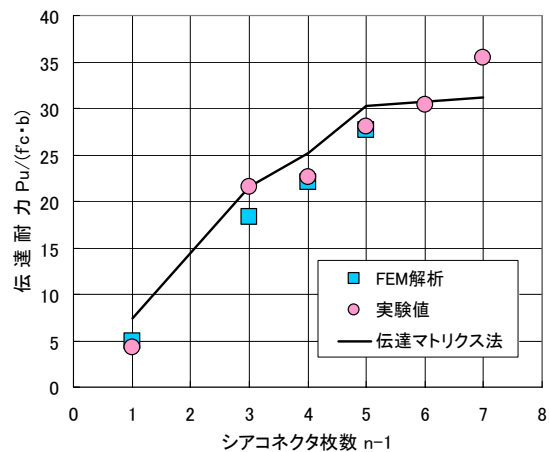


図-6 伝達耐力

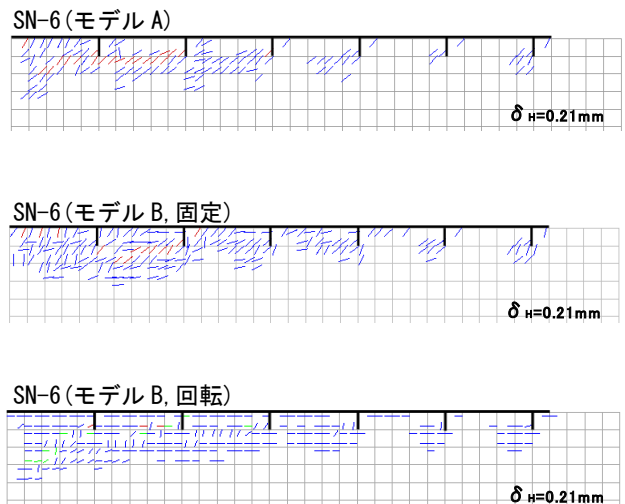


図-7 ひび割れの状況

表-1 FEM 解析結果の一覧

解析	シアコネクタ個数 n	n-1	シアコネクタ間隔 S [mm]	シアコネクタ高さ h_sc [mm]	シアコネクタ厚 t_sc [mm]	定着長 (n-1)・S [mm]	シアコネクタ最大伝達力				シアコネクタ剛性				P_ave / n-1 [kN]	P_ave / P_max [-]
							P_max [kN]	f_c [N/mm <sup>2</sup> ]	L_max [mm]	正規化P_max [-]	P' max [kN]	δ_U [mm]	正規化剛性 K [-]	P_U [kN]		
SN-2	2	1	100	20	2.3	100	22.86	31.0	4.92	0.049	22.86	0.066	74	22.86	22.9	1.00
SN-4	4	3	100	20	2.3	300	25.09	22.2	7.54	0.075	23.49	0.077	91	61.01	20.3	0.81
SN-5	5	4	100	20	2.3	400	26.25	23.9	7.32	0.073	23.78	0.093	71	78.99	19.7	0.75
SN-6	6	5	100	20	2.3	500	25.13	21.4	7.83	0.078	23.48	0.089	82	88.72	17.7	0.71
SS-6	6	5	150	20	2.3	750	39.71	23.6	11.22	0.075	34.22	0.098	99	127.92	25.6	0.64
AN-26	26	25	20	20	2.3	500	5.15	21.4	1.60	0.080	2.32	0.038	19	83.87	3.4	0.65
AN-3	3	2	200	20	2.3	400	41.28	21.4	12.86	0.064	40.95	0.089	144	65.37	32.7	0.79
AH-6	6	5	100	40	2.3	500	18.23	21.4	5.68	0.057	17.67	0.070	79	70.95	14.2	0.78
AT-6	6	5	100	20	6.9	500	29.57	21.4	9.21	0.092	27.56	0.088	98	83.67	16.7	0.57

試験体幅b=150mm, P' max: 伝達力の初期ピーク値, K=P' max/(f' c · b · δ\_U)

れが生じることがわかる。このひび割れは実験においても確認されており、モデル B ではコンクリートの応力状態を精度よく評価できるためにひび割れの角度、さらには伝達耐力をより適切に再現できていると考えられる。モデル B(回転ひび割れ)は、ひび割れが逐次回転するために実際のひび割れの方角との整合性においてはやや劣るが耐力との整合性はよいことがわかる。

#### 4. 数値実験による応力伝達の考察

##### 4.1 数値実験ツール

既往の実験との比較から、シアコネクタの間隔、厚さなどの仕様が変わった場合においても適切に耐力を再現できるモデルとしてモデル B(回転ひび割れ)による数値実験を実施した。表-1に FEM 解析結果の一覧を示す。

##### 4.2 応力伝達特性を支配する要因

###### (1) シアコネクタ間隔

シアコネクタ間隔は図-8に示すように、シアコネクタ剛性を支配することがわかる。また、シアコネクタ最大伝達力は図-9に示すようにシアコネクタ間隔に比例して大きくなる。シアコネクタ間隔によるひび割れの発生状況の相違を図-10に示す。図-8のモデル B (シアコネクタ間隔 100mm) と合わせて比較すると、ひび割れ間隔が小さくなるほど広い範囲にわたってひび割れが分散すること、水平方向のひび割れが卓越することなどがわかる。

表-1に示すようにコンクリートの圧縮強度  $f_c$ 、試験体幅  $b$  およびシアコネクタ間隔  $S$  で除して正規化するとほぼ一定の値になる。ちなみに、この値は圧縮強度に対する見かけのせん断強度 ( $P_{max}/bS$ ) の比に相当するものであり、コンクリートの引張強度と圧縮強度の比に近い値となっている。このことは、純せん断に近い状態となっていることを表すものと考えられる。

###### (2) 定着長

表-1に進行性破壊の程度を示す指標として  $P_{ave}/P_{max}$  の値を示した。ここで、 $P_{max}$  はシアコネクタの最大伝達力であり、 $P_{ave}$  は最大荷重時に

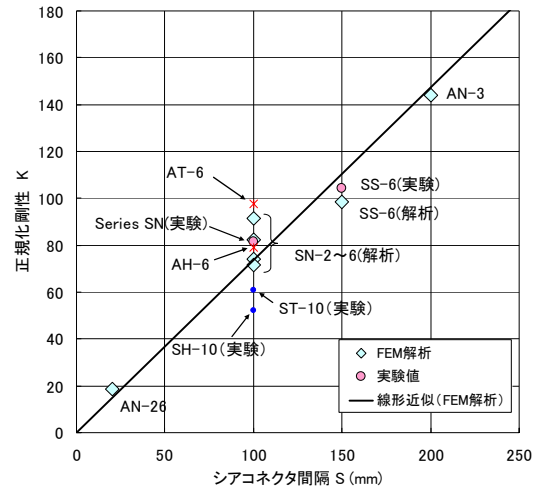


図-8 シアコネクタ間隔と剛性の関係

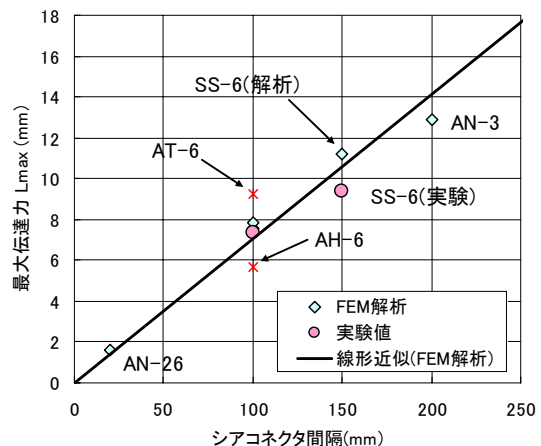
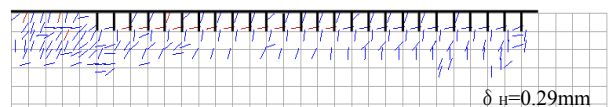


図-9 シアコネクタ間隔と最大伝達力の関係

###### AN-26 (シアコネクタ間隔 20mm)



###### AN-3 (シアコネクタ間隔 200mm)

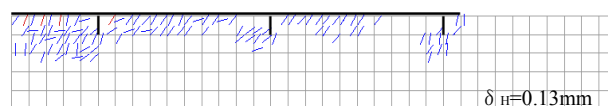


図-10 シアコネクタ間隔とひび割れ状況 (モデル B 非直交固定ひび割れモデル)

において載荷端から最も近いシアコネクタ伝達力を除外した伝達力の平均値である。この値と定着長との関係を図-11に示すが、シアコネクタの間隔、高さ等が異なる試験に対しても定着長が大きいほど線形に低下するという共通した



傾向を示す。

### (3) シアコネクタ高さ

シアコネクタ高さ 20mm と 40mm という既往の実験および今回の解析の範囲では、シアコネクタ高さに関して明確な傾向は見られなかった。これは、最終的にはシアコネクタ前面コンクリートの支圧破壊ではなく、シアコネクタ先端をから発達するコンクリートのせん断破壊で終局に至るため、シアコネクタ高さは伝達耐力に対して支配的ではないと考えられる。

### (4) シアコネクタ厚さ

図-10, 図-11に示すように伝達耐力に与える影響は小さいものの、図-8に示すようにシアコネクタ厚さは剛性には影響を与えることを確認した。

## 5. まとめ

既往の実験および今回の解析の範囲において、以下のことが言える。

- (1) シアコネクタを混合構造物の接合部に用いた場合の伝達耐力に対しては定着長が最も支配的な要因である。
- (2) シアコネクタ間隔は、シアコネクタの伝達耐力、ずれに対する剛性、ひび割れの形態、破壊の進行を支配する。
- (3) シアコネクタ間隔とシアコネクタ高さの比が1~10の範囲においては、最終的な破壊形態はシアコネクタ間コンクリートの支圧破壊ではなく側方コンクリートのせん断破壊である。このために、シアコネクタ高さは伝達耐力に対して影響を与えないものと考えられる。
- (4) 弾塑性破壊モデルを組み込んだ非線形 FEM 解析モデルはコンクリートのせん断破壊が支配的となる場合においても有効である。
- (5) 伝達マトリクス法による計算は、シアコネクタ剛性が適切に評価されればシアコネクタによる伝達耐力を精度よく評価できる。

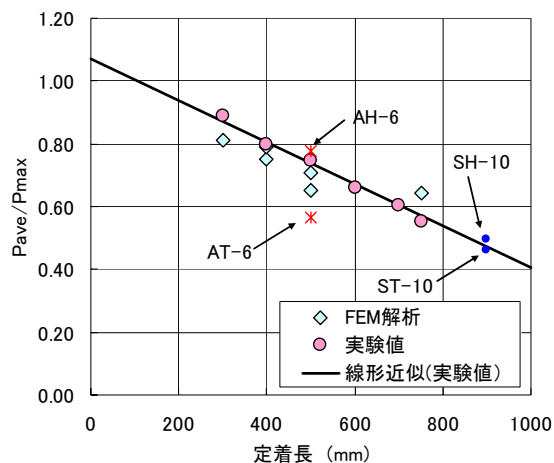


図-11 シアコネクタ伝達力の有効率

## 参考文献

- 1) 土木学会：鋼コンクリートサンドイッチ構造設計指針(案)，コンクリートライブラリー73, 1992
- 2) 土橋浩，川田成彦，白鳥明，山田武正，吉岡健一，篠崎裕生，大竹省吾：鋼製セグメントとRC躯体の接合部応力伝達に関する一考察，構造工学論文集，Vol.51A, pp.1405-1414, 2005.3
- 3) Chuar,C.L., Shima,H. and Virach,R. : Load-Displacement Relationship of Plate Shape Shear Connector in Steel-Concrete Composite Structures, Proc. of JSCE No.433/V-15, pp.223-229, Aug.1991
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書 構造性能照査編，2002
- 5) Maekawa, K, Pimanmas, A. and Okamura,H. : Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete, 2002
- 6) Gao,S.B., Yamada,T., Watanabe,M., and Hendriks, M.A.N.: Implementation and Verification of Maekawa Concrete Model in Diana, The First International Conference on Construction Information Technology, pp.460-468, Aug.2004