

V-38

鋼コンクリートサンドイッチ棒部材のせん断耐力に関する解析的検討

北海道大学大学院 学生員 伊藤 常正

北海道大学大学院 学生員 Taufiq Saidi

北海道大学大学院 正会員 古内 仁

北海道大学大学院 正会員 上田 多門

1. はじめに

鋼コンクリートサンドイッチ構造は、高強度、水密性、高靱性などの特徴を合わせ持ち、施工性に優れた構造物である。近年、サンドイッチ構造に関しさまざまな研究が行われるようになったがその数は少なく、せん断耐力の正確な算定は難しい状況である。サンドイッチ構造には、鋼版を両面に配したボックスサンドイッチ構造と、鋼版を片面のみに配したオープンサンドイッチ構造に大きく2種類に大別されるが、前者に対しては浅沼¹⁾のせん断耐力の評価に関する研究などが見られる。それと比較すると、研究はいまだ少ないようである。

そこで本研究では、フルウェブタイプのボックスサンドイッチ構造はりとオープンサンドイッチ構造はりの両者を、統一したせん断耐荷機構の評価を行うことを目的とし、その前段階としてコンクリートの圧縮強度、せん断スパン比、せん断補強量、引張補強鋼材量、シアコネクタによるすべり剛性を変えて、その影響がせん断耐荷性状に及ぼすかを、非線型有限要素解析により定性的に示す。

2. 解析概要

(1) 解析プログラム

本研究ではサンドイッチはり部材用に改良された有限要素解析プログラム²⁾を用いた。本解析において用いた要素の種類は、コンクリート要素、鋼材要素（上下フランジ、ダイヤフラム、ウェブ鋼板）、コンクリート要素と、上下フランジ、ダイヤフラムの鋼材要素との境界面において、応力伝達を担うと同時にすべりを考慮する接合要素の3つに分けられる。ボックスサンドイッチのコンクリートと圧縮鋼版（上フランジ）の境界は圧縮領域に位置するため接合要素を用いず、コンクリート要素と鋼材要素を剛結する。これまでコンクリート部材とシアコネクタを有する鋼板のすべりに対するモデルは存在しなかったが、本研究では接合要素においてシアコネクタを考慮するため、シアコネクタの位置する境界においては、Saidi³⁾らにより実験から導出されたモデルを参考に形鋼シアコネクタに働く伝達せん断力と相関変位の関係（式(1)）を取り入れた。

$$Q_a = \frac{24(EI)_{eq}}{h_{sc}^3} y \quad (1)$$

ここに、 Q_a ：せん断伝達力、 y ：相関変位、 h_{sc} ：シアコネクタの高さ、

$(EI)_{eq} = (EI)_{sc} + (EI)_{con}$ ：コンクリート部材とシアコネクタを有する鋼版のすべり剛性

$(EI)_{sc}$ ：シアコネクタの剛性、 $(EI)_{con} = E_c \cdot b \cdot t_c^3 / 12$ 、

$t_c = 2.29h_{sc}^{0.488}$ （シアコネクタを支えるコンクリートの厚さ）

図1に式(1)と実験値との比較を示す。SC-no1は支点寄りの、SC-no2はせん断スパン中央部のシアコネクタの挙動を示す。実線は式(1)を示し、ほぼ実験によって観察された初期剛性に近い。

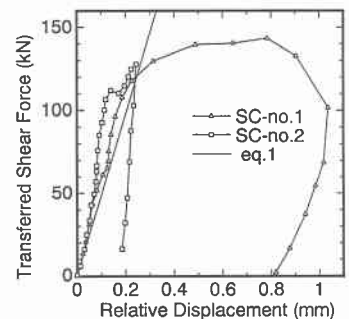


図1 伝達せん断力と相関変位の関係

Analytical Investigation of Shear Strength of Steel-Concrete Sandwich Beams

by Tsunemasa Ito, Taufiq Saidi, Hitoshi Furuuchi, and Tamon Ueda

(2)解析供試体

本論文ではフルウェブタイプのボックスサンドイッチ、オープンサンドイッチはりに対して解析を行う。

図1は本解析を行う解析供試体の要素分割図である。供試体 OSW は中井⁴⁾が実験を行ったT型フルウェブを有するオープンサンドイッチはりであり、供試体 BSW は OSW の上フランジの幅と高さのみを変えたフルウェブを有するボックスサンドイッチである。BSW、OSW を基準としてコンクリート強度、せん断スパン比、せん断補強鋼材比、引張補強鋼材比を変え、また接合要素におけるシアコネクタを有するすべり剛性のせん断耐力に対する影響を見るため、コンクリート部材とシアコネクタを有する鋼板間の剛性 $(EI)_{eq} = \alpha \{ (EI)_{sc} + (EI)_{con} \}$ として α を変え計 19 体の解析を行う。また全ての供試体で、鋼材の降伏強度は上下フランジ、ダイヤフラムが 585MPa、ウェブ鋼板は 294MPa である。

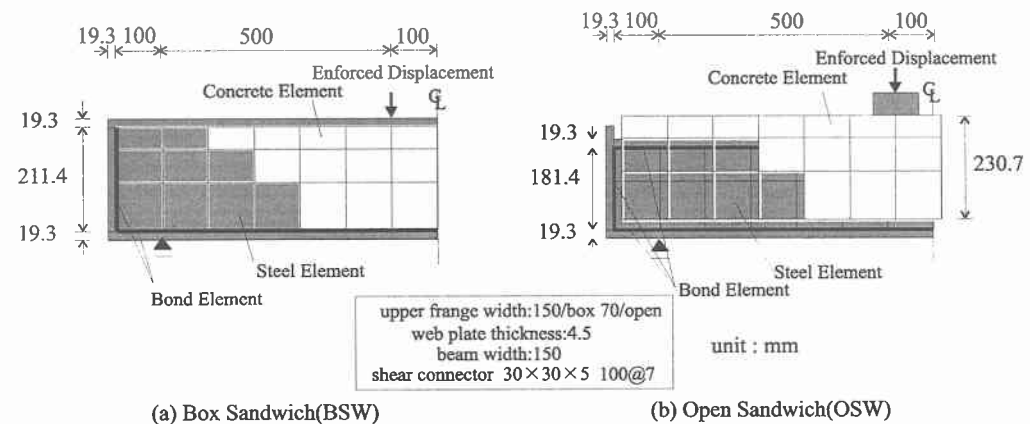


図1 解析供試体の要素分割図

表1 解析供試体の諸元

specimen	Box /open	f'_c (MPa)	a/d	p_s (%)	p_w (%)	α	V (kN)
BSW	Box	34.3	2.08	8.0	3.0	1.0	401
BFC25	Box	24.5	2.08	8.0	3.0	1.0	349
BFC45	Box	44.1	2.08	8.0	3.0	1.0	422
BAD16	Box	34.3	1.67	8.0	3.0	1.0	410
BAD24	Box	34.3	2.50	8.0	3.0	1.0	371
BPS42	Box	34.3	2.08	4.2	3.0	1.0	376
BPW21	Box	34.3	2.08	8.0	2.1	1.0	320
BPW40	Box	34.3	2.08	8.0	4.0	1.0	473
BSC05	Box	34.3	2.08	8.0	3.0	0.5	357
BSC20	Box	34.3	2.08	8.0	3.0	2.0	395
BSC40	Box	34.3	2.08	8.0	3.0	4.0	407
OSW	Open	34.3	2.08	8.0	3.0	3.0	347
OFC25	Open	24.5	2.08	8.0	3.0	3.0	285
OFC45	Open	44.1	2.08	8.0	3.0	3.0	371
OAD16	Open	34.3	1.67	8.0	3.0	3.0	383
OAD24	Open	34.3	2.50	8.0	3.0	3.0	313
OPS42	Open	34.3	2.08	4.2	3.0	3.0	321
OPW21	Open	34.3	2.08	8.0	2.0	3.0	300
OPW40	Open	34.3	2.08	8.0	4.0	3.0	379

f'_c : コンクリート圧縮強度 a/d : せん断スパン比 p_s : 引張補強鋼板比 (下フランジの厚さ/有効高さ)
 p_w : せん断補強鋼板比 (ウェブ鋼板の厚さ/供試体の幅)

3. 解析結果

供試体 OSW の荷重－変位曲線を図 2 に示す。実験はせん断圧縮破壊であり、コンクリートの圧縮破壊後、剛性が急激に落ち出す付近までは概ね実験結果を評価できている。図 3 に供試体 BSW、BSC00、BSC05、BSC20、BSC40 の荷重－変位曲線を示す。Saidi らのシアコネクタによるすべり剛性が 2 分の 1 である BSC05 は初期剛性の低下が見られるが、すべり剛性が $(EI)_{sc} + (EI)_{con}$ 以上になってもほとんど変化が見られない。また表 1 に示すように、せん断耐力も同様にコンクリート部材とシアコネクタを有する鋼板の間のすべり剛性が $(EI)_{sc} + (EI)_{con}$ 以上になっても変化が見られない。またコンクリートの圧縮強度、せん断スパン比、引張補強鋼板比、せん断圧縮補強鋼板比が大きい程、せん断耐力は大きくなった（表 1 参照）。終局時のコンクリートの圧縮軟化位置（図中の○）、コンクリートのせん断スパン内の軸ひずみが 0 である中立軸位置（図中の折線）を図 4 に示す。図に示すように全ての解析供試体において、載荷点付近及び支点付近でコンクリート

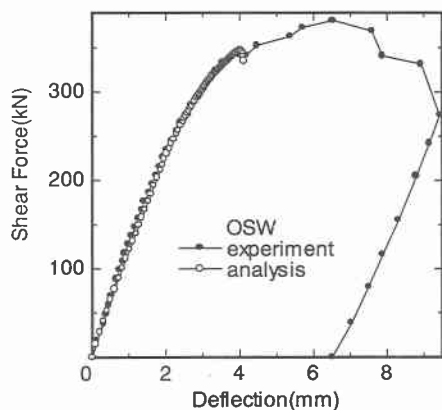


図 2 荷重－変位曲線 (OSW)

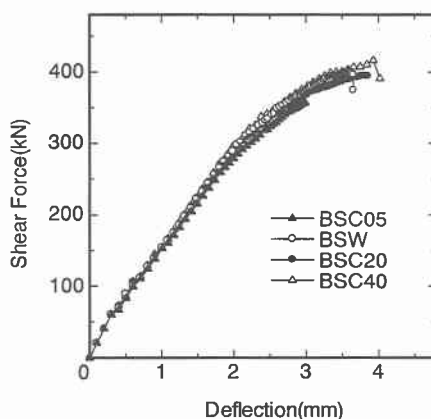
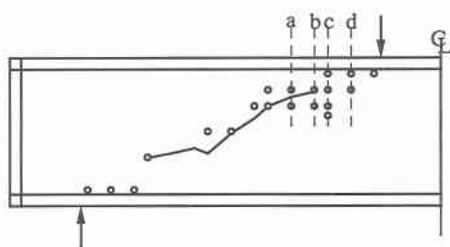
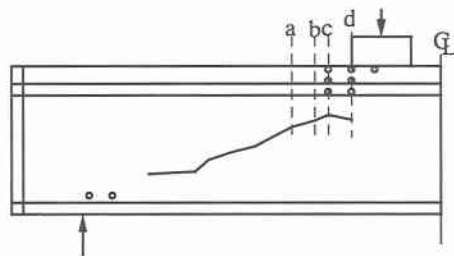


図 3 荷重－変位曲線

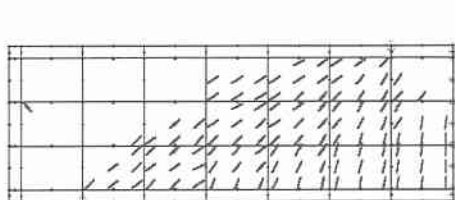


(a) box sandwich (BSW)

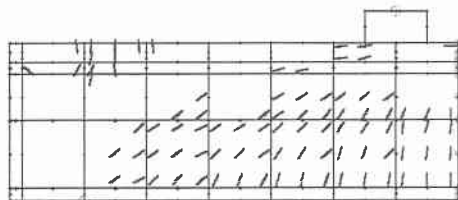


(b) open sandwich (OSW)

図 4 コンクリートの圧縮破壊位置と中立軸位置



(a) box sandwich (BSW)



(b) open sandwich (OSW)

図 5 ひび割れ図

クリートの圧壊により終局に至る。また、終局時のコンクリートの中立軸深さは上フランジの位置が低いオープンサンドイッチはりが深い傾向にある。ボックスサンドイッチはりにおいて支点付近でコンクリートに中立軸がないが、これは上フランジ、ウェブ鋼板において圧縮を受け持っているためである。また両者とも全ての供試体において、載荷点の少し内側より、支点方向に向かうにつれ徐々に浅くなっていく傾向にある。図5にひび割れ図を示す。ボックスサンドイッチはりとはオープンサンドイッチはりに比べ、斜めひび割れが上部の載荷点付近にまで達している。

4. せん断耐荷性状

(1) せん断耐荷力の構成要素

図6のようなせん断力の釣り合いを考える断面を仮定し、作用せん断力は載荷点付近の鉛直断面である圧縮域コンクリートとウェブ鋼板が受け持つ分担せん断力 ($V_{qz} = V_{c\ qz} + V_{w\ qz}$)、コンクリートのせん断ひび割れに沿った斜めひび割れ域コンクリートとウェブ鋼板が受け持つ分担せん断力 ($V_{dcz} = V_{c\ dcz} + V_{w\ dcz}$) と上フランジで受け持つ分担せん断力 (V_{uf})、下フランジが受け持つ分担せん断力 (V_{lf}) の和に釣り合うと考える。

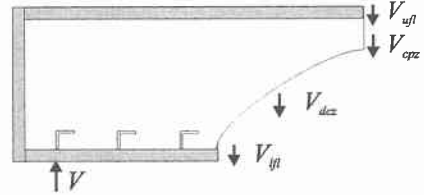


図6 作用せん断力における力の釣り合い

(2) 圧縮領域における終局時の平均せん断応力

先述したように、サンドイッチはりでは、載荷点付近でのコンクリートが圧壊軟化しせん断圧縮破壊が起こるものと考えられる。そこで載荷点付近の圧縮領域において、終局時(最大耐力時)における圧縮域のコンクリートの平均せん断応力(以下、 $\tau_{c\ qz}$)と比較することにより破壊を考える。検討断面として全ての供試体で図4に示すa(載荷点から150.0 mm)、b(111.3 mm)、c(88.7 mm)、d(50.0 mm)の4つの断面を考える。ただし中立軸のない、もしくはコンクリートの圧縮軟化点を含まない断面は検討していない。

図7に $\tau_{c\ qz}$ と各パラメータの関係を示す。どの供試体においても、オープンサンドイッチはりは断面cにおいて終局時に平均せん断応力が大きく、ボックスサンドイッチはりは断面b付近で最大であると考えることができ、破壊断面と定義可能である。

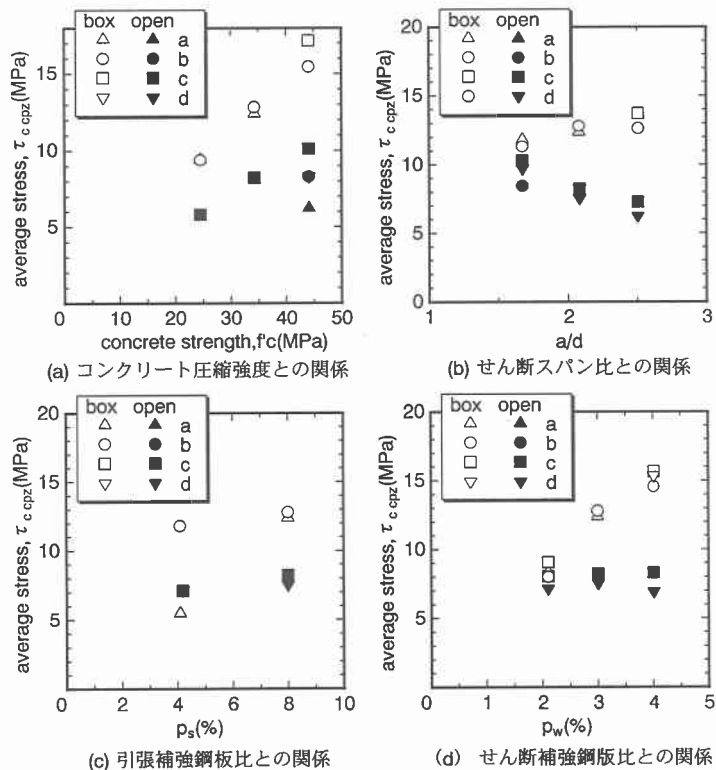


図7 各パラメータと終局時における圧縮域のコンクリートの平均せん断応力との関係

定義した圧縮領域の終局時におけるウェブ鋼板の平均せん断応力(以下、 $\tau_{w\ cpx}$)を図8に、上フランジの圧縮領域の平均せん断応力(以下、 $\tau_{uf\ cpx}$)を図9に示し、各パラメーターの影響を考える。図7(a)、図8(a)、に示すように、 $\tau_{c\ cpx}$ 、 $\tau_{w\ cpx}$ はボックス、オープン両者共に、最大耐力時でコンクリート圧縮強度の増加と共にほぼ直線的に増加している。また $\tau_{uf\ cpx}$ は図9(a)に示すように、コンクリートの圧縮強度の増加に伴い若干増加しているが、ボックス、オープン両者ともほぼ6MPaで終局に至っている。図7(b)、図8(b)、図9(b)に示すようにせん断スパン比が低下するにつれ、オープンサンドイッチはりでは各平均せん断応力は低下している。一方、ボックスサンドイッチはりにおいては、明確な差はあまり見られない。図7(c)、図8(c)、図9(c)に示すように、引張補強鋼板量増加と共に圧縮域では各平均せん断応力は若干増加の傾向にあるが、変化はほとんど見られず、引張補強鋼板量の影響はほとんど受けないと思われる。 $\tau_{c\ cpx}$ はボックスサンドイッチはりでは12MPa、オープンサンドイッチはりでは7MPa付近で終局に至っている。また $\tau_{w\ cpx}$ はボックスサンドイッチはりでは450から500MPa、オープンサンドイッチはりでは350から400MPa付近で、 $\tau_{uf\ cpx}$ はボックスサンドイッチはりでは5.5MPa、オープンサンドイッチはりでは7MPa付近で終局に至っている。図7(c)、図8(c)、図9(c)に示すように、オープンサンドイッチはりにおいては、 $\tau_{c\ cpx}$ はせん断補強鋼板量の影響をほとんど受け

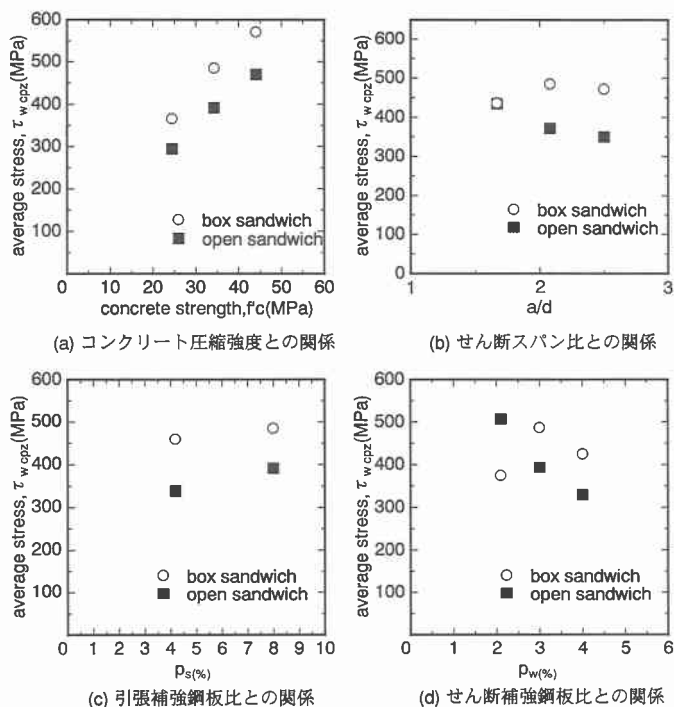


図8 各パラメータと終局時における圧縮域のウェブ鋼板の平均せん断応力との関係

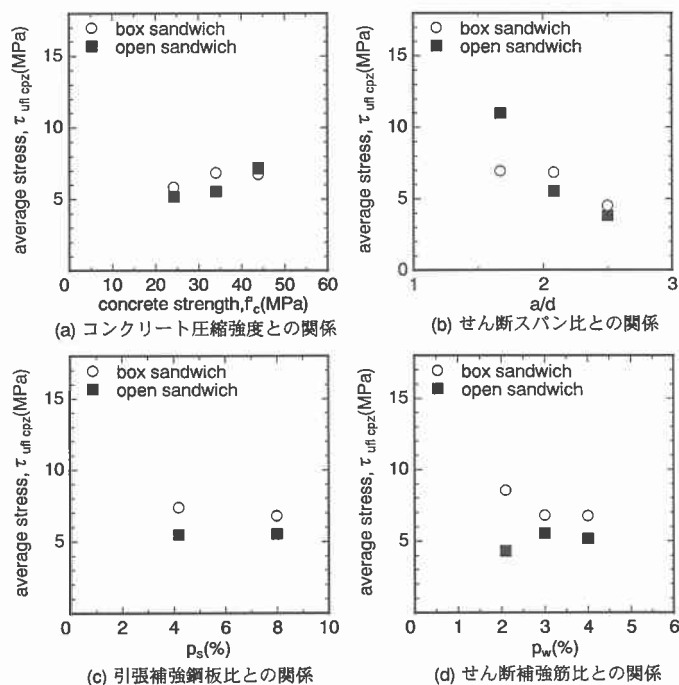


図9 各パラメータと終局時における圧縮域の上フランジの平均せん断応力との関係

ずに 8 MPa 付近で終局に至っており、 $\tau_{w\ cpx}$ はせん断補強鋼板量の増加と共に減少している。 $\tau_{ult\ cpx}$ はせん断補強筋量の影響をほとんど受けずに、ボックスサンドイッチはりで、せん断補強筋比 2.1% 以外は、6MPa 付近で、オープンサンドイッチはりでは 5MPa 付近で終局に至ると考えられる。一方ボックスサンドイッチはりではオープンサンドイッチはりのようにせん断補強筋量の低下と共に $\tau_{c\ cpx}$ と $\tau_{w\ cpx}$ が増加していないが、これはせん断補強筋比が2.1%の供試体BPW21 で圧縮領域において、ウエブ鋼板が降伏し、作用せん断力を上フランジで受け持ち、 $\tau_{c\ cpx}$ と $\tau_{w\ cpx}$ が小さく $\tau_{ult\ cpx}$ が大きくなったと考えられる。今後、せん断補強筋比が2%以下の供試体を検討する必要がある。

5. まとめ

- (1) 本解析では、非線型有限要素解析プログラムの接合要素に Saidi ら³⁾の形鋼シアコネクタに働くせん断伝達力とすべり変位の関係を取り入れた。実験結果と解析結果を比較することにより、本非線型有限要素解析は、せん断耐力、変形性状を概ね精度良く評価できることが明らかになった。
- (2) 形鋼シアコネクタによるすべり剛性を変化させ解析を行った結果、荷重—変位曲線において、Saidi らの形鋼シアコネクタによるすべり剛性よりも小さい場合は、初期剛性、及びせん断耐力に低下が見られたが、Saidi らの形鋼シアコネクタによるすべり剛性以上になっても、初期剛性、及びせん断耐力に変化はほとんど見られなかった。
- (3) 本解析において、ボックスサンドイッチはり、オープンサンドイッチはりにおいて、支点、及び載荷点付近においてコンクリートの圧縮軟化がおこり終局に至ることが明らかになった。またボックスサンドイッチでは載荷点付近のコンクリート中には中立軸がないことが明らかになった。
- (4) 載荷点付近の中立軸位置より上部の鉛直断面である圧縮領域において、終局時のコンクリートの平均せん断応力を比較した結果、オープンサンドイッチはりでは載荷点直下よりも支点寄りの断面において大きいことが明らかになった。
- (5) 終局時における圧縮域のコンクリート及び、ウエブ鋼板の平均せん断応力にはコンクリート圧縮強度の影響が大きく、引張補強鋼板量の影響は小さいことが明らかになった。また、上フランジの平均せん断応力にはコンクリート強度、引張補強鋼板量、せん断補強鋼板量の影響が小さいことが明らかになった。

謝辞

本研究において、北海道大学大学院の角田興史雄教授に、多大なるご助言をいただきました。また本解析において北海道大学大学院の佐藤靖彦氏に多大なるご指導をいただきました。ここに深く感謝いたします。

【参考文献】

- (1)浅沼 芳雄, 中井勝彦, 古内仁, 上田多門, 角田興史雄: 鋼コンクリートサンドイッチ構造はりのせん断耐力 構造工学論文集 vol. 42A, p1139-p1146 1996 年 3 月
- (2)ナレス バンタラトーン: 鉄筋コンクリート梁におけるせん断抵抗機構の有限要素解析, 東京大学博士論文 1991 年 3 月
- (3)Taufiq Saidi, Hitoshi Furuuti, Tamon Ueda: Transferred Shear Force-Relative Displacement Relationship of Shear Connector in Steel-Concrete Sandwich Beam, 構造工学論文集 1998 年 3 月 (掲載予定)
- (4)中井勝彦: T 型ウエブを有するオープンサンドイッチ構造はりのせん断耐力に関する研究, 北海道大学修士論文 1996 年 3 月