コンクリート工学年次論文報告集，Vol.14，No.2，1992

論　文

[2126]　鋼・コンクリートサンドイッチはりの力学的特性に関する実験的研究

正会員○真壁知大（埼玉大学大学院）
正会員　N.MALEK（埼玉大学大学院）
正会員　睦好宏史（埼玉大学建設工学科）
正会員　町田篤彦（埼玉大学建設工学科）

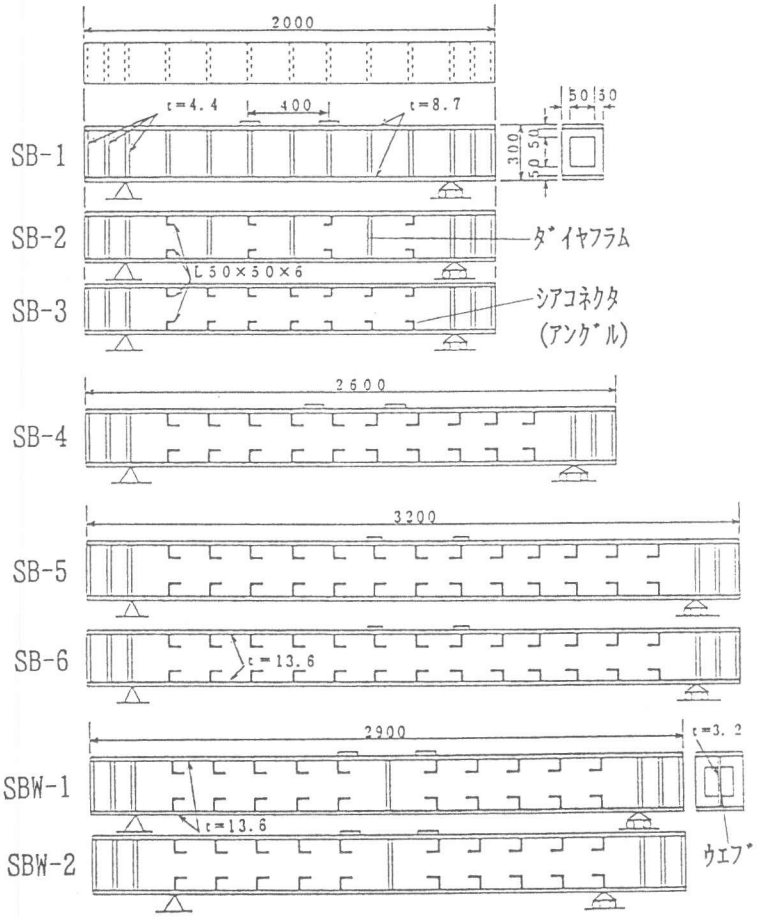
1．はじめに

異種材料をその特性を活かすように一体化させ、合理的に利用する合成部材として鋼・コンクリートサンドイッチ合成部材が挙げられる。近年、この種の合成部材が土木構造物、特に使用条件および施工条件の厳しい海洋構造物を中心として適用されつつある。鋼・コンクリートサンドイッチ部材はその優れた特徴として高強度、高靱性、水密性、施工性などを兼ね備えている。しかし、その力学的性状は不明な点も多く、設計方法も確立されているとは言い難い。

このような観点から、本研究では鋼・コンクリートサンドイッチ部材の力学的性状としてせん断破壊とその耐力、鋼とコンクリートを合成するために用いる形鋼シアコネクターのひびわれへの影響に注目し、数タイプの鋼・コンクリートサンドイッチはりを作製して実験的研究を行った結果について報告する。

2．実験概要

実験に用いた供試体は図－1に示すように断面幅25cm、高さ30cmでスパンが120cmから280cmのサンドイッチはりで計8体作製した。供試体は、その構造形式からせん断補強鋼材としてダイヤフラムを設置したタイプ（SB-1,2）とウエブを設置したタイプ（SBW-1,2）、またせん断補強鋼材を用いないタイプ（SB-3～SB-6）とに大別することができる。供試体のパラメータとしてはせん断スパン比、主鋼材比、シアコネクタの有無、せん断補強鋼材の有無とその補強方法等である。シアコネクタとしてはアングル（山形鋼 50×50×6mm）を用いた。使用鋼材は圧縮および引張側鋼板がSM50で厚さが 8.7mmまたは13.6mm、ダイヤフラムとウエブはSS41で厚さがそれぞれ4.5m



図－1　供試体の構造

m、3.2mm である。供試体および使用鋼材の詳細を表－１、２にそれぞれ示す。

供試体の作製にあたっては、供試体を90度回転させた後コンクリートの打設を行った。また、フルウエブの供試体(SBW-1,2) は形状的な制約から、片側にコンクリートを打設し、翌日もう一方の側を打設する方法を採用した。コンクリートは早強ポルトランドセメントを使用し配合強度240kg/cm^2 、スランプが16cmおよび20cm（翌日打設分）、骨材の最大寸法20mmの生コンを使用した。

載荷方法は、静的２点載荷を行い、はりのたわみ、鋼板、ダイヤフラム、ウエブ、アングルおよびコンクリートの各部のひずみを測定した。

表－１　供試体の詳細

供試体	a/d [mm]	ts [mm]	td [mm]	tw [mm]	Sd [cm]	Pt [%]
SB-1	2	8.7	4.4	－	20	2.9
SB-2	2	8.7	4.4	－	40	2.9
SB-3	2	8.7	－	－	－	2.9
SB-4	3	8.7	－	－	－	2.9
SB-5	4	8.7	－	－	－	2.9
SB-6	4	13.6	－	－	－	4.53
SBW-1	3.5	13.6	－	3.2	－	4.53
SBW-2	2.83	13.6	－	3.2	－	4.53

a/d：せん断スパン比　　tw：ウエブの厚さ
ts：鋼板の厚さ　　Sd：ダイヤフラムの間隔
td：ダイヤフラムの厚さ　　Pt：引張鋼材比

表－２　鋼材の機械的性質

TYPE	STANDARD	Fy[MPa]	Ft[MPa]	Es[GPa]
Frange(8.7mm)	SM50	337	504	193
Frange(13.6mm)	SM50	342	522	196
Diaghragm(4.4mm)	SS41	290	403	192
Web(3.2mm)	SS41	292	444	193

Fy：鋼材の降伏強度, Ft：鋼材の引張強度, Es：鋼材のヤング率

３．実験結果

３．１耐力と破壊性状

各供試体の耐力と破壊性状をそれぞれ表－３と図－２に示す。全タイプともひび割れはアングルまたはダイヤフラムからほぼ左右対称に発生し、大きく成長した。a/d=2.0 の供試体の場合、せん断補強としてダイヤフラムを設置してあるSB-1、SB-2とせん断補強を行っていないSB-3とでは耐力が大きく異なっている。最も耐力を発揮したのは、ダイヤフラムにせん断補強とシアコネクタの機能ももたせたSB-1であり、続いてSB-2、SB-3の順となった。SB-1、SB-2は斜めひびわれ

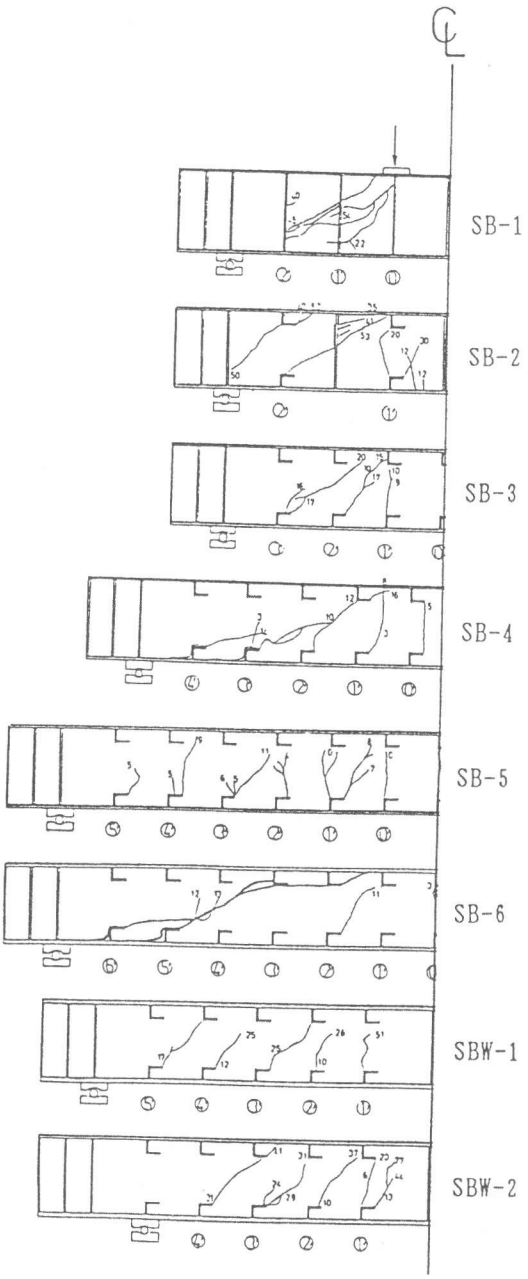
表－３　実験結果と計算結果

供試体	実験結果					計算結果［KN］				
	Pcr [KN]	Pwy [KN]	Psy [KN]	Pmax [KN]	破壊形式	曲げ耐力		せん断耐力		
						①	②	③	④	⑤
SB-1	215	441	588	700	S/F	617	712	614	892	636
SB-2	118	294	441	549	S/F	617	712	450	728	472
SB-3	92	－	－	275	S	617	712	286	564	308
SB-4	20	－	190	230	S	411	474	240	392	－
SB-5	49	－	－	115	S	309	356	208	299	－
SB-6	19	－	－	132	S	436	555	250	474	－
SBW-1	59	579	353	805*	F/S	498	634	660	720	－
SBW-2	98	549	540	862*	F/S	615	784	681	792	－

Pcr：斜めひびわれ発生荷重　　Pmax：終局荷重　　＊終局状態に至らず
Pwy：せん断補強鋼材の降伏荷重　　S：せん断破壊
Psy：引張側鋼材の降伏荷重　　F：曲げ破壊

発生後もタイドアーチ的耐荷機構となり耐力はすぐに低下せず、さらに大きな荷重を受け持ったあとダイヤフラムが破断して終局に至った。アングルのみを配置したSB-3は各アングルから発生したひびわれが載荷点に向かって成長し、最終的には支点と載荷点を結ぶ斜めひびわれの発生とともに圧縮ストラットが形成されたが、載荷点付近のコンクリートが圧壊して耐力が低下した。a/d=3.0～4.0 の供試体においても典型的な斜め引張破壊の様相を呈した。同じせん断スパン比でSB-6がSB-5よりも若干耐力が大きいのは鋼板の厚さの違いが影響したものと考えられる。一方、フルウエブの供試体は a/d=3.5および2.83のタイプとも大きな耐力を有し、鋼板とウエブが降伏したものの終局の状態には至らず、他のタイプのように支点と載荷点を結ぶ大きな斜めひびわれも発生しなかった。このため上田等[1] が示しているようなウエブの降伏後にタイドアーチ的耐荷機構へ移行するという現象を確認することはできなかった。

各供試体の曲げ耐力を計算するために①圧縮鋼板を無視した場合、②コンクリートの圧縮応力を無視した場合の二通りの方法を採用した。せん断耐力は、③コンクリート標準示方書[2]、④清宮等の式[3]、⑤二羽の式[4]にコンクリート標準示方書のせん断補強筋の受け持つ耐力を加えた値とした。せん断耐力は a/d=2.0の供試体では⑤の計算方法が実験結果と比較的近い値を示している。④の方法ではフルウエブの供試体以外は耐力を大きく見積もっている。③の示方書の方法が最も安全側の計算結果となっている。



図－２　供試体の破壊性状

３．２はりのたわみ

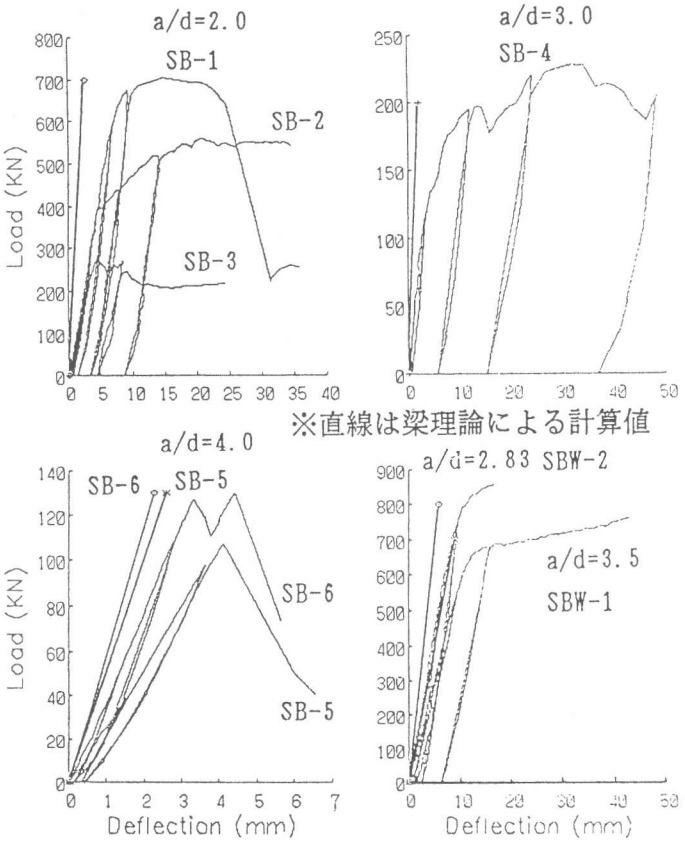
図－３に各供試体の荷重－たわみ曲線を示す。 a/d=2.0の供試体では初期剛性は３タイプともほぼ同じであった。SB-1とSB-2は最大荷重に達した後もしばらく荷重を保持したのに対してSB-3は最大荷重到達後、２タイプに比べ耐力の低下が早かった。一方、 a/d=4.0の供試体では最大荷重に達した後、急激に耐力が低下した。フルウエブの供試体では荷重－たわみ曲線に明瞭なピークが観測されなかった。はり理論から求めたたわみの計算結果を比較のために示すが、全ての供試体で実験結果の方が計算値よりも大きな値であった。特にせん断スパン比が小さい供試体ほど実験値と計算値との差は大きくなることが判明した。

３．３鋼板のひずみ

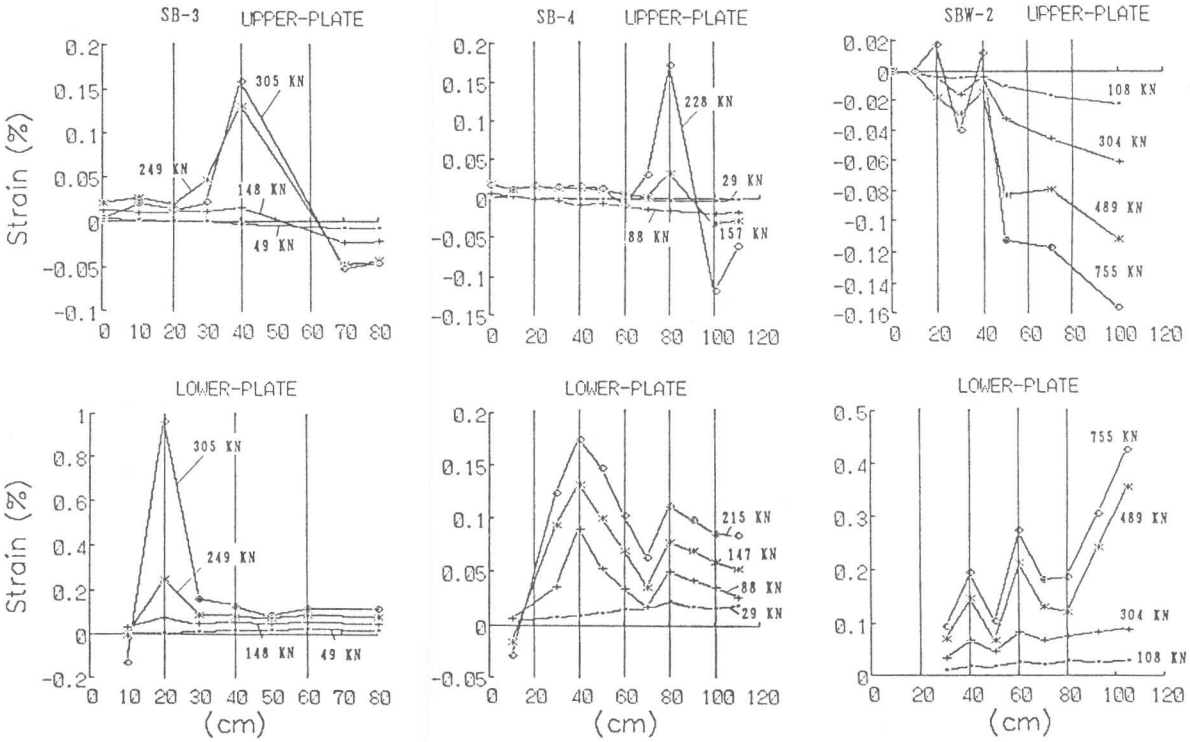
引張および圧縮側鋼板のひずみ分布を図－４に示す。 a/d=2.0の供試体では、せん断スパン内

の引張側鋼板において、アングルやダイヤフラムを溶接したリブの近傍で応力集中がみられた。この傾向は斜めひびわれが大きく進展した後に顕著に現れる。この原因として、斜めひびわれ発生後、ひびわれに沿って圧縮ストラットが形成されるため、斜めひびわれ発生点のアングルの近傍の鋼板に大きな引張力が発生するためであると思われる。SB-3の支点付近では斜めひびわれ発生後に圧縮ひずみが発生していた。SB-3においては斜めひび割れ発生後に直ちに圧縮ひずみから引張ひずみに変化し、載荷点のとなりのアングルに応力が集中して降伏した。このような現象からSB-2およびSB-3では斜めひびわれをはさんで２本の圧縮ストラットが形成されたと予測される。

a/d=3.0 の供試体では引張側鋼板で斜めひびわれの発生したアングル近傍での応力集中がみられ、終局時には降伏ひずみに近い値を示していた。また、斜めひびわれ発生後、支点の付近で圧縮ひずみが発生した。



図－３　荷重－たわみ曲線



図－４　引張・圧縮鋼板のひずみ分布

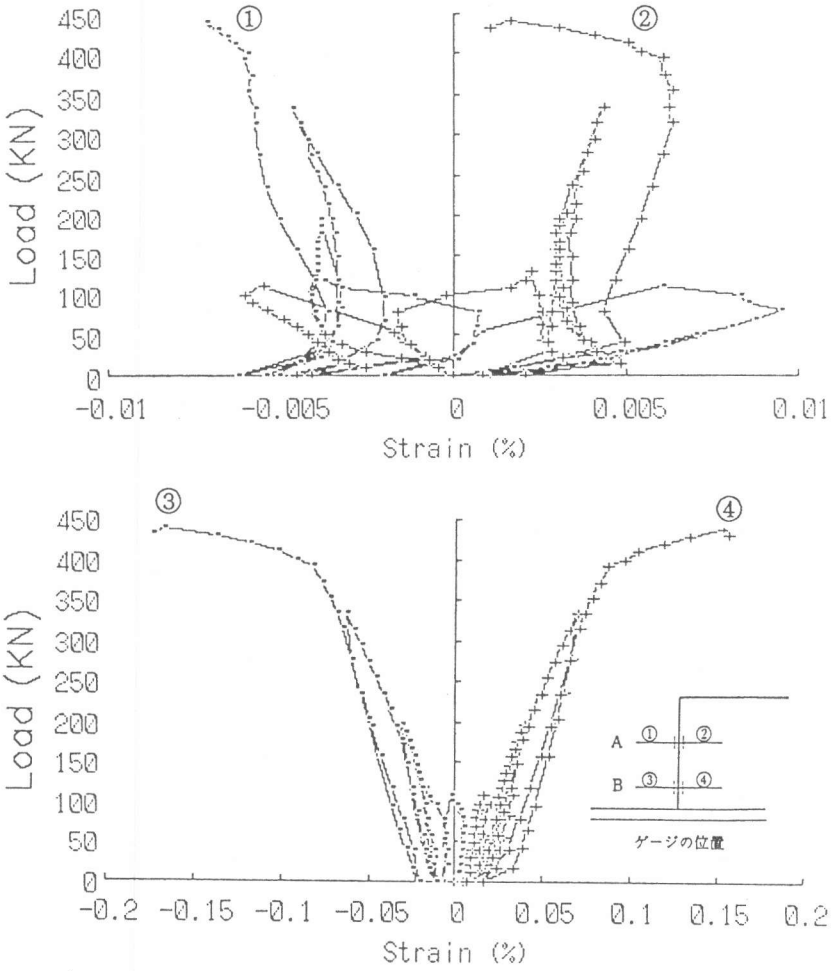
a/d=4.0 の供試体SB-5およびSB-6において、斜めひびわれ発生前は引張側鋼板のひずみ分布は

a/d=2.0～3.0の供試体に比してアングル付近の応力集中は顕著でなく、斜めひびわれ発生後にそのひびわれの起点となったアングル付近に応力が集中した。引張・圧縮側の両鋼板とも降伏した箇所は見受けられなかった。

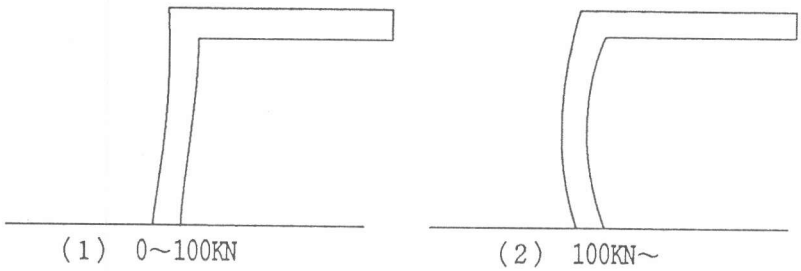
フルウエブの供試体ではa/d=3.5のSBW-1では引張・圧縮側鋼板とも目立った応力集中はなく、はりに曲げ変形が卓越していたことが判る。最大荷重載荷時には引張側鋼板はほとんど降伏していた。a/d=2.83のSBW-2ではSBW-1と比較して荷重レベルが上がるにつれて引張側鋼板の応力集中が著しくなった。荷重レベルが高くなったときに圧縮側鋼板の支点よりの２カ所のアングルの近傍で引張歪みを観測した。これからこのリブ間で斜めひびわれが発生して、そのひびわれに沿って圧縮ストラットが形成されていることが予測できる。

３．４アングルの変形挙動

シアコネクタであるアングルの変形挙動と強度を検討するために図－５に示すように供試体SB-2のアングルにひずみゲージを装着した。供試体SB-2の破壊の原因となった斜めひびわれ発生点のアングルのウエブのひずみ分布からその変形挙動は図－６に示すようになる。斜めひびわれが発生する以前では、アングルのウエブには曲げモーメントと引張軸力が作用している。ウエブの上部と下部とでは曲げモーメントの符号が変わる事から明らかにせん断変形をしており（図－６(1)）、シアコネクタの機能を果たしていると言える。荷重のレベルが上がるにつれて曲げが卓越してくる（図－６(2)）。これは斜めひびわれに沿って形成される圧縮ストラットからの圧縮力がアングル近傍の引張側鋼板に作用するため、アングルのウエブの付け



図－５　荷重とアングルのウエブにおけるひずみとの関係



図－６　アングルの変形

根に大きな曲げモーメントが作用したためである。これがアングルの近傍の鋼板の応力集中の原因と考えられる。また、全ての供試体において供試体が耐力を失うまでアングルは健全に機能していた。

３．５せん断耐荷機構

以上の実験結果から鋼・コンクリートサンドイッチはりのせん断耐荷機構を提案する。供試体SB-1～SB-6ではa/d=2.0～3.0の供試体において、斜めひびわれ発生後、圧縮側鋼板で引張ひずみがせん断スパンのほぼ全域に渡って観測された。また、斜めひびわれ発生したアングルと斜めひびわれが到達したその近傍のアングルにおいて応力集中がみられた。このことから a/d=3.0程度までのはりでは斜めひびわれが発生した際に、そのひびわれに沿って２本の圧縮ストラットが発生すると考えられる。よって、せん断スパン内に適切なせん断補強を行う事により斜めひびわれが発生後、タイドアーチ的な耐荷機構に移行してせん断補強鋼材が降伏してからもさらに大きな荷重を受けることができるものと考えられる。

４．まとめ

今回の実験的研究の結果から以下のような結論を得た。

①鋼・コンクリートサンドイッチはりの既存のせん断耐力評価式を用いて耐力を計算した結果、どの評価式も実験値を精度良く推定することはできなかった。今後サンドイッチ内に形成される圧縮ストラットの方向とその幅、また、その圧縮力の強さを定量的に求めるために、有限要素法等による数値解析を行い実験結果と比較する必要がある。

②今回の供試体では、アングルはシアコネクタとしての機能を十分果たしていた。しかし、その反面でせん断破壊の原因となる斜めひび割れを誘発する原因となっている。よって、必要以上にアングルを配置することはせん断耐力を低下させるおそれがあるため、アングルとせん断補強鋼材の設置位置とその間隔を十分考慮することが必要である。

謝辞　本研究の実験準備の際には佐藤昭七郎、佐藤幸作両技官に、また、載荷実験を森川淳司君（銭高組）にご協力を頂いたことに深く感謝の意を表します。

参考文献

[1]小沢一雅・田中征登・上田多門： 鋼コンクリート合成構造のせん断耐荷機構、第８回コンクリート工学年次講演会論文集、1986年, pp. 777-780

[2]清宮理・横田弘： 鋼－コンクリート合成はりのせん断補強鉄筋が終局耐力に及ぼす影響、第９回コンクリート工学年次論文報告集、1987年、pp. 531-536

[3]土木学会：コンクリート標準示方書【 昭和61年制定 】設計編、1986年、pp. 74-84

[4]二羽淳一郎： ＦＥＭ解析に基ずくディープビームのせん断耐荷力算定式、第２回ＲＣ構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム論文集、1983年10月、pp. 119-126