

(24) 鋼／コンクリート・コンポジット構造のせん断特性に関する2、3の考察

SOME EXAMINATIONS ON SHEAR PROPERTY OF STEEL/CONCRETE COMPOSITE STRUCTURES

塩屋俊幸* 大内田博喜** 大野文良*** 長谷川俊昭****

Toshiyuki SHIOYA, Hiroki OOUCHIDA, Fumiyoshi OHNO, Toshiaki HASEGAWA

Basic experiments were performed on shear property of steel/concrete composite beams.

[1] THE EFFECT OF STIFFENERS DIRECTION ON SHEAR STRENGTH

Two types of beam were tested. In the A-type beam, stiffeners were set longitudinally. In the B-type beam, stiffeners were set transversely. B-type beam was failed in shear. Although A-type beam was failed in flexure, the maximum shear stress of A-type beam was three times larger than that of B-type beam. Transversal stiffeners became the trigger of diagonal tension cracks. Therefore, there are some cases where beam with no transversal stiffener has large shear strength.

[2] SIZE EFFECT ON SHEAR STRENGTH OF COMPOSITE STRUCTURES

Shear tests were performed with two different beam size. The nominal shear strength decreased as the beam size increased. Therefore, in the design of large composite member, it is deemed necessary for evaluation to be made by considering the size effect on shear strength.

1. はじめに

鋼／コンクリート・コンポジット構造はじん性・施工性に優れているため、各種構造物へ適用しようとする試みが活発におこなわれている[1][2]。しかしながら、コンポジット構造は現在開発段階にあり、設計・施工の両面において解決すべき問題点が数多くある。このような背景から、筆者らは海洋構造物を対象にして一連の開発・研究[3][4][5]を行っており、本報においては以下の2つの主題について報告する。

① せん断強度に及ぼすスティフナーの配置方向の影響

② コンポジット構造のせん断強度の寸法効果

2. せん断強度に及ぼすスティフナーの配置方向の影響

一般にコンポジット構造においてはずれ止めが配置されている。ずれ止めは鋼板とコンクリートを複合するために不可欠のものであるが、ずれ止めの存在が部材のせん断強度に及ぼす影響を調べた例は少ない。そこで本実験ではスティフナー（フラットバー厚さ $t=9\text{mm}$ ）を部材軸方向に配置したもの（Aタイプ）、ずれ止めとして部材軸直角方向に配置したもの（Bタイプ）を用意し加力実験をおこなった。Aタイプは鋼板とコンクリートの付着がほとんど無い試験体、Bタイプは完全合成の試験体に相当する。

* : 工博 主任研究員 清水建設技術研究所

* * : 工修 課長 清水建設土木本部技術部

* * * : 工修 清水建設土木本部技術部

* * * * : 工修 清水建設技術研究所

(1) 実験概要

試験体の形状寸法を図-1に、諸元を表-1に示す。試験体の形状は正方形断面のはりとし、試験体の高さ $h=300\text{mm}$ 、幅 $b=300\text{mm}$ とした。鋼材配置については主鋼板(厚さ $t=9\text{mm}$)を上下に配置したサンドイッチ構造とした。コンクリートは、粗骨材最大寸法 $G_{\text{max}}=25\text{mm}$ の普通骨材を用いた、圧縮強度 $f'_c=450\text{kgf/cm}^2$ 程度の流動化コンクリートであり、配合を表-2に示す。鋼板はSM50Aを用い、降伏点は $f_{sy}=3300\text{kgf/cm}^2$ 、引張強度は $f_{su}=5300\text{kgf/cm}^2$ である。試験体は、打設直後から1週間コンクリート面を水張り養生とし、その後試験時まで湿布養生とした。支持条件は単純支持とし、加力は2点集中载荷とした(図-1参照)。

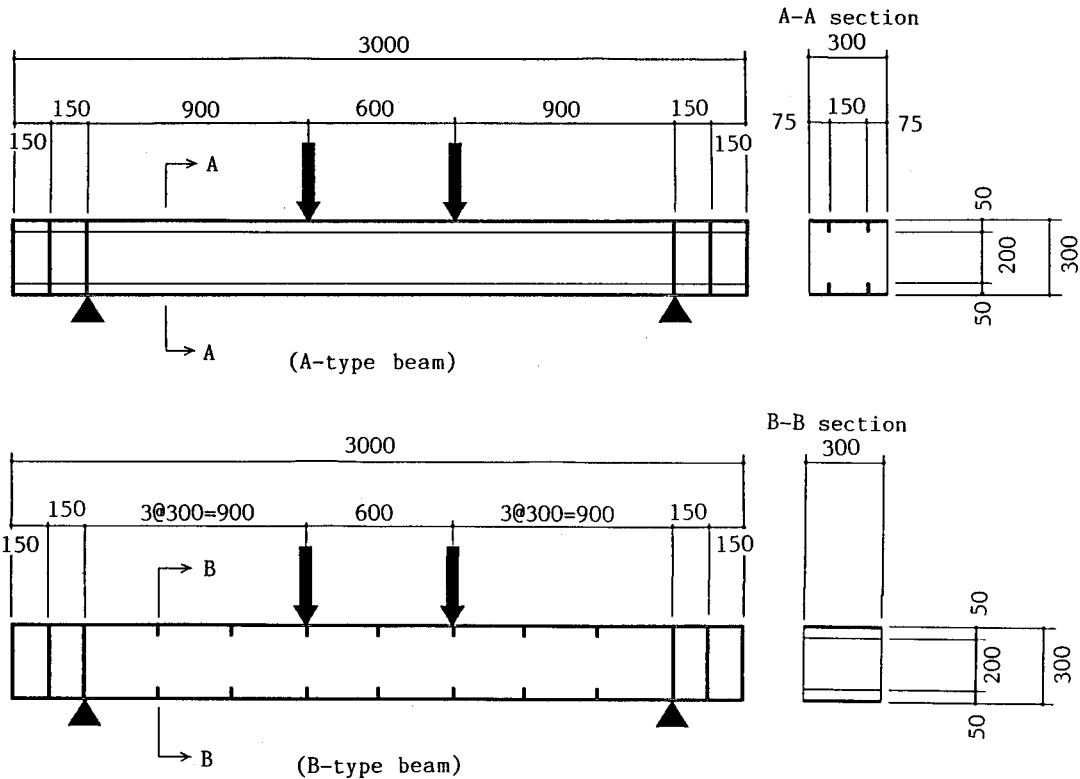


Fig. 1 Cross-sectional dimensions and loading condition (unit:mm)

Table 1 Varieties of specimens and principal test results

Specimen	Specimen dimensions			Concrete		Failure load		Failure mode
	Loading span (mm)	Height (mm)	Width (mm)	Comp. strength (kgf/cm^2)	Tens. strength (kgf/cm^2)	Shear force (tonf)	Shear strength (kgf/cm^2)	
A-type	2400	300	300	411	27.5	36.9	41.0	Tied-arch
B-type	2400	300	300	415	27.8	11.0	12.2	Diagonal tension

Table 2 Mix proportion of concrete

Target comp. strength f'_c (kgf/cm^2)	Max. coarse aggregate G_{max} (mm)	Range of slump (cm)	Range of air content (%)	Water-cement ratio W/C (%)	Sand-agg. ratio s/a (%)	Unit content (kg/m^3)			
						Water W	Cement C	Sand S	Gravel G
450	25	24±2	6±2	35	39	157	450	646	1,042

(2) 実験結果と考察

実験結果は、表－１に示した通りである。ひびわれ状況を図－２に示す。Ａタイプ試験体は、部材軸直角方向にフラットバーが配置されていないので、せん断スパンにひびわれが発生せず、曲げスパンおよび支点直上のみに曲げひびわれが約20cm間隔で発生した。せん断スパンでは、鋼板とコンクリートとの間に付着ひびわれが、ほぼ全長にわたり発生した。曲げスパンの引張鋼板が降伏した後、曲げスパンの圧縮部が圧壊し破壊に至った。Ｂタイプ試験体は、試験体軸直角方向にフラットバーが配置されているため、全スパンにわたりフラットバーの間隔でひびわれが発生した。その後支点よりdの位置のフラットバーの先端からせん断ひびわれが急に発生し、荷重点へぬけるような形で最大荷重に至った。

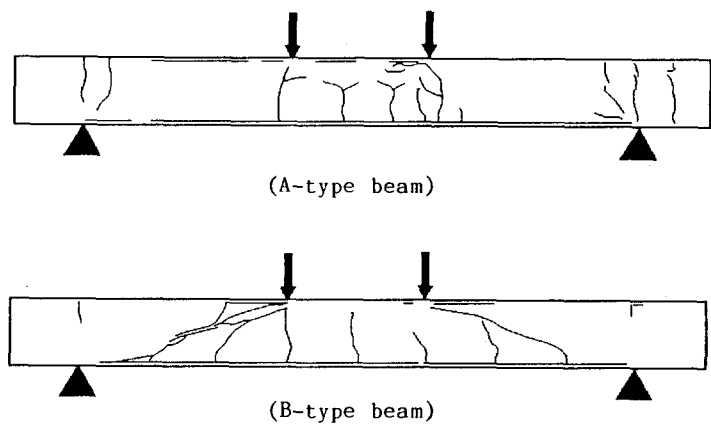


Fig. 2 Cracking patterns

表－３に土木学会[6]の鉄筋コンクリートに対する計算せん断強度 τ_{cal} と実験せん断強度 τ_{max} の比を示した。同表には計算曲げ強度との比も示した。この表よりわかるようにＢタイプ試験体は計算値よりせん断強度がやや小さいもののほぼ一致しているが、Ａタイプ試験体は計算値の約３倍の値を示した。Ｂタイプ試験体では、試験体軸直角方向のフラットバーから発生した曲げせん断ひびわれによって斜め引張破壊を起こしたため鉄筋コンクリートの場合と似たような耐荷機構となり計算値とほぼ一致したのと考えられる。一方、Ａタイプ試験体の場合はせん断スパンにひびわれが発生しないため強固なタイドアーチ機構となり実験値が大きくなったのと考えられる。

このことは鉄筋コンクリート部材において池田[7]も指摘している。すなわち、せん断スパンにおけるずれ止めは斜めひびわれの起点となり、せん断破壊の引金となる。したがって、ずれ止めを配置しない方が、場合によっては、せん断特性がよくなると言える。

Table 3 Ratio of calculated and experimental value

Specimen	Calculated shear strength by JSCE eq. τ_{cal} (kgf/cm^2)	Calculated maximum moment M_{cal} ($\text{tonf}\cdot\text{m}$)	Ratio	
			τ_{max}/τ_{cal}	M_{max}/M_{cal}
A-type	13.6	34.9	3.06	0.95
B-type	13.2	26.2	0.94	0.38

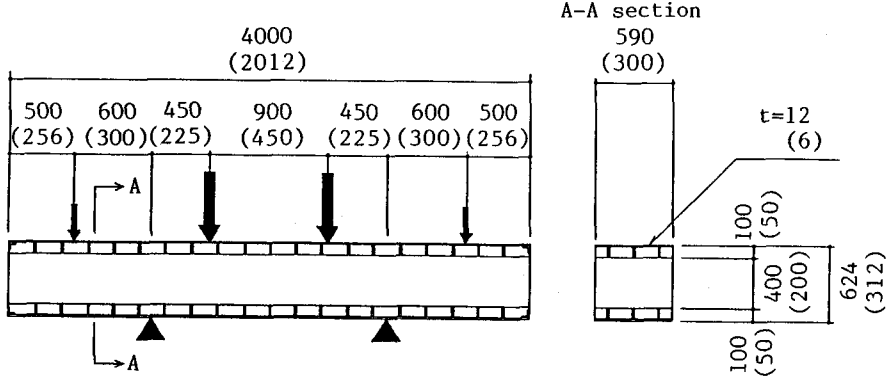
(Note) τ_{max} : Experimental shear strength
 M_{max} : Experimental maximum moment

3. コンポジット構造のせん断強度の寸法効果

せん断補強筋を用いていない鉄筋コンクリートはりのせん断強度は、有効高さdが大きくなると次第に減少することがKani[8]、Taylor[9]、井畔・塩屋・野尻・秋山[10]等の実験的研究によって明かにされている。これは一般に寸法効果と呼ばれており、土木学会「コンクリート標準示方書」[6]、CEB/FIP「Model Code for Concrete Structures」[11]等の示方書でも取り入れられている。コンポジット構造においても寸法効果があると考えられるが実験的に確認された例はない。そこで、本実験では大小２つの試験体によりコンポジット構造におけるせん断強度の寸法効果について検討したものである。

(1) 実験概要

試験体の形状寸法を図-3に、諸元を表-4に示す。大小2つの試験体の寸法比は1/2である。コンクリートは、粗骨材最大寸法 $G_{max}=15\text{mm}$ の軽量粗骨材を用いた、圧縮強度 $f'_c=600\text{kgf/cm}^2$ 程度の流動化コンクリートであり、配合を表-5に示す。鋼板はSS41を用い、大型試験体の場合、降伏点は $f_{sy}=3100\text{kgf/cm}^2$ 、引張強度は $f_{su}=4500\text{kgf/cm}^2$ である。小型試験体の場合、その降伏点は $f_{sy}=3650\text{kgf/cm}^2$ 、引張強度は $f_{su}=4170\text{kgf/cm}^2$ である。大型試験体は文献[4]に示した大型施工性実験試験体からダイヤモンドカッターにより切り出したものであり試験時まで気中養生とした。小型試験体は実験室内で製作し試験時まで散水養生とした。支持条件は単純支持とし加力は等分布荷重が連続ばりに満載する状態をモデル化し、4点集中荷重とした(図-3参照)。なお、載荷板および支承板の幅は大型試験体の場合10cm、小型試験体の場合5cmである。



Figures in () : Dimensions of small beam

Fig. 3 Cross-sectional dimensions and loading condition (unit:mm)

Table 4 Varieties of specimens and principal test results

Specimen	Specimen dimensions			Concrete		Failure load		Failure mode
	Loading span (mm)	Height (mm)	Width (mm)	Comp. strength (kgf/cm^2)	Tens. strength (kgf/cm^2)	Shear force (tonf)	Shear strength (kgf/cm^2)	
Large	1800	618	590	579	31.7	329	90.3	Shear comp.
Small	900	312	300	578	37.9	122	131	Shear comp.

Table 5 Mix proportion of concrete

Target comp. strength f'_c (kgf/cm^2)	Max. coarse aggregate G_{max} (mm)	Range of slump (cm)	Range of air content (%)	Water-cement ratio W/C (%)	Sand-agg. ratio s/a (%)	Unit content (kg/m^3)				
						Water W	Cement C	Sand S	Gravel G	Silica fume SF
500	15*	>25	7±2	29	38	146	502	589	598	50

(Note) * : Light weight coarse aggregate

(2) 実験結果と考察

実験結果は、表-4に示した通りである。ひびわれ状況を図-4に示す。ひびわれは、支点を基部とするタイドアーチのような性状を示した。支承と荷重点とを結ぶせん断ひびわれによって形成されたコンクリートの圧縮斜材がせん断圧縮破壊するようにして最大荷重に至ったが、最大荷重以前に、上下主鋼板の一部で圧縮降伏または引張降伏が生じていた。両者のひびわれ性状や破壊モードはほとんど差異がないといえる。

図-5は両者のせん断応力度-変位関係を比較したものである。両者とも変形が支承および載荷板近傍に集中したため、載荷を中断した。そのため、最終のじん性を確認することはできなかった。実験の結果、小型試験体のせん断強度は $\tau_{max}=131\text{kgf/cm}^2$ であり、大型のせん断強度は $\tau_{max}=90.3\text{kgf/cm}^2$ であった。故に両試験体のせん断強度の寸法効果は図-6に示すように有効高さの約 $-1/2$ 乗に比例する寸法効果があった。一般に線形破壊力学に従う線形弾性ぜい性破壊材料は寸法の $-1/2$ 乗に比例する強度の寸法効果を持つことが知られている。本実験のコンポジット試験体は、単一のひびわれによって不安定ぜい性破壊を起こしたわけではなく、厳密な意味での線形破壊力学に従っているとは思えないが、そのせん断強度の寸法効果は普通コンクリートを用いた鉄筋コンクリートのせん断強度の寸法効果（一般に有効高さ d の $-1/4$ 乗に比例するとされている）よりも線形破壊力学に近づく可能性はある。その理由は、本実験のコンポジット試験体は高強度軽量コンクリートを用いており、高強度軽量コンクリートが普通コンクリートよりもぜい性破壊材料に近いこと、また鉄筋コンクリートでは鉄筋とコンクリートの付着破壊が生ずるのに対し、コンポジット構造ではそのような現象が少ないことによる。しかしながら、せん断強度の寸法効果は上述したような観点のみから論じきれるものではなく、他の様々な因子、たとえば乾燥収縮・水和熱・材料固有のばらつき等の影響因子が関係していると考えられる。特に本実験の場合、次のような理由のため、本実験のみからせん断強度の寸法効果を決定できるものではない。①試験体数が2体と少ない。②2試験体のコンクリート配合は同じであるが施工条件が異なる。すなわち、小型試験体は実験室で水平に打設されたのに対し、大型試験体は現場で傾斜して打設された後ダイヤモンドカッターで切り出された。③2試験体の養生条件が異なる。④鋼板の降伏点が異なる。

図-7にせん断強度の実験結果と土木学会の鉄筋コンクリートに対するディーブビーム式による計算結果の比 τ_{max}/τ_{cal} の関係を示す。土木学会式はかなりの精度で実験結果を予測することがわかる。土木学会式ではせん断強度は有効高さの $-1/4$ 乗に比例しており、寸法効果を考慮している。 $-1/2$ 乗に比例するのか $-1/4$ 乗に比例するのかは今後の実験データの蓄積を待たねばならないが、いずれにしても大型コンポジット構造を設計する場合、せん断強度の寸法効果を考

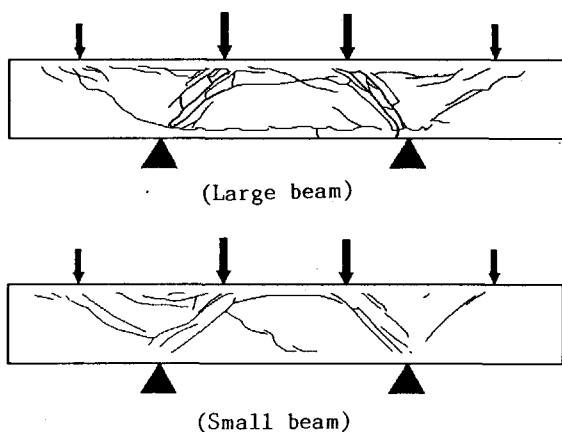


Fig. 4 Cracking patterns

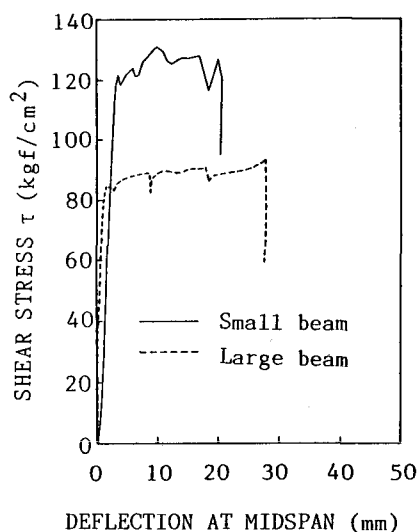


Fig. 5 Shear stress - deflection

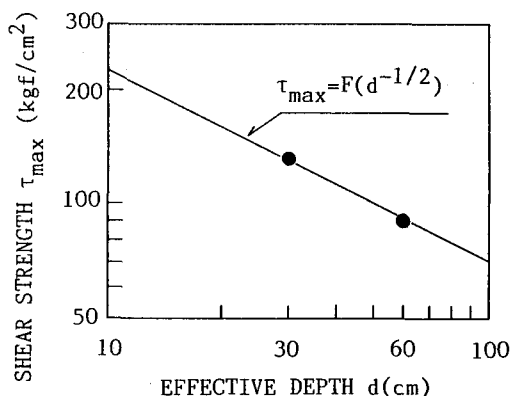


Fig. 6 Shear strength and effective depth (Effect of depth)

慮しなければならないものと考えられる。

4. 結論

鋼／コンクリート・コンポジット構造のせん断特性に関して基本的な実験をおこない以下の結論を得た。

①：せん断強度に対するずれ止めの影響

せん断スパンに平鋼を部材軸方向に配置した試験体（Aタイプ）、ずれ止めとして部材と直角方向に配置した試験体（Bタイプ）を用意し、せん断実験を行った。Bタイプではせん断破壊となったが、AタイプはBタイプの約3倍のせん断力に耐え曲げ破壊となった。せん断スパンにおけるずれ止めは斜めひびわれ発生の起点となり、せん断破壊の引金となると考えられる。したがって、場合によっては、ずれ止めを配置しない方がせん断特性がよい。

②：コンポジット構造におけるせん断強度の寸法効果

大小2つの試験体を用意し、せん断実験を行った。大型試験体の方がせん断強度は小さくなる傾向（寸法効果）を示した。したがって、大型コンポジット構造物の設計においてはせん断強度の寸法効果を考慮しなければならないものと考えられる。ちなみに、土木学会の鉄筋コンクリートに対するディープビーム式はせん断強度の寸法効果を考慮しており、その計算値は実験結果と良い一致を示した。

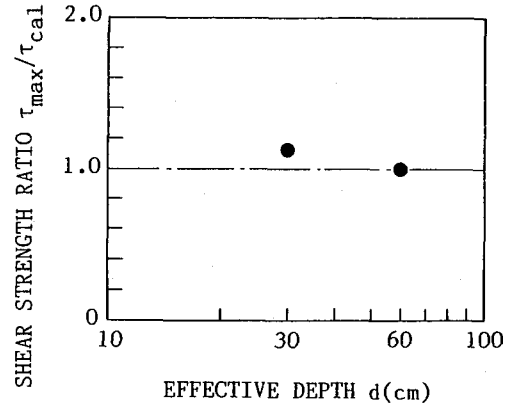


Fig. 7 Shear strength ratio $\tau_{\max}/\tau_{\text{cal}}$

[参考文献]

- [1] 土木学会：合成構造の活用に関するシンポジウム論文集、1986年9月
- [2] 土木学会：鋼・コンクリート合成構造の設計ガイドライン、1989年3月
- [3] Shioya T., Matsumoto G., Okada T. & Ota T. : Developmment of Composite Members for Arctic Offshore Structures, Proc. of POLARTECH '86(International Offshore and Navigation Conference and Exhibition), Vol. 2, Oct. 1986, pp.660-677
- [4] 長谷川俊昭、塩屋俊幸、岡田武二他：氷海向石油掘削プラットフォーム用 鋼／コンクリート・コンポジット構造の開発、清水建設研究報告、第45号、1987年4月、pp.15-25
- [5] Ohno F., Shioya T., Nagasawa Y. et al. : Experimental Studies on Composite Members for Arctic Offshore Structures, POAC'87 (in press)
- [6] 土木学会：コンクリート標準示方書、昭和61年制定
- [7] 池田尚治、宇治公隆：鉄筋コンクリートはりのせん断耐荷挙動に及ぼす鉄筋の付着の影響に関する研究、土木学会論文報告集、第293号、1980年1月、pp.101-109
- [8] Kani G.N.J. : How Safe Are Our Large Reinforced Concrete Beams?, Journal of ACI, No.64-12, March, 1967
- [9] Taylor H.P.J. : Shear Strength of Large Beams, Journal of ST., Proc. of ASCE, Nov., 1972
- [10] 井畔・塩屋・野尻・秋山：等分布荷重下における大型鉄筋コンクリートはりのせん断強度に関する実験的研究、土木学会論文報告集、1984年8月
- [11] CEB/FIP : Model Code for Concrete Structures, 1978