

論文

[2002] 氷海向け石油掘削プラットフォーム用鋼・コンクリート合成構造の構造特性と施工性

正会員○大野文良（清水建設㈱土木技術部）  
 正会員 塩屋俊幸（清水建設㈱技術研究所）  
 大内田博喜（清水建設㈱土木技術部）  
 正会員 長谷川俊昭（清水建設㈱技術研究所）

1. はじめに

鋼・コンクリート合成構造はじん性・施工性に優れ、また建設コスト・期間とも低減・短縮できる可能性が高いため各種構造物へ適用しようとする試みが活発に行われている。しかしながら、合成構造の設計・施工法は確立しているとは言い難く解決すべき問題点が残されている。このような背景から、著者らは氷海向け石油掘削プラットフォームを対象に鋼板とコンクリートからなるサンドイッチ形式の合成構造の構造実験および施工性実験を行った[1][2]。本報はこれらの実験結果について報告するものである。

2. 曲げ実験

2.1 実験概要

曲げ耐力の評価、特に圧縮側鉄板の座屈挙動を調べるため、13体の曲げ試験を行った（表-1参照）。試験体の形状・寸法を図-1に示す。鋼材配置については主鋼板（厚さ $t=9\text{mm}$ ）を上下に配置した構造とし、せん断スパンは鋼板を配置し補強した。曲げ試験における実験パラメータは圧縮側鋼板の座屈に対する最適スティフナー形状と配置を検討するため、スティフナー（フラットバー）の高さ $h_f$ 、間隔 $l_f$ 、配置方向（Aタイプ：スティフナーを軸方向に配置、Bタイプ：スティフナーを軸直角方向に配置）とした。さらに、合成構造部材と同じ鋼材比の鉄筋コンクリート（RC）はりを試験した。コンクリートの目標圧縮強度は約 $45\text{MPa}$ であり、配合を表-2に示す。鋼材の強度特性は表-1に示す。試験体は側面を上にした状態でコンクリートを打設し、試験時まで湿布養生とした。図-1に示すように支持条件は単純支持とし、加力は2点集中荷とした。なお、支持・加力点とも幅 $10\text{cm}$ のテフロン支承を用いた。

2.2 曲げ実験結果

(1) 破壊性状

破壊モードを表-1に示す。ここで、「塑性座屈」とは引張鋼板・圧縮鋼板の降伏後、圧縮鋼板が加工硬

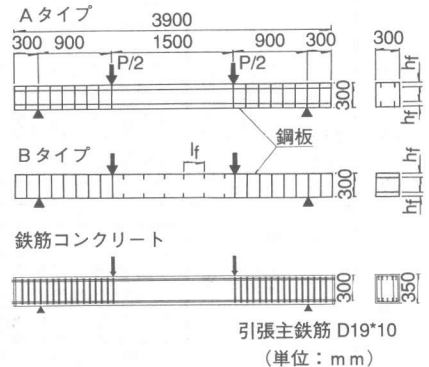


図-1 曲げ試験体の形状・寸法および荷重条件

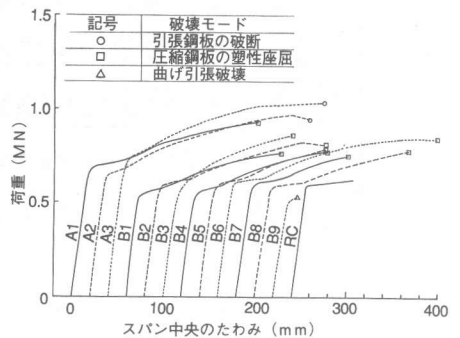


図-2 荷重-中央たわみ関係（曲げ実験）

表一 試験体および実験結果一覧

実験	試験体寸法			コンクリート			鋼材			スティフナー					実験結果				破壊モード		
	全長 L mm	載荷加心長さ $\phi$ mm	有効高さ d mm	幅 b mm	配合	圧縮強度 $f_c$ MPa	引張強度 $f_t$ MPa	厚さ t mm	降伏点 $f_{sy}$ MPa	引張強度 $f_{su}$ MPa	主鋼材比 P %	タイプ	高さ $h_s$ mm	間隔 $\lambda_s$ mm	降伏荷重 $P_y$ MN	座屈荷重 $P_b$ MN	最大荷重 $P_{max}$ MN	実験最大モーメント $M_{max}$ MN*m		終局せん断強度 $\tau_{max}$ MPa	
曲げ	A1	3900	3300	296	300	M1	41.5	2.78	9	324	520	3.05	A	10	0.667	0.937	0.937	0.422	-	塑性座屈	
	A2	3900	3300	296	300	M1	43.3	2.91	9	324	520	3.05	A	25	0.647	0.981	0.441	-	支点のすべり		
	A3	3900	3300	296	300	M1	43.7	2.93	9	324	520	3.05	A	50	0.745	1.06	0.477	-	支点のすべり		
	B1	3900	3300	296	300	M1	44.0	2.96	9	324	520	3.05	B	10	0.549	0.780	0.351	-	塑性座屈		
	B2	3900	3300	296	300	M1	45.5	3.07	9	324	520	3.05	B	25	0.588	0.814	0.380	-	塑性座屈		
	B3	3900	3300	296	300	M1	46.1	3.11	9	324	520	3.05	B	50	0.569	0.863	0.393	-	塑性座屈		
	B4	3900	3300	296	300	M1	46.3	3.13	9	324	520	3.05	B	10	0.569	0.789	0.355	-	塑性座屈		
	B5	3900	3300	296	300	M1	46.8	3.18	9	324	520	3.05	B	25	0.588	0.804	0.362	-	塑性座屈		
	B6	3900	3300	296	300	M1	46.9	3.20	9	324	520	3.05	B	50	0.608	0.873	0.393	-	塑性座屈		
	B7	3900	3300	296	300	M1	47.3	3.23	9	324	520	3.05	B	10	0.608	0.760	0.342	-	塑性座屈		
せん断	B8	3900	3300	296	300	M1	47.4	3.25	9	324	520	3.05	B	25	0.588	0.809	0.809	0.364	-	塑性座屈	
	B9	3900	3300	296	300	M1	47.9	3.30	9	324	520	3.05	B	50	0.539	0.294	0.539	0.243	-	曲げ引張	
	RC	3950	3300	300	300	M1	46.3	3.48	D19*	343	520	3.19	-	-	0.569	-	0.642	0.269	-	曲げ引張	
	C8R	4000	1800	618	590	M2	59.4	2.59	12	304	441	1.94	R1B	550	-	-	-	2.17	-	5.95	圧縮せん断
	C8F	4000	1800	618	590	M2	56.8	3.11	12	304	441	1.94	FB	100	200	-	-	3.23	-	8.86	圧縮せん断
	CSR	4000	1800	618	1190	M2	59.4	3.05	12	304	441	1.94	R1B	550	350	-	-	5.80	-	7.88	圧縮せん断
せん断	CSF	4000	1800	618	1190	M2	56.8	3.00	12	304	441	1.94	FB	100	200	-	-	6.67	-	9.11	圧縮せん断
	RCB	4000	1800	600	600	M2	55.3	2.74	D32*	343	549	1.99	-	-	-	-	2.73	-	7.58	圧縮せん断	
	C8FS	2012	900	309	300	M2	56.7	3.72	6	358	409	1.94	FB	50	100	-	-	1.20	-	12.8	圧縮せん断
	A	3000	2400	296	300	M1	40.3	2.70	9	324	520	3.05	A	50	-	-	0.361	-	4.04	タイドアーチ	
B	3000	2400	296	300	M1	40.7	2.73	9	324	520	3.05	A	50	300	-	-	0.108	-	1.20	斜め引張	

\*:異形鉄筋

表二 コンクリートの配合

配合	目標圧縮強度 $F_c$ MPa	粗骨材最大寸法 $G_{max}$ mm	スランプレーションの範囲 cm	空気量の範囲 %	水セメント比 W/C %	細骨材率 S/a %	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
							水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	
M1	45	25*	24±2	5±2	35	39	157	450	646	1042	-
M2	50	15**	>25	7±2	29	38	146	502	589	598	50

\*:普通重量粗骨材

\*\* :軽重量粗骨材

化域にある状態で座屈し急激に破壊したことを示し、「曲げ引張」とは引張鋼材が降伏後、圧縮鋼材が降伏に至る前に圧縮部コンクリートが圧壊したことを示す。

### (2) 荷重-中央たわみ関係

曲げ荷重下における荷重-中央たわみ関係を図-2に示す。本実験における合成構造部材では、圧縮側鉄板が弾性座屈しなければ、降伏時の8~10倍のたわみに達したとき圧縮側鉄板の塑性域での座屈を伴うコンクリートの圧壊によって破壊した。RC構造部材の場合、合成構造部材に比べ、もっと小さなたわみでコンクリートが圧壊し破壊に至った。すなわち、本実験における合成構造部材は曲げ荷重下において高いじん性能を示した。

### (3) 曲げ破壊荷重

図-3に実験降伏モーメントとコンクリートの引張負担力を無視したRC理論[3]に基づく計算値との比較を示す。実験結果は計算値とよく一致している。また、図-4に示すようにひずみの測定結果から降伏荷重までは平面保持の仮定が合成構造部材においても成立していることが確かめられた。したがって、合成構造部材の降伏モーメントはRC計算式で評価してよいと考えられる。合成構造部材ではRC構造部材に比べ降伏荷重から最大荷重までの強度増加が著しい。これは合成構造の場合、圧縮部コンクリートが鋼板によって拘束されており、容易に圧壊（コンクリートの座屈）しないためである。したがって、合成構造部材の最大荷重を推定する場合、鋼材の加工硬化、コンクリートの多軸応力状態における強度増加などを考慮する必要があるものと考えられる。

## 3. せん断実験

### 3.1 実験概要

種々のスティフナー形状の合成構造のはりとスラブのせん断強度を評価するため、7体のせん断実験を行った（表-1参照）。試験体の形状・寸法を図-5に示す。以下に示す4つの形状のスティフナーを考慮した。

- (A) FBタイプ：格子状のフラットバーを配置
- (B) RIBタイプ：L形スティフナーを軸直角方向に配置
- (C) Aタイプ：フラットバーを軸方向に配置

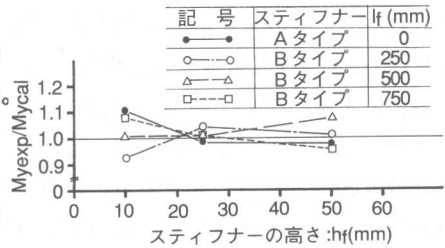


図-3 実験値と計算値の比 (曲げ実験)

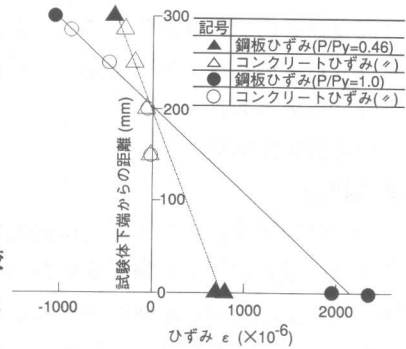


図-4 A2試験体のひずみ分布

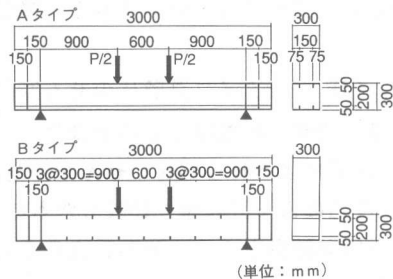
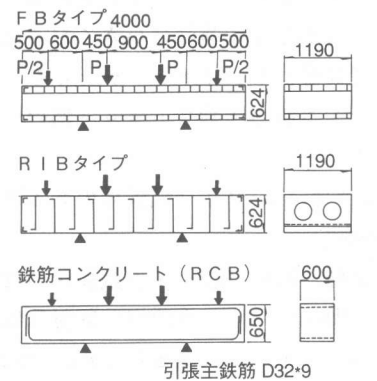


図-5 せん断試験体の形状・寸法および荷重条件

(D) Bタイプ：フラットバーを軸直角方向に配置  
 さらに、RIBタイプ試験体とほぼ同じ鋼材比のRC試験体(RCB)を用意し、せん断強度を比較した。なお、本実験ではせん断補強用鋼材は配置していない。目標圧縮強度は45~50MPaである。配合は表-2に、鋼材の特性は表-1に示した。加力方法は図-5に示すように支点は単純支持とし、加力点は2または4点とした。4点とした試験体は等分布荷重が連続ばりに満載した状態をモデル化したものであり、検討せん断スパンは両支点の内側のせん断スパンである。なお、載荷板及び支承板の幅は、CBFS試験体が5cm、その他の試験体では10cmである。

### 3.2 せん断実験結果

#### (1) 破壊状況

CBF、CSF、CBFS試験体のせん断耐荷機構はタイドアーチとなった。載荷点近傍の局部変形の増加とともに荷重は漸増したが、支承と試験体が接触したため試験体を実験を中断した。CBR、CSR試験体の破壊モードもタイドアーチとなったが、コンクリート斜め圧縮ストラット部でL型スティフナーとコンクリートの間にすべりを生じたため、終局せん断強度は小さくなった。RCB試験体のせん断耐荷機構もタイドアーチとなり、破壊モードはコンクリート斜め圧縮ストラット部のせん断圧縮破壊となった。

#### (2) FB, RIB, RCBタイプ試験体のせん断応力-たわみ関係

図-6にFB, RIB, RCBタイプ試験体のせん断応力-中央たわみ関係を示す。合成構造部材はRCB試験体に比べ大きなエネルギー吸収能を示した。CBR試験体で5倍、その他の試験体で約20倍のエネルギー吸収能であった。

#### (3) FB, RIB, RCBタイプ試験体のせん断強度

図-7は実験せん断強度と土木学会コンクリート標準示方書式[3]によるRC部材のせん断強度計算値およびACI式[4]による計算値と比較したものである。土木学会式は実験結果とよく一致し、ACI式はかなり安全側の値を示した。

#### • 土木学会式

$$\tau_{JSC E} = 0.6 \times (100/d)^{1/4} \times (100 \times p_w)^{1/3} \times 5 \times f'_c \cdot 1/2 / (1 + (a_v/d)^2) \quad (1)$$

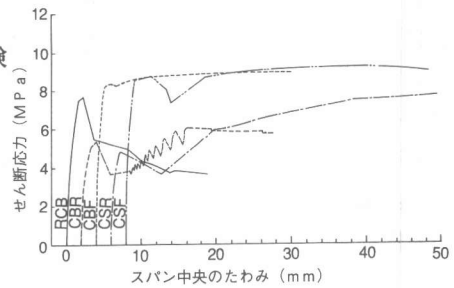


図-6 せん断応力-中央たわみ関係 (せん断実験)

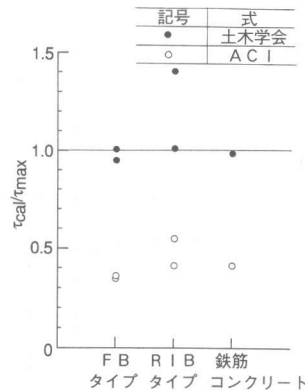


図-7 実験値と計算値の比 (せん断実験)

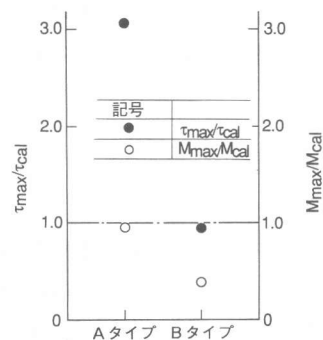


図-8 実験値と計算値の比 (スティフナーの配置方向の影響)

• ACI式

$$\tau_{ac1} = 0.85 * 1.59 * f'_c{}^{1/2}$$

(2)

ここに、 $d$ :有効高さ(cm)、 $p_w$ :軸方向引張鋼材比、 $a_v$ :荷重作用点から支承前面までの距離(cm)、 $f'_c$ :コンクリートの圧縮強度

(4) スティフナーの配置方向がせん断強度に及ぼす影響

図-8はAタイプ試験体およびBタイプ試験体の実験せん断強度と土木学会式による計算値との比を示したものである。Aタイプ試験体では軸方向にスティフナーを配置しており、Bタイプ試験体では軸直角方向に配置している。Bタイプ試験体はせん断破壊となった。Aタイプ試験体では曲げ破壊となったが破壊時の作用せん断応力はBタイプ試験体の3倍の値となった。軸直角方向に配置したスティフナーは斜めひびわれ発生の起点となっていることが観察された。よって、軸直角方向にスティフナーを配置しない方がせん断特性が良くなるといえる。

(5) 合成構造のせん断強度の寸法効果

CBF試験体とCBFS試験体の中央たわみとせん断応力との関係を図-9に示す。CBFS試験体はCBF試験体の1/2の縮尺の試験体である。せん断強度は試験体の寸法が大きくなるにつれて減少する。よって、大きな構造物を設計する場合はせん断強度の寸法効果を考慮する必要がある。図-10は土木学会のディープビームに対するせん断強度式：(1)式による計算値と実験せん断強度との比を示したものである。土木学会式ではせん断強度の寸法効果を考慮しているため実験値は計算値とよく一致している。

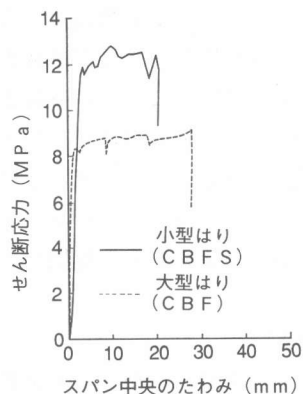


図-9 せん断応力-中央たわみ関係 (寸法効果)

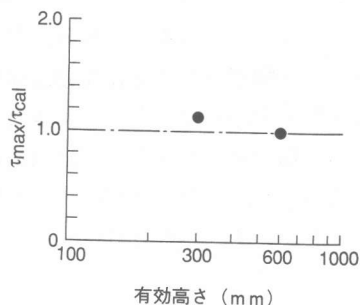


図-10 実験値と計算値の比 (寸法効果)

4. 施工性実験

4.1 実験概要

合成構造の施工方法を確立する目的で18体の小型試験体を用いたコンクリート打設実験を行った。詳細は文献[1]に示されている。小型打設実験を完了した後、小型実験で達成された技術を確認するため大型施工性実験を行った。大型施工性実験の試験体形状・寸法を図-11に示す。アクリル製の窓を供試体側面に設け目視により充填性を確認した。コンクリート打設システムを図-12に示す。この装置は、トレミー管を鋼殻内部に設けたレールによって懸垂させ、コンクリート打設に伴ってトレミー管を引き上げる構造であ

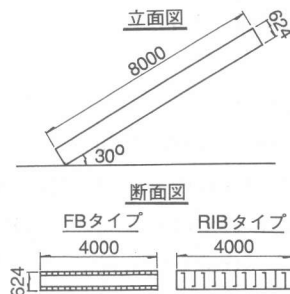


図-11 大型施工性実験試験体

り、フレキシブルホースを用いていることから、引き上げ途中での配管切り取り作業が不要で、コンクリートの連続打設が可能である。また、この装置には棒状パイプレータも同様に懸垂させており、トレミー管と連動して引き上げる構造である。

#### 4. 2 施工性実験結果

結果を要約すると以下の通りである。

(1) コンクリート硬化後表面の鋼板および内部コンクリートを切断し充填状況を調査した結果試験体は十分に充填されていることが確認された。

(2) 最大温度上昇量は6.8℃となったが、コンクリート表面にはひびわれが観測されなかった。

(3) コンクリート打設システムは非常に良好に作動し、十分実機に供し得ることを確認した。本実験の打設実績から、実機における打設効率は約40m<sup>3</sup>/hrと推定される。

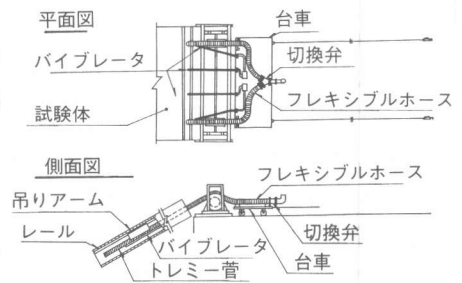


図-12 コンクリート打設システム

#### 5. 結論

(1) 曲げ実験結果から、本実験におけるようなサンドイッチ形式の合成構造部材の降伏モーメントは、コンクリートの引張負担力を無視したRC計算式で評価してよいことが確認された。合成構造部材は高いじん性を示し、破壊は降伏時たわみの約1.0倍のたわみに達した時に起こった。合成構造部材の破壊モードは圧縮側鉄板の塑性座屈とコンクリートの圧壊であった。RC試験体では、そのような大きなたわみとなる前に圧縮域のコンクリートの圧壊によって破壊した。

(2) 合成構造部材のせん断強度は内部のスティフナーが適切な形状をしていればRC部材のせん断強度と大差なかった。土木学会式による計算値は実験結果と良く一致したが、ACI式はかなり安全側の値となった。合成構造部材はRC部材の約2.0倍という極めて大きなエネルギー吸収能を示した。しかしながら、軸直角方向スティフナーはせん断破壊の誘発原因となる。軸直角方向スティフナーがなければ、せん断強度は大きくなる(本実験では約3.0倍のせん断強度となった)。

(3) 合成構造部材のせん断強度は部材高さが大きくなると減少する(せん断強度の寸法効果)。したがって、大型合成構造物を設計する場合、せん断強度の寸法効果を考慮する必要があるものと考えられる。

(4) 複雑な鋼殻に連続打設できるシステムを開発した。そのシステムの有用性を実物大施工実験によって確認した。

#### <参考文献>

- [1] SHIOYA T., MATSUMOTO G. et al.: Development of Composite Members for Arctic Offshore Structures, Proc. of POLARTECH'86, Vol. 2, Oct. 1986, pp. 660-677
- [2] OHNO F., SHIOYA T. et al.: Experimental Studies on Composite Members for Arctic Offshore Structures, POAC'87 (印刷中)
- [3] 土木学会: コンクリート標準示方書、1986年制定、設計編
- [4] ACI: Building Code for Reinforced Concrete(318-83), 1983