

[152] 鋼コンクリート合成サンドイッチ構造部材の強度特性

正会員 秋山 暉 (鹿島建設技術研究所)
 正会員 小関喜久夫 (鹿島建設技術研究所)
 正会員 ○平 和男 (鹿島建設技術研究所)
 正会員 佐々木正廣 (鹿島建設土木設計本部)

1. はじめに

最近、鋼製二重殻中にコンクリートを充填した鋼／コンクリート合成サンドイッチ構造、あるいは片側が鋼板、片側がコンクリートのオープンサンドイッチ構造等が、構造物の軽量化、耐荷性能の向上、止水性の確保あるいは工期短縮等の観点から注目されている。

サンドイッチ構造部材に関する既往の研究としては、栖原らの研究¹⁾や筆者らの研究²⁾がある。栖原らはせん断スパン比 a/d が $1.4 \leq a/d \leq 2.7$ の範囲の実験を実施し、サンドイッチ部材の破壊に至るまでの吸収エネルギーが非常に大きいことを示した。また、筆者らは 1000t/m^2 もの巨大な氷荷重が作用する氷海用石油掘削プラットフォームの耐氷壁を対象として、 $0.3 \leq a/d \leq 2.3$ の範囲の実験を実施し、サンドイッチ部材における実験時の挙動及び終局耐力はRC部材とほぼ同等であり、鋼材量が多い場合においても適切なせん断補強を行えば、優れた耐荷性能及び変形性能を有する部材とすることができることを示した。

本研究では氷荷重と比較して作用荷重がかなり小さい一般土木構造物を対象とし、 $1.3 \leq a/d \leq 4.8$ の範囲のサンドイッチ部材の基本的な強度特性を把握しようとしたものである。

2. 実験方法

サンドイッチ部材の変形特性及び終局耐力に着目し、せん断スパン比、鋼材比及びせん断補強方法等をパラメータとした実験を行った。また、せん断スパン比を変えた実験ではRC部材との比較も行った。

試験体は図-1に示した7タイプの単純はりで、スパン中央1点集中荷重載荷による実験を行った。試験体の幅はすべて60cmとし、サンドイッチ部材とオープンサンドイッチ部材ではコンクリート部分の厚さを30cm、RC部材では有効高さ d を30cmとした。実験に用いた試験体数は16体であり、表-1にその諸元を示した。使用したコンクリートは $G_{\max} = 10\text{mm}$ 、圧縮強度 $f'_c = 340\text{kg/cm}^2$ のもので、鋼材の強度は表-2に示したとおりである。

3. 実験結果及び考察

各試験体の斜めひびわれ発生荷重、最大荷重及び引張側鋼材の降伏状況等について表-1に示した。

3.1 せん断スパン比 a/d の影響

鋼材比 $p = 1.68\%$ のサンドイッチ部材 (No.1, 2, 5, 8) と $p = 1.54\%$ のRC部材 (No.12, 13, 15, 16) について、 a/d の影響を検討した。このとき用いたせん断スパン a は図-1(a)に示すスパンとした。

最終ひびわれの状況を図-2に示したが、サンドイッチ部材では曲げひびわれに続いて斜めひびわれが発生し、その後 $a/d = 1.3$ 、 2.3 の試験体 (No.1, 2) では、引張側鋼板降伏後に斜めひびわれの圧縮側終端付近のコンクリートが圧壊した。 $a/d = 3.3$ 、 4.8 (No.5, 8) では、斜めひびわれ発生と同時に上下鋼板に溶接したフラットバーとコ

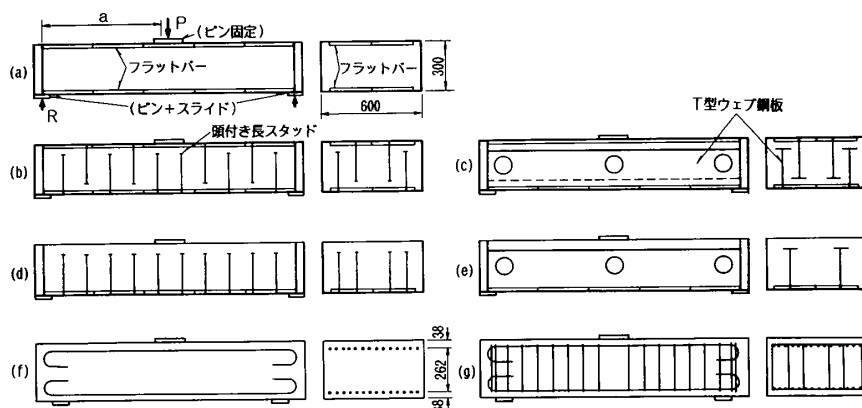


図-1 試験体のタイプ

表-1 試験体の諸元及び実験結果一覧表

試験体 No.	構造型式	試験体タイプ	スパン ℓ (cm)	せん断スパン比 a/d	鋼材比 ρ (%)	鋼材指数 ρ_{fsy} (%)	実験結果				計算値						
							斜めひびわれ発生荷重 $P_d(\text{tn})$	最大荷重 $P_{\max}(\text{tn})$	せん断強度 $\tau_{\max}(\text{kg/cm}^2)$	引張側鋼材の降伏状況	曲げ			せん断 (注)			
											圧縮側鋼板無視 P_{cal1}	圧縮側鋼板考慮 P_{cal2}	ひずみ硬化考慮 P_{cal3}	二羽式 P_{cal4}	岡村・楢貝式 P_{cal5}	荒川式 (耐力) P_{cal6}	荒川式 (斜め) P_{cal7}
1	Sandwich	a	90	1.35	1.68	0.12	130	133	37	降伏	103	134	—	151	—	84	53
2		b	150	2.35			40	74	21	"	59	77	—	65	52	53	39
3		c	210	2.52			38	78	22	"	—	—	—	(77)	(64)	87	"
4		a	300	3.34	3.67	0.26	155	173	52	"	—	104	135	(178)	(165)	110	37
5		b	210	4.89	1.68	0.12	33	33	9.1	降伏せず	42	54	—	—	46	38	32
6		c	210	4.89	0.50	0.04	—	10	2.9	降伏	10	12	—	—	26	20	25
7		d	300	4.87	0.90	0.07	—	21	5.9	"	18	22	—	—	31	23	"
8		e	300	4.84	1.68	0.12	31	31	8.6	"	29	37	—	—	40	26	"
9		f	300	4.83	2.24	0.19	32	32	8.9	降伏せず	42	57	—	—	46	29	"
10	Open Sandwich	d	150	2.35	1.68	0.12	40	60	17	降伏	59	—	—	(77)	(64)	87	39
11		e	150	2.44	2.24	0.17	35	105	30	"	70	—	97	(170)	(157)	94	40
12		f	90	1.35	1.54	0.17	145	148	41	"	135	139	—	148	—	82	52
13	RC	b	150	2.35			40	65	18	降伏せず	77	80	—	64	51	51	39
14		c	210	3.35			40	102	28	降伏	"	"	111	(122)	(108)	85	"
15		d	300	4.85			40	40	11	降伏せず	54	56	—	—	44	37	32
16		e	300	4.85			33	33	9.2	一部降伏	37	39	—	—	39	26	25

注) () 内の値は、各計算式による値にせん断補強鋼材による耐力増加分 (ACI 318-83標準の式) をプラスした値である。

表-2 鋼材の特性

鋼材	試験体 No.	鋼板厚さまたは鉄筋径 (mm)	鋼板幅 (mm)	降伏強度 (kg/cm ²)	引張強度 (kg/cm ²)
上下鋼板	6	1.2	600	2500	3470
	7	2.3	600	2620	3430
	1~5, 8, 10, 11	4.5	600	2430	3470
	9	6.0	600	2850	4190
頭付き長スタッド (ネジ棒)	3, 10	φ 6	—	2400 以上	4000
フラットバー	6	2.3	25	2620	3430
	7	3.2	25	3060	4390
	1~5, 8, 10, 11	4.5	25	2430	3470
	9	6.0	25	2850	4190
ウェブ鋼板	4, 11	4.5	—	2430	3470
フランジ	4, 11	3.2	100	3060	4390
鉄筋	12~16	φ 16	—	3660	5570
スターラップ	14	φ 6	—	4510	5750

ンクリートとの付着が切れ、荷重は急激に低下した。この破壊に至るまでの現象はRC部材とほぼ同様であり、 $a/d = 3.3$ 、 4.8 のRC部材 (No. 15, 16) では斜めひびわれの発生と同時に鉄筋に沿ったひびわれが入り、試験体は急激に破壊した。

サンドイッチ部材ではRC部材と比較してひびわれの本数が少なく、ひびわれが集中する傾向にあった。また、斜めひびわれ発生位置は、RC部材では図-2に示したBowerらの式³⁾から算定された発生位置と比較的良く一致したのに対して、サンドイッチ部材では計算によって得られた発生位置と異なり、部材軸直角方向に30cmピッチで配置したフラットバーの位置に発生した。

図-3は、荷重PをRC曲げ計算値 P_{cal2} (圧縮側鋼板考慮) で、たわみ δ をスパン ℓ で除して無次元化した P/P_{cal2} と δ/ℓ との関係を鋼材比 $\rho = 1.68\%$ の場合について示したもので、 a/d が大きくなるに従って最大荷重到達後の荷重低下が大きくなることが確認された。この傾向はRC部材においても認められた。

図-4はせん断強度 $\tau_{\max}$ と a/d の関係をRC部材と比較したもので、 a/d が増加するとせん断強度は急激に低下し、 $a/d \geq 3.3$ ではほぼ一定となる傾向が、両部材で良く一致した。

以上のように、サンドイッチ部材の変形特性及び終局耐力は $1.3 \leq a/d \leq 4.8$ の範囲においてはRC部材とほぼ同じであり、終局耐力については両者を同等に扱ってもよいことがわかった。

なお、材料特性から部材の $P-\delta$ 及び $P-\varepsilon$ (一例を図-5に示す) 等の挙動を推定する手法としてのFEM弾塑性解析の妥当性を検証するために、図-6に示した材料特性を用いたFEM弾塑性解析を行った。その結果の代表例は図-3及び図-7に示したと

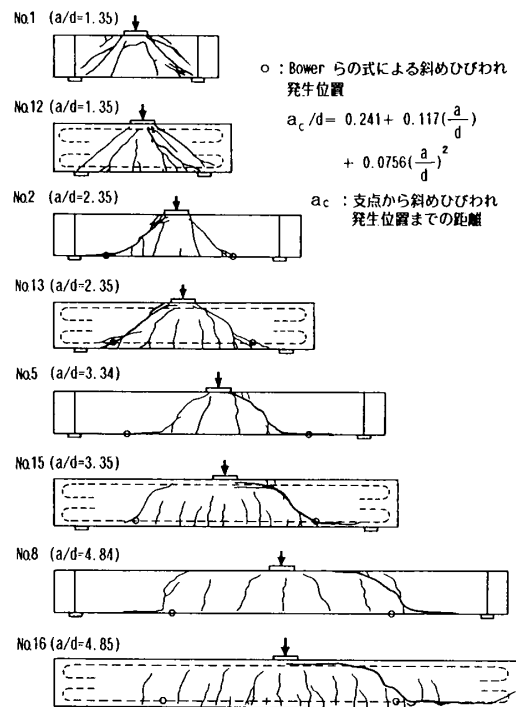


図-2 最終ひびわれ状況

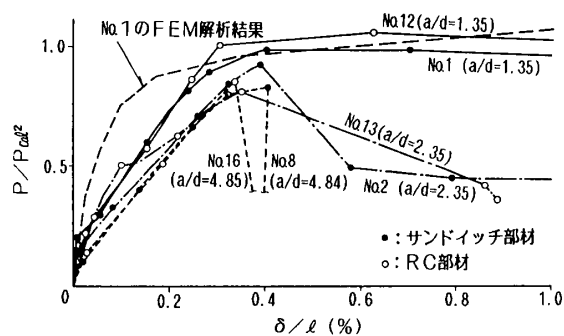


図-3 荷重-たわみ曲線 (1)

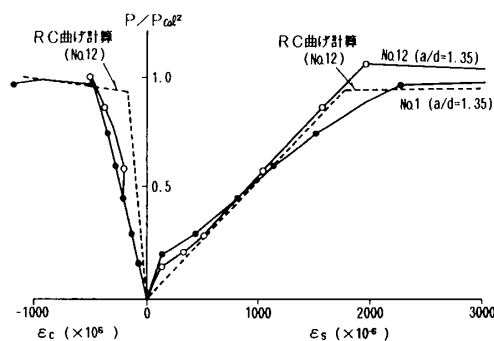


図-5 荷重-ひずみ曲線

おりであり、FEM解析を用いてサンドイッチ部材の変形及びひずみ特性を推定できることが示された。

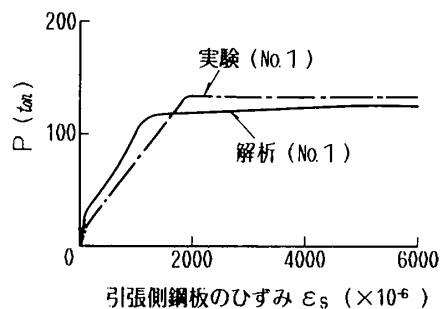


図-7 解析値と実験値の比較

3.2 鋼材比pの影響

$a/d = 4.8$ のサンドイッチ部材 (No. 6, 7, 8, 9) を用いて、 p の影響を検討した。

図-8に示したように、 $p = 0.5$ 、 0.9 の試験体 (No. 6, 7) では、鋼材降伏後、変形の増加に伴い荷重も徐々に増加し、じん性に富んだ変形特性を示した。これに対して、 $p = 1.7$ 、 2.2% (No. 8, 9) では斜めひびわれ発生と同時に荷重は急激に低下し、鋼材比を増すことによって斜めひびわれ発生荷重を高めることはできなかった。

図-9は、この傾向を明確にするために τ_{max} と鋼材指数 $p f_{sy} / f'_c$ の関係を示したものであるが、 τ_{max} は鋼材指数の増加に伴って増大し、 $p f_{sy} / f'_c \geq 0.12$ はほぼ一定となることがわかった。

3.3 セン断補強方法による影響

$a/d = 2.3$ 、 $p = 1.68\%$ のサンドイッチ部材 (No.

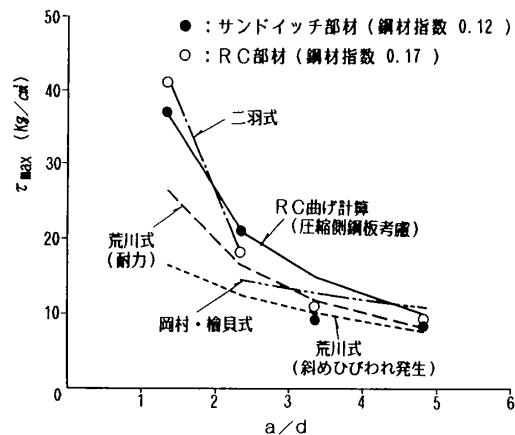
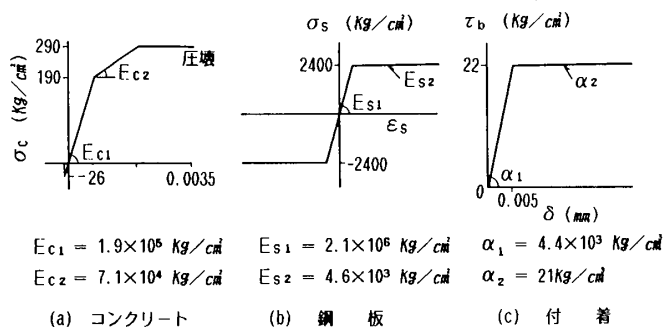
図-4 $\tau_{max} - a/d$ の関係

図-6 解析に用いた材料特性

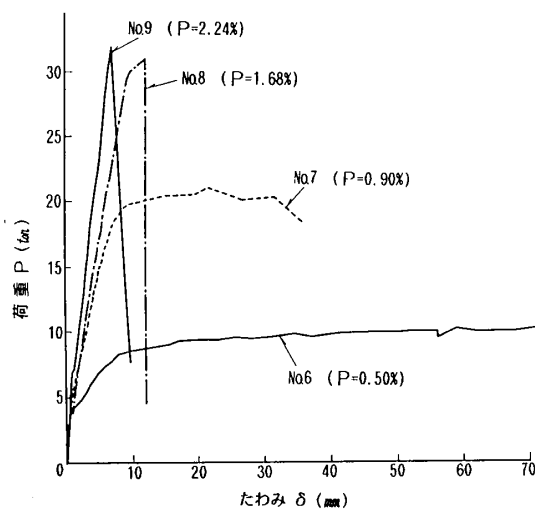
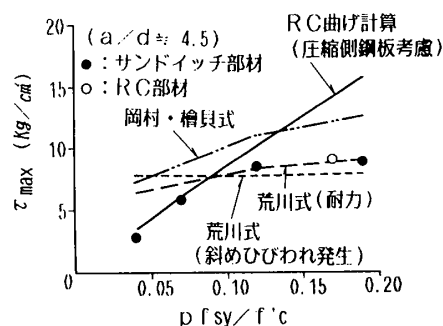


図-8 荷重-たわみ曲線 (2)

図-9 $\tau_{max} - p f_{sy} / f'_c$

2, 3, 4)及びオープンサンドイッチ部材(No. 10, 11)において、頭付き長スタッドとT型ウェブ鋼板が終局耐力に及ぼす影響を調べた。

その結果は表-1に示したとおりで、T型ウェブ鋼板による曲げ補強効果とせん断補強効果が認められた。これに対して、今回頭付き長スタッドを用いて補強した試験体(No. 3, 10)では、その鋼材量が少ないことが影響し、終局耐力に及ぼす効果を確認できなかった。

4. 実験値と計算値の比較

サンドイッチ部材とRC部材の破壊状況が近似し、かつ、鋼板の実測ひずみが鉄筋の実測ひずみとほぼ同等であったため、サンドイッチ部材の終局耐力の算定に際して、以下に示すRC部材の曲げ耐力及びせん断耐力の算定式を準用した。

せん断補強鋼材がない場合には、曲げに対しては、圧縮側の鋼材を無視した計算(Pcal1)と考慮した計算(Pcal2)、さらに鋼材がひずみ硬化領域まで達した試験体については引張側鋼材のひずみ硬化を考慮した計算(Pcal3)を行った。せん断に対しては、二羽式⁴⁾(Pcal4)、岡村・檜貝式⁵⁾(Pcal5)及び荒川式⁶⁾(Pcal6, Pcal7)を用いた。また、せん断補強鋼材がある場合は、補強鋼材が負担するせん断力 V_s の算定式としてACI規準の式を用いた²⁾。

表-1にはこれらによる計算結果を示し、また、図-4及び図-9ではサンドイッチ部材についてRC算定式を準用した結果を併記した。定性的には、 a/d 及び $p f_{sy}/f'_c$ の影響をどのせん断耐力式も比較的良く表現していた。定量的には、図-4に示したように、実験値は引張側鋼材が降伏した後に破壊した $a/d \leq 2.3$ の範囲ではRC曲げ計算値(圧縮側鋼材考慮)と、斜めひびわれ発生と同時に破壊した $a/d \geq 3.3$ の範囲では荒川式による値と比較的良く一致した。また、図-9に示したように、曲げ圧縮破壊した $p f_{sy}/f'_c \leq 0.07$ ではRC曲げ計算値(圧縮側鋼材考慮)が、斜めひびわれ発生と同時に破壊した $p f_{sy}/f'_c \geq 0.12$ では荒川式による値が、実験値に最も近い値を示した。

石川らの研究⁷⁾によれば、荒川式は単純ばりに対しては実験値よりも小さめの値を与え、岡村・檜貝式は $a/d \geq 3$ では実験値と比較的良く一致するようである。今回、複鉄筋のRC部材及び上下に鋼板を有するサンドイッチ部材の実験値とこれらの式による計算値を比較したが、 $a/d \geq 3.3$ の範囲で荒川式による値は実験値と比較的良く一致した。このような結果を与えた理由として、 $a/d \geq 3$ では圧縮鉄筋の影響によって終局耐力が低下することが沢村らによって報告されており⁸⁾、サンドイッチ部材においても圧縮側鋼材が終局耐力に及ぼす影響等を検討する必要がある。

5. まとめ

今回実施した実験の範囲では、サンドイッチ部材の終局耐力は、鋼板降伏後に破壊した場合にはRC部材における曲げ耐力算定式を、斜めひびわれ発生と同時に破壊した場合には荒川によるせん断耐力算定式を準用して比較的精度良く推定できることが示された。

<参考文献>

- 1) 栖原, 他, “鋼材とコンクリートから構成されるサンドイッチ式複合構造物に関する研究(第1報)”, 日本造船学会論文集, Vol. 14, 1977.6
- 2) 秋山, 他, “鋼/コンクリートサンドイッチ構造部材強度に関する実験的研究”, 鹿島建設技術研究所年報, Vol. 34, 1986.6
- 3) BOWER, J.E. and VIEST, I.M., “Shear Strength of Reinforced Concrete Beams Without Web Reinforcement” ACI Journal, Vol. 57, 1960.7
- 4) 二羽, “FEM解析に基づくディープビームのせん断耐荷力の算定式”, 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, 1983.10
- 5) OKAMURA, H. and HIGAI, T., “Proposed design equation for shear strength of reinforced concrete beams without web reinforcement”, Proc. of JSCE, No. 300, Aug. 1980
- 6) 荒川, “鉄筋コンクリートばりの許容せん断応力度とせん断補強について”, コンクリートジャーナル, Vol. 8, No. 7, 1970.7
- 7) 石川, 他, “スターラップを有するRCばりのせん断耐荷力のマクロ的推定方法”, 第6回JCI年次講演会論文集, 1984
- 8) 沢村, 他, “鉄筋コンクリート単純梁のせん断ひびわれ性状”, 第6回JCI年次講演会論文集, 1984