

V-38

せん断補強鋼材を有する鋼コンクリートサンドイッチ構造はりのせん断耐力

北海道大学大学院 学生員 浅沼 芳雄

北海道大学工学部 正 員 古内 仁

北海道大学工学部 正 員 上田 多門

北海道大学工学部 正 員 角田典史雄

1. はじめに

鋼コンクリートサンドイッチ構造とは、コンクリートが外殻鋼板によってサンドイッチ状に挟み込まれた合成構造の一種である。この構造は通常の鉄筋コンクリートに比べて高靱性、高強度を有し、水密性、施工性といった点で優れており、それゆえ各種構造物に適用される可能性が大きくなりつつある。そのような背景を基にして、最近、サンドイッチ構造に対しての設計指針が土木学会によって提案された¹⁾。(以後、その耐力設計式をJSCE式と呼ぶことにする。)しかしながら、そのJSCE式によって評価されるせん断耐力は実験データが基本的に不足しているといったこともあり、必ずしも精度よく推定されているとはいえない現状にある。そこで、本研究では過去において実験データがほとんどない、部材軸方向にせん断補強鋼材を有するサンドイッチ構造はりをとりあげ、その供試体のせん断耐荷試験を行い、併せて有限要素解析を行うことによって、せん断耐荷機構ならびにせん断耐力について、検討するものである。

2. 実験概要

本研究において実験を行った供試体の形状の一例を図1に示す。図1に示されるように、部材断面の中央には部材軸方向に連続的にせん断補強鋼板(フルウェブ)が配置されている。本研究ではそのフルウェブの厚さのみを3mm、4.5mm、6mmと変化した供試体を3体作成し、せん断耐荷試験を行った。すなわち、せん断補強鋼材比の増加によって、せん断耐荷機構ならびにせん断耐力にいかなる影響を及ぼすのかを調べたものである。また、せん断耐荷機構ならびにせん断耐力の比較のため、せん断補強鋼板を有しない供試体とせん断補強鋼板が部材軸方向に不連続に配置されている供試体(タイププレートタイプの供試体)のせん断耐荷試験も行った。そのタイププレートは厚さが6mmで、幅が100mmであり、せん断スパン内において、150mmの間隔で配置され、せん断補強鋼材比はNo.2と等しい。どの供試体においても、曲げ破壊が生じないように引張補強鋼板の厚さは19mm、降伏点は585MPaである鋼板を用いた。鋼板とコンクリート間においては合成作用を生じさせるため、シアコネクタを下側鋼板と上側鋼板に配置した。これらの供試体のせん断補強鋼材比、降伏点、コンクリート強度、及び、終局せん断耐力は表1に示す通りである。表1において、供試体No.1がせん断補強鋼板を有しない供試体であり、供試体No.2、No.3およびNo.4がフルウェブタイプの供試体、供試体No.5がタイププレートタイプのせん断補強鋼板を有する供試体である。すべての供試体において、せん断スパン有効高さ比(a/d)は2.0、引張補強鋼材比は6.54%と等しく、コンクリートの目標圧縮強度は24.5MPaとした。測定した項目は最大荷重、せん断補強鋼板、上下フランジ鋼板および、コンクリート表面のひずみ、支間中央点の変位等である。また、ひびわれも目視で観察した。

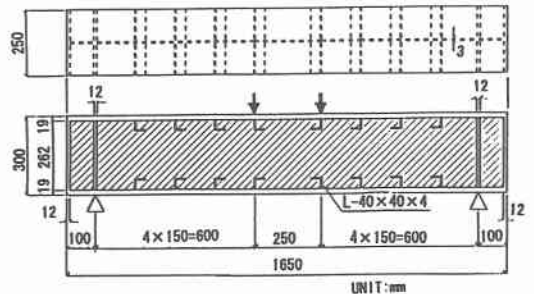


図1 実験供試体(No.2)

Shear Strength of Steel-Concrete Sandwich Beams with Shear Reinforcement

by Yoshio ASANUMA, Hitoshi FURUUCHI, Tamon UEDA and Yoshio KAKUTA

3. 解析概要

本研究で用いられている解析プログラムは WCOMR²⁾ である。本解析プログラムは3つの要素から成り立っている。一つは鉄筋コンクリート部に用いられる要素であり、ひびわれを平均的に捉える分散ひびわれモデルが採用されている。2番めの要素は上側鋼板、下側鋼板、せん断補強鋼板、ダイヤフラム等の鋼材部分に用いられる2次元の弾塑性要素である。3番めの要素は鋼板とコンクリート間において、境界面の挙動を考慮するための接合要素である。解析に用いた要素分割を図2に示す。図2に示すように、載荷は供試体に直接、強制変位を与えることによって、行った。また、図2中の太線部分は接合要素の存在する部分を示している。

4. 実験結果および解析結果

4. 1 実験結果

実験供試体5体すべてにおいて、せん断破壊が観察された。その破壊モードは破壊状況から判断して、シアコネクタから発生した斜めひびわれ間のコンクリートの斜め圧縮斜材の破壊であると推察することができる。破壊後のひびわれの一例として供試体No. 2のひびわれ図を図3に示す。ひびわれ性状は各供試体によって、顕著な差は認められず、その角度は25度～30度前後であった。図3に示すように、各供試体とも載荷点あるいは支点付近において、コンクリートの圧縮破壊が観察された。フルウェブタイプの供試体No. 2、No. 3、No. 4におけるウェブ鋼板は最大荷重に達する以前から降伏が始まり、最大荷重時には破壊したスパン全域にわたって降伏が認められた。タイププレートタイプの供試体No. 5においては最大荷重時において、タイププレートの降伏は起こっていない。フルウェブ鋼板の主ひずみ角度は概ね50度前後であった。すべての供試体において、最大荷重時には引張補強鋼板の降伏は起こらなかった。

続いてせん断耐力の比較であるが、フルウェブタイプの供試体No. 2、No. 3、No. 4においてはせん断補強鋼材比が増加するほど、せん断耐力の増加が認められる。また、せん断補強鋼材比が等しい供試体No. 2 (フルウェブタイプ) とNo. 5 (タイププレートタイプ) においてはフルウェブタイプのほうが大きなせん断耐力を示した。

4. 2 解析結果

本研究では実験したすべての供試体について解析を行った。

表 1 実験供試体諸元および実験結果

供試体	P_w %	f_{wy} MPa	P_s %	f_s MPa	f'_c MPa	せん断耐力	
						実験 kN	FEM kN
No. 1 ¹⁾	0	—	—	585	24.4	291	248
No. 2 ²⁾	1.2	319	6.54	585	26.0	603	576
No. 3 ²⁾	1.8	324	6.54	585	24.7	722	670
No. 4 ²⁾	2.4	342	6.54	585	24.4	796	768
No. 5 ³⁾	1.2	342	6.54	585	22.3	554	483

1) せん断補強鋼板なし

2) フルウェブタイプのせん断補強鋼板を有する供試体

3) タイプレートタイプのせん断補強鋼板を有する供試体

P_w : せん断補強鋼材比

f_{wy} : せん断補強鋼材の降伏点

P_s : 引張補強鋼材比

f_s : 引張補強鋼材の降伏点

f'_c : コンクリートの圧縮強度

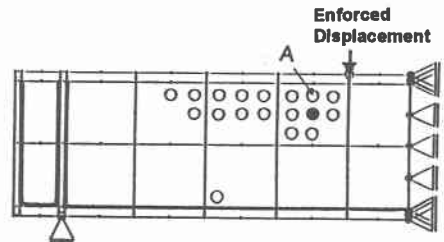


図 2 要素分割図および軟化しているガウジポイント

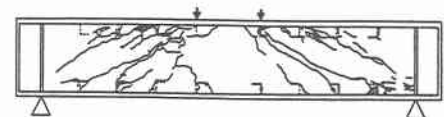


図 3 ひびわれ図 (供試体No. 2)

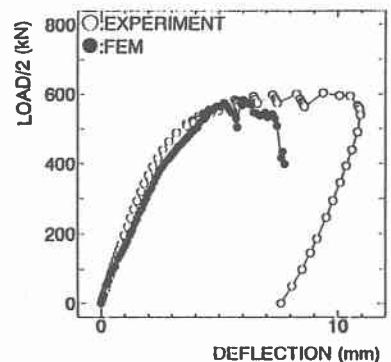


図 4 荷重—変位曲線 (供試体No. 2)

解析結果によれば、すべての供試体において、せん断スパン内におけるコンクリート要素のガウスポイントにおいて圧縮軟化していることが認められた。これは実験において、斜めひびわれ間のコンクリートが圧縮破壊して終局に至る破壊モードと一致していることを示している。その圧縮軟化を示していたガウスポイントの位置（供試体No.2）の例は図2中において、○点および●点で示されている。図2に示されるように、各供試体とも軟化を示していた部位は載荷点付近あるいは支点付近であった。また、解析および実験によって得られた支間中央点における変位の比較（No.2）を図4に示す。図4に示すように、本解析結果は実験供試体の変形性状をよく捉えているといえる。次に、せん断補強鋼板の荷重—主引張ひずみ関係（供試体No.2）を図5に示す。（その位置は図2において●点で示されている。）図5に示されるように、本解析値は作用せん断力が450 kN付近までは、実験値を概ね捉えている。また、せん断耐力については本解析結果は実験値よりもやや低い値を示しているが、概ねその傾向を捉えている。

4.2 解析供試体

4.1で示されたように、本有限要素解析は実験供試体の変形性状、せん断補強鋼板のひずみならびにせん断耐力を概ね評価しているものであった。そこで本研究ではフルウェブタイプのせん断補強鋼材を有するサンドイッチ構造はりのせん断耐荷機構ならびにせん断耐力の推定方法をより明らかにするために、表2に示すような解析供試体を設定した。これは実験においてはコンクリートの圧縮強度のばらつきや実験的な誤差がどうしても生じるため、せん断補強鋼板の降伏点、鋼材比の差異による影響を解析的に検討するためである。フルウェブタイプのサンドイッチ構造はりのせん断耐力に及ぼす諸要因としてはRCはりと同様に、せん断スパン比(a/d)、コンクリートの圧縮強度(f'_c)、せん断補強鋼材比(P_w)、せん断補強鋼材の降伏点(f_{wy})、引張補強鋼材比(P_s)等、様々なパラメータが考えられるが、本研究ではこれらの中で、実験でもその影響を調べたせん断補強鋼材比(P_w)とせん断補強鋼材の降伏点(f_{wy})に着目した。これは過去の研究報告において、せん断補強鋼板の降伏前にせん断破壊している例がみられないことから、せん断耐力に最も大きな影響を及ぼしていると考えられたからである。そこで、フルウェブタイプの実験供試体3体を基にして合計6体の供試体を解析した。それらの供試体はせん断補強鋼材の降伏点とせん断補強鋼材比のみが異なるものであり、表2に示される通りである。

表2中の供試体を解析した結果、実験供試体の解析と同様に、せん断スパン内において、コンクリートの軟化が認められた。この軟化を解析における破壊と判断すると、その軟化がいつ起こるかを予測することが重要で

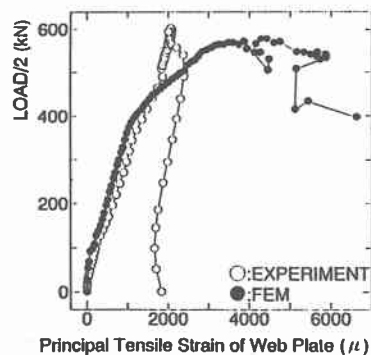


図5 ウェブ鋼板の荷重—主引張ひずみ関係（供試体No.2 図2中●点）

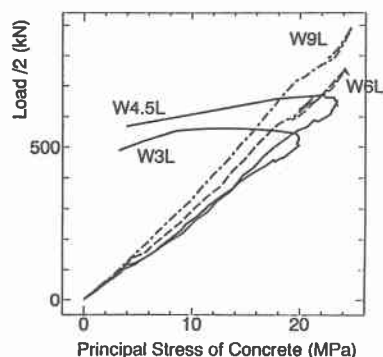


図6 荷重—コンクリートの主圧縮応力関係 (P_w の違いによる) (図2中A点)

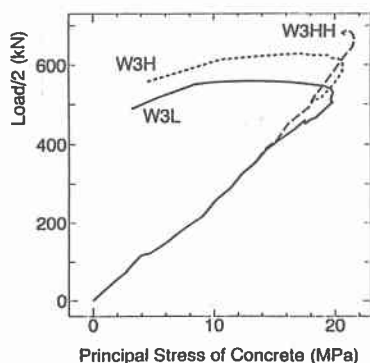


図7 荷重—コンクリートの主圧縮応力関係 (f_{wy} の違いによる) (図2中A点)

あると考えられる。図6は解析供試体の中でせん断補強鋼材比のみが異なる供試体(W3L、W45L、W6L、W9H)において、荷重-コンクリートの主圧縮応力関係を示すものである。(その位置は図2においてA点で示されている。)図6より、せん断補強鋼材比が減少するほど、同じ作用せん断力に対する主圧縮応力の値が大きい。これはせん断補強鋼材比が小さいほど、低い作用せん断力で圧縮破壊に至ることを意味している。また、せん断補強鋼材比が増加するほど、コンクリートの主圧縮応力の最大値が増加していることがわかる。これはせん断補強鋼材比の増加によって、コンクリートに拘束効果が生じているからだと考えられる。次にせん断補強鋼材の降伏点の異なる供試体(W3L、W3H、W3HH)における荷重-コンクリートの主圧縮応力関係を図7に示す。(その位置は図2においてA点で示されている。)図6と同様にせん断補強鋼材の降伏点が増加するほど、そのコンクリートの主圧縮応力の最大値は大きくなっている。したがって、せん断補強鋼材の降伏点が増加するほどコンクリートに対する拘束効果が大きいといえる。また、降伏点の増加と鋼材のせん断力負担分の増加は比例せず、コンクリートの貢献分が増加することにより、耐力が増加する傾向にあった。しかし、その拘束効果の限界値が存在するはずであり、解析結果によれば、コンクリートの圧縮強度付近までその拘束効果が存在するものと考えられる。

表2 せん断耐力の比較

供試体	P _r %	f _{sy} MPa	f' _c MPa	せん断耐力(kN)			
				Exp	FEM	* JSCE式	
						①	②
No. 1	0	-	24.4	291	248	129	-
No. 2	1.2	319	26.0	603	576	464	453
No. 3	1.8	324	24.7	722	670	452	675
No. 4	2.4	342	24.4	796	768	450	895
No. 5	1.2	342	22.3	554	483	429	795
W3L	1.2	319	24.5	-	560	450	418
W4.5L	1.8	319	24.5	-	670	450	628
W6L	2.4	319	24.5	-	753	450	837
W9L	3.6	319	24.5	-	887	450	1255
W3H	1.2	441	24.5	-	627	450	579
W3HH	1.2	584	24.5	-	688	450	767

①せん断補強鋼材の降伏前のトラス機構の破壊

②せん断補強鋼材の降伏後のトラス機構の破壊

* せん断耐力は①と②で決定される耐力のうち小さい方とする。

5. せん断耐力の評価

本研究において実験された供試体および解析供試体すべてのせん断耐力の比較を表2に示す。表2中にはJSCE式^{1), 3)}によって、計算されたせん断耐力も記されている。表2に示されるように、JSCE式によって、評価されるせん断耐力はどの供試体においても安全側には評価しているが、精度よく推定しているとはいえない。特に、フルウェブタイプの供試体において、せん断補強鋼材の降伏点および、鋼材比が大きくなるほどJSCE式によるせん断耐力と実験値との差が大きくなる。これはJSCE式では安全側に耐力を推定するために、せん断補強鋼材自身のせん断力負担分を考慮していないことによるものである。しかしながら、実際にはせん断耐力はせん断補強鋼材比の降伏点および、鋼材比の増加に伴い、増加しており、せん断補強鋼材自身のせん断力負担分とコンクリート部分のせん断力負担分を加えるせん断耐力の推定方法が必要である。

6. まとめ

- 1) 本研究において実験された供試体5体はすべてせん断破壊を生じ、その破壊形態はシアコネクタから発生した斜めひびわれ間のコンクリートの圧縮斜材の破壊であった。
- 2) 本研究において用いられた有限要素解析は実験供試体の変形性状、せん断補強鋼材のひずみ、ならびに破壊形態を精度よく推定しているが、せん断耐力についてはやや低く評価している。
- 3) フルウェブタイプのサンドイッチはりにおいて、せん断補強鋼材の降伏点ならびに鋼材比が増加すれば、せん断耐力も増加する。これは有限要素解析によれば、せん断補強鋼材自体のせん断力負担分が増加する他に、コンクリートを拘束することによるコンクリート自体のせん断力負担分を増加させていることによるものである。

謝辞 本研究の実験を行うにあたり、ニッテツ室蘭エソジニアリクの上野満氏、小松靖氏、新日本製鐵の葛拓造氏、木下雅敬氏、北海道大学の木村勉技官に多大な御助力をいただきました。この場をお借りして深甚なる感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：鋼コンクリートサント' イッチ構造設計指針(案)、コンクリートライブラリー、第73号、1992年7月。
- 2) ナレス パ' 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。
- 3) 上田多門、塩屋俊幸：鋼コンクリート系サント' イッチ構造、コンクリート工学、vol. 30, pp. 6-20, 1992年5月。