

論文 フランジ鉄板及びウェブ薄鉄板により拘束されたコンクリートで構成する複合梁に関する実験的研究

森田邦生*¹・松崎育弘*²・藤原一成*³・細川洋治*⁴

要旨: 本論文は、RC梁の鉄筋を鋼板に置き換えた複合梁について、RC梁と同様のせん断力伝達機構が形成される様に諸要因を与え、その諸要因が複合梁のせん断力伝達機構に与える影響に関し実験的な把握を行ったものである。その結果、設定した諸要因はせん断耐力に寄与することが明らかとなり、この複合梁のせん断耐力評価はRC梁部材の考え方をを用いることにより評価することが可能であるという結果を得た。

キーワード: S C 梁、せん断耐力、トラス機構、アーチ機構、コンクリート圧縮強度有効係数

1. はじめに

近年、施工の合理化や既存の異種材料を組み合わせる従来とは得られない構造性能を得ようとする目的から、複合構造の研究開発が盛んに行われている。本研究ではRC鉄筋に代わりほぼ同量の鋼板を用い、RCの考え方で製作した鋼板とコンクリートによる複合梁(以下、S C 梁)の提案を行い、せん断性状の把握を実験的に行った。

本研究で提案を行ったS C 梁はRC梁主筋にあたる部分にフランジ鋼板を、せん断補強筋にあたる部分にウェブ薄鋼板を用い、溶接により製作した箱形閉断面の鋼板を有する構造となっており、フランジ上面に設けたコンクリート打設孔よりコンクリートを打設し、鋼部、内部コンクリート、外部コンクリートとを一体化させる構造となることを意図している。S C 梁のせん断耐力は、終局強度型耐震設計指針(以下、指針) [2] 等に示されているトラス機構とアーチ機構を想定し評価することが有用と考えられる。本研究におけるS C 梁では、そのせん断力伝達機構をRC梁と同様の機構とすることを意図し、フランジに内部コンクリートとの付着要因を設け、フランジを弦材、コンクリートによる斜め圧縮材とウェブによる鉛直引張材を腹材とするトラス機構と、コンクリートのみにより伝達されるアーチ機構とで構成させるものとした(図-1参照)。そこでS C 梁のせん断力伝達機構に関与すると思われる諸要因を変動要因として抽出し、S C 梁のせん断力伝達機構の把握を実験的に行い、せん断耐力評価法を構築するための基礎資料を得ることを目的とした。

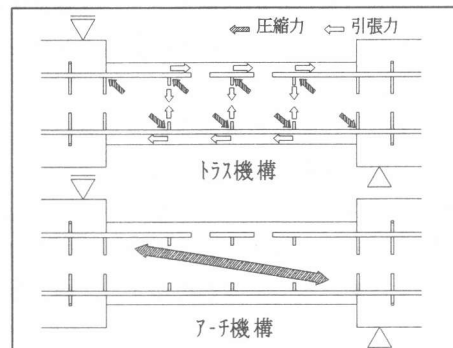


図-1 S C 梁せん断力伝達機構

- | | | |
|--------------|---------------|-------|
| *1 東京理科大学大学院 | 工学研究科建築学専攻、工修 | (正会員) |
| *2 東京理科大学教授 | 工学部建築学科、工博 | (正会員) |
| *3 東京理科大学大学院 | 工学研究科建築学専攻 | |
| *4 前田建設工業(株) | プロジェクト推進部、工博 | (正会員) |

表-1 試験体一覧

N	試験体名	変動要因			せん断補強筋比 (%)	全せん断補強量 (kg/crrt)	コンクリート強度 (kg/crrt)	
		外部コンクリート	付着リブ間隔 (mm)	ウェブ厚 (mm)				縦リブウェブ厚に換算 (mm)
1	SC-1. 2a-1-C	有	270	---	---	1.14	20.3	274
2	SC-1. 2a-3-C		---	90				271
3	SC-1. 2a-1-N		270	---				269
4	SC-1. 2a-2-N	無	135	---	0.4	1.50	26.7	269
5	SC-1. 2a-3-N		---	90				279
6	SC-1. 2b-1-N		270	---				282
7	SC-1. 2b-2-N		135	---				282
8	SC-1. 2c-1-N		270	---	282			
9	SC-1. 2a-4-N		---	---	1.50	26.7	274	
10	SC-0. 8a-1-N		270	---	---	---	269	
11	SC-0. 8a-3-N		---	90	0.8	1.00	25.2	269
12	SC-0. 8e-1-N	270	---	0.8	2.00	41.4	287	
13	SC-1. 6a-1-N	270	---	---	---	---	279	
14	SC-1. 6a-3-N	---	90	1.6	2.00	34.0	279	
15	SC-2. 3a-1-N	270	---	2.3	2.88	56.2	280	

■共通要因■
 ・外部コンクリート断面: $b \times D_c = 21 \times 36$ (cm) ・フランジ断面: 1.9×16 (cm)
 ・鉄骨断面: $b_s \times D_s = 16 \times 27$ (cm) ・ウェブ鉄板せい: $2.3. 2$ (cm)
 ・せん断スパン: $a = 54$ (cm)

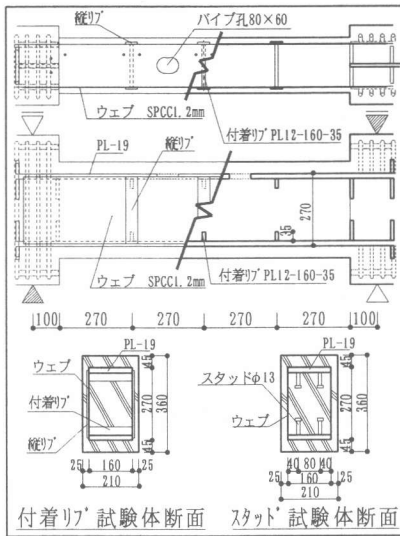


図-2 試験体形状

2. 実験概要

2. 1. 試験体

図-2 に試験体形状、図-3 に試験体形状一覧、表-1 に試験体一覧、表-2 に使用材料の力学的特性を示す。試験体はフランジ厚を19mmとし全てせん断破壊型を想定し、総数15体を計画した。梁断面は $b \times D = 21 \text{cm} \times 36 \text{cm}$ (外部コンクリート有り)、 $b \times D = 16 \text{cm} \times 27 \text{cm}$ (外部コンクリート無し) の2種類とし、共通要因はせん断スパン54cm、コンクリート設計基準強度 $F_c = 240$ (kgf/cm²)とした。

SC梁のせん断抵抗機構を把握するために設定した変動要因は次の3要因とした。

①外部コンクリート(有り,無し): 外部コンクリートの

剛性、耐力への寄与分を把握し、内部コンクリート及び鋼部への影響を把握する。尚、外部コンクリートの剥落防止のため外部コンクリート内にメッシュ筋を設けた。

②付着要因(付着無し,付着リブ@270mm,付着リブ@135mm,スタッド@90mm): コンクリート斜め圧縮力を伝達させる要因であり、付着リブタイプは圧縮力を集中して、スタッドタイプは圧縮力を平均的に受圧するとし、伝達されるコンクリート圧縮束の角度及び圧縮力の受厚面積を変化させた。

③せん断補強方法(ウェブ厚さ0.8,1.2,1.6,2.3mm,縦リブの有無): ウェブはRC梁のせん断補強筋に相当するとし、厚さを変えることによりせん断補強筋比(P_w)を変化させた。縦リブは付着リブタイプにおいて、付着リブ位置に作用する集中力に対しウェブの縦方向補強材として設け、 P_w で換算した場合ウェブ厚1.6mmと同等の P_w となる様に設定した。

外部コンクリート	○	○				
縦リブ						○
スタッド		○		○		
付着リブ	○		○		○	
ウェブ厚	0.8			N010	N011	N012
	1.2	N01	N02	N03,4	N05	N06,7,8
	1.6			N013	N014	
	2.3			N015		

図-3 試験体形状一覧

2. 2. 実験方法

図-4に加力模式図、図-5に载荷履歴を示す。加力は逆対称モーメント形式の正負交番繰り返し载荷とし、変形制御により行う。

3. 実験結果及び検討

3. 1. 破壊性状

図-6に破壊状況の一例を示す。外部コンクリートを有するN01は曲げひび割れ、せん断ひび割れの順にひび割れが入り、サイクルを重ねる毎にメッシュ筋の効果によりRC梁的に細かいひび割れが多数発生した。最大耐力付近では上側フランジに沿った付着割裂ひびが顕在化し、左上端の圧壊が確認されたが大きな耐力低下は示さなかった。N01から外部コンクリートを取り除いたN03は、加力を行うに連れウェブ薄鋼板におよそ45度方向に鋼板の座屈による「しわ」が発生した。その後も耐力は上昇し続け、「しわ」は最大耐力付近で消滅し、最大耐力以降「しわ」の数が急増する現象が確認された。このことから、ウェブは最大耐力時に鉛直方向引張力が作用した為「しわ」が消滅したと思われる。この現象は付着の無いN09以外の外部コンクリートの無い試験体全てに観察された。N09は最終サイクルまで「しわ」が消滅しなかったことから、ウェブには内部コンクリート圧縮力、ウェブ鉛直方向引張力によるトラス機構は作用せず、ウェブのみのせん断抵抗と内部コンクリートで抵抗していたと思われる。

3. 2. 内部コンクリート破壊状況

図-6に内部コンクリート破壊状況を示す。付着リブタイプのN01は付着リブ間を結ぶひび割れが発生しており、想定していた通り付着リブ間で圧縮束が形成されていたと思われる。また、スタッドタイプのN02はスタッド付近からひび割れが分散して発生しており、フランジ材軸に沿って平均的に付着力が発揮されている様子が確認された。

表-2 使用材料の力学的特性

	使用部位	降伏点 (kgf/cm ²)	引張強さ (kgf/cm ²)	ヤング係数 ($\times 10^6$ kgf/cm ²)
PL0. 8		2520	3400	1.90
PL1. 2	ウェブ	1780	2950	1.96
PL1. 6	薄鉄板	1700	3010	2.05
PL2. 3		1950	2970	1.98
PL3. 2	縦リブ	1620	3030	1.75
PL19	フランジ	2980	4440	1.97

注) PL0. 8~3. 2はSPCC材、PL19はSS400材を使用

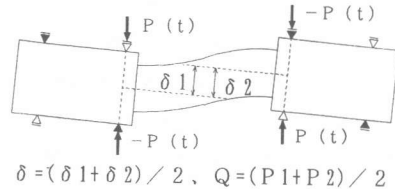


図-4 加力模式図

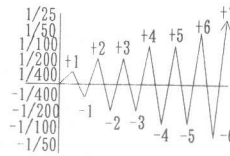


図-5 载荷履歴図

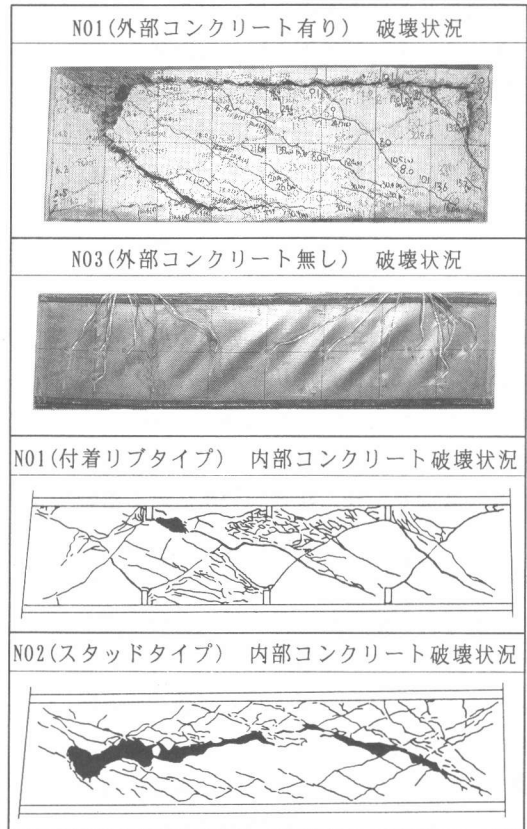


図-6 破壊状況

3. 3. 変形性状

図-7にN01のせん断力-相対変位(Q- δ)曲線、図-8～図-10に変動要因による包絡線比較を示す。

全試験体とも想定した通りせん断破壊の様相を示し、最大耐力以降も大きな耐力低下のない靱性の有る変形性状を示した。一例としてN01のQ- δ 曲線を示す。Q=約18(tf)でウェブが降伏した後も荷重は上昇し続け、-1/100(rad)付近で最大耐力(-33.9tf)を迎えた。+7サイクルでも最大耐力近くまで耐力が上昇し、最大耐力以降も急激な耐力低下の無い性状を示した。付着要因の無いN09は緩やかに耐力が上昇し、最終サイクルまで耐力低下の無い性状を示した。

以下、包絡線の比較により各変動要因がQ- δ 曲線に及ぼす影響を検討する。

3. 3. 1. 外部コンクリートの影響

図-8に外部コンクリートの有無を変動要因とした、N01, N03の比較を示す。外部コンクリートを有するN01は初期から最大耐力まで剛性がN03より高くなったが、最大耐力以降ほぼ同様の性状を示したことから、外部コンクリートは最大耐力に関与し、N01は最大耐力以降も鋼板及び内部コンクリートにより抵抗しているものと思われる。

3. 3. 2. 付着要因による影響

図-9に付着要因を変動要因とした、N03, N05, N09の比較を示す。付着の無いN09は最終サイクルまで耐力低下を示さず19.7(tf)まで耐力が上昇した。付着を有するN03, N05とN09の比較から、付着を設けることによりトラス機構が作用し耐力が上昇する様相がうかがえる。また、付着要因の異なるN03とN05がほぼ同様の性状を示したことから最大耐力は想定するトラス機構の形成の有無によるものと思われる。

3. 3. 3. せん断補強方法による影響

図-10にせん断補強方法の違いによる包絡線の比較を示す。図-10よりウェブ厚さの上昇に伴い耐力が上昇することが確認された。このことからSC梁のせん断耐力評価にウェブをRC部材のせん断補強筋と同様に扱った場合と同様な性状を示すことが明らかになった。縦リブ補強による比較(N0.6, N0.13)では、せん断補強量($P_w \cdot \sigma_y$)が若干異なるものの、ウェブの引張力が集中

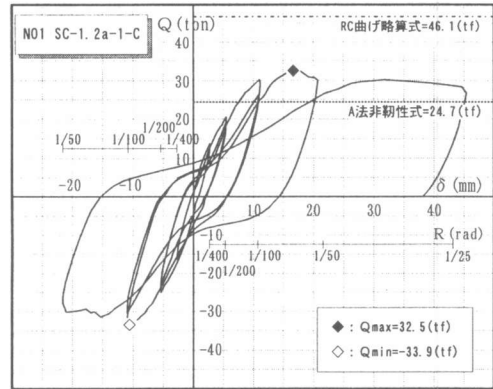


図-7 N01 Q- δ 曲線

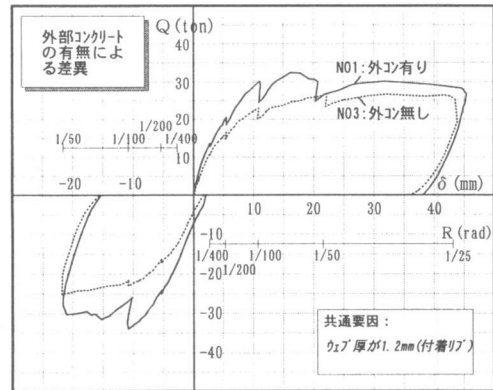


図-8 外部コンクリートの有無による比較

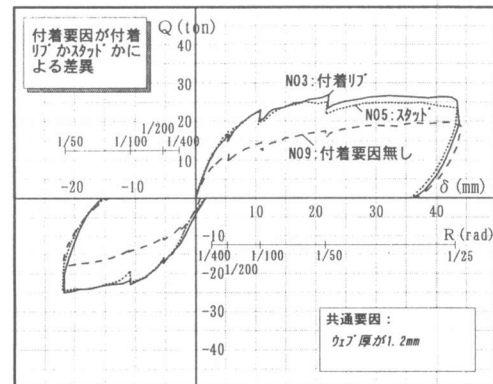


図-9 付着要因による比較

的に作用する箇所に縦リブを設けることにより同一せん断補強筋比においてより効果的なせん断補強効果が得られることが確認でき、耐力評価にあたっては縦リブの効果を配慮することが必要であると思われる。

3. 4. せん断耐力評価法に対する考察

図-11、図-12に最大耐力と計算値の比較、表-3に最大耐力と計算値一覧を示す。破壊性状及び変形性状より以下の知見が得られた。

- ①：外部コンクリートを設けた場合、鋼板、コンクリートは一体化して挙動する。
- ②：外部コンクリート破壊後も内部コンクリート及び鋼板により抵抗力を発揮する。
- ③：S C梁のせん断耐力は部材端に生じ、圧縮部で伝達されるアーチ耐力と付着要因を設けることにより発揮できるトラス耐力との累加で考えられる。
- ④：ウェブをR Cのせん断補強筋と同様に評価することが可能である。

これらより、S C梁はR C梁的なせん断力伝達機構が形成されているものとし、せん断耐力に関する考察を行う。そこで先ず、指針A法非靱性式を用いた計算値と実験値の比較を行う。ここで鋼板に拘束されているコンクリート圧縮強度の有効係数 ν の評価の検討を試みる。内部コンクリートは鋼板に拘束されている為 $\nu=1.0$ とすると、概ね比較値（実験値／計算値）は0.9～1.2の範囲となり良い対応を示している。この結果、トラス機構とアーチ機構によりS C梁のせん断伝達機構を評価する可能性を示した。

そこで、より実験結果に適合したせん断耐力評価法を確立するため以下の仮定を行い、S C梁せん断耐力評価法に関する提案を行う。

- ①：S C梁のせん断耐力(cQ_{su})をトラス耐力(Q_t)、内部コンクリートアーチ耐力(Q_{aI})、外部コンクリートアーチ耐力(Q_{a0})の累加により評価する。（図-13参照）
- ②：（トラス耐力： Q_t ）最大耐力時にウェブ及び縦リブは鉛直方向のみに抵抗力を発揮するとする。そこでトラス機構はフランジの引張力、ウェブ及び縦リブの鉛直方向引張力、付着要因間で生ずるコンクリート斜め圧縮力により形成される。その時のコンクリート圧縮角度 ϕ は内部コンクリートひび割れ状況よりスタッド、付着リブ(@270mm)タイプの場合 $\phi=43^\circ$ 、付着リブ(@135mm)タイプの場合 $\phi=32^\circ$ とする。
- ③：（内部コンクリートアーチ耐力： Q_{aI} ）N09は鋼板のせん断抵抗力と内部コンクリートのアーチ耐力のみ作用しているとし、N09の最大耐力から鋼板のせん断抵抗力を差し引くことにより内部コンクリートアーチ機構のコンクリート強度 σ_{aI} ($2.66c\sigma_B$)を算出し、 σ_{aI} は各試験体に作用する内部コンクリートアーチ機構に作用するとし各試験体の内部コンクリートアーチ耐力を算出する。
- ④：（外部コンクリートアーチ耐力： Q_{a0} ）外部コンクリートのみでも外部コンクリートアーチ機構を形成し、その時のコンクリート強度 σ_{a0} はコンクリート圧縮強度 $c\sigma_B$ とする。

表-3より実験値と計算値は良く対応していることがうかがえる。このことよりS C梁に働く各耐力を累加することによりせん断力の評価を行える方法を示すことができた。

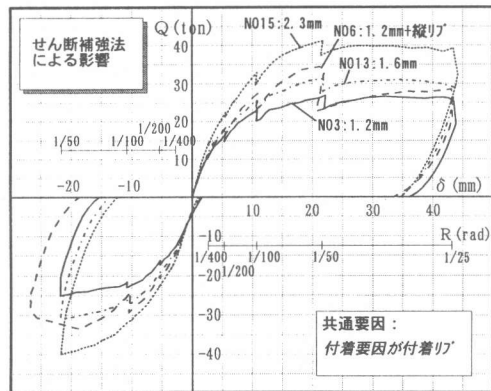


図-10 せん断補強方法による比較

表-3 最大耐力及び計算値一覧

NO	試験体名	A法非靱性 ($\nu=1.0$)			実験より算定した評価法					
		最大耐力 eQ_{max} (tf)	せん断耐力 計算値 cQ_{su1} (tf)	比較値 eQ_{max}/cQ_{su1}	トラス機構 耐力 Q_t (tf)	内部コンクリート アーチ耐力 Q_{a1} (tf)	外部コンクリート アーチ耐力 Q_{a0} (tf)	抵抗力 Q_w (tf)	せん断 計算値 cQ_{su2} (tf)	比較値 eQ_{max}/cQ_{su2}
1	SC-1.2a-1-C	33.9	32.0	1.06	11.53	14.37	4.00	----	29.90	1.13
2	SC-1.2a-3-C	32.5	31.8	1.02	15.38	14.21	3.96	----	33.55	0.97
3	SC-1.2a-1-N	26.8	25.1	1.07	11.53	14.10	----	----	25.64	1.05
4	SC-1.2a-2-N	27.6	25.1	1.10	17.30	14.10	----	----	31.40	0.88
5	SC-1.2a-3-N	25	25.3	0.99	11.53	14.63	----	----	26.16	0.96
6	SC-1.2b-1-N	34.4	30.8	1.12	16.20	14.78	----	----	30.98	1.11
7	SC-1.2b-2-N	37.2	30.8	1.21	23.21	14.78	----	----	37.99	0.98
8	SC-1.2c-1-N	34.7	30.8	1.13	16.20	14.78	----	----	30.98	1.12
9	SC-1.2a-4-N	19.7	25.2	0.78	0.00	14.37	----	5.36	19.73	1.00
10	SC-0.8a-1-N	26.5	24.0	1.10	10.89	14.10	----	----	24.99	1.06
11	SC-0.8a-3-N	24.4	24.0	1.02	10.89	14.10	----	----	24.99	0.98
12	SC-0.8b-1-N	37.1	35.4	1.05	20.22	15.05	----	----	35.26	1.05
13	SC-1.6a-1-N	31.1	30.2	1.03	14.69	14.63	----	----	29.32	1.06
14	SC-1.6a-3-N	31.2	30.2	1.03	14.69	14.63	----	----	29.32	1.06
15	SC-2.3a-1-N	41.2	45.0	0.92	24.22	14.68	----	----	38.90	1.06

● 付着リ' (@270mm) ★ スタット' ■ 縦リ' 有り
 ◆ 付着リ' (@135mm) ✱ 付着無し

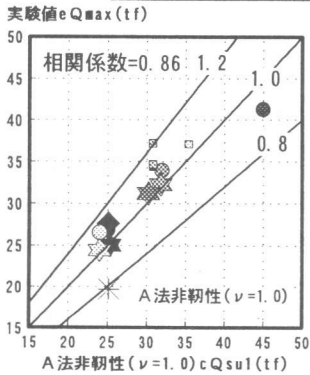


図-11 比較(A法非靱性 $\nu=1.0$)

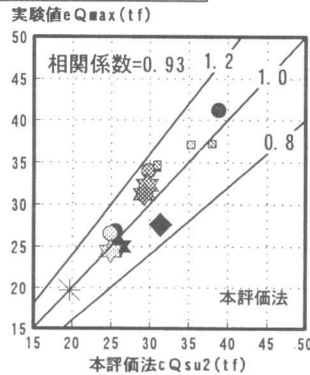


図-12 比較(本評価法)

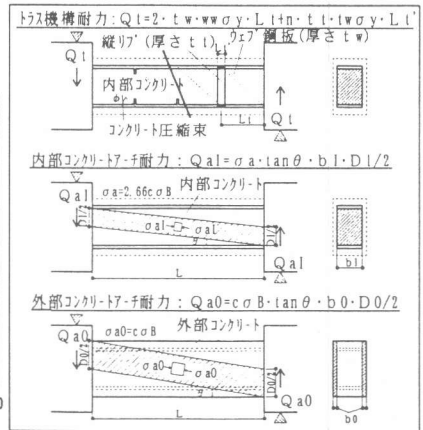


図-13 SC梁せん断抵抗機構

4. まとめ

従来のRC梁の鉄筋に代わり鋼板を用いるSC梁の提案を行い以下の知見を得た。

- (1) SC梁のせん断力伝達機構をRC梁のせん断抵抗機構に関与すると思われる要因(外部コンクリート、付着要素、ウェブ厚さ)を設定することにより意図した通りのせん断抵抗機構を構成できることを実験により確認した。
- (2) SC梁のせん断耐力は、RC梁のせん断力伝達機構と同様にトラス機構とアーチ機構の累加により評価でき、終局時のコンクリートの圧縮応力は鋼板による拘束効果が期待できる。

謝辞

本論文をまとめるに当たって、前田建設工業(株)の作田氏、一條氏、加藤氏、一柳氏、東京理科大学助手中野氏、卒研生の菅沼君、をはじめ松崎研究室の皆様には多大な御指導・御協力を頂きました。深く感謝致します。

参考文献

- [1] 松崎育弘ほか：鉄骨フランジに主筋を溶接した梁と鋼管を有する梁から成るRC柱梁接合部に関する実験的研究 コンクリート工学年次講演会論文集, Vol. 17, [2], pp1107-1112, 1995.
- [2] 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説, 1990