

論文 SRC造内柱梁接合部におけるせん断応力分担に関する非線形有限要素解析

穴吹 拓也^{*1}・後藤 康明^{*2}・城 攻^{*3}

要旨：鉄骨鉄筋コンクリート造十字形柱梁接合部を対象に、繰返し載荷時の履歴特性及び鋼板とコンクリートの付着挙動を考慮した3次元非線形有限要素解析を行った。鋼板とコンクリート間の付着特性及びコンクリート圧縮応力下降域に適切なモデルを用いることで、解析結果は最大耐力までは荷重-変形関係をよく再現できたが、実験よりも早い段階で耐力低下を生じてしまう問題があった。接合部コンクリートを梁や柱の内部鉄骨による拘束条件が異なる領域に区分しせん断力分担について検討したところ、それぞれの領域が負担するせん断力の割合はその領域の面積とは比例していないことがわかった。

キーワード：柱梁接合部, 正負繰返し載荷, 付着特性, 非線形有限要素解析

1. はじめに

日本で中層以上の建物に用いられてきた鉄骨鉄筋コンクリート構造（以下 SRC 造）や混合構造といった、鋼材とコンクリートを組み合わせた構造（合成構造）を対象とした有限要素解析例は極めて少ない。この原因のひとつに、コンクリートと鋼板の間の付着すべり挙動を表すモデルが現在開発段階にあることが挙げられる。

本研究は SRC 造内柱梁骨組に水平力が作用したときの、接合部を構成する部材のせん断力分担や応力伝達機構を、鋼とコンクリートの間の付着特性を考慮した3次元非線形有限要素解析により明らかにするものである。

2. 解析概要

2.1 解析対象試験体

解析対象は横山ら¹⁾が実験を行った SRC 造平面骨組柱梁接合部試験体で、梁降伏に対して接合部せん断破壊が先行するよう

設計されている。

試験体形状は図-1の階高 3500mm、スパン 6000mm の SRC 架構を 1/2 に縮小した十字形で、直交梁はない。接合部コンクリートは梁や柱の内部鉄骨の拘束条件により、A（梁鉄骨幅）、B（Aの外側で RC 梁幅内）、C（RC 梁幅の外側）の領域（zone）に平断面を区分した。解析対象実験は柱断面を 300×300 とした試験体 SRC-1-W（解析名：SRC-O）を基準試験体とし、A~C の

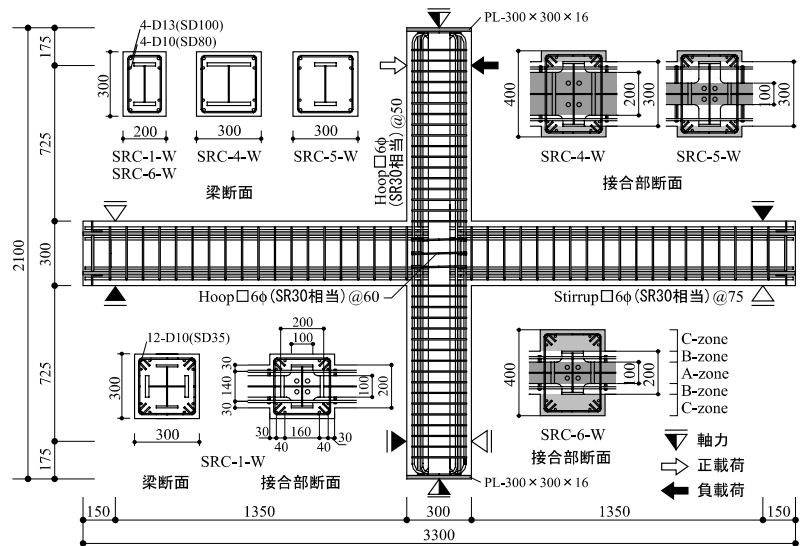


図-1 解析対象試験体概要

*1 大林組 工修 (正会員)

*2 北海道大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻助教授 工博 (正会員)

*3 北海道大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻教授 工博 (正会員)

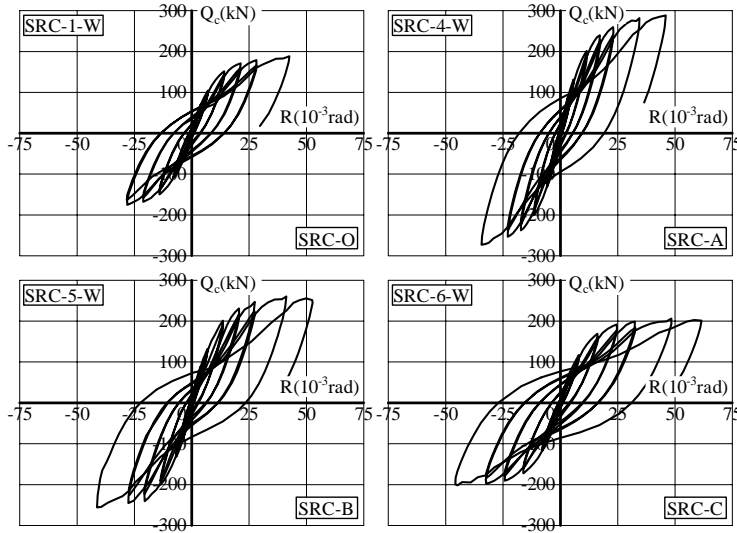


図-2 実験結果

各領域を個別に拡大した（柱 400×300）試験体 SRC-4-W, SRC-5-W, SRC-6-W（解析名：SRC-A, SRC-B, SRC-C）との比較検討を行った。実験結果を図-2に、材料試験の結果を表-1に示す。

2.2 解析手法

解析には株式会社大林組が開発した非線形有限要素解析ソフト“FINAL”を使用した。

解析モデルは加力軸に対称な条件を用いた1/2モデルで、柱頭部に軸力比 1/6 の軸力を加えた後、梁反曲点位置に鉛直方向正負繰返し強制変位を与えた。図-3に SRC-O のコンクリート部分及び鉄骨部分の要素分割図を示す。

2.3 構成則

(1) コンクリート

コンクリートは六面体要素でモデル化した。図-4 (a) に応力-ひずみ関係を示す。圧縮側の応力上昇域は修正 Ahmad モデル²⁾、下降域は Nakamura ら³⁾の圧縮破壊エネルギー (G_{fc}) から定義した直線モデルを用いた。引張側応力上昇域は引張強度点までの直線モデル、下降域は出雲ら⁴⁾の引張硬化の式で表した。破壊条件には Willam-Warke の 5 パラメータモデルを用い、履歴特性は図-4 (b) (c) に示す長沼ら⁵⁾のモデルで表した。ひび割れ後の挙動について、ひび割れ面におけるせん断剛性の低減は Al-Mahaidi のモデルを、ひび割れ面に平行な方向の圧縮強度の低減は Collins ら⁶⁾のモデルを用いて表した。

表-1 材料試験結果

コンクリート				
試験体	σ_B (MPa)	ϵ_{max} (μ)	σ_t (MPa)	$E_{1/3}$ (GPa)
SRC-1-W	34.4	3047	2.98	23.7
SRC-4-W	39.0	3472	3.09	21.2
SRC-5-W	39.0	3150	3.31	24.6
SRC-6-W	35.8	2681	2.76	22.9
鉄筋				
	使用部位	σ_y (MPa)	ϵ_y (μ)	E_s (GPa)
D13	梁	1102	7510	170
D10	梁	731	5017	183
D10	柱	360	2550	142
6 ϕ	接合部	319	1667	193
6 ϕ	梁、柱	434	4235	196
鋼板(鉄骨)				
	使用部位	σ_y (MPa)	ϵ_y (μ)	E_s (GPa)
PL-16	フランジ	361	1886	192
PL-9	直交フランジ	303	1515	199
PL-4.5	ウェブ	353	1819	194

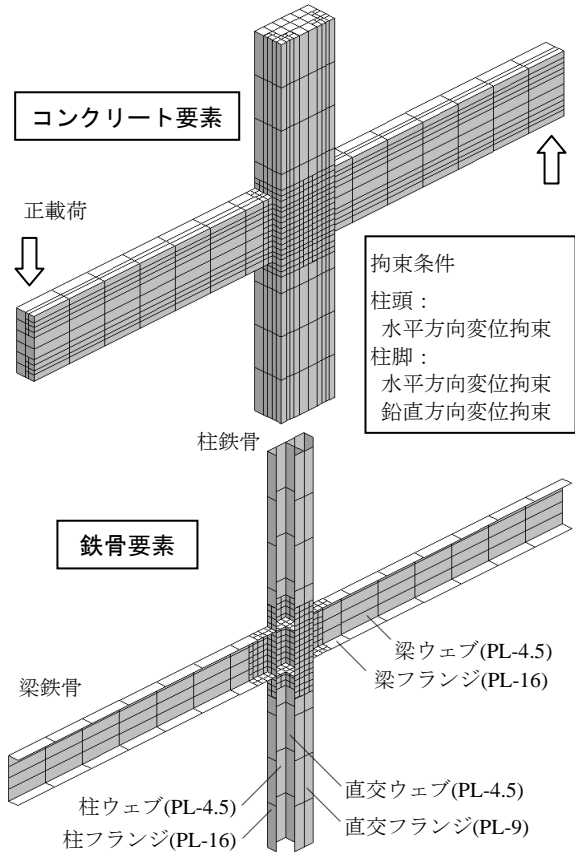


図-3 SRC-O 要素分割図

(2) 鉄筋

柱主筋及び梁主筋はトラス要素を、せん断補強筋は全て分散鉄筋を用いてモデル化した。応力-ひずみ関係はマルチリニアモデルで表し、降伏条件には Von Mises の条件を用いた。履歴特性には図-4 (d) に示す等方硬化則を用いた。

(3) 鉄骨

鉄骨は平面応力要素でモデル化した鋼板を組み合わせるが、柱フランジ及び梁フランジは他の鋼板に比べて厚さが大きいので、面外せん断変形を考慮できる積層シェル要素を用いた。応力-ひずみ関係はバイリニアモデルで表し、降伏条件には Von Mises の条件を用いた。鉄筋と同様に履歴特性は等方硬化則を用いた。

(4) 鋼とコンクリート間の付着特性

鋼板（鉄骨）とコンクリート間の付着応力-すべり関係は、RCブロックに埋め込まれた鋼板の引抜き試験の結果を基に、図-4 (e) のような、最大付着強度点までは直線モデル、強度点以降は図中のべき乗曲線の式をマルチリニアモデルで近似し、最大付着応力 (τ_{max}) は 1.87MPa とした。また、鋼板とコンクリートを密着させる面外圧縮応力の大きさに応じて付着強度の増大 ($\Delta\tau$) も考慮することができる。柱梁主筋とコンクリート間の付着-すべり関係は、図-4 (f) の Elmersi ら⁷⁾のモデルを適用した。

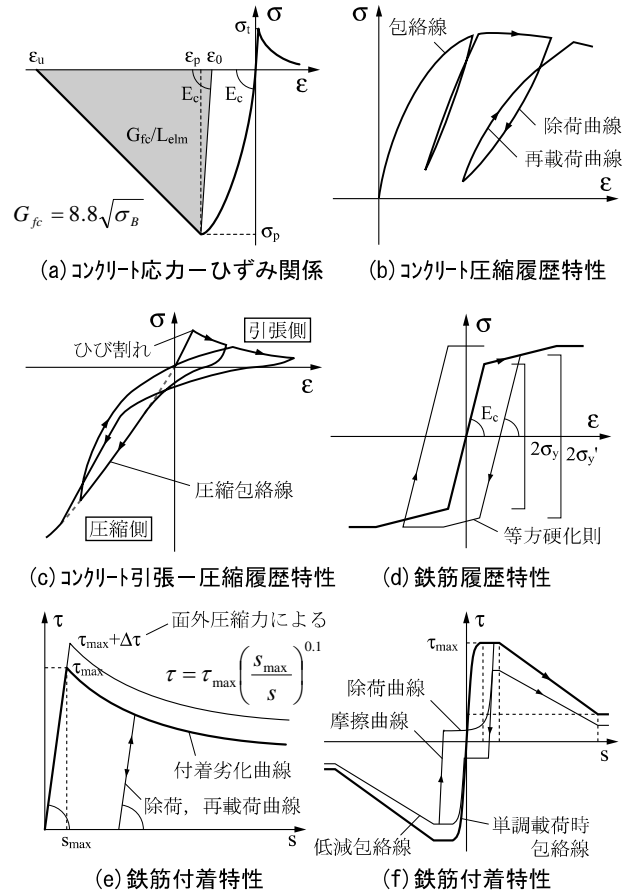


図-4 構成則概要

3. 解析結果

3.1 荷重-変形関係

図-5 に基準試験体の柱せん断力-層間変形角関係を示す。図を見やすくするために、解析結果は同一変形での繰り返し曲線を省略した。

(a) 鋼板とコンクリートを完全付着として仮定したモデル (SRC-OPB) は荷重初期の段階から剛性や耐力がかなり大きくなるが、鋼板とコンクリート間の付着挙動を考慮した SRC-O は実験時の挙動を精度よく再現している。

(b) コンクリートの圧縮側応力下降域の構成則も解析結果に大きく影響した。圧縮破壊エネルギーに基づく応力下降域モデル (G_{fc}) と修正 Ahmad モデル (mod-Ahmad) 及び Kent ら⁸⁾のモデル (Kent,Park) を用いた結果と比較すると、圧縮破壊エネルギーに基づくモデルを用いた場合が最も実験に近い結果を得ることができた。従って、鉄骨や鉄筋により拘束される SRC 造架構の中のコンクリートの材料特性として本解析

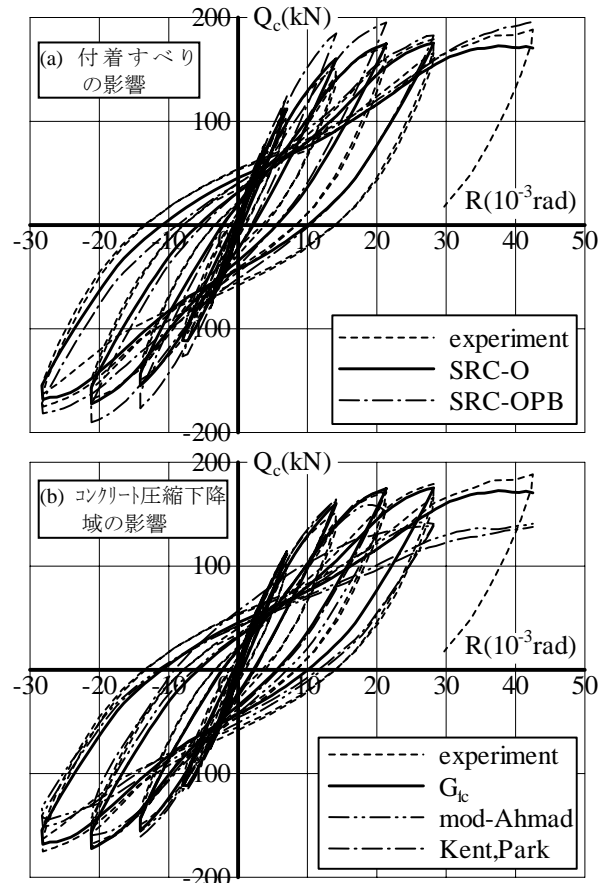


図-5 Q_c - R 関係 (SRC-1-W)

で用いたモデル (G_{fc}) が適当であると判断した。

図-6にはSRC-A, B, Cの柱せん断力-層間変形角関係を示す。SRC-Oを含め、いずれの解析モデルも実験のピークより小さい $25 \times 10^{-3} \text{rad}$ 程度でピークとなってしまったが、そこまでは実験結果をよく評価することができ、鋼板とコンクリートの付着特性を考慮した解析が有効であることが複数の実験結果に対して示された。

変形初期の段階での実験結果との対応はよい

が、実験よりも早い段階で耐力低下を生じてしまうことやループ面積が実験結果よりも小さいことが今後の課題として残った。これを解決するためにはコンクリートのひび割れ後の挙動や履歴特性について更なる検討が必要である。

3.2 応力分布

図-7はSRC-Oの正載荷(図-3参照)最大耐力時における接合部周辺の最小主応力分布を、接合部中心側の要素列から表面側へ順に並べた

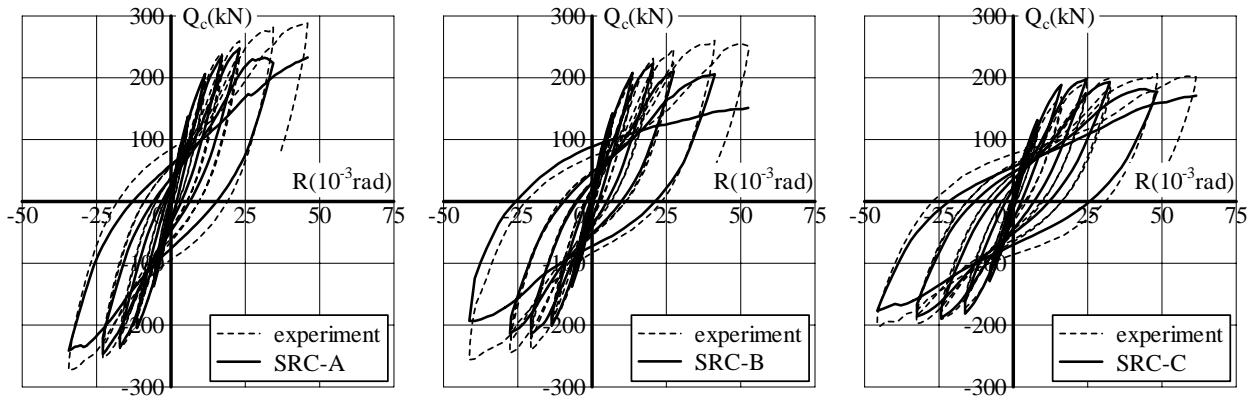


図-6 柱せん断力-層間変形角関係

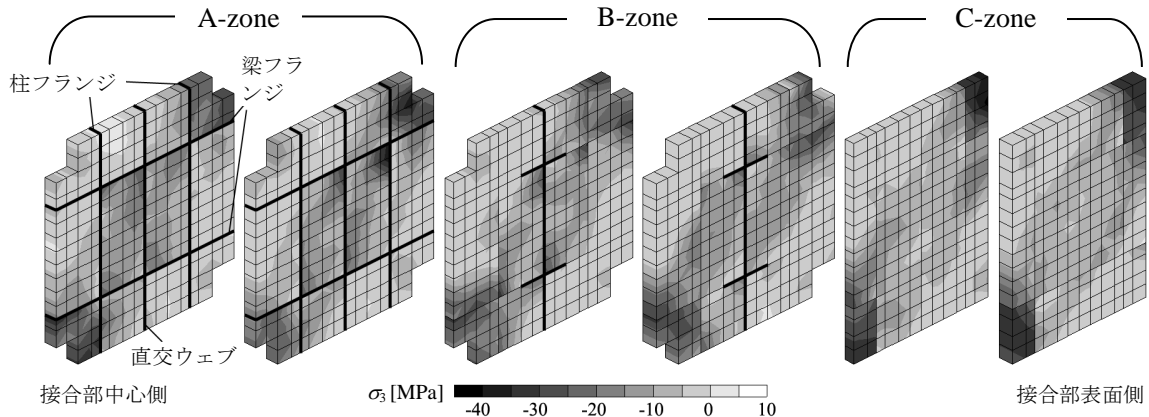


図-7 最小主応力分布 (SRC-O, 最大耐力時)

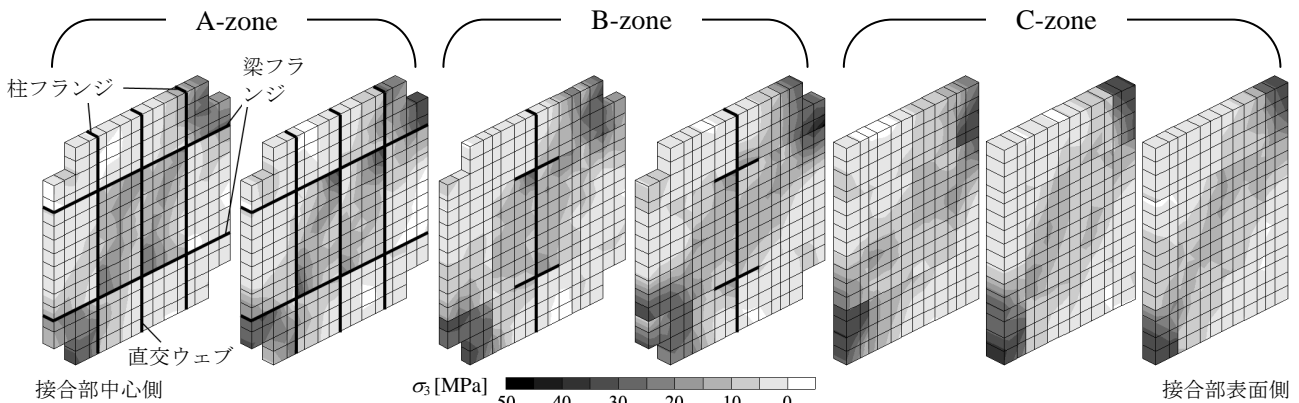


図-8 最小主応力分布 (SRC-C, 最大耐力時)

ものである。領域中に直交ウェブが通る A-zone 及び B-zone では、直交ウェブで分けられたそれぞれに圧縮ストラットが生じていることがわかる。また、梁から支圧力が直接伝達されない C-zone においても、小さなレベルではあるが圧縮ストラットが形成された。C-zone 幅が大きい SRC-C の最小主応力分布 (図-8) についても、同様に最も表面側に近い要素列まで圧縮ストラットが現れることが確認できた。

3.3 接合部せん断力

接合部せん断力 (Q_j) はパネル中央高さの要素に生じるせん断力の和として求めた。値を抽出した要素はコンクリート、パネルウェブ、柱フランジ (枠効果)、直交フランジである。図-9 は Q_j に対する各要素が負担するせん断力の構成比である。接合部せん断力分担率の推移については次のような特徴が挙げられる。

$R = 2 \times 10^{-3} \text{ rad}$ までの変形初期段階ではコンクリートによるせん断力負担が 7 割程を占め支配的であるが、変形が進むとひび割れや圧壊によりコンクリートの負担力は徐々に低下し、相対的に鉄骨のせん断力分担率が増えた。また、接

合部中心側のコンクリート (A-zone) のせん断力分担率は変形が進んでもあまり変化がないが、接合部表面側のコンクリート (B-zone, C-zone) ほど分担率の低下が顕著であることがわかる。これは接合部表面側には鉄骨や梁による拘束がないためであり、実験でもこれに近い挙動が生じていると考えられる。

表-2 に最大耐力時 (図-9 中口で囲む変形時) のせん断力分担について、コンクリート要素のみに注目し、A~C 領域の面積比と負担せん断力の比を C-zone の値を基準としてまとめる。

表-2 接合部コンクリートのせん断力分担

モデル	A-zone	B-zone	C-zone	
SRC-O	負担せん断力(kN)	101	103	79
	せん断力比	1.28	1.31	1.00
	面積比	1	1	1
SRC-A	負担せん断力(kN)	233	113	110
	せん断力比	2.12	1.02	1.00
	面積比	2	1	1
SRC-B	負担せん断力(kN)	102	232	138
	せん断力比	0.74	1.68	1.00
	面積比	1	2	1
SRC-C	負担せん断力(kN)	97	110	185
	せん断力比	0.52	0.60	1.00
	面積比	0.5	0.5	1

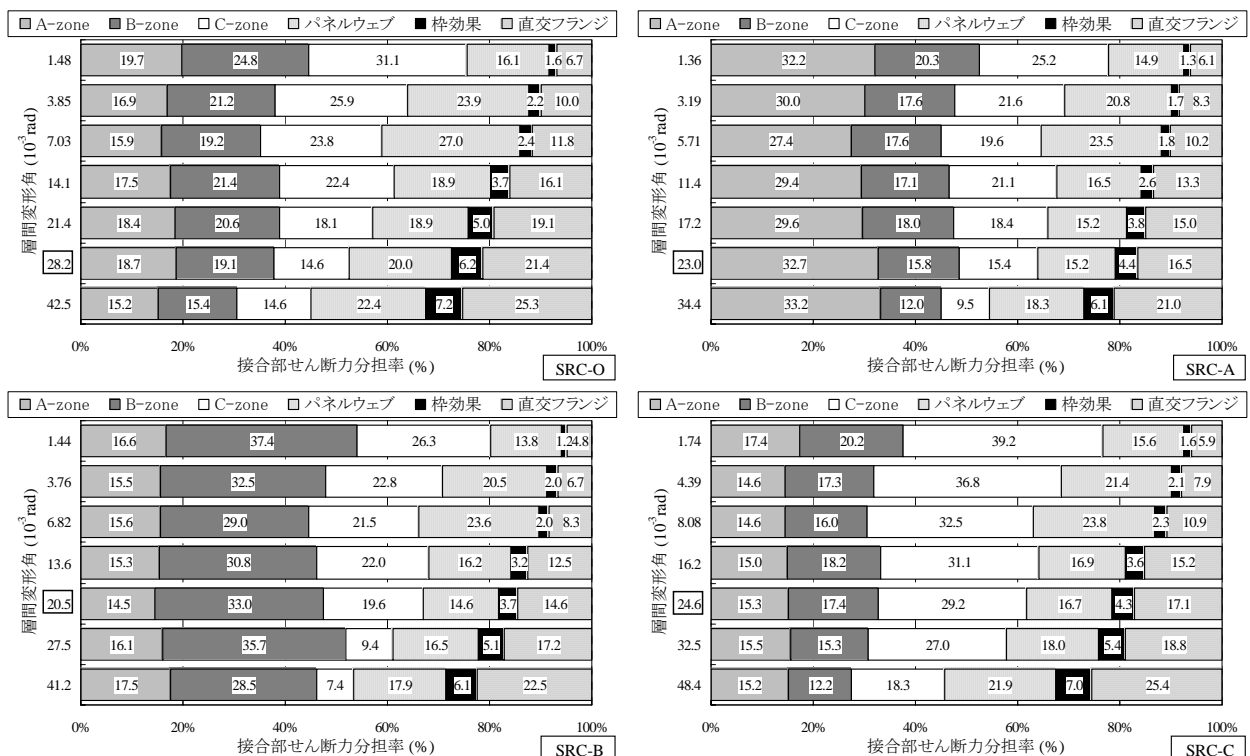


図-9 接合部せん断力の分担率

SRC-O の場合 A~C の面積比は 1:1:1 であり、仮に接合部せん断力がコンクリート全断面に均一に分布するならば、各 zone が負担するせん断力の比は面積比に比例して 1:1:1 となるはずだが、C-zone のせん断力比を 1 としたとき A-zone の値は 1.28, B-zone は 1.31 と、1 を大きく上回った。A-zone が 2 倍となる SRC-A については面積比とせん断力比がよく対応したが、SRC-B については A-zone, B-zone とせん断力比が 0.74, 1.68 と面積比を下回り、SRC-C については B-zone のせん断力比が 0.60 とやや高い値を示した。

この結果より、接合部内コンクリートの負担せん断力は面積に比例して分担している訳ではないことがわかる。接合部コンクリート内のせん断力分担の傾向は、表面側のコンクリートよりも内部のコンクリートの方が相対的に大きな分布となる。これは内部鉄骨の拘束効果による影響が現れたものと考えられる。

4. まとめ

SRC 造柱梁接合部を対象とした 3 次元非線形有限要素解析を行い以下の知見を得た。

- 1) 繰返し載荷時のコンクリートの履歴特性や鋼板とコンクリート間の付着挙動を設定することで繰返し載荷時の接合部挙動をよく再現することができた。また、コンクリートの σ - ε 関係について圧縮応力下降域のモデルには、圧縮破壊エネルギーに基づくモデルを適用したものが実験結果を最もよく評価した。ただし、コンクリートのひび割れ後の挙動や履歴特性に関しては実に検討を要する課題である。
- 2) 梁から直接支圧を受けない接合部表面側のコンクリートにも圧縮ストラットは形成されており、接合部せん断耐力への寄与が認められる。
- 3) コンクリートの破壊が少ない変形初期には、接合部せん断耐力はコンクリートによって 7 割程度負担されるが、変形が進むと拘束の少ない接合部表面側が破壊し、その分担率は低下する。
- 4) 接合部内のコンクリートを、柱や梁や内部鉄骨の拘束条件の違いより A (梁鉄骨幅), B (A

の外側で RC 梁幅内), C (RC 梁幅の外側) の 3 つの zone に区分すると、各 zone でのせん断力負担は zone 面積に比例した値とはならず、A-zone 及び B-zone の負担が大きくなる傾向がある。

謝辞

本研究を行う上で株式会社大林組の長沼一洋氏、米澤健次氏より多大なご助言をいただきましたことに厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 横山隆明ほか:SRC 造内部柱梁接合部のせん断抵抗性能に及ぼす接合部水平断面形状の影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C, pp.1709-1712, 1993.9
- 2) 長沼一洋:三軸圧縮下のコンクリートの応力~ひずみ関係, 日本建築学会構造系論文集, 第 474 号, pp.163-170, 1995.8
- 3) Hikaru Nakamura, Takeshi Higai : Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete, Seminar on Post-peak Behavior of RC Structures Subjected to Seismic Load, JCI-C51E, Vol.2, pp.259-272, 1999.10
- 4) 出雲淳一ほか:面内力を受ける鉄筋コンクリート板要素の解析モデル, コンクリート工学論文, No.87.9-1, pp.107-120, 1987.9
- 5) 長沼一洋ほか:繰返し応力下における鉄筋コンクリート板の解析モデル, 日本建築学会構造系論文集, 第 536 号, pp.135-142, 2000.10
- 6) Vecchio, F. J. et al. : The Modified Compression-Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear, ACI Journal, Vol.83, No.2, pp.219-231, March-April.1986
- 7) Elmorsi, M. et al. : Modeling bond-slip deformations in reinforced concrete beam-column joints, Canadian Journal of Civil Engineering, Vol.27, pp.490-505, 2000
- 8) Kent, D.C. et al. : Flexural Members with Confined Concrete, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.97, No.ST7, pp.1969-1990, July.1971