

論文

[2206] 柱 RC・梁 S 構造接合部の解析的研究

飯塚信一*1・笠松照親*2・野口 博*3

1. はじめに

近年、柱 RC・梁 S 構造に関する研究が、多くの研究機関で行われている。柱 RC・梁 S 構造の特徴は、大きな軸力を RC 柱で負担し、S 梁により大スパン化が可能となることである。また、施工方法を検討することで、施工の合理化、省力化も図ることが出来る。

この柱 RC・梁 S 構造の研究については、異種部材が接合された接合部部材の強度や剛性の研究が主であり、架構に関する実験や解析的研究等の全体挙動に対する研究[1]は数少ない。柱 RC・梁 S 構造を設計する為には、架構としての全体挙動を検討し、接合部の挙動が全体挙動に与える影響を評価することが重要である。

本研究は、筆者等が開発した新しい接合部仕口を用いた柱 RC・梁 S 構造接合部の接合部部材実験[2]から得られた実験結果を基に、接合部の復元力特性を提案し、接合部の強度をパラメータとしたフィッシュボーンモデルによる地震応答解析を行い、柱 RC・梁 S 構造において接合部が全体挙動に与える影響を検討するものである。

2. 部材のモデル化

2.1 柱、梁モデル

柱、梁、接合部部材の復元力特性をモデル化するにあたり、柱、梁部材については、両部材が純 RC 造、純 S 造であることから、既往のモデルを用いることとし、柱部材については、D-Tri型（武田モデル）、梁部材については、Bi-Linear型とした。柱、梁部材の曲げ、せん断ひび割れ、および柱、梁部材の曲げ、せん断強度は、既往の計算式により算出した。

2.2 接合部モデル

接合部部材については、柱 RC・梁 S 構造という特殊な接合部であり、さらに本仕口形状のディテールは新たに開発したものであることから、一般的な履歴モデルを使用することができない。そこで、実験結果[2]を基に、接合部の復元力特性のモデル化を行った。

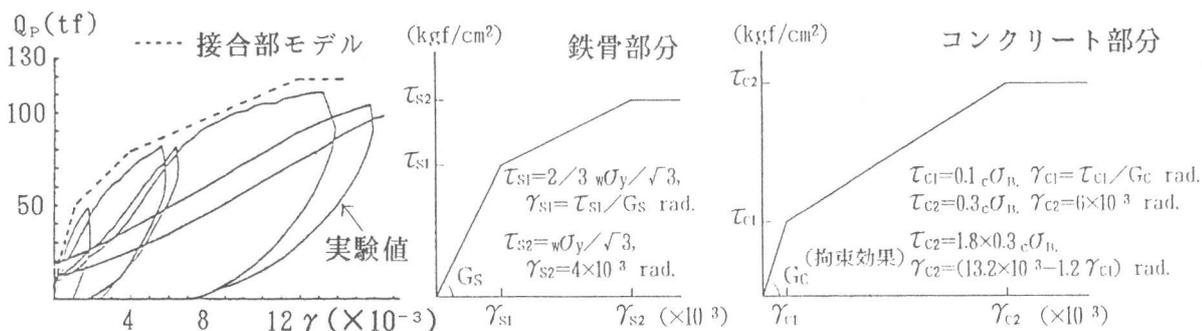


図1 接合部モデル 鉄骨部分 $\tau - \gamma$ 関係 コンクリート部分 $\tau - \gamma$ 関係

*1 千葉大学大学院自然科学研究科（西松建設（株）技術研究所）（正会員）

*2 西松建設（株）技術研究所原子力課課長

*3 千葉大学教授 工学部建築学科、工博（正会員）

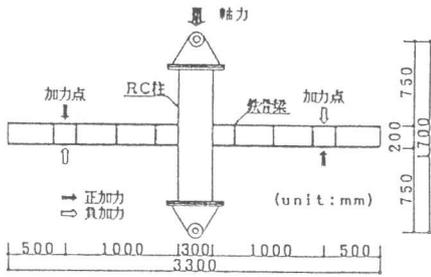


図2 試験体形状

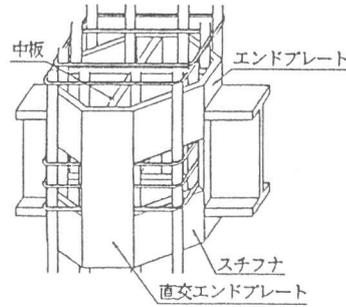


図3 接合部形状

表1 材料特性

柱断面	B×D=30×30(cm)
柱主筋	12-D19(Pt=1.28%)
帯筋	4-D10 @50(Pw=1.9%)
柱軸力	50.4(tf)(0.2bDσ _B)
梁断面	H-200×100×12×16
コンクリート	σ _B =280kgf/cm ²
鉄骨	F _y =2700kgf/cm ²

接合部のせん断力—せん断変形関係は、鉄骨部分とコンクリート部分のせん断応力—せん断ひずみ関係の重ね合わせとしてモデル化した。鉄骨部分は、坂口の研究[3]を参考に、エンドプレート中央部位置がせん断降伏した時点第1折れ曲がり点としたモデルとし、コンクリート部分は、実験結果[2]における拘束効果を考慮したモデルである。鉄骨部分およびコンクリート部分のモデル、及び重ね合わせた接合部モデルを実験結果と比較して図1に示す。接合部モデルは、実験結果と適合性のよいものとなっている。

解析の接合部モデルは、鉄骨部分とコンクリート部分を重ね合わせた5折れ線のモデルであるので、解析の都合上、スケルトン部分の面積を等価とした3折れ線に置換したD-Tri Slipモデル(武田スリップモデル)の履歴特性とした。

3. 十字型試験体の静的解析

解析モデルの妥当性を検証する為に、十字型試験体による静的解析を行った。

3.1 検証用試験体

検証に用いた試験体は、筆者等が行った接合部部材実験[2]の基本的仕口形状を持つ十字型試験体(No.1)である。試験体形状を図2に、接合部仕口形状を図3に、材料特性を表1に示す。

実験における層せん断力—層間変形を図4に示す。実験結果は、梁降伏後の接合部破壊であり、層間変形が大きくなるに従い、接合部の変形が増大しスリップ形の傾向を示している。

3.2 十字型試験体解析結果

解析プログラムは、汎用プログラムの「2次元フレームの弾塑性解析プログラムRESP-F」を基に、接合部のせん断応力—せん断変形の弾塑性性状を考慮することが出来るような解析プログラムを開発し、実験結果を基にした接合部モデルを組み込んだものを用いた。

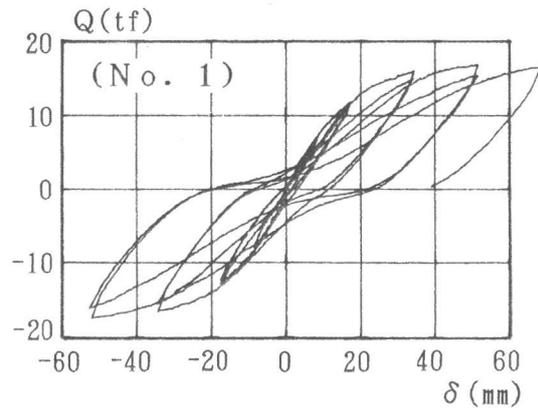


図4 層せん断力—層間変形(実験値)

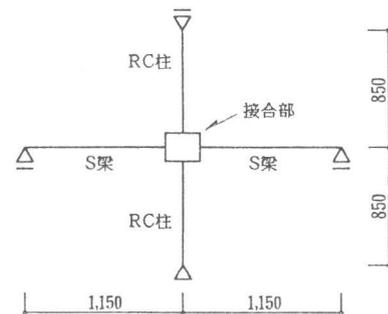


図5 解析モデル試験体

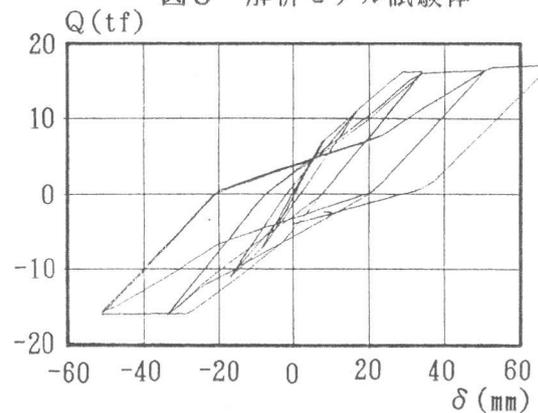


図6 層せん断力—層間変形(解析値)

解析モデル試験体を図5に示す。実験では、梁端に荷重を作用させた加力方法を用いたが、解析では、実験結果の層間変位を柱頭に与えるものとした。

解析結果の層せん断力-層間変形関係を図6に示す。解析結果は、実験の曲線的なループの変化は追跡できないが、ループのスリップ性状を良く表現している。解析結果から、柱RC・梁S構造において接合部の復元力特性を考慮したモデルを用いることで、解析の妥当性を確認した。

4. 骨組の動的解析

柱RC・梁S構造の耐震性状を検討するために、接合部をパラメータとした単純な平面骨組による地震応答解析を行い、全体挙動に与える影響を検討した。

4. 1 フィッシュボーンモデル

接合部の性状が全体挙動に挙動に与える影響を検討するために、接合部を考慮した5層1スパンのフィッシュボーンモデルによる動的解析を行った。モデルの形状を図7に、柱、梁のモデル一覧を表2に示す。対象構造は、5階建て店舗の内部柱を想定し、階高4.0m、スパン8.0mとしたものである。解析モデルパラメータは、接合部性能が全体挙動に与える影響を比較するために、

- ①モデル1 (接合部剛型)
- ②モデル2 (基本接合部型)
- ③モデル3 (弱接合部型)
- ④モデル4 (梁貫通型)

とした。

接合部断面性能を表3に示す。接合部剛型では、柱、梁の剛接合とし、基本接合部型では、筆者等が行った接合部実験結果を参考にし、弱接合部型では、解析上で接合部破壊を特に意図したものであり、梁貫通型は、比較のための単純な梁貫通タイプとしたものを想定し、スリップ型の履歴とした。

接合部強度は、基本接合部型では、2.2で示した手法により評価し、弱接合部では、基本接合部型の接合部強度を約1/2として接合部破壊型となるよう計画した。梁貫通型では、接合部強度をSRC規準[4]を用いて評価し、履歴特性は、実験結果を参考にD-Tri Slipモデル(武田スリップモデル)とした。基本接合部型、梁貫通型の接合部せん断応力-せん断変形関係曲線モデルを図8に示す。

さらに、柱RC・梁S構造と比較するため、RCモデル[5]の解析も行った。

表2 柱、梁断面

モデル 1 ~ 4		
5	R 梁	H-700×300×13×24
	柱	800×800 12-D32
4	梁	H-700×300×13×24
	柱	800×800 12-D35
3	梁	H-700×300×13×24
	柱	800×800 12-D35
2	梁	H-800×300×14×26
	柱	800×800 12-D35
1	梁	H-800×300×14×26
	柱	800×800 12-D38

表3 接合部断面性能

モデル	接合部性能
モデル1 (接合部剛型)	接合部剛
モデル2 (基本接合部型)	$Q_c=300.8\text{tf}$ $Q_s=803.2\text{tf}$ 2.2節による
モデル3 (弱接合部型)	$Q_c=144.0\text{tf}$ $Q_s=400.0\text{tf}$ 基本接合部型の約1/2倍
モデル4 (梁貫通型)	$Q_c=217.6\text{tf}$ $Q_s=620.8\text{tf}$ SRC規準の評価方法による

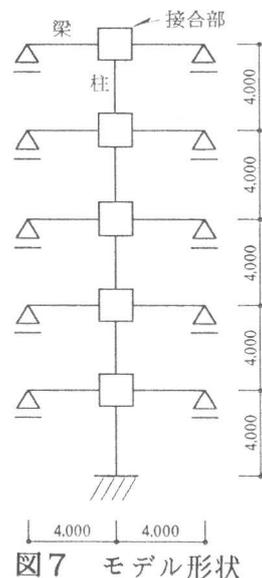


図7 モデル形状

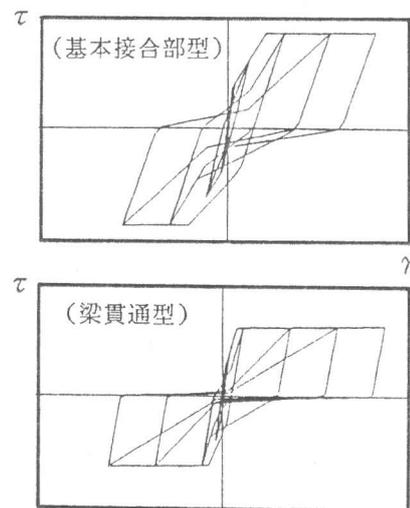


図8 接合部復元力モデル

(接合部剛型) (基本接合部型) (弱接合部型) (梁貫通型)

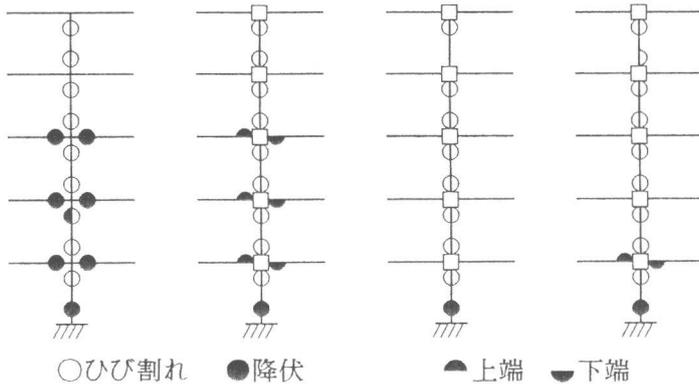


図9 降伏ヒンジ発生状況 (EL CENTRO)

RCモデルでは、柱断面は、積載荷重を考慮して柱軸応力度が柱RC・梁S構造と等しくなるようにし、梁については、その曲げ降伏強度が、鉄骨梁のそれと等しいものとした。接合部の履歴特性は、ひび割れ時及び、最大応力時をそれぞれ $0.1\sigma_B$ 、 $0.3\sigma_B$ としたD-Triモデル(武田モデル)とした。

部材の材料強度は、部材実験結果を参考に、柱については、コンクリート強度 $F_c=270\text{kgf/cm}^2$ とし、柱主筋をSD395、梁鉄骨および接合部仕口鉄骨部分はSS400の規格値を用いた。

柱、梁部材の解析モデルは、3章の十字型試験体の静的解析に用いたモデルとした。

4. 2 解析パラメータ

入力地震動波形は、EL CENTRO NS 1940, TAFT NS 1952, HACHIOHE EW 1968の3波とした。減衰は、瞬間剛性比例型とし、モデル1~4は2%、RCモデルは3%とした。入力の高さは、建物損傷後における挙動を比較するために、3波の地震動波形を50kineで規準化したものを入力した。

5. 解析結果

5. 1 固有周期

解析結果による1次の固有周期を表4に示す。

一般に、建物の固有周期(T)は、建物高さ(h)と構造形式に応じた略算式として、

$$T = 0.02h + 0.01h_s \quad (h = \text{建物高さ(m)}, \text{RC造: } h_s = 0, \text{S造: } h_s = 1.0h)$$

を用いて評価している。柱RC・梁S構造の固有周期に対しては、RC造とS造の中間の値、または梁崩壊型と考えてS造の値を採用するといった考え方がある。

解析結果は、RCモデルの計算値における固有周期が $T = 0.63$ 秒となり、柱RC・梁S構造では、接合部剛型で $T = 0.72$ 秒、基本接合部型、弱接合部型、梁貫通型ではモデルによる違いはなく $T = 0.8$ 秒程度であった。今回の解析結果から、固有周期を略算的に考えるには、RC造を $T = 0.02h$ と仮定した場合、 $T = 0.026h$ ($h_s = 0.6h$)程度に考えられる。地震波の加速度スペクトルからみた卓越周期は、 $0.5 \sim 1.3$ 秒程度であり、今回の解析モデルの固有周期もこの範囲にある。

5. 2 降伏ヒンジ

モデルの降伏ヒンジ発生状況を図9に示す。全モデル共、50kineの入力により最終的に1階柱脚部が曲げ降伏している。また、その他の柱頭、柱脚は、ひび割れが発生している。梁の損傷度合いは、接合部剛型、基本接合部型、梁貫通型、弱接合部型の順であり、接合部強度が弱くなると、層間変形に占める接合部変形が大きくなり、梁降伏型を形成しなくなることがわかる。

表4 固有周期

モード	固有周期 (秒)	
1	計算値	0.719
	略算値	0.60
2	計算値	0.805
	略算値	0.60
3	計算値	0.809
	略算値	0.60
4	計算値	0.789
	略算値	0.60
RC	計算値	0.626
	略算値	0.40

注)モード1~4の略算値では $h_s = 1.0h$ とした。

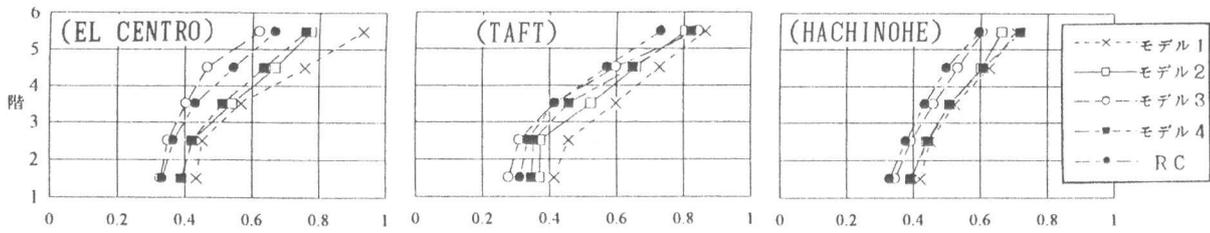


図10 最大層せん断力係数

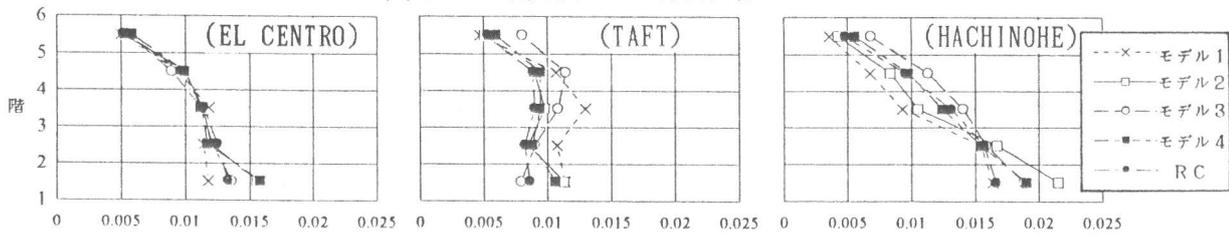


図11 最大層間変形角

5. 3層せん断力、層間変形

解析における最大層せん断力係数の比較を図10に、最大層間変形角の比較を図11に示す。

接合部モデルの違いによる、最大層せん断力係数の分布を比較してみると、弱接合部型は、他のモデルより層せん断力が小さくなっている、逆に接合部剛型は、全体的に層せん断力が大きくなっている。これは、接合部強度が弱く、接合部の損傷度合いが大きい程、層せん断力が小さくなっていることを示している。

最大層間変形角を比較すると、解析結果による層間変形角の違いは、接合部モデルによる違いよりも地震波の違いによる影響が大きく、2階位置の層間変形角でみると、TAFT(1/100rad.程度)、EL CENTRO(1/70rad.程度)、HACHINOHE(1/50rad.程度)の順に大きくなっている。

6. 全体挙動の検討

今回の解析は、建物の固有周期が0.6~0.8秒程度であり、入力も50kineのみと限られた条件の解析であるが、解析結果から柱RC・梁S構造接合部が全体挙動に与える影響を検討してみる。

6.1 接合部強度の影響

基本接合部型、弱接合部型により接合部強度の違いによる影響を検討する。解析における接合部のせん断応力は、基本接合部型で $\tau=150\text{kgf/cm}^2$ (τ_{max} の42%)、接合部強度を約1/2とした弱接合部型で $\tau=109\text{kgf/cm}^2$ (τ_{max} の82%)であった。両タイプの2階位置における接合部の履歴ループを図12に示す。

接合部強度の違いによる影響は、部材降伏状況、層せん断力係数に現れている。接合部強度を約1/2とすると、接合部での変形が大きくなるために、層せん断力係数が小さくなり、接合部変形が増大することで、梁降伏を起こさせることが出来ない。

6.2 全体挙動の影響

HACHINOHE波の解析における2階位置の層せん断力一

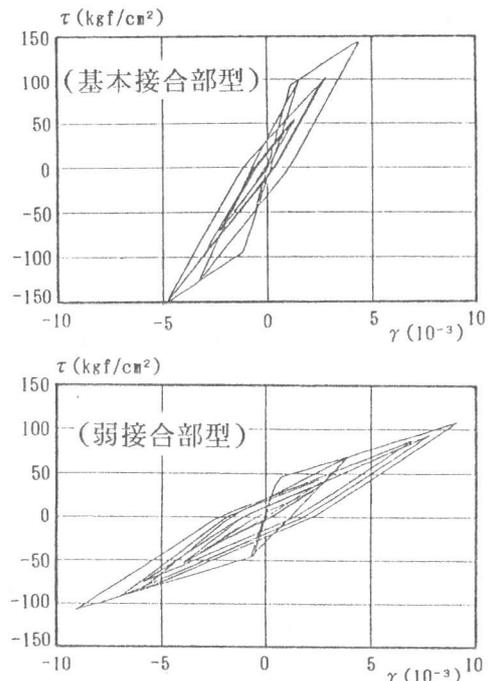


図12 接合部せん断応力一せん断変形 (EL CENTRO) (解析)

層間変形関係を図13に示す。接合部モデルの違いが架構の履歴挙動に与える影響は、顕著には見られない。接合部モデルの違いによる影響とし、弱接合部型の履歴ループの形状が細っている。また、接合部剛型は、層間変形を少なめに評価する結果となった。

RC構造と柱RC・梁S構造では、同様な傾向を示しているが、全体的に柱RC・梁S構造の方が、層間変形、層せん断力係数が大きくなっている。

今後、架構としての設計を行うにあたり、接合部自体の強度と剛性の確保もさることながら、特に接合部と梁部材との強度比の検討が重要であると考えられる。

7. まとめ

柱RC・梁S構造接合部接合部の復元力特性を考慮した柱RC・梁S構造における5層のフィッシュボーンモデルを用いて地震応答解析を行った。

解析の結果、以下のことがわかった。

- (1) 解析モデルの範囲では、固有周期を略算的に考えると、RC造を $T=0.02h$ と仮定した場合、 $T=0.026h$ ($h_s=0.6h$)程度に考えられる。
- (2) 接合部強度を弱くしていくと、梁の降伏が少なくなり、梁降伏形を形成しなくなる。
- (3) 柱RC・梁S構造の層間変形は、S梁部材による変形の増大の為に、RC造に比べ大きくなる。
- (4) 接合部を剛とすると、層間変形を少なめに評価する結果となる。

【謝辞】本研究を行うにあたり構造計画研究所 宇佐美祐人氏には、解析データの作成、解析計算を行って頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- [1]日本コンクリート工学協会：混合構造研究委員会報告集,1991.12 [2]飯塚信一・笠松照親・野口博：柱RC・梁Sで構成された混合構造接合部の耐震性能に関する実験的研究,コンクリート工学年次論文報告集, Vol.15, No.2 PP.1019-1024,1993.6 [3]坂口昇：鉄筋コンクリート柱と鉄骨梁で構成される柱梁接合部パネルのせん断力-せん断変形,日本建築学会構造系論文報告集, No.429, pp.55~64,1991.11 [4]日本建築学会：鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説,1987.6 [5]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,1990.11

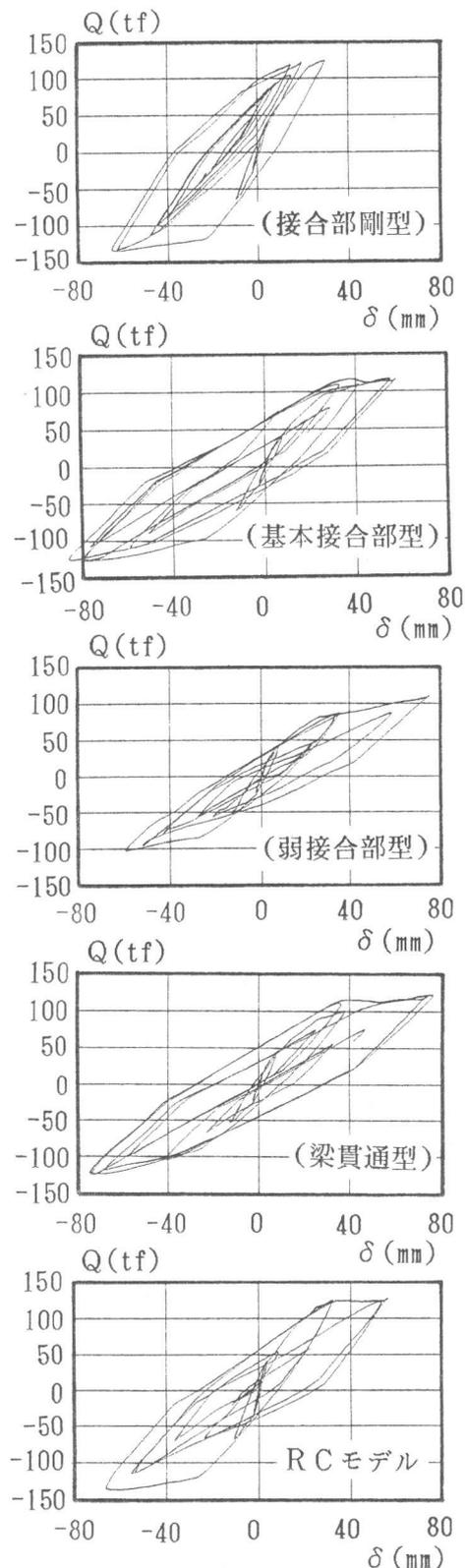


図13 層せん断力-層間変形 (2階位置) (解析)