

## 接合部パネルの変形が鉄骨造ラーメン架構の弾塑性挙動に及ぼす影響

## - その1 接合部パネルのエネルギー吸収 -

正会員○上森 博\*1 同 金谷 弘\*2 同 田淵基嗣\*3

同 上場輝康\*4 同 山成 實\*5

## 1. まえがき

鉄骨造ラーメン骨組において、骨組の変形能力を求める際に、接合部パネルを柱・はり部材の単なる交点ではなく1つの部材とみなし、接合部パネルのもつ安定した塑性変形能力を積極的に評価しようとする考え方がある。

近年、鉄骨造建物では角形鋼管を柱とするラーメン骨組が多用されているが、その接合部パネルの力学性状および骨組形状が骨組の弾塑性挙動に与える影響はよく知られていない。日本建築学会「建築耐震設計における保有耐力と変形性能」(昭和56年刊)では、骨組全体のエネルギー吸収の1/3以上が接合部パネルでなされるものとして構造特性係数 $D_s$ が求められ、骨組の塑性変形能力を評価している。このことの根拠になっているのは、H形鋼柱の部分架構を対象とした文献1), 2)等の実験的および解析的研究である。

本報では、角形鋼管柱を用いた中低層のラーメン骨組を対象として、骨組の弾塑性解析を行い、パネル降伏比 $R_{pp}$ およびスパン数が接合部パネルのエネルギー吸収に及ぼす影響について調べる。

## 2. 解析方法

架構の弾塑性解析は、以下の仮定を設け、図-1に示す接合部パネルのせん断変形を考慮した弾塑性たわみ角法<sup>3)</sup>により行う。

- 1) 柱・はり部材は線材として扱い、柱部材は曲げ、せん断および軸方向変形を、はり部材は曲げ変形とせん断変形を考慮する。
- 2) 接合部パネルはせん断変形のみ考慮し、局部変形は考慮しない。
- 3) 柱・はりおよび接合部パネルの部材力-変形関係は図-2に示すようにバイリニアールとし、塑性域での剛性は弾性剛性の1/30とする。ここで、部材の $M_p$ <sup>\*</sup>およびパネルの $Q_y$ は次式による。

$$M_p = F \cdot Z_p$$

$$Q_y = \frac{16}{9} D_c T \frac{F}{\sqrt{3}} \sqrt{1-n^2}$$

F : 鋼材の基準強度 (2.4 tf/cm<sup>2</sup>)  
 $Z_p$  : 柱・はり部材の塑性断面係数  
 $D_c$  : 柱フランジ中心間距離  
 T : 鋼管厚  
 n : 柱の軸力比

## 3. 解析対象

3-1. 対象骨組 解析は表-1に示す部材断面を持つラーメン骨組(図-3(a)~(d))について行う。ここで、断面の算定は、鉛直荷重ははりについて4tf/mの等分布荷重、水平力は $A_i$ 分布に従うものと仮定し、許容応力度設計法により行っている。

3-2. 解析モデル 解析モデルは、対象骨組について、検討

パラメータであるパネル降伏比 $R_{pp}$ およびスパン数を考慮して設定した12例である(表-2)。ここで、パネル降伏比 $R_{pp}$ は、接合部パネルの降伏耐力 $M_{py}$ と接合部パネルに隣接する上下の柱あるいは左右のはりの全塑性耐力の和のどちらか小さい方との比で、接合部パネルの板厚を変化させることにより設定している。また、表-2には柱あるいははり部材の降伏耐力を用いて表示したパネル降伏比 $R_{py}$ の値も( )内に示している。なお、側柱のパネルについては、左右に同様のはりがあるものとして $R_{pp}$ を設定している。表-2中のR4200Lは対象骨組(b)の柱断面をそのまま接合部パネルに用いたモデル( $R_{pp}=0.59\sim 0.69$ )である。接合部パネルの降伏耐力 $M_{py}$ は文献4)に基づい

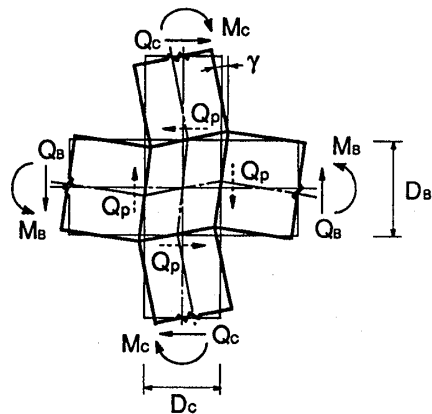


図-1 接合部パネルのせん断変形

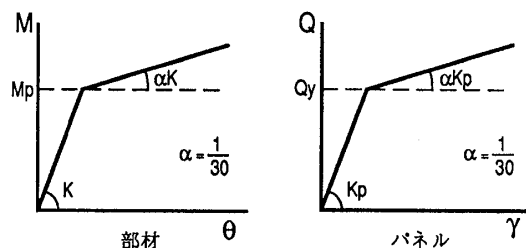


図-2 部材力-変形関係

表-1 部材断面

| Column (mm) |                        | A (cm <sup>2</sup> ) | I (cm <sup>4</sup> ) | K <sub>c</sub> |
|-------------|------------------------|----------------------|----------------------|----------------|
| C1          | □ - 350 x 350 x 12     | 158.5                | 29800                | 2.0            |
| C2          | □ - 300 x 300 x 12     | 134.5                | 18300                | 2.0            |
| C3          | □ - 250 x 250 x 12     | 110.5                | 10300                | 2.0            |
| Beam (mm)   |                        | A (cm <sup>2</sup> ) | I (cm <sup>4</sup> ) | K <sub>b</sub> |
| G1          | H - 496 x 199 x 9 x 14 | 101.3                | 41900                | 2.40           |
| G2          | H - 450 x 200 x 9 x 14 | 96.8                 | 33500                | 2.54           |
| G3          | H - 446 x 199 x 8 x 12 | 84.3                 | 28700                | 2.50           |
| G4          | H - 396 x 199 x 7 x 11 | 72.2                 | 20000                | 2.75           |

K<sub>c</sub>, K<sub>b</sub>: 柱およびはりのせん断変形に関する形状係数

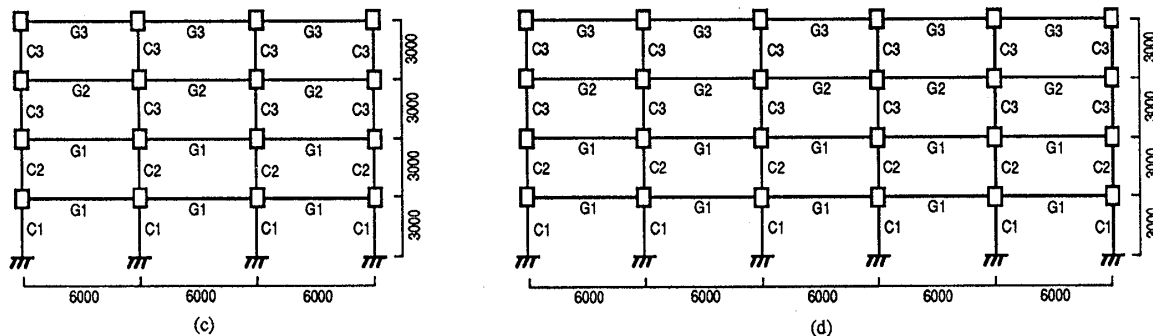
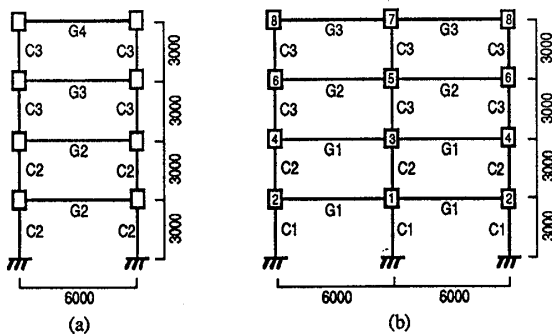
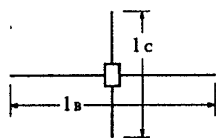


図-3 対象骨組

て次式より算出した。

$$M_{py} = \frac{16F}{9\sqrt{3}} \frac{(1-\lambda)}{(1-\lambda-\mu)} D_B D_c T$$

ここで、 $\lambda = D_c/l_b$ 、 $\mu = D_B/l_c$   
 D<sub>B</sub>: はりフランジ中心間距離  
 D<sub>c</sub>: 柱フランジ中心間距離



なお、本解析における水平力は、部材断面算定時に用いたA<sub>i</sub>分布と異なり、文献5)による水平力分布を用い、各階はりの軸心位置に作用する集中力とした。

4. 解析結果

表-2で示した解析モデルのうち2スパンのモデルについて各層の層間変形角が $\theta = 0.04\text{rad.}$ になるまでの層せん断力-層間変形角関係を図-4(a)~(f)に示す。ここで、各層の接合部パネルの降伏の推移を示すため、図中に接合部パネル番号(図-3(b)参照)を記している。図-5(a)~(f)は各モデルの柱・はりおよび接合部パネルでの塑性ヒンジ形成順を示している。R<sub>pp</sub> ≤ 0.8のときは部材降伏よりもパネル降伏が先行し(weak panel タイプ)、R<sub>pp</sub> = 0.4および0.6の場合、 $\theta = 0.01\text{rad.}$ までにほとんどのパネルが降伏している。R<sub>pp</sub> = 0.8の場合はパネル降伏が先行するものの、降

表-2 解析モデル一覧

|     | R <sub>pp</sub> (R <sub>py</sub> ) | 1スパン   | 2スパン   | 3スパン   | 5スパン   |
|-----|------------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| パネル | 0.40 (0.47)                        |        | R4204L |        |        |
| 降伏  | 0.60 (0.71)                        | R4106L | R4206L | R4306L | R4506L |
| 比   | 0.80 (0.94)                        | R4108L | R4208L | R4308L | R4508L |
|     | 1.00 (1.18)                        |        | R4210L |        |        |
|     | 1.20 (1.42)                        |        | R4212L |        |        |
|     | 0.59-0.69                          |        | R4200L |        |        |

ここで、解析モデルの名称は下記の要領による。

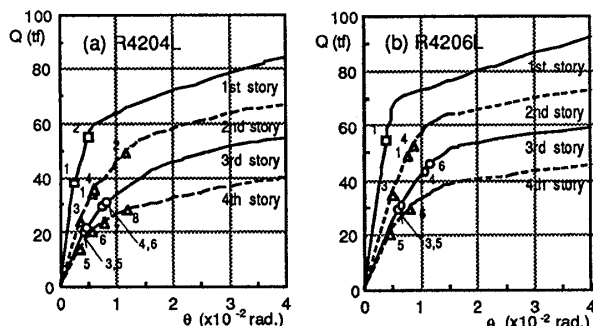
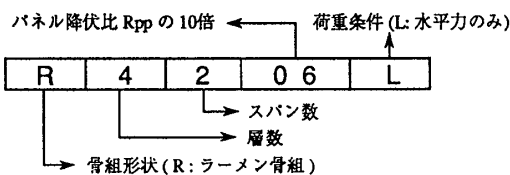


図-4 層せん断力-層間変形角関係

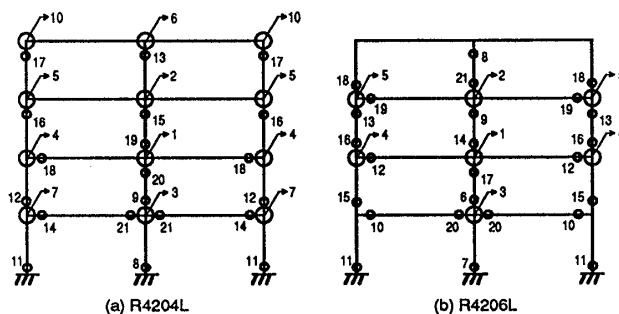


図-5 骨組の塑性化状況

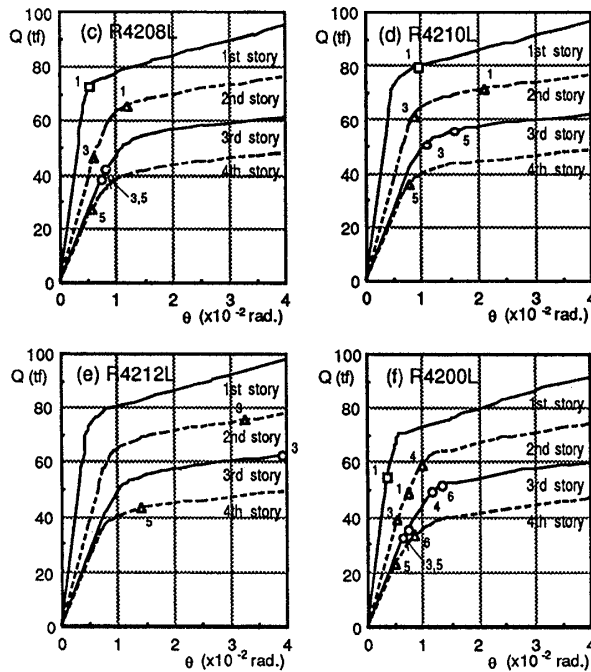


図4 層せん断力-層間変形角関係

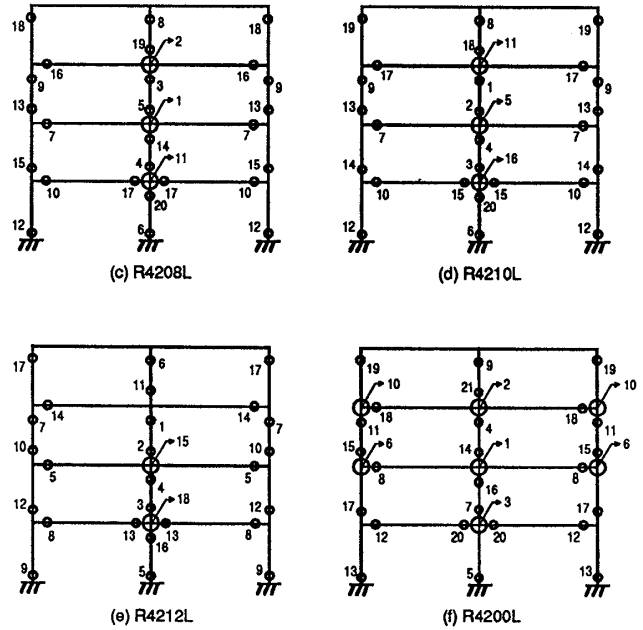


図5 骨組の塑性化状況

伏するのは中柱のパネルのみで、部材および接合部パネルともバランスよく塑性化している。これに対し、 $R_{pp} \geq 1.0$ のときは部材降伏が先行し (strong panel タイプ)、接合部パネルは部材の降伏が進展した後、中柱のパネルに限って降伏している。

5. 考察

本研究では、接合部パネルのエネルギー吸収を論ずるにあたり、図-6 に示す各層の層せん断力 $Q$ と層間変位 $\delta$ の関係より、解析モデル各層の $Q_B$ 時のエネルギー吸収 $W_T$ と接合部パネルを剛と仮定した骨組のエネルギー吸収 $W_R$ との差を、接合部パネルのエネルギー吸収 $W_P (= W_T - W_R)$ と定義する。

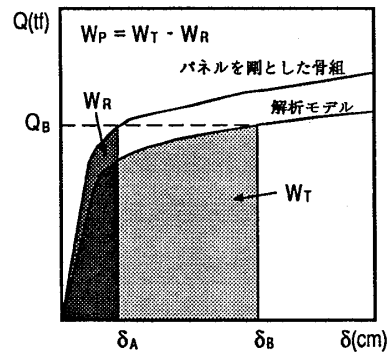


図6 接合部パネルのエネルギー吸収の算出

5-1. パネル降伏比の影響 図-7(a)~(f)に2スパンのモデルについてパネル降伏比を $R_{pp}=0.4 \sim 1.2$ に変化させたときの各層の接合部パネルのエネルギー吸収率( $W_P/W_T$ )と層間変形角との関係を示す。これより、次のことがわかる。

- 1) パネル降伏比 $R_{pp}$ が大きくなるほど $W_P/W_T$ は小さくなる。
- 2)  $R_{pp} \leq 0.8$ の場合はパネル降伏が先行するため、層間変形角が小さい範囲では、 $\theta$ が大きくなるにつれ $W_P/W_T$ は増加する傾向がある。第1層については柱脚が初期に降伏するため $R_{pp}=0.6$ および $0.8$ の場合、 $\theta = 0.01 \sim 0.015$ rad.より $W_P/W_T$ は減少している。一方、 $R_{pp} \geq 1.0$ の場合は部材降伏が先行するため、 $\theta$ の増大に伴って $W_P/W_T$ は減少する傾向にある。
- 3)  $R_{pp}=0.4$ の場合、各層とも $\theta > 0.02$ rad.で $W_P/W_T$ は70%以上になっている。 $R_{pp}=0.6$ の場合は、中間層(第2,3層)において $\theta < 0.01$ rad.で20~30%程度、 $\theta > 0.02$ rad.では50%前後のエネルギーを接合部パネルで吸収している。

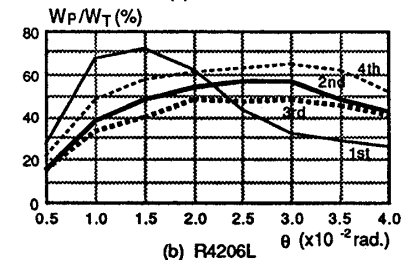
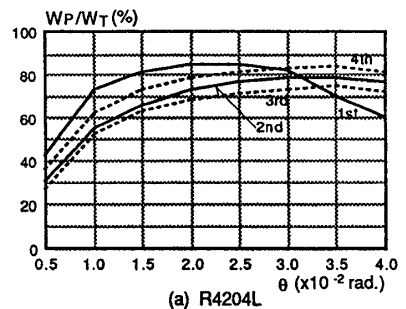


図7 接合部パネルのエネルギー吸収

4)  $R_{pp}=0.8$ の場合、中間層において $\theta < 0.01\text{rad.}$ で $W_p/W_T$ は15~20%程度、大地震時に想定される $\theta=0.02\sim 0.03\text{rad.}$ では20~30%程度になる\*\*).

5)  $R_{pp}=1.0$ および1.2のstrong panel タイプでは、最上層(第4層)を除き、 $R_{pp}=1.0$ の場合、 $W_p/W_T$ は10%程度、 $R_{pp}=1.2$ の場合は5%程度で、接合部パネルでのエネルギー吸収はほとんど期待できない。

5-2. スパン数の影響 図-8(a), (b)に $R_{pp}=0.6$ および0.8の場合について、スパン数を1, 2, 3および5スパンに変化させたときの第2層の接合部パネルのエネルギー吸収率を示す。これより、次のことがわかる。

1) 中柱のない1スパンのモデルは他の場合と異なり、 $R_{pp}=0.8$ の場合、 $\theta < 0.04\text{rad.}$ の範囲ではパネルは降伏せず、 $W_p/W_T$ は5%以下で接合部パネルでのエネルギー吸収は全く期待できない。 $R_{pp}=0.6$ の場合、はり部材の降伏よりパネル降伏がわずかに先行しているが、 $W_p/W_T$ は10%程度にとどまっている。

2) 3および5スパンのモデルは2スパンの場合と同様の傾向を示しているが、スパン数が増す(中柱が増える)ほど $W_p/W_T$ は増加する。 $R_{pp}=0.6$ の場合は、2スパンに比べ3スパンでは $W_p/W_T$ が10%程度、5スパンで20%程度増加している。 $R_{pp}=0.8$ の場合は、2スパンに比べ3スパンでは $W_p/W_T$ が5%程度、5スパンで10%程度増加している。

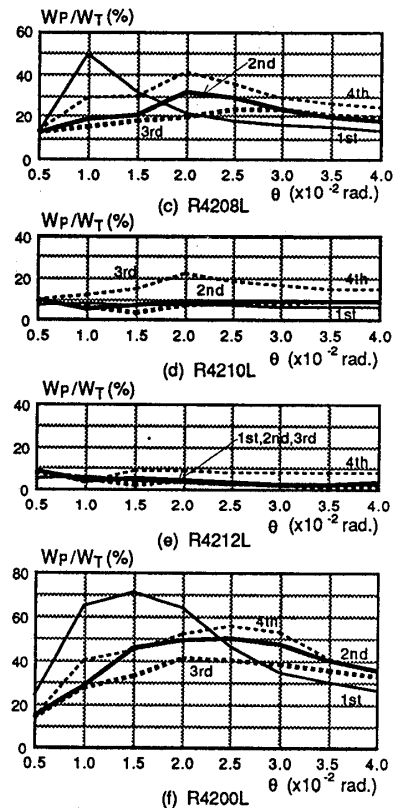


図-7 接合部パネルのエネルギー吸収

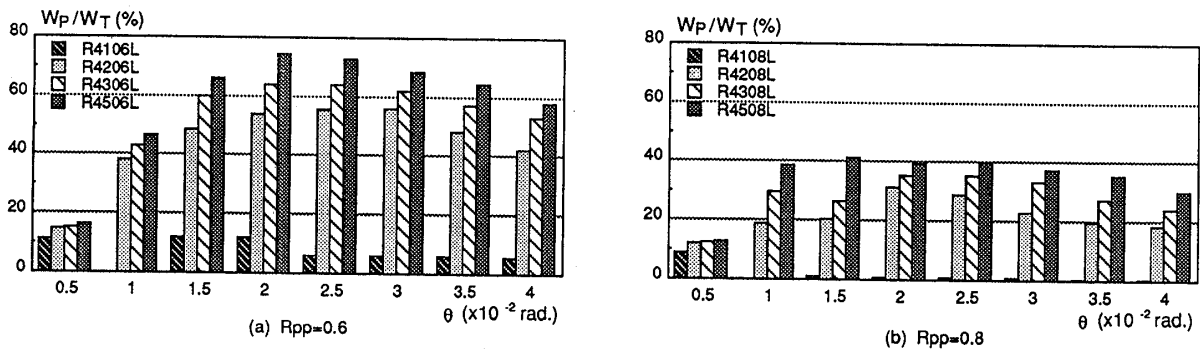


図-8 スパン数の影響 (第2層)

6. まとめ

当然のことながら骨組全体に対する接合部パネルのエネルギー吸収は、接合部パネルの強度と部材強度との比および中柱の数によって変化する。本解析の結果より中柱を有する中低層骨組では、大地震時に $W_p/W_T \geq 1/3$ を期待するには、 $R_{pp}$ を0.6~0.8程度以下とする必要があることがわかる。なお、ここでは角形鋼管柱の場合について検討を行ったが、この解析方法は、他の断面形状の柱に関しても、部材および接合部パネルの挙動をそれぞれの断面形状に応じて適切に評価することにより適用できる。

脚注 \*) 解析プログラム上は、柱の全塑性耐力には軸力を考慮しているが、本解析ではすべての段階で $M_{pc} = M_p$ の範囲である。  
 \*\*) 対象骨組(図-3(b))を4質点の等価せん断型モデルに置換し、入力最大加速度を $400\text{cm/s}^2$ として弾塑性応答解析を行ったところ、最大応答層間変形角は第3層で $0.02\sim 0.03\text{rad.}$ 程度であった。

[参考文献] 1) E. P. Popov, V. V. Bertero and S. Chandramouli: Hysteretic Behavior of Steel Columns, Proc. US National Conf. on Earthquake Engineering, pp.245-254, 1975  
 2) M. Nakao: A Statistical survey of the Influence of the Deformation of Beam-to-Column Connection on the Strength and the Ductility of Frames Composed of H-shapes Subjected to Strong Axis Bending, Annual Report of the Engineering, University of Tokyo, Vol.34, July, 1975  
 3) H. Kanatani, T. Kamba and M. Tabuchi: Effect of the Local Deformation of the Joints on RHS Vierendeel Trusses, Safety Criteria in Design of Tubular Structures, Proc. of the International Meeting held in Tokyo, pp.127-137, July, 1986  
 4) 田淵, 金谷: 水平荷重時における角形鋼管柱・H形はり接合部の耐力評価—角形鋼管柱溶接接合部の実験的研究3—, 日本建築学会論文報告集, 第358号, pp.52-62, 昭和60年12月  
 5) 渡部: 新耐震設計法(案)について, 建築雑誌 Vol.92, No.1130, pp.55-64, 昭和52年12月

\*1神戸大学大学院生(現 備日本設計) \*2同教授 工博 \*3同助教授 工博 \*4同助手 工博 \*5熊本大学助手 工修