

左右の梁せいが異なる角形鋼管柱・梁接合部パネルの力学性状
(その1. 釣合条件と弾性剛性・耐力算定式)

桑原 進^{*1}

同 熊野豪人^{*2}

同 宮定 章^{*2}

同 井上一朗^{*3}

1. 序

柱梁接合部パネルの力学性状に関する実験的・解析的研究成果は多く発表されているが、そのほとんどが左右の梁せいが等しい標準的な接合部(図3を参照。以下、標準型パネルと称す)に関する研究である。現実の鋼構造骨組はこのような標準的な接合部だけで構成されているわけではなく、機能上の要求や鉄骨重量の軽減目的等により左右の梁で梁せいを变化させた接合部(図1参照。以下、段違いパネルと称す)がある。このような段違いパネルの弾塑性挙動・設計法に関する研究は極めて少なく、H形断面の段違いパネルに関する研究^{1)~5)}が数件見られるにすぎない。また、角形鋼管の段違いパネルの挙動・設計法を扱った研究は見受けられない。

本論その1では角形鋼管柱梁接合部段違いパネルを対象として、パネル周りの釣合条件式を導くとともに、段違いパネルの剛性・耐力推定式を提案する。なお、本論の対象は角形鋼管柱・梁接合部パネルであるが、パネルの鋼管板厚(2枚分)をウェブ板厚に置き換えることで、H形断面の段違いパネルにも適用できる。

2. 段違いパネル周辺の釣合条件

図1に示す段違いパネル周りの応力に関する釣合条件を示す。以下、せいの大きい梁を梁1、小さい梁を梁2と称す。また、両方に梁の接合しているパネルをパネル

1、片方の梁に接合しているパネルをパネル2と称す。パネル周辺の力は柱・梁1フランジの中心にある黒丸の位置での力を示す。この位置でのモーメントをフェイスモーメントと呼び、柱・梁1の中心線の交点を節点と呼ぶ。柱・梁のフェイスモーメントを柱フランジ・梁フランジに作用する集中荷重の偶力として仮定すると、パネル1のせん断力 ${}_jQ_{C1}$ 、パネル2のせん断力 ${}_jQ_{C2}$ は次式で表せる。

$${}_jQ_{C1} = \frac{{}_B M_1}{d_{B1}} + \frac{{}_B M_2}{d_{B2}} - \frac{{}_C Q_1 + {}_C Q_2}{2} \quad (1)$$

$${}_jQ_{C2} = \frac{{}_B M_1}{d_{B1}} - \frac{{}_C Q_1 + {}_C Q_2}{2} \quad (2)$$

ただし、 d_C はパネルのフランジ中心間距離、 d_{B1} は梁1のフランジ中心間距離、 d_{B2} は梁2のフランジ中心間距離である。ここで、パネルモーメント ${}_jM$ は図2に示すパネルせん断力によるモーメントであると定義すると、 ${}_jM$ は次式で表せる。

$${}_jM = {}_jQ_{C2} d_{B1} + ({}_jQ_{C1} - {}_jQ_{C2}) d_{B2} \quad (3)$$

また、図2に示す平均せん断力 \bar{Q} を次式で定義する。

$$\bar{Q} = \frac{{}_jM}{d_{B1}} = {}_jQ_{C2} + ({}_jQ_{C1} - {}_jQ_{C2}) \frac{d_{B2}}{d_{B1}} \quad (4)$$

(1)、(2)式を(3)式に代入すると次式を得る。

$${}_jM = {}_B M_1 + {}_B M_2 - ({}_C Q_1 + {}_C Q_2) \frac{d_{B1}}{2} \quad (5)$$

(5)式と柱・梁の釣合条件から、柱・梁・パネル相互の

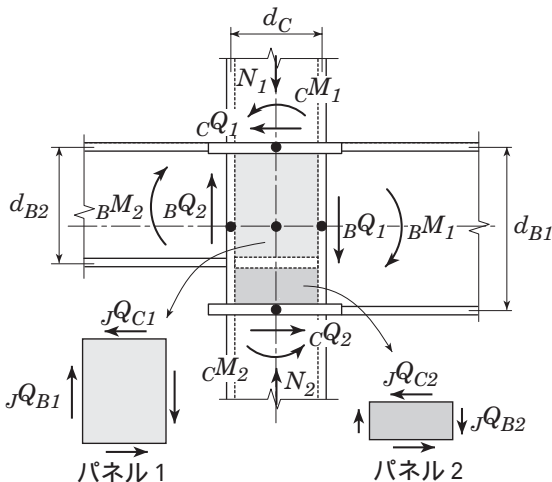


図1 パネル周辺に作用する力(段違い)

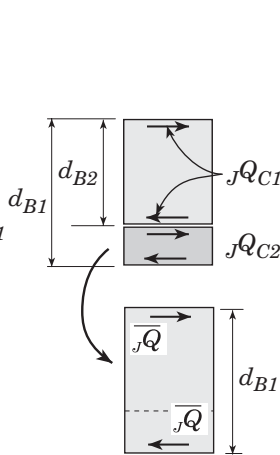


図2 パネルモーメント

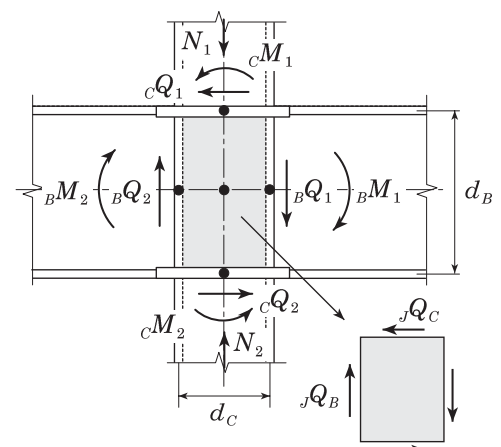


図3 パネル周辺に作用する力(標準型)

The elasto-plastic behaviors of joint panels at the connection of rectangular steel column and two H-shaped beams with different depth (Part 1. Equilibrium and calculation of stiffness and strength of the panels)

釣合条件が次式で得られる．

$${}_cM^* = {}_B M^* = {}_J M^* \quad (6)$$

$${}_cM^* = {}_cM_1 + {}_cM_2 + ({}_cQ_1 + {}_cQ_2) \frac{d_{B1}}{2} \quad (7)$$

$${}_B M^* = {}_B M_1 + {}_B M_2 + ({}_B Q_1 + {}_B Q_2) \frac{d_C}{2} \quad (8)$$

$${}_J M^* = {}_J M + ({}_B Q_1 + {}_B Q_2) \frac{d_C}{2} + ({}_cQ_1 + {}_cQ_2) \frac{d_{B1}}{2} \quad (9)$$

ここでは，上式中の ${}_cM^*$ ・ ${}_B M^*$ ・ ${}_J M^*$ を柱・梁・パネルの節点モーメントと呼ぶ．

同様に図3に示す標準型パネルに関する釣合条件は次式で表される⁶⁾．

$${}_cM^* = {}_B M^* = {}_J M^* \quad (10)$$

$${}_cM^* = {}_cM_1 + {}_cM_2 + ({}_cQ_1 + {}_cQ_2) \frac{d_B}{2} \quad (11)$$

$${}_B M^* = {}_B M_1 + {}_B M_2 + ({}_B Q_1 + {}_B Q_2) \frac{d_C}{2} \quad (12)$$

$${}_J M^* = {}_J M + ({}_B Q_1 + {}_B Q_2) \frac{d_C}{2} + ({}_cQ_1 + {}_cQ_2) \frac{d_B}{2} \quad (13)$$

段違いパネルと標準型パネルの釣合条件式と比較すると，段違いパネルの d_{B1} を標準型パネルの d_B に置き換えれば，両者の釣合条件式・節点モーメントは全く同じものになることがわかる．

3．段違いパネルの弾性剛性推定式

本論では，パネルのせん断変形のみを考慮してパネルの弾性剛性を算定する．段違いパネルの場合，パネル1とパネル2に作用するせん断力が異なるため，それぞれに生じるせん断弾性変形角も異なる（図4参照）．パネル1・パネル2に作用するせん断力をそれぞれ ${}_J Q_{C1}$ ・ ${}_J Q_{C2}$ とし，パネル1・パネル2のせん断変形角を γ_1 ・ γ_2 とする．これらには次式の関係が成立する．

$${}_J Q_{C1} = G A_w \gamma_1, \quad {}_J Q_{C2} = G A_w \gamma_2 \quad (14), (15)$$

ただし， G はせん断弾性係数であり， A_w はパネルのウェブ面積であり，鋼管断面面積の1/2とする．パネル全体の平均せん断変形角 $\bar{\gamma}$ （図4参照）を次式で定義する．

$$\bar{\gamma} = \frac{\gamma_1 d_{B2} + \gamma_2 (d_{B1} - d_{B2})}{d_{B1}} \quad (16)$$

(16)式に(4)，(14)，(15)式を代入すると，次式を得る．

$$\bar{J}Q = G A_w \bar{\gamma} = K_s \bar{\gamma} \quad (17)$$

パネルの平均せん断力 $\bar{J}Q$ と平均せん断変形角 $\bar{\gamma}$ を関係式は，標準型・段違いパネルともに同じ式で表せる．

4．段違いパネルの全塑性耐力推定式

塑性解析法により段違いパネルの全塑性耐力を算定す

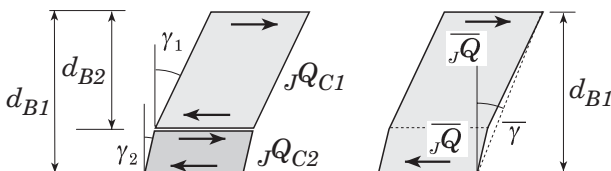


図4 パネルのせん断変形角

る．本論ではパネルの全塑性耐力をパネルの塑性化によって生じる崩壊機構形成時のパネル節点モーメント（以下，パネルの節点塑性モーメント⁶⁾と称す），または，そのときのパネルの平均せん断力（以下，パネルの平均せん断耐力と称す）として表す．

図1に示すような力が作用する場合について，図5, 6に示す2つの崩壊機構について考える．図5に示す機構Aはパネル1・2がともに塑性化している状態である．機構Aの仮想仕事式より次式が得られる．

$$2 t_p d_C d_{B1} \Delta \theta \sqrt{1-n^2} \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}} = \left\{ {}_B M_1 + {}_B M_2 - ({}_cQ_1 + {}_cQ_2) \frac{d_{B1}}{2} \right\} \Delta \theta \quad (18)$$

ただし， σ_y はパネルの降伏応力度， t_p はパネル板厚， n は軸力比である．(5)，(18)式より機構A形成時のパネルモーメント ${}_J M_P^A$ は次式で得られる．

$${}_J M_P^A = 2 t_p d_C d_{B1} \sqrt{1-n^2} \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}} \quad (19)$$

また(9)，(19)式より節点塑性モーメント ${}_J M_P^{A*}$ は次式となる．

$${}_J M_P^{A*} = {}_J M_P^A + ({}_B Q_1 + {}_B Q_2) \frac{d_C}{2} + ({}_cQ_1 + {}_cQ_2) \frac{d_{B1}}{2} \quad (20)$$

図6に示す機構Bではパネル1と梁1のフランジ・ウェブの一部（図のハッチ部分）が塑性化し，パネル2は塑性化しない．機構Bの仕事式より次式が得られる．

$${}_J M_P^{BI} \Delta \theta = \left\{ {}_B M_1 + {}_B M_2 - ({}_cQ_1 + {}_cQ_2) \frac{d_{B2}}{2} \right\} \Delta \theta \quad (21)$$

$${}_J M_P^{BI} = 2 t_p d_C d_{B2} \sqrt{1-n^2} \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}} + B_1 t_{f1} (d_{B1} - d_{B2}) \sigma_{yf1} + t_{w1} (d_{B1} - d_{B2})^2 \frac{\sigma_{yw1}}{2} \quad (22)$$

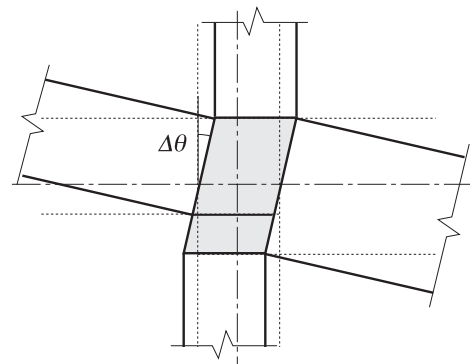


図5 崩壊機構A

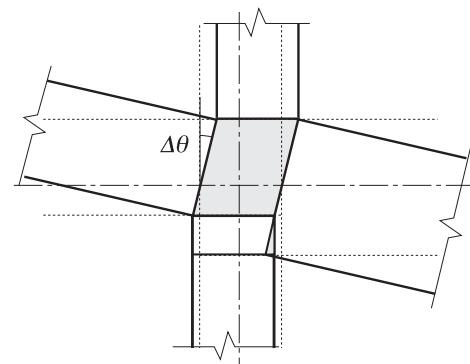


図6 崩壊機構B

ただし $\sigma_{yf1} \cdot \sigma_{yw1}$ は梁 1 のフランジ・ウェブの降伏応力度, B_1 は梁 1 の幅, $t_{f1} \cdot t_{w1}$ は梁 1 のフランジ・ウェブ厚である。(5), (21), (22)より機構 B 形成時のパネルモーメント ${}_jM_P^B$ は次式で得られる.

$${}_jM_P^B = {}_jM_P^{BI} - ({}_cQ_1 + {}_cQ_2) \frac{d_{B1} - d_{B2}}{2} \quad (23)$$

また, (9), (23) 式より機構形成時の節点塑性モーメント ${}_jM_P^{B*}$ は次式で得られる.

$${}_jM_P^{B*} = {}_jM_P^{BI} + ({}_BQ_1 + {}_BQ_2) \frac{d_C}{2} + ({}_cQ_1 + {}_cQ_2) \frac{d_{B2}}{2} \quad (24)$$

段違いパネルの節点塑性モーメント ${}_jM_P^*$ は上界定理より次式で得られる.

$${}_jM_P^* = \text{Min.} ({}_jM_P^{A*}, {}_jM_P^{B*}) \quad (25)$$

また, パネル平均せん断耐力 \overline{jQ} は (4) 式より次式で得られる.

$$\overline{jQ} = \text{Min.} ({}_jQ_P^A, {}_jQ_P^B) \quad (26)$$

$$\frac{{}_jQ_P^A}{d_{B1}} = \frac{{}_jM_P^A}{d_{B1}}, \quad \frac{{}_jQ_P^B}{d_{B1}} = \frac{{}_jM_P^B}{d_{B1}} \quad (27), (28)$$

5. パネル耐力に及ぼすパラメータの影響

図7に示すような十字形部分架構を例にとってパネル耐力に及ぼす構造パラメータの影響について考察する. 機構 B から得られるパネル平均せん断耐力は (23), (28) 式より次式で得られる.

$$\frac{{}_jQ_P^B}{d_{B1}} = \frac{1 - d_C/L - d_{B1}/H} {1 - d_C/L - d_{B2}/H} \frac{{}_jM_P^{BI}}{d_{B1}} \quad (29)$$

(27), (29) 式より機構 A に対する機構 B のパネル平均せん断耐力比は次式で得られる.

$$\frac{\overline{jQ}_P^B}{\overline{jQ}_P^A} = \frac{1 - d_C/L - d_{B1}/H} {1 - d_C/L - d_{B2}/H} \frac{{}_jM_P^{BI}}{{}_jM_P^A} \quad (30)$$

さて, (22)式で表される ${}_jM_P^{BI}$ を整理すると次式で表せる.

$${}_jM_P^{BI} = \frac{d_{B2}}{d_{B1}} {}_jM_P^A + \left(1 - \frac{d_{B2}}{d_{B1}}\right) {}_B M_{Pf1} + \frac{2(d_{B1} - d_{B2})^2}{(d_{B1} - t_{f1})^2} {}_B M_{Pw1} \quad (31)$$

ただし, ${}_B M_{Pf1}$, ${}_B M_{Pw1}$ はそれぞれ梁 1 のフランジ, ウェブの全塑性モーメントであり, 次式で得られる.

$${}_B M_{Pf1} = B_1 d_{B1} t_{f1} \sigma_{yf1} \quad (32)$$

$${}_B M_{Pw1} = \frac{1}{4} t_{w1} (d_{B1} - t_{f1})^2 \sigma_{yw1} \quad (33)$$

ここで (31) 式中で $d_{B1} - t_{f1} = d_{B1}$ とすると次式を得る.

$${}_jM_P^{BI} = {}_jM_P^A \psi + {}_B M_{Pf1} (1 - \psi) + {}_B M_{Pw1} 2(1 - \psi)^2 \quad (34)$$

ただし, $\psi = d_{B2}/d_{B1}$ である. 図8に上記の近似による影響の一例を示す. 諸元は本論その2で示す R2816-5-b10 試験体のものである. 実線が近似前, 点線が近似後の値を示す. 図よりほとんど影響がないことがわかる. 上記の近似を用いると, (30)式は次式で表せる.

$$\frac{\overline{jQ}_P^B}{\overline{jQ}_P^A} = \frac{1 - \xi - \zeta} {1 - \xi - \psi \zeta} \{ \psi + (1 - \psi) m_f + 2(1 - \psi)^2 m_w \} \quad (35)$$

ただし, 式中の変数はそれぞれ $\xi = d_C/L$, $\zeta = d_{B1}/H$, $m_f = {}_B M_{Pf1}/{}_jM_P^A$, $m_w = {}_B M_{Pw1}/{}_jM_P^A$ であり, この5つの変数によって平均せん断耐力比が決定する.

図9に(35)式で得られるパネルせん断耐力比を示す. 横軸は梁せい比 ψ である. その他のパラメータの値は図中の通りである. 図の $\overline{jQ}_P^B/\overline{jQ}_P^A$ が1以下である場合は機構 B で, 1以上である場合は機構 A でパネル平均せん断耐力がきまる. 図より, パラメータによってはせん断耐力が \overline{jQ}_P^A の数割程度も低下し, 機構 B で耐力が決まる場合があることがわかる. また, 梁せい比 ψ が小さくなると, $\overline{jQ}_P^B/\overline{jQ}_P^A$ は単調に減少するのではなく, 一旦減少した後増加する場合がある.

6. 段違いパネルの節点塑性モーメント略算法

一般的な骨組の保有水平耐力を塑性解析手法を用いて算定するためには, 柱・梁・パネルの節点塑性モーメント⁶⁾から得られるフロアモーメントを算定する必要がある. しかし, パネルの節点塑性モーメントを算定するためには, 機構形成時の柱と梁のせん断耐力がわからなければならない(20) (24) 式参照). ここで以下の仮定を導入する⁶⁾ (図10参照).

パネルの節点塑性モーメント算定時のせん断力を, 機構 A の場合は ${}_jM_P^A$, 機構 B の場合は ${}_jM_P^{B*}$ を上下の柱・左右の梁に等分配したとして算定する. 上記の仮定を導入すると, 機構の節点塑性モーメントは

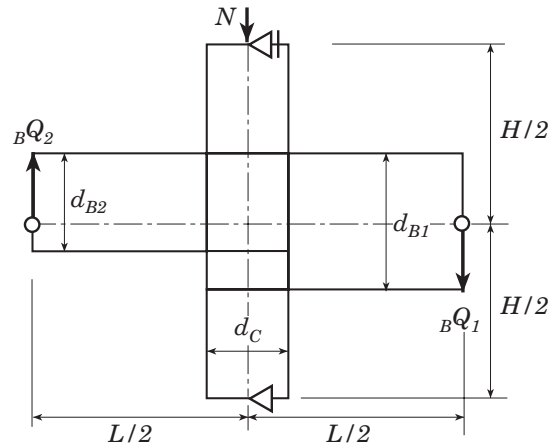


図7 十字形部分架構

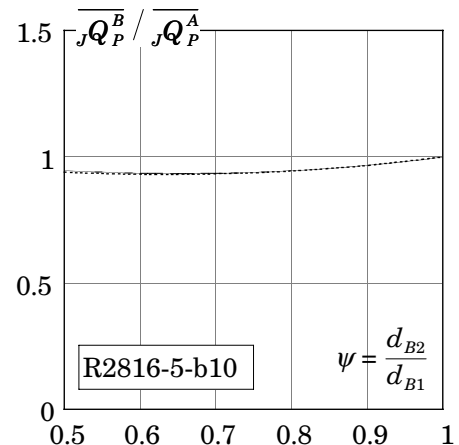


図8 近似の影響 (パネルせん断耐力比)

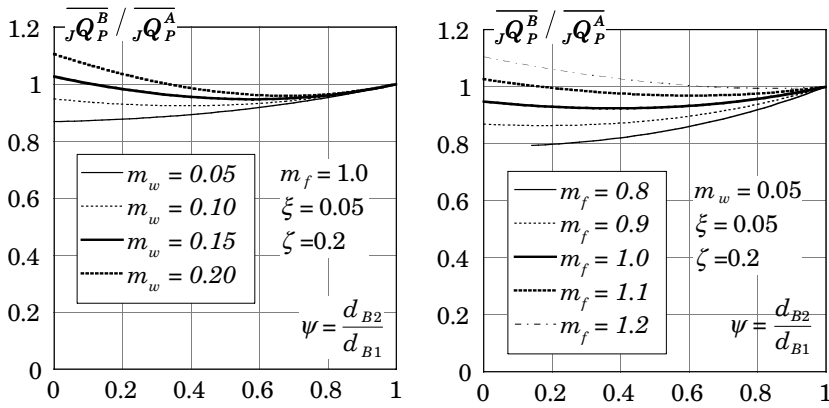


図9 パネルせん断耐力比

それぞれ以下ようになる。

$$jM_P^{A*} = \frac{1}{1 - \left(\frac{d_C}{2l_L} + \frac{d_C}{2l_R} + \frac{d_{B1}}{2h_T} + \frac{d_{B1}}{2h_B} \right)} jM_P^A \quad (36)$$

$$jM_P^{B*} = \frac{1}{1 - \left(\frac{d_C}{2l_L} + \frac{d_C}{2l_R} + \frac{d_{B2}}{2h_T} + \frac{d_{B2}}{2h_B} \right)} jM_P^B \quad (37)$$

式中の記号は図11を参照のこと。ここで1に比べて小さな数に関する次の近似式 $1/(1-x) \approx 1+x$ を適用すれば、式(27)、(28)式はそれぞれ次のようになる。

$$jM_P^{A*} \approx \left(1 + \frac{d_C}{2l_L} + \frac{d_C}{2l_R} + \frac{d_{B1}}{2h_T} + \frac{d_{B1}}{2h_B} \right) jM_P^A \quad (38)$$

$$jM_P^{B*} \approx \left(1 + \frac{d_C}{2l_L} + \frac{d_C}{2l_R} + \frac{d_{B2}}{2h_T} + \frac{d_{B2}}{2h_B} \right) jM_P^B \quad (39)$$

なお、上記の仮定を用いて算定した骨組の保有水平耐力は、よい近似解を与えることが文献6)で示されている。

7. 結

本論では左右の梁せいの異なる柱梁接合部パネル周りの釣合条件を示し、パネル剛性・耐力推定式について検討した。得られた結果を以下に列記する。

1. 段違いパネルのパネルモーメント、柱・梁・パネルの節点モーメントの算定式は、式中の d_{B1} をパネル全せい(最外縁ダイアフラム中心間距離)と定義することで標準型パネルの算定式と同じ式で表せる。また柱・梁・パネル相互の釣合方程式も同一式で表せる。
2. 平均せん断力 $j\bar{Q}$ と平均せん断変形角 $\bar{\gamma}$ を関係付ける弾性剛性は標準型パネル・段違いパネルとも同一算定式で表せる。
3. パネルの全塑性耐力を、パネルの塑性化によって生じる崩壊機構形成時のパネル節点モーメント、または、そのときのパネルの平均せん断力とし、これらをパネル全体が塑性化する機構と、パネルの一部と梁の一部が塑性化する機構を考慮して導いた。
4. 十字形部分架構を例に梁せい比が段違いパネルのせん断耐力や機構に及ぼす影響について考察した。

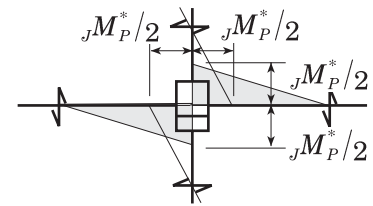


図10 せん断力の近似

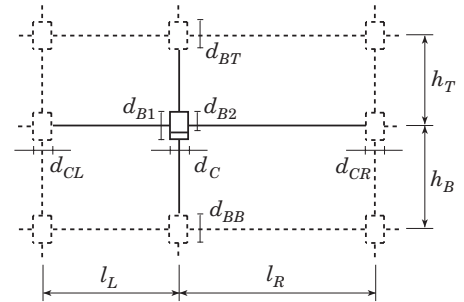


図11 骨組寸法

5. 一般的な骨組中の段違いパネルの節点塑性モーメントを算定するための近似式を示した。

謝辞

本研究は、平成9～10年度文部省科学研究費補助金・基盤研究B(2)「角形鋼管柱・段違い梁接合部パネルの力学性状」(No.09450210, 研究代表者:井上一朗)の助成を受けた。

参考文献

- 1) 中尾雅躬, 小佐野宏: 左右のはりせいの異なるH形鋼強軸交叉形柱はり接合部に関する研究, 日本建築学会関東支部研究報告集, pp.97-100, 1984.7.
- 2) 中尾雅躬, 小佐野宏: 左右のはりせいの異なるH形鋼強軸交叉形柱はり接合部に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.917-918, 1985.10.
- 3) 今井兼久, 平野道勝, 吉田幸弘, 西條誠, 渡辺富雄: 段差を有する柱はり接合部の力学的性状に関する研究 その1～3, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1203-1208, 1989.10.
- 4) 万木宏, 梅澤宣雄, 土井康生, 福知保長: 段差を有する柱・梁仕口部の耐力実験(その1.実験計画と実験結果, その2.解析および実験値), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1199-1202, 1989.10.
- 5) 今井兼久, 平野道勝, 吉田幸弘, 西條誠, 渡辺富雄: 段差を有する柱はり接合部の力学的性状に関する実験報告 左右の梁せいが等しい場合の試験体, 日本建築学会論文報告集, 425号, 1991.7.
- 6) 桑原進, 小川厚治, 井上一朗: 柱梁接合部パネルを考慮した部材間耐力比と保有水平耐力略算法, 鋼構造年次論文報告集, 第6巻, pp.357-362, 1998.11.
- 7) 熊野豪人, 桑原進, 井上一朗: 鋼構造柱梁接合部パネルの弾塑性挙動(その1.パネル幅厚比を変数とした角形鋼管柱梁接合部パネル十字架構荷重実験) 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.471-472, 1998.10.

*1 大阪大学大学院工学研究科建築工学専攻・助手
*2 大阪大学大学院工学研究科建築工学専攻・大学院生
*3 京都大学大学院工学研究科生活空間学専攻・教授

Dept. of Architectural Eng, Osaka Univ. / Research Associate
Dept. of Architectural Eng, Osaka Univ. / Graduate Student
Dept. of Architecture and Environmental Design, Kyoto Univ. / Professor