
増厚補強型柱梁接合部の弾塑性挙動と設計法

Elastic-Plastic Behaviour and Design of Beam-to-Column Connections Reinforced by Increasing Thickness of Columns

村上 行夫(Yukio Murakami) 金子 忠男(Tadao Kaneko)

要旨：

冷間成形角形鋼管柱とH形鋼梁接合部において、水平ダイアフラムを省略した増厚補強形式の柱梁接合部の実挙動と設計法について検討した。十字形部分架構モデルによる実大構造実験によって、以下の成果が得られた。(1) 増厚補強型柱梁接合部は安定した復元力特性と十分な変形性能を示す。(2) 接合部の局部降伏耐力は降伏線理論によって予測が可能。(3) 増厚部の長さは降伏線理論によって計算される降伏線の距離以上とする。また、FEM弾塑性パラメータ解析により、設計資料としての梁端の回転剛性評価式を提案した。

Synopsis：

With regard to connections of cold-formed square tube and beam, behavior and design of the connection reinforced by increasing thickness of column have been investigated. Sub-assembly tests were carried out under cyclic loadings. Test results show that the connection can absorb sufficient seismic energy and that yield strengths predicted by yield line theory agree well with experimentals. Parametric study using FE method as succeeded in obtaining empirical formulae and made it possible to estimate rotational rigidity of the connection.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

Elastic-Plastic Behaviour and Design of Beam-to-Column Connections Reinforced by Increasing Thickness of Columns



村上 行夫
Yukio Murakami
エンジニアリング事業
本部 鋼構造研究所建
築建材研究室



金子 忠男
Tadao Kaneko
エンジニアリング事業
本部 鋼構造研究所長
・工博

要旨

冷間成形角形鋼管柱とH形鋼梁接合部において、水平ダイアフラムを省略した増厚補強形式の柱梁接合部の実挙動と設計法について検討した。十字形部分架構モデルによる実大構造実験によって、以下の成果が得られた。(1)増厚補強型柱梁接合部は安定した復元力特性と十分な変形性能を示す。(2)接合部の局部降伏耐力は降伏線理論によって予測が可能。(3)増厚部の長さは降伏線理論によって計算される降伏線の距離以上とする。また、FEM弾塑性パラメータ解析により、設計資料としての梁端の回転剛性評価式を提案した。

Synopsis:

With regard to connections of cold-formed square tube and beam, behavior and design of the connection reinforced by increasing thickness of column have been investigated. Sub-assembly tests were carried out under cyclic loadings. Test results show that the connection can absorb sufficient seismic energy and that yield strengths predicted by yield line theory agree well with experimentals. Parametric study using FE method has succeeded in obtaining empirical formulae and made it possible to estimate rotational rigidity of the connection.

1 序 論

近年、中低層建築に冷間成形角形鋼管柱（以下、冷間コラム）を使用することが一般的となっている。

この冷間コラムと梁接合部の補強形式としては、一般に外ダイアフラム形式、通しダイアフラム形式（Fig. 1-(a)）の2形式が採用されている。しかし、外ダイアフラム形式は、意匠上の問題から採用されることが少なく、現在最も多く用いられている通しダイアフラム形式には、加工工数が多く溶接量も多いなどの問題がある。

一方、ダイアフラムを用いずに、柱の仕口部分の板厚を増すことによって補強すること（以下、増厚補強形式、Fig. 1-(b)）ができれば、加工工数の削減や施工の容易さなどの点から優れた補強方法となり、鉄骨加工の大幅な合理化が可能となる。

しかしながら、この増厚補強形式は、外力に対し板の面外曲げ耐力で抵抗するため、水平ダイアフラム補強形式の場合と比較して、耐力および剛性が低下することが予測される。そのため、設計に用いるにあたっては柱梁接合部の耐力と剛性を正確に評価する必要がある。

本報ではこれらの検討結果について述べる。

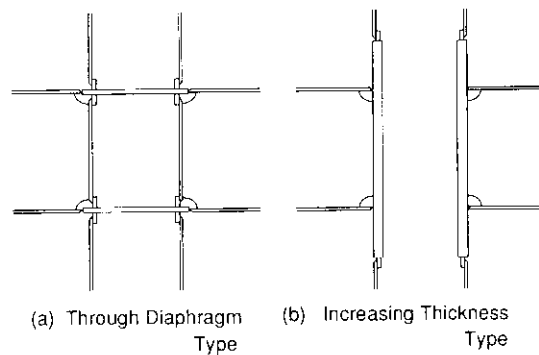


Fig. 1 Connection types

2 柱梁接合部部分架構実験

2.1 実験概要

試験体は、Fig. 2に示す形状・寸法で、角形断面柱の左右にH形梁を取付けた十字型部分架構試験体であり、実験変数はTable 1に示すように梁幅および増厚部板厚である。使用鋼材の機械的性質をTable 2に示す。荷重方法は、柱端上下をピンローラーで支持し、左右の梁先端に正負逆対称の繰返し漸増振幅による荷重を行った。

* 平成7年10月20日原稿受付

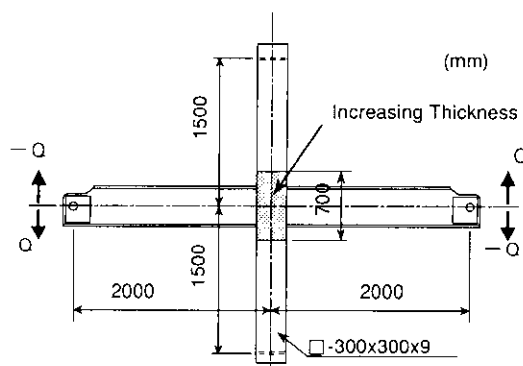


Fig. 2 Test specimens

Table 1 Parameter of sub-assembly tests (mm)

Specimens	Beam	Part of increasing thickness
No. 1	BH-400×200×6×12	□-300×300×19
No. 2	BH-400×250×6×12	□-300×300×19
No. 3	BH 400×200×6×12	□-300×300×32

Table 2 Mechanical properties of materials

Plate thickness (mm)	Yield point (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
6	285	446	25.4
12	290	456	31.2
19	283	446	31.7
32	271	454	34.8
19	429	516	32.6

2.2 実験結果

Fig. 3 に荷重と全体変形（梁先端鉛直変位）の関係を示す。履歴曲線はいずれも安定した紡錘形の復元力特性を示し、エネルギー吸収能力に富んだものであることが分かる。

Table 3 は、降伏荷重 P_y 、最大荷重 P_u 、パネル降伏荷重 P_{py} 、柱フランジ局部降伏荷重 P_{ny} の実験結果と、Fig. 4 に示す降伏線で形成される崩壊モード²⁾を仮定し、降伏線理論より求めた局部降伏荷

Table 3 Results of sub-assembly test and analysis (kN)

	Experimental strength				Analytical	
	P_y	P_u	P_{py}	P_{ny}	iP_{ny}	P_{ny}/iP_{ny}
No. 1	106	158	107	109	110	0.97
No. 2	129	186	129	126	132	0.96
No. 3	176	218	—	—	140	—

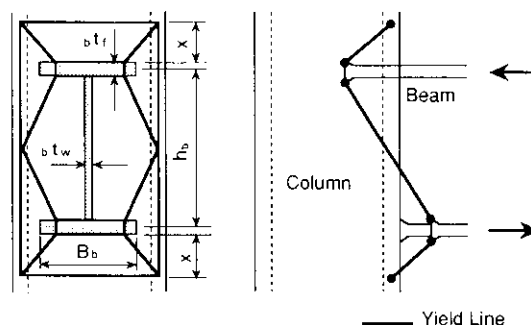


Fig. 4 Yield mechanism

重の計算値 P_{ny} をまとめたものである。各降伏荷重の実験値は累加経験則²⁾に基づく単調荷重形式の荷重-累積変形曲線より、General Yield Point 法を用いて求めた。

降伏線理論による局部降伏耐力の計算値は、柱フランジが面外に局部降伏する場合の実験値とほぼ一致し、両者の比をとってもよい対応を示していることから、降伏線理論による局部降伏耐力の予測は十分可能であることが分かる。

3 FEM による弾塑性解析

3.1 解析概要

解析モデルは、Fig. 5 に示すように、I 字型部分架構をモデル化したもので、形状および荷重条件の対称性を考慮し 1/2 モデルとした。解析パラメータには、Table 4 示すように、梁幅および増厚部板厚に加え、Fig. 6 に示す増厚補強部の梁フランジ面からの張り出し長さ l_k （以下、増厚部余長）を選定した。

3.2 解析結果

Fig. 7 に得られた荷重と全体変形の関係を実験値と比較して示

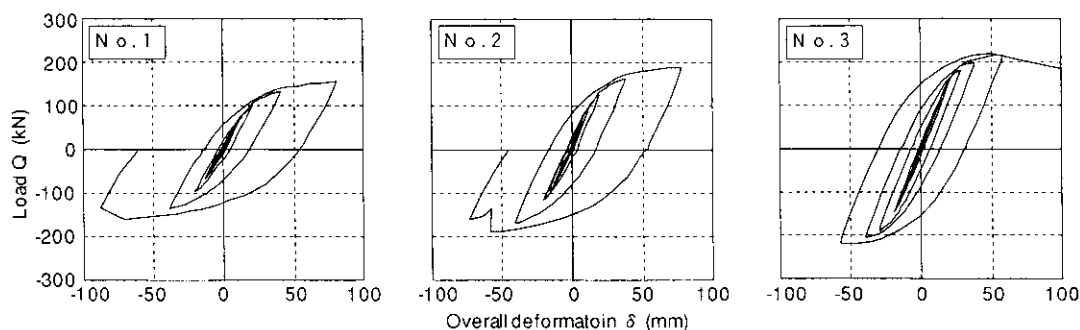


Fig. 3 Relations between load and overall deformation

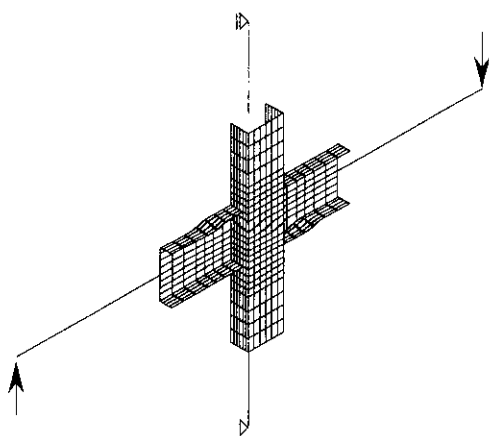
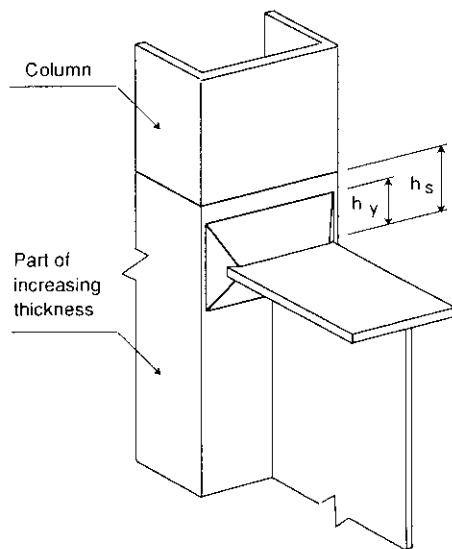


Fig. 5 Model for FEM

Table 4 Parameters of FEM analysis (mm)

Increasing thickness type	
Width of beam	150, 200, 250, 300
Thickness of increased plate	12, 16, 19, 22, 25, 28, 32
Extra length of increased plate, h_s	50, 100, 150, 200, 300
Through diaphragm type	
Width of beam	150, 200, 250, 300
Thickness of increased plate	9
Thickness of diaphragm	16


 Fig. 6 Extra length h_s

す。試験体 No. 1, No. 2 については、大変形領域で実験値が解析値の荷重をやや上回っているが、ほぼ実験結果をよく追跡している。実験における繰返し履歴曲線を単調荷重曲線に変換するときの誤差を考えると、全体的にみれば3体とも降伏耐力までは非常に精度で解析できると判断される。したがって FEM 解析により、増厚補強型接合部の弾性範囲の実挙動を精度よく予測することは可能であり、塑性域においてもほぼ妥当な近似を得られるものと考えられる。

Fig. 8 に増厚部余長と梁端の初期回転剛性の関係を示す。図中の縦軸は、梁端部初期回転剛性 K を通しダイヤフラム形式の梁端部

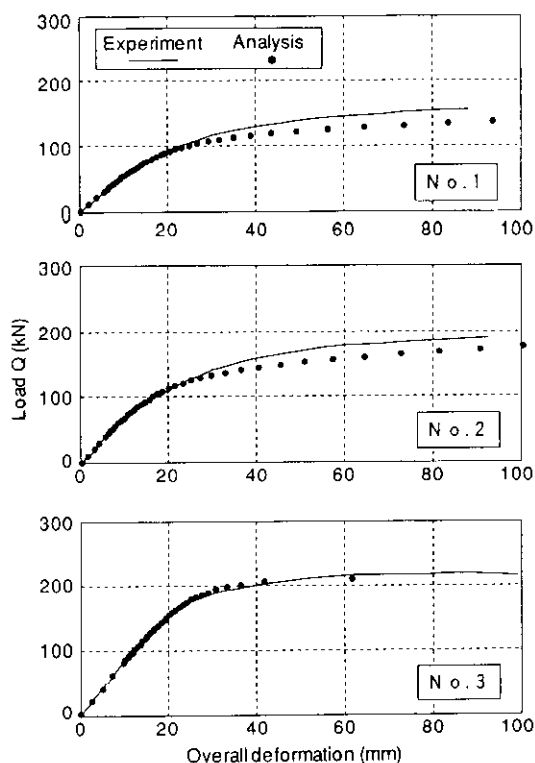
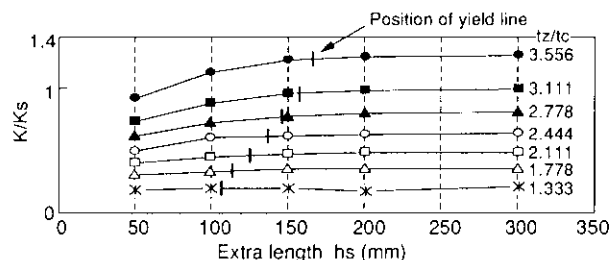


Fig. 7 Load vs. overall deformation curves


 Fig. 8 Relation between stiffness of connection and extra length (h_s , thickness of column; t_c , thickness of increasing part)

回転剛性 K_s で除して無次元化したものである。柱フランジと梁フランジの接合部モデルを降伏線理論により解析し、Fig. 6 に示す梁フランジ位置から降伏線までの距離 h_s を図中に縦棒で示したが、増厚量、梁幅ともに関係なく、増厚部余長 h_s が降伏線までの距離よりも長ければ、梁端の初期回転剛性には影響を及ぼさないことが分かる。また、降伏線理論は材の全塑性状態を仮定した理論であるが、仕口部が弾性の範囲内であっても、柱フランジの面外変形は降伏線位置が基準になっているといえる。

Fig. 9 に増厚部余長と仕口の局部降伏モーメントの関係を示す。縦軸は、仕口の局部降伏モーメント M_y を通しダイヤフラム形式の仕口部降伏モーメント M_{ys} で除して無次元化したものである。仕口の降伏モーメントも初期回転剛性同様、増厚部余長が降伏線までの距離以上であれば耐力低下の影響はほとんどないことが分かる。

したがって、増厚補強部の長さは、Fig. 6 に示すように、増厚補強部の梁フランジ面からの張出長さ h_s が降伏線までの距離 h_y 以上になるように決定すればよい。

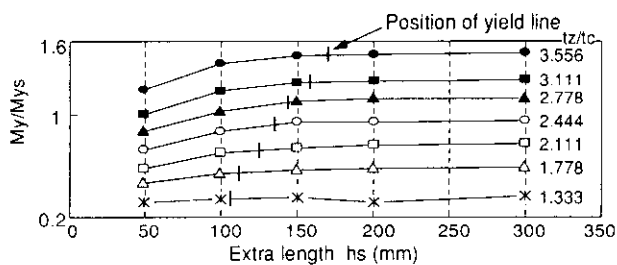


Fig. 9 Relation between strength of connection and extra length

4 骨組の設計法

4.1 仕口回転バネモデル

増厚補強型接合部を考慮したの骨組のモデル化は、Fig. 10 に示すように仕口の局部変形を回転バネと見做し、梁端部に挿入することにより行えるため、この回転バネの剛性を与える評価式を導出する。まず FEM パラメータ解析の結果から、剛性と耐力の関係を Fig. 11 のように整理する。縦軸は、梁端回転剛性 K を、(1) 式に示す接合部パネルの増厚前のせん断弾性剛性 K_0 を基準値として無次元化したものである。ここでは、パネルゾーンの力の釣合いには、梁および柱のせん断力を無視するという仮定を設ける。

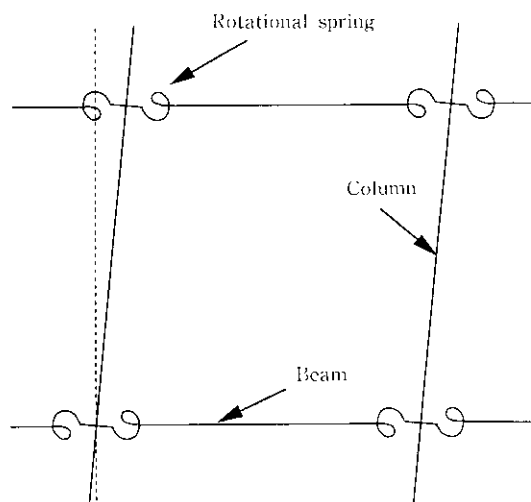


Fig. 10 Frame model with spring at the end of beams

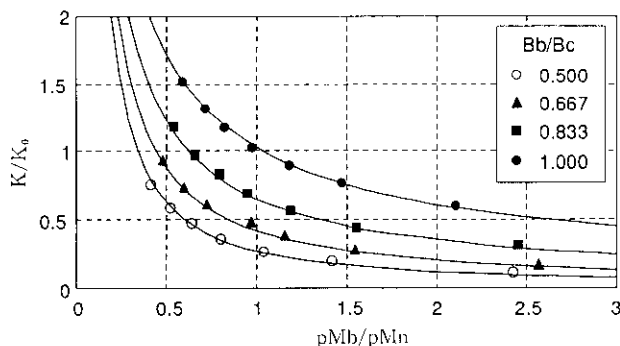


Fig. 11 Value of rotational stiffness

$$K_0 = V_0 \cdot G \quad (1)$$

$$V_0 = A_c \cdot h_b / 2$$

A_c : 柱一般部の断面積

h_b : 梁フランジの応力中心間距離

G : せん断弾性係数

また、横軸は梁の全塑性モーメント pM_b を、降伏線理論により得られる仕口部の局部降伏耐力 pM_n で除して無次元化したものである。このように整理することにより、梁降伏耐力と仕口局部降伏耐力の比と回転剛性を関係づけることを試みたことになる。

ところで、FEM 解析によると、通しダイアフラム形式の梁端回転剛性（パネルゾーンのせん断変形によるものが支配的）は、梁幅の影響によるばらつきはあるが、 $K = (0.7 \sim 0.8) K_0$ となった。つまり、一般的に行われている従来設計において、接合部の変形は剛と仮定されているが、その無視される接合部変形が過小評価されているおそれがある。

4.2 回転剛性評価式

Fig. 11 の関係を最小二乗近似すると (2) 式が得られる。

$$K/K_0 = a(pM_b/pM_n)^b \quad (2)$$

$$a = 1.197 (B_b/B_c)^{1.733}$$

$$b = -1.76 + (B_b/B_c)$$

B_b : 梁フランジ幅

B_c : 柱幅

上式により得られる結果を Fig. 11 に実線で示す。(2) 式は Table 4 に示すパラメータ範囲で経験的に得られた評価式であるが、同式によれば接合部諸元から回転剛性を算出することができ、あとは従来設計と同様の手順で設計を行う。

5 結 論

増厚補強型柱梁接合部について、十字型部分架構モデルによる実験および FEM 解析を行った結果、以下の結論が得られた。

- (1) 本接合部は、安定した復元力特性と十分な変形能力を示す。
- (2) 接合部の降伏耐力は、降伏線理論により予測が可能である。
- (3) 増厚補強部の長さは、降伏線理論によって計算される降伏線の距離以上とする。
- (4) FEM パラメータ解析により、回帰的に梁端部の回転剛性評価式を得た。

6 謝 辞

本研究の実施に際しては、千葉大学工学部建築学科森田耕次教授ならびに小山工業高等専門学校建築学科山本昇教授により終始親切なお指導を頂いた。ここに深甚の謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) K. Morita, N. Yamamoto, and K. Ebato: "Analysis on the strength of unstiffened beam flange to RHS column connections based on the combined yield line model," TUBULAR STRUCTURES, The Third International Symposium, (Finland), (1989), 164-171
- 2) B. Kato: "Beam-to-Column Connection Research in JAPAN," J. of the Structural Division, ASCE, Vol. 108, No. ST 2, (1982)