

耐震ジョイント

Development of Earthquake Resisting Joint

岡本 晴仁 建材センター 主席 工博
植木 卓也 建材センター 建材技術開発部
加村 久哉 基盤技術研究所 都市工学研究部 主任研究員
下川 弘海 基盤技術研究所 都市工学研究部 主任研究員

Haruhito Okamoto
Takuya Ueki
Hisaya Kamura
Hiroumi Shimokawa

兵庫県南部地震以降、柱梁溶接接合部の脆性破壊防止に対する多くの研究、改善がなされているが、鉄骨建築においては、未だ大きな課題となっている。この課題に対し、当社では、高耐震性商品として耐震ジョイントの開発を行った。本稿では、耐震ジョイントの概要を説明するとともに、耐震性能を検証するために行った実大実験の結果について報告する。

Although many studies and improvements to prevent brittle fracture of beam-to-column welded joint have been done since Hyogoken-Nanbu earthquake, solution of this problem is not yet found. NKK developed Earthquake Resisting Joint as high performance quake-proof joint concerning problem of brittle fracture. This paper describes the general description of Earthquake Resisting Joint and the test results of cyclic loading of full scale Earthquake Resisting Joint.

1. はじめに

Fig.1 に示すような鋼管柱と H 鋼梁の鉄骨建築では、工場にて、柱に設けられたダイアフラムにブラケットを溶接接合したものを製作し、梁は建設現場にてボルト接合されるのが一般的である。このような接合形式では、(1) 梁端の最も応力が大きくなる位置に溶接部が存在する、(2) この溶接部縁端に応力が集中する、(3) 溶接部縁端は溶接欠陥が発生し易い、などの要因から地震時に早期脆性破壊が発生し易いという欠点がある^{1),2)}。これら梁端溶接部の破壊の防止策として、鋼材の材質面での改善や、エンドタブの工夫、接合部の補強による工夫が試みられてきたが^{3),4)}、最善の方法が見つからないのが現状であり、鉄骨建築における大きな課題となっている。

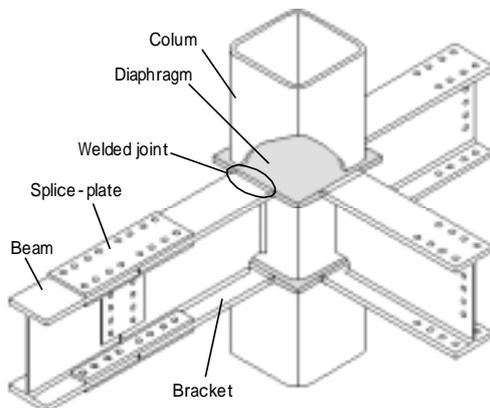


Fig.1 Conventional beam-to-column connection

当社では、上記問題を解決するため耐震ジョイントの開発を行った。耐震ジョイントは、接合部ディテールの改善により、脆性的破断が防止でき、塑性変形により高いエネルギー吸収能力が得られる柱梁接合構造である。

本稿では、耐震ジョイントの概要を説明するとともに、耐破断性と変形能力を把握するために行った実験結果について報告する。

2. 耐震ジョイントの概要

2.1 耐震ジョイントボルトタイプ

耐震ジョイントボルトタイプ(以下、TJB と略記する)の概略図を Fig.2 に示す。通しダイアフラムとブラケットのフランジが一体となっており、高力ボルトにより梁を

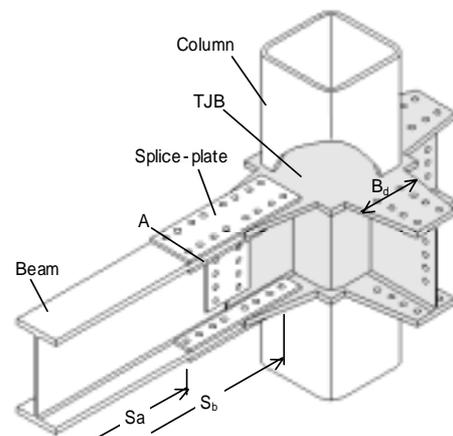


Fig.2 Schematic of TJB

取り付けるものである。ブラケットフランジは、柱側をモーメント勾配に従って広げることにより、ブラケットフランジのみで塑性ヒンジ発生位置の全塑性モーメントを伝達するサイズとなっている。スプライスプレートは塑性化しないよう、応力を伝達するのに十分な板厚とする。ブラケットもスプライスプレートもことから、最も塑性化しやすい部位は柱から最も遠い梁のボルト孔欠損部 (Fig.2 の A 部断面, 以下, この位置のボルトを第 1 ボルトと略記し, また, この位置を第 1 ボルト位置と略記する) となる。これらを一次および二次設計時での設計式としてまとめると以下のようになる。

(1) 一次設計時

$$Z_e \cdot \sigma_{yb} \geq M_e \quad \dots\dots(1)$$

ただし,

- Z_e : 梁のボルト孔欠損を考慮した断面係数
- σ_{yb} : 梁材の基準強度
- M_e : 梁の第 1 ボルト位置に作用しているモーメント

(2) 二次設計時

$$\frac{Z_{pe}}{Z_p} \geq \frac{\sigma_{yb}}{\sigma_{ub}} = YR_b \quad \dots\dots(2)$$

ただし,

- Z_{pe} : 梁のボルト孔欠損を考慮した塑性断面係数
- Z_p : 梁全断面の塑性断面係数
- σ_{ub} : 梁材の引張強さ
- YR_b : 梁材の降伏比 (= $\sigma_{yb} / \sigma_{ub}$)

このように、柱から最も遠い位置にある梁のボルト孔位置で設計する上においては、柱側フランジ幅 (Fig.2 の B_d) は、以下の条件を満足しなければならない。

$$B_d \geq \frac{Z_{pe} \cdot \sigma_{yb}}{t_d \cdot (H - t_d) \cdot \sigma_{yd}} \cdot \frac{S_b}{S_a} + g \cdot d \quad \dots\dots(3)$$

ただし,

- t_d : ブラケット板厚
- σ_{yd} : ダイアフラム材の基準強度
- H : ブラケットのせい
- S_a : 第 1 ボルト位置から梁中心までの距離
- S_b : 柱から最も近いボルト孔から梁中心までの距離
- g : ゲージライン数
- d : ボルト孔径

このような設計を行うと、破断の可能性のある断面は第 1 ボルト位置ボルト孔欠損断面となる。

2.2 耐震ジョイント溶接タイプ

耐震ジョイント溶接タイプ (以下, TJW と略記する) の概略を Fig.3 に示す。従来の通しダイアフラム形式とほとんど形状が変わらず、ダイアフラムと梁との溶接部が突出しているものである。

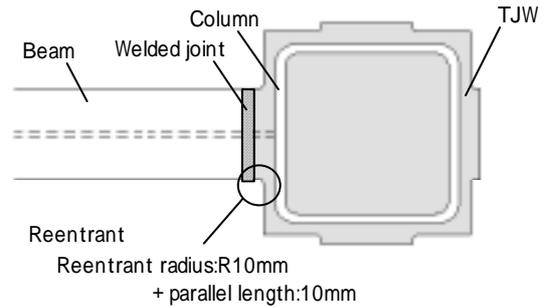


Fig.3 Schematic of TJW

Fig.4 に従来の通しダイアフラム形式 (従来型) と突出型の FEM 解析結果を示す。図は、梁の変形が降伏変形量の 4.4 倍 ($=4.4 \cdot \sigma_{yb}$) まで変形したときの相当塑性歪分布図である。従来型では、ダイアフラムと梁の溶接接合部の入隅部に大きな応力集中が生じる。一方、突出型では、この応力集中を避けるためにダイアフラム突出部の角部を 10mm 以上の曲率半径で R 加工している。この R 部には溶接線がないので、溶接による変形能力の低下はない。また、溶接部 (Fig.4 の Weld zone) は、R 加工部から 10mm 程離れているため、入隅による応力集中の影響はほとんど受けない。

さらに、従来型では、溶接の始末端は欠陥が発生しやすく、エンドタブを取り除くことも入隅部ということで困難であったが、TJW では直線部分に溶接線があるため、エンドタブの取り除きも比較的簡単に行える。

このように、TJW では溶接部への応力・ひずみ集中を緩和できるため、優れた変形性能が期待できるのに加え、現場溶接でのメリットも期待できる。

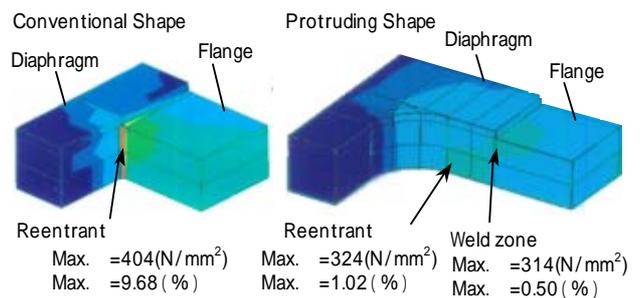


Fig.4 Results of FEM analysis

3. 変形性能実験

3.1 試験体概要

耐震ジョイントの変形性能を把握するため、実大での繰返し載荷実験を行った⁵⁾。試験体は、角形鋼管柱 BCP325: $500 \times 500 \times 25$ に 400N/mm^2 級 H 形鋼梁を取り付けるものとした。Table 1 に試験体一覧を、Fig.5 に試験体接合部形状を示す。試験体は、下記により決定した。

Table 1 Experimental parameters of specimen

Specimen No.	Beam size	Section modulus (cm ³)				Bolt layout	First bolt (mm)			Mechanical properties			Bending moment		
		Z	Z _p	Z _e	Z _{pe}		Diameter	Pitch	Guage	σ _y	σ _u	Y _R	M _b	M _s	
20YHD26B	H-600 × 199 × 9 × 18	2524	2865	1996	2320	Parallel	26	60	2	303	414	73	1.11	867	1511
20YHD22B				2077	2404		22	60	2	303	414	73	1.15	867	894
20YLD26B	H-600 × 200 × 9 × 22	2920	3280	2279	2619	Zigzag	26	60	2	270	429	63	1.27	887	1379
30YHD26B				3424	3871		26	45	2.75	343	458	75	1.08	1640	2135
30YHD22B	H-600 × 300 × 12 × 22	4290	4780	3761	4220	Zigzag	22	60	2	343	458	75	1.18	1640	2135
30YHD24B				3712	4170		24	60	2	343	458	75	1.17	1640	1459
30YLD26B				3424	3871		26	45	2.75	266	415	64	1.26	1270	2135
20YHW	H-600 × 199 × 9 × 18	2524	2865	-	-	-	-	-	-	303	414	73	-	867	-
30YHW	H-600 × 300 × 12 × 22	4290	4780	-	-	-	-	-	-	343	458	75	-	1640	-

Z: Section modulus of beam, Z_p: Plastic section modulus of beam, Z_e: Effective section modulus of beam (reduction due to bolt hole), Z_{pe}: Effective plastic section modulus of beam (reduction due to bolt hole), σ_y: Yield stress (N/mm²), σ_u: Tensile strength (N/mm²), Y_R: Yield ratio (%), M_b: Full plastic moment of beam on the column side (kN · m), M_s: Sliding moment of bolted connection (kN · m)

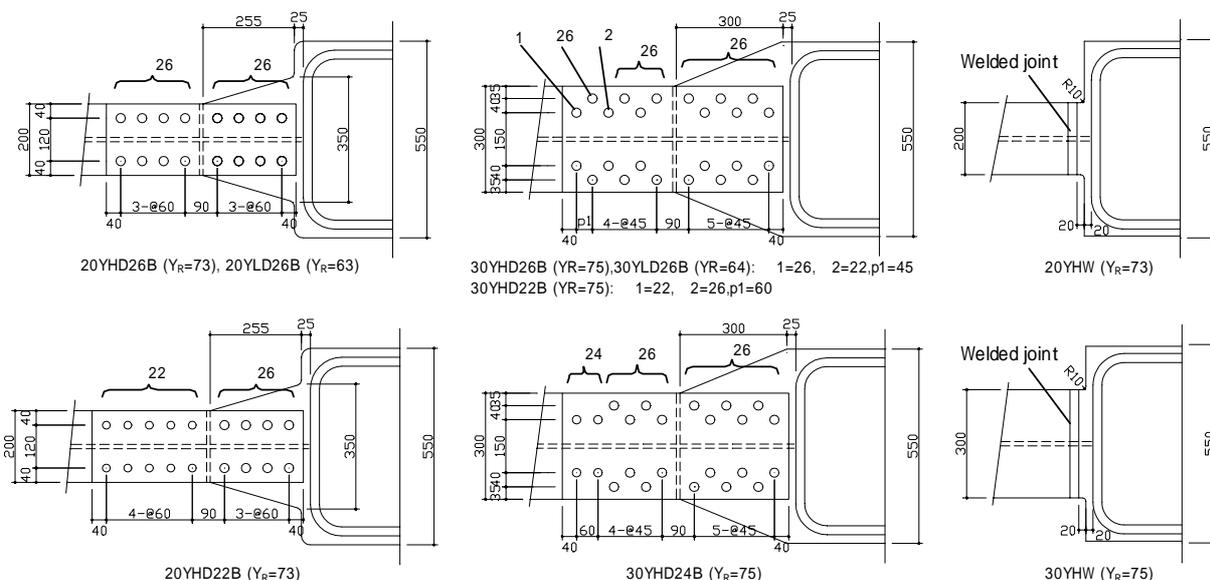


Fig.5 Shapes of specimen joint

(1) TJB 試験体

TJB では、第 1 ボルト位置がクリティカル断面となる。この場合、梁の変形能力は、下式で表わされる接合部係数 α_j に依存する。

$$\alpha_j = \frac{Z_{pe} \cdot \sigma_{ub}}{Z_p \cdot \sigma_{yb}} = \frac{Z_{pe}}{Z_p \cdot YR_b} \quad \dots\dots(4)$$

以上から 梁のボルト孔欠損を考慮した有効断面係数と、梁母材の降伏比が変形能力に大きく影響すると考えられる。そこで、第 1 ボルトの孔径および配置と、梁の降伏比および梁幅を実験パラメータとした。

なお、孔径 26 には M24、24 には M22、22 には M20 の高力ボルトを使用し、20YHD22B、30YHD24B 試験体の接合部摩擦係数は $\mu = 0.5$ 、その他の試験体については、摩擦面に溶射加工を施すことにより $\mu = 0.7$ とした。

(2) TJW 試験体

TJW では、(1) 入隅部の R の大きさ、(2) 溶接線を入隅部からいくら離すかによって溶接部への応力集中が変化し、変形能力が決定されると考えられる。入隅部の曲率半径 R をパラメータとした FEM 平面応力弾性解析を行った結果、

従来型の入隅部 R を 1mm とした場合に対して、R 6mm で R 止まりから 10mm 程度離れている位置では、入隅による応力集中の影響はほとんど受けないことがわかった。そこで、曲率半径 R=10mm、平行部=10mm を選定し、改良スカルップをもつ梁幅を変化させた試験体 2 体を用意した。

3.2 荷重方法

実験は、Fig.6 に示すように、試験体柱端を固定し、梁先端に荷重を負荷するものとした。荷重は、正負交番繰り返しの静的荷重とし、 $p, 2p, 4p, \dots$ と順に 2 ループずつ振幅を増大させ、最終的に破断が生じるまで荷重を行った。ここで、 p は柱側の梁端が全塑性状態に達するときの荷重点変位である。

3.3 実験結果および考察

Table 2 に実験結果一覧を示す。表中の破断モードは、Fig.7 に示す破断位置（破断線）を示す。

TJB の梁幅 200mm 試験体および 30YHD24B 試験体では、第 1 ボルト孔縁端から破断に至り（破壊モード A）、梁幅 300mm 試験体（30YHD26B を除く）では、柱から 2 番目に遠い梁のボルト孔縁端の破断から第 1 ボルトへ向けて

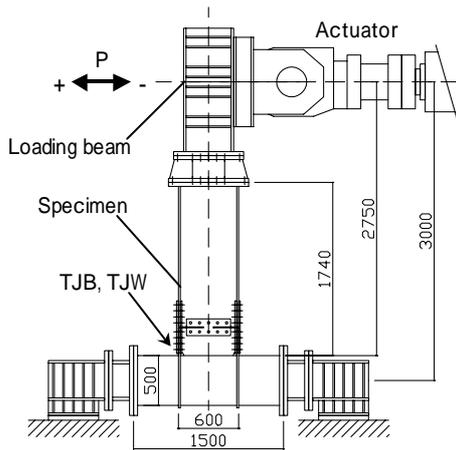


Fig.6 Diagram of test setup

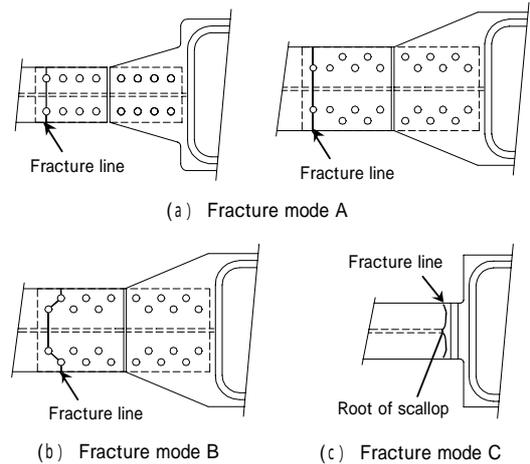


Fig.7 Fracture mode

Table 2 Experimental results and ϵ_e

Specimen No.	Max. Load (kN)			@Fractur		Deformation capacity	
	cP_u	eP_u	eP_u/cP_u	Cycle	Mode	ϵ_e	Cycle
20YHD26B	429	509	1.19	10 p×1+	A	129	8 p×2-
20YHD22B	457	538	1.18	12 p×1+	A	170	10 p×2-
20YLD26B	501	549	1.10	12 p×1+	A	214	10 p×2-
30YHD26B	831	893	1.07	8 p×2-	B	108	8 p×2+
30YHD22B	906	930	1.03	11 p×1-	A	158	11 p×1+
30YHD24B	895	990	1.11	12 p×2+	B	189	12 p×1-
30YLD26B	752	852	1.13	10 p×2-	B	219	10 p×2+
20YHW	314	398	1.27	9 p×2-	C	147	9 p×2+
30YHW	636	735	1.16	9 p×2+	C	103	9 p×1-

cP_u : Calculated value of max. load, eP_u : Experimental value of max. load
 ϵ_e : Cumulative ductility factor which was calculated using absorbed energy

き裂が進行し破断に至った(破断モード B)。TJWでは、スカルップ底にき裂が発生し破断に至った(破断モード C)。すべての試験体で、 $8 p$ 以上の大きな変形性能を保有する結果となった。

(a) TJBの結果

Fig.8 (a)~(d)にTJBの実験結果例として、梁幅300mm試験体の復元力特性を示す(p および梁の全塑性モーメント M_p で無次元化)。

30YHD26B($1=26, 2=22$)と30YHD22B($1=22, 2=26$)の比較から、30YHD22Bの方が梁の有効断面が大きくなるため、破断までの変形量が30YHD26Bより大きい結果となった。

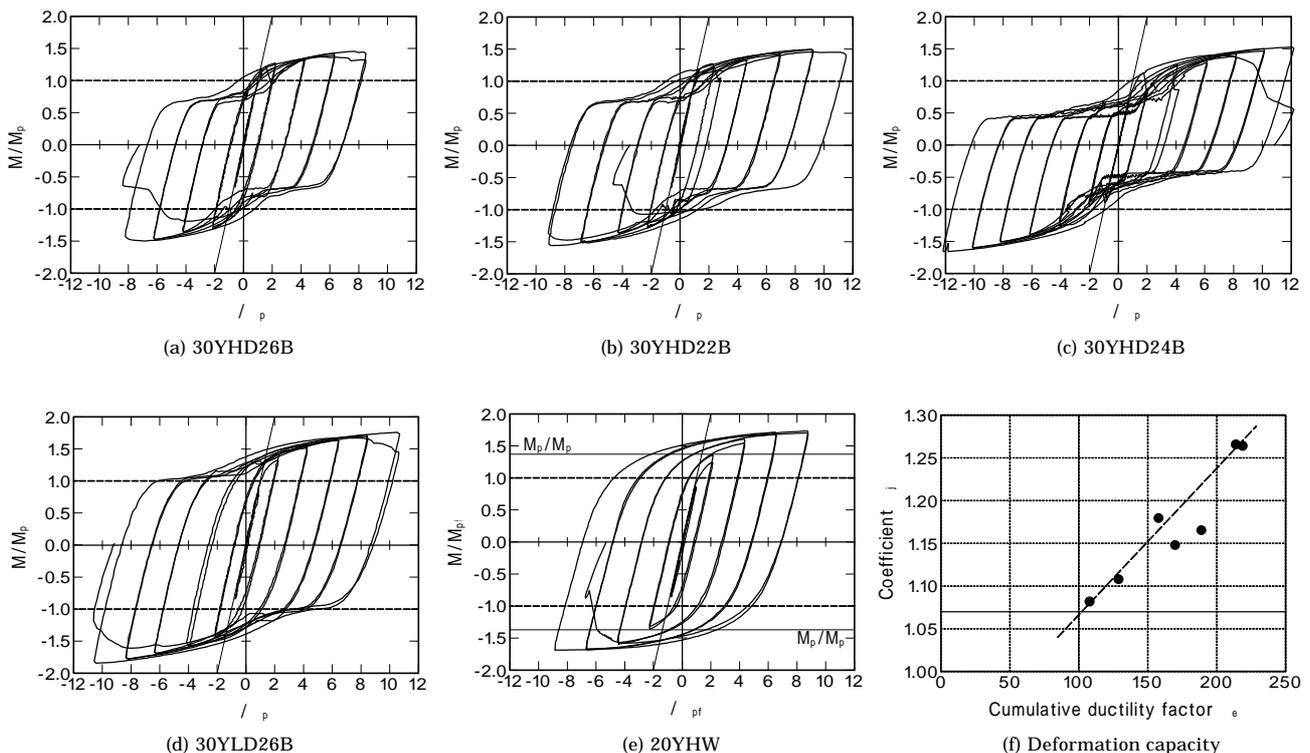


Fig.8 Experimental results of TJB and TJW

第1ボルトの配置工夫により、さらに有効断面を大きくした30YHD24Bでは、破断変形量 $12 p$ と大きな値を示した。

梁に低降伏比材($Y_R=64\%$)を用いた30YLD26Bは、高降伏比材($Y_R=75\%$)を用いた30YHD26Bより2サイクル多い $10 p$ まで安定した履歴挙動を示した。降伏比が小さい程、変形能力、耐力上昇が大きいことがわかる。

梁幅200mmの試験体についても、同様の傾向を示した。

(b) TJWの結果

Fig.8 (e)の実験結果例として、梁幅200mm試験体の復元力特性を示す(p および梁フランジの全塑性モーメント M_{pf} で無次元化)。

20YHWの試験体は降伏比が低く、30YHWと比較して耐力上昇は大きいものの、どちらの試験体も $8 p$ まで安定した履歴挙動を示す結果となった。最終的にはスカラップ底を起点として梁フランジが破断した。

破断後の試験体観察から、溶接接合部の溶接止端部にわずかなき裂が確認できるものの、破断に影響するような大きさではなく、突出型とした効果が確認できた。

既往の実験³⁾で突出部の曲率半径 $R=10\text{mm}$ 、平行部 $=5\text{mm}$ とした結果(破断変位 $5 p$ 程度、通常を通しダイアフラム形式と比較して倍以上の変形能力が得られている)と比較すると、溶接条件は若干異なるものの、変形能力は大幅に向上している。これは、わずか 5mm の差であるが、平行部 $=10\text{mm}$ として溶接線を入隅部から遠ざけた影響が大きいと考えられる。

4. 塑性変形能力

Table 2に各試験体の累積塑性変形倍率 μ_e を示す。 μ_e は、破断前のループまでの累積ひずみ吸収エネルギーから算定した。いずれの試験体も $\mu_e > 100$ を示し、梁部材に要求される累積塑性変形倍率 $20 \sim 40$ ⁶⁾と比較してはるかに大きな変形能力が確保できることがわかる。

TJBについては、変形性能を決定する因子として、接合部係数 j が挙げられる。そこで、Fig.8 (f)に j と μ_e の関係を示す。 j と μ_e はほぼ比例的な関係となり、接合部係数 $j \geq 1.1$ とすれば、累積塑性変形倍率100以上を確保できることがわかる。

5. まとめ

梁端溶接部の破壊の問題は、これまで材料や溶接の問題として扱われるケースが多かった。当社では、この問題に対し、接合ディテール面での解決を試み、耐震ジョイントボルトタイプ(TJB)および耐震ジョイント溶接タイプ(TJW)の開発を行った。

耐震ジョイントの性能を把握するために行った実大繰り返し載荷実験の結果、(1)梁端の脆性的な破断が生じず、従来の溶接接合形式と比較して、変形能力が格段に向上する、(2)降伏比が小さいほど変形能力、耐力上昇が大きい、

(3)接合部係数 $j \geq 1.1$ とすれば、累積塑性変形倍率100以上を確保できる、など従来の3倍以上の変形性能を有することが確認できた。

経済的には、TJBでは、ダイアフラムの歩留りが低下するが、(1)従来のブラケット形式に比べ仕口加工費が削減できる、(2)ブラケットの出寸法が短く運送効率が向上する、(3)新しい基準法での溶接部食違いの問題(柱梁継手では、食違いが発生しないように施工しなければならない)が解消される、などのメリットがある。TJWでは、通しダイアフラムと梁フランジの溶接干渉が避けられるため、四周出寸法は 20mm に抑えられ、突出寸法も 20mm 程度のため、従来構造と比較して大幅なコスト増にはならない。

柱が角形鋼管、梁がH形鋼からなる鉄骨ラーメン構造は、低層から高層建築まで、非常に多く用いられている。現在、耐震ジョイントを適用した建物が建設され始めており(Photo 1)、今後、建物の耐震安全性の観点からも、耐震ジョイントの利用が期待される。



Photo 1 Example of execution

参考文献

- 1) 日本建築学会近畿支部鉄骨構造部会. 1995年兵庫県南部地震鉄骨造建物被害調査報告書.
- 2) 日本建築学会. 兵庫県南部地震における鋼構造物の被害と教訓. 1996年7月.
- 3) 岡本晴仁ほか. 柱梁接合部の破断性状 - その3. 通しダイアフラム形状の改良効果 -. 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), C-1, pp.699-670, 2000年9月.
- 4) 日本建築学会近畿支部鉄骨構造部会. 通しダイアフラム形式で角形柱に接合されるH形鋼梁の塑性変形能力に関する実大実験報告書. 1997年7月.
- 5) 植木卓也ほか. 柱梁接合ディテールの改善による変形能力の検証. 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸). No.22346, 2002年8月.
- 6) (旧)建設省建築研究所. (社)鋼材倶楽部 耐震性能共同研究. 数値解析研究会報告書, 平成7年7月.

<問い合わせ先>

建材センター 建材技術開発部

Tel. 03 (3217) 2871 植木 卓也

E-mail address: Takuya_Ueki@ntsgw.tokyo.nkk.co.jp

基盤技術研究所 都市工学研究部

Tel. 044 (322) 6386 下川 弘海

E-mail address: hsimokaw@lab.keihin.nkk.co.jp