

特集：建築鉄骨

耐震安全性向上のための柱梁溶接接合部梁端ディテールの提案

信州大学
中込 忠男

1. はじめに

阪神淡路大震災において、建築鉄骨の梁端スカラップ部において脆性破壊が数多く見られた。その後、多くの研究が行われ、梁端ディテールの提案も数多くなされている。それらを比較検討して、変形能力が充分あるディテールを確認した。ノンスカラップと改良型スカラップでは変形能力に多くの差があることが確認された。改良スカラップを採用すれば、以前から使われていた従来型のディテールに比べて変形能力が良くなるものの、ノンスカラップと比べると十分な変形能力に達しているとは言い難い。一方、実施工を見てみると、ノンスカラップ工法を採用している建物は半数前後であり、全数をノンスカラップにして変形能力を確保することが、耐震上重要である。筆者らは各種のディテールの実大実験を行い比較検討して、推奨ディテールを取りまとめた³⁾。提案するディテールは特に複雑な手順とはならず、改良スカラップ工法と同様同等に容易に溶接できるものである。

2. 工場ノンスカラップ工法の推奨ディテール

2.1 実験概要

2.1.1 試験体

試験体は工場溶接接合形式による柱梁溶接接合部をモデル化した実大ト形試験体(図1に示すような試験体を建築業界では「ト型試験体」と呼ぶ)とし、柱部材には熱間成形角型鋼管(STKR490)または溶接組立形断面材(SN490B)を、梁部材にはSM490A材の溶接組立H形断面梁(以下、BHと称す)または圧延H形鋼(以下、RHと称す)を用いた。試験体一覧を表1に、試験体形状と試験方法を図1に示す。実験パラメータは梁端ディテールの差異であり、具体的には梁部材が先組み(もしくはRH)か、同時組みかの組立て順序、ダイアフラム形式の違い、スカラップもしくはノンスカラップ形状の違い、それに伴う裏当て金の形状などを変化させている。なお、本論文において、通しダイアフラムで梁ウェブに断面欠損がダイアフラムより柱側にある試験体(BH8、RH5)はノンスカラップと称する。また、目違いについても、実験パラメータの一つとした。梁端ディテールの詳細を図2に示す。BH4~BH6、BH11、BH12はウェブと裏当て金周辺を溶接し、BH9~BH13はウェブとダイアフラム、柱フランジの間を溶接した。また、裏当て金形状を図3に、目違いの位置寸法を図4に示す。ダイアフラム厚は、内ダイアフラム形式において梁フランジと同厚、通しダイアフラム形式において2サイズアップとした。エンドタブにはスチールタブを使用した。

なお、溶接部の内部欠陥の検査は、日本建築学会「鋼構造建築溶接部の超音波探傷検査基準・同解説」¹⁾に従って全数行い、合格となっている。梁フランジのシャルピー衝撃試験における0℃の吸収エネルギーはBH材で33J、RH材で18Jと充分低いものを採用した。梁部材の機械的性質及びミルシート値を表2に、シャルピー衝撃試験結果を表3に示した。

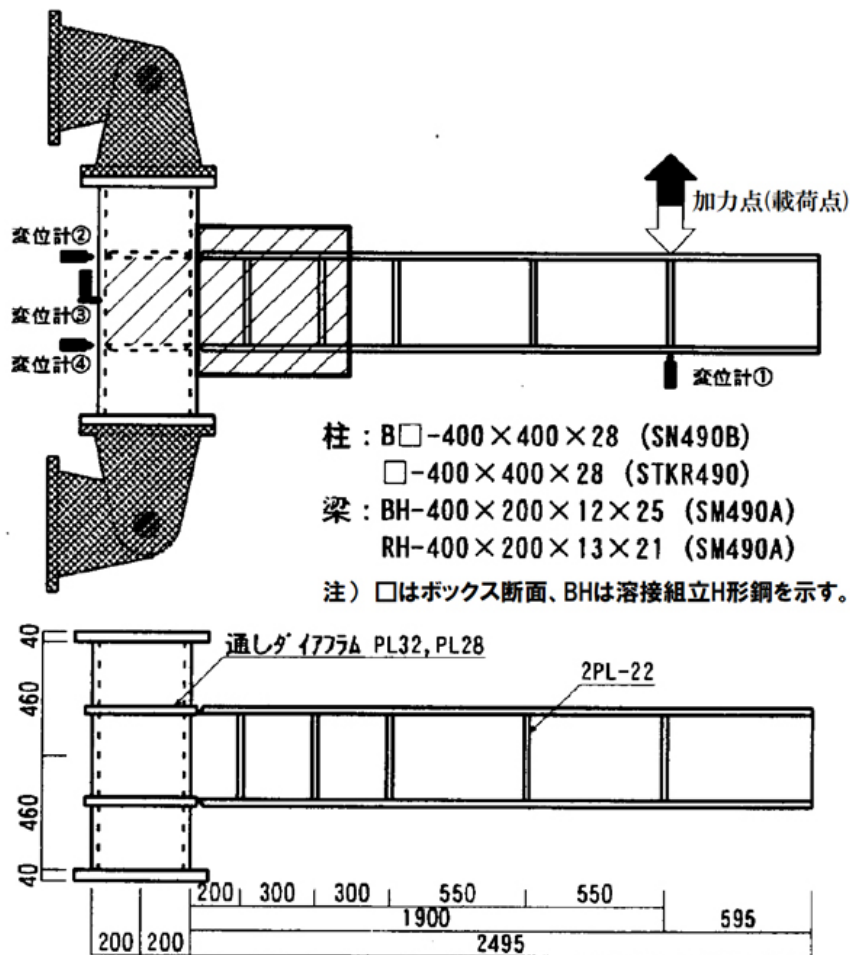


図1 試験体形状と試験方法

表1 試験体一覧

試験体名	梁部材のタイプ	ダイヤフラム	スカープの有無と形状	裏当て金	目違いの有無				
BH1	BH (溶接組立H形断面梁)	先組み 内ダイヤフラム (t=25mm)	有	従来型	平板	無			
BH2			有	改良型					
BH3			無	—					
BH4			無	—					
BH5			無	—					
BH6			無	—					
BH7		同時組み	通しダイヤフラム (t=32mm)	有	従来型	平板	有*		
BH8				有	四角	フレット密着		無	
BH9				有	—	—		無	
BH10				無	ガウジング	—		無	
BH11				無	—	—		1/2カット	有*
BH12				無	—	—		—	無
BH13				無	ガウジング	—		無	
RH1	RH (圧延H形鋼)	内ダイヤフラム (t=22mm)	有	改良型	平板	無			
RH2			有	—	フレット密着				
RH3		無	ストレートカット	—					
RH4		有	改良型	平板					
RH5		無	四角	フレット密着	有*				

(注)* : 図4参照

表3 シャルピー衝撃試験結果

部位		vEs (J)	vEo (J)	vTre (°C)	vBo (%)	vTrs (°C)
BH	溶接金属	216	108	-0.1	38.5	-9.3
	HAZ	227	68	22.1	59.2	10.1
	母材	260	33	30.2	88.5	33.8
RH	溶接金属	196	152	-28.1	29.1	-17.5
	HAZ	201	148	-10.6	27.1	-9.9
	母材	174	18	21.9	87.9	23.6

vEo : 0°Cシャルピー吸収エネルギー、vBo : 0°C脆性破面率

2.1.2 加力（载荷）方法

図1に示すように試験体の柱両端をピン支持とし、梁端に取付けたアクチュエーターを用いて载荷を行った。加力は変位制御とし、梁全断面を有効として得られる全塑性モーメント時の加力点水平変形量を $c\delta p$ (c :計算値, δ :変形, p :全塑性耐力) 基準として $1c\delta p$ を1回、その後 $2c\delta p$ から2回ずつ試験体が破壊するまで正負交番繰返し静的载荷とした。载荷計画を図5に示す。試験温度は0°Cとした。

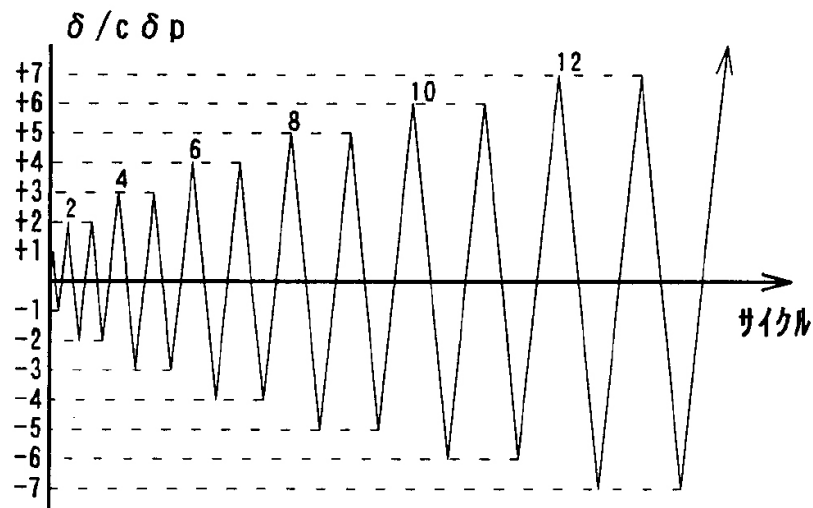


図5 载荷計画

2.2 実験結果

実験結果一覧を表4に示す。累積塑性変形倍率は、最大耐力までの全履歴ループが吸収したエネルギーの累積による $E\eta A$ (E :エネルギー, η :弾性エネルギーの2倍で除した値, A :総和) と、スケルトン曲線から求めた吸収エネルギーによる $E\eta S$ (S :スケルトン) を併記した。スケルトン曲線及び $E\eta S$ の算出方法を図6に示す。なお、 $c\delta p$ は cPp (P :全塑性耐力) 時における梁部材の曲げ変形量とせん断変形量の和である。本研究では、変形能力を評価する指標として $E\eta S$ を用いて以下の検討を行うこととし、 $E\eta A$ は他研究との比較のため参考までに示す。また、脆性破壊という現象を対象としているため実験結果にはバラツキも考えられるが、各パラメータの優劣には信頼性が得られると考えた。荷重 P - 変形 δ 関係を図7に示す。全ての試験体で P - δ 関係は正側・負側ともに安定した紡錘形を描いており、同ループ内で1回目より2回目、正側より負側の方が荷重は大きくなっている。

表 4 実験結果

試験体名	計算値		実験値										破壊 サイクル	破壊 タイプ
	cPp (kN)	cδp (mm)	ePu (kN)		eδu (mm)		α		Eηs		EηA			
			+	-	+	-	+	-	+	-	+	-		
BH1	404	13.7	594	-611	72.9	-60.8	1.47	1.51	7.6	6.8	28.8	31.3	-10	C
BH2			591	-632	69.5	-80.2	1.46	1.57	7.7	8.4	32.0	33.6	+11	A'
BH3			600	-640	74.0	-74.4	1.49	1.58	8.7	9.6	36.7	33.4	+11	A'
BH4			592	-628	61.2	-60.5	1.47	1.56	5.9	6.7	27.3	24.8	+10	D
BH5			633	-681	86.7	-86.7	1.57	1.69	12.9	12.0	63.5	65.7	+14	A
BH6			638	-673	100.3	-86.7	1.58	1.67	15.0	11.6	70.6	71.3	-14	A
BH7			553	-543	48.0	-34.6	1.37	1.34	3.1	2.1	7.5	7.5	-6	A'
BH8			600	-622	73.4	-60.4	1.49	1.54	8.4	6.6	29.8	27.6	-10	A'
BH9			627	-655	86.6	-73.5	1.55	1.62	11.8	9.6	49.6	50.2	-12	A
BH10			650	-689	86.1	-86.0	1.61	1.71	12.7	11.2	61.0	63.9	-13	A
BH11			639	-668	74.2	-73.4	1.58	1.65	10.3	9.1	40.9	44.8	-11	B
BH12			653	-688	85.6	-86.8	1.62	1.70	14.2	12.1	62.3	57.6	-13	A
BH13			655	-695	86.5	-86.2	1.62	1.72	14.6	12.7	62.9	69.8	-13	A'
RH1	439	16.1	527	-523	61.9	-61.8	1.20	1.19	4.4	3.4	12.7	13.0	-7	C
RH2			542	-570	78.0	-61.6	1.23	1.30	5.1	4.5	18.1	18.2	-8	A'
RH3			555	-559	61.5	-60.8	1.26	1.27	4.4	4.4	13.0	14.8	-7	A'
RH4			557	-562	76.3	-60.1	1.27	1.28	6.2	4.3	19.2	18.5	-8	A
RH5			572	-605	76.3	-69.6	1.30	1.38	6.4	6.2	19.5	22.6	-8	B

- cPp : 梁部材の全塑性耐力(計算値)
- cδp : cPp時の曲げ変形量とせん断変形量の和(計算値)
- ePu : 最大耐力(実験値)
- eδu : ePu時変形量(実験値)
- α : 耐力上昇率(=ePu/cPp)
- WA : 全履歴ループによる累積塑性ひずみエネルギー
- Eηs : スケルトン曲線による累積塑性変形倍率
- EηA : 全履歴ループによる累積塑性変形倍率(=WA/cPp×cδp)
- 破損側サイクル

注)BH4試験体は溶接欠陥(銀点)より早期に破断している。

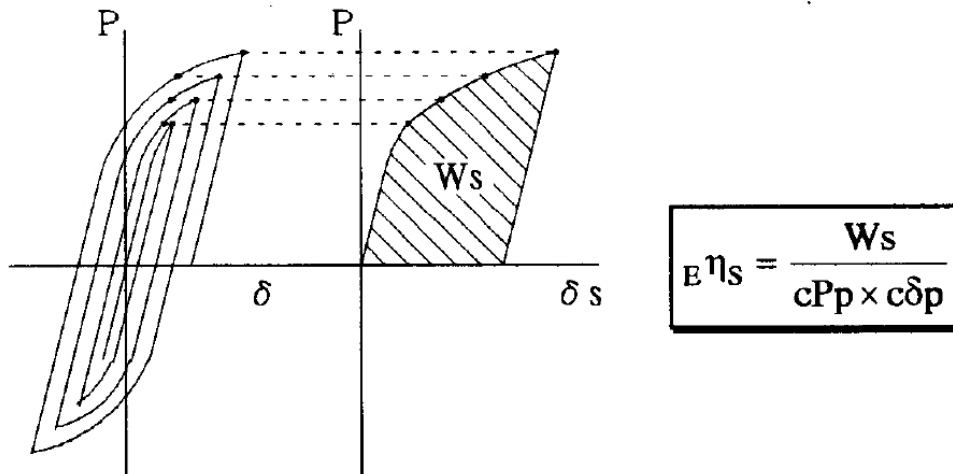


図 6 スケルトン曲線・Eηsの算出

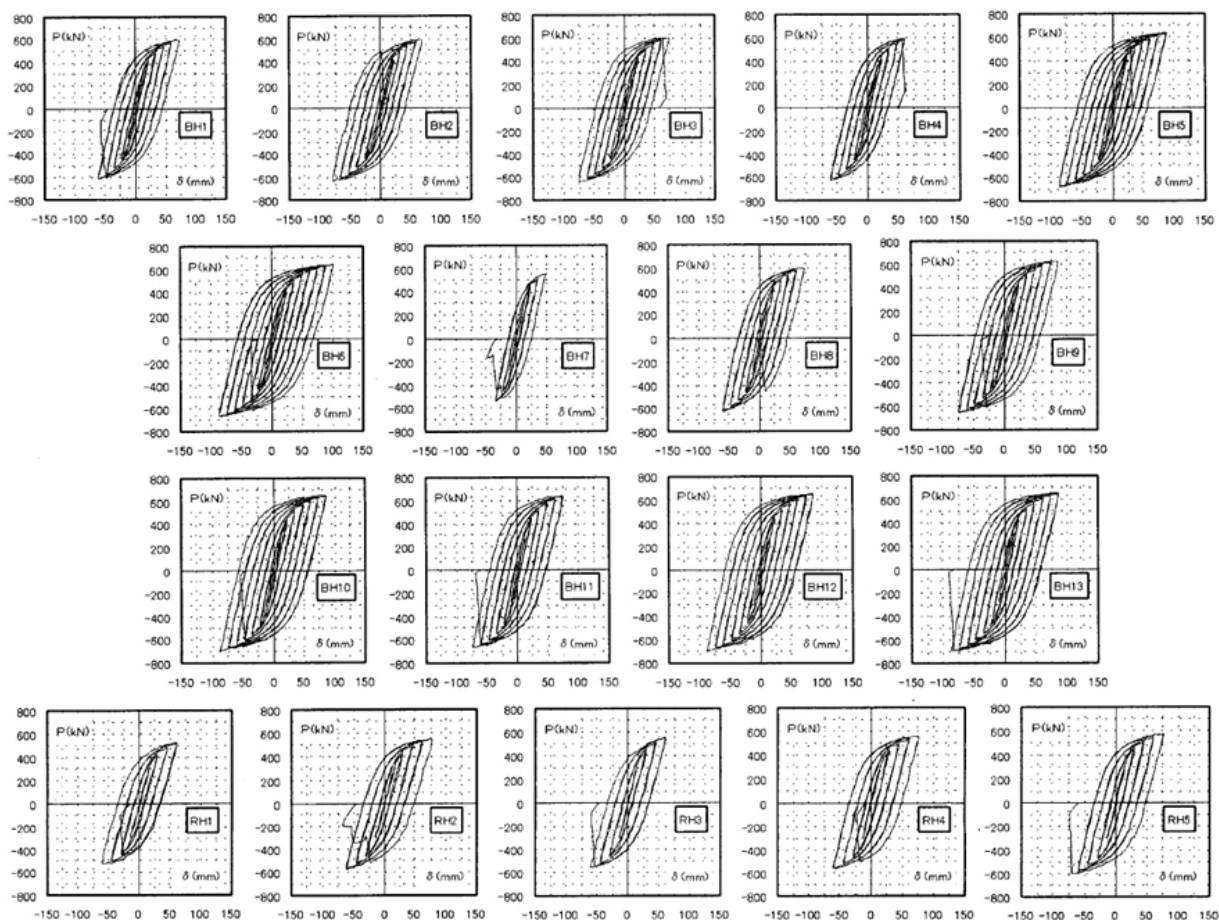


図7 荷重 P-変形 δ 関係

2.3 考察

2.3.1 梁部材が BH (溶接組立 H 形断面梁) の場合

図8に耐力上昇率 α -累積塑性変形倍率 $E\eta S$ の関係を示す。内ダイアフラム形式では、 $E\eta S$ は従来型スカラップ < 改良型スカラップ < ノンスカラップの順に大きく、ノンスカラップが変形能力に優れている。ただし、ノンスカラップ BH4 は溶接欠陥に起因して破壊したため図8には標記していない。

通しダイアフラム形式でも BH8 はやや劣っているが、ノンスカラップ試験体が $\alpha (=cPu/cPp)$ 、 $E\eta S$ とともに大きな値を示し、変形能力が優れている。従来型スカラップ BH7 は、 $E\eta S$ が最も小さい。ノンスカラップ BH8 は、従来型スカラップ BH7 に比べて変形能力が優れているが、BH9、BH11 と比べて α 、 $E\eta S$ とともに小さい値を示した。

図9に BH7、BH8、BH9 の梁ウェブにおける $\delta/c\delta p=3.0$ までのピーク時におけるひずみ分布を示す。ここでのひずみはダイアフラム小口より 50mm の位置に貼付したひずみゲージの値を用いた。従来型スカラップ BH7 ではフランジ表面、裏面で引張時のひずみが大きく、ウェブのフランジ近傍ではひずみが小さい。それに対し、ノンスカラップ BH9 ではウェブのフランジ近傍のひずみが大きく、曲げモーメントの伝達がスムーズにできていることが伺える。一方、ノンスカラップ BH8 ではウェブのフランジ近傍のひずみが BH7 に比べて大きく、BH9 に比べて小さい。また、フランジ表面、裏面ではひずみが若干大きく BH7 に類似した傾向が見られる。よって、ウェブに目違いのような断面欠損が存在する場合は従来型スカラップに類似した影響をフランジ幅端部にもたらし、変形能力に対して不利に働く場合があると考えられる。また、通しダイアフラム形式では内ダイアフラム形式より α が $E\eta S$ に比例する傾向が顕著に見られる。

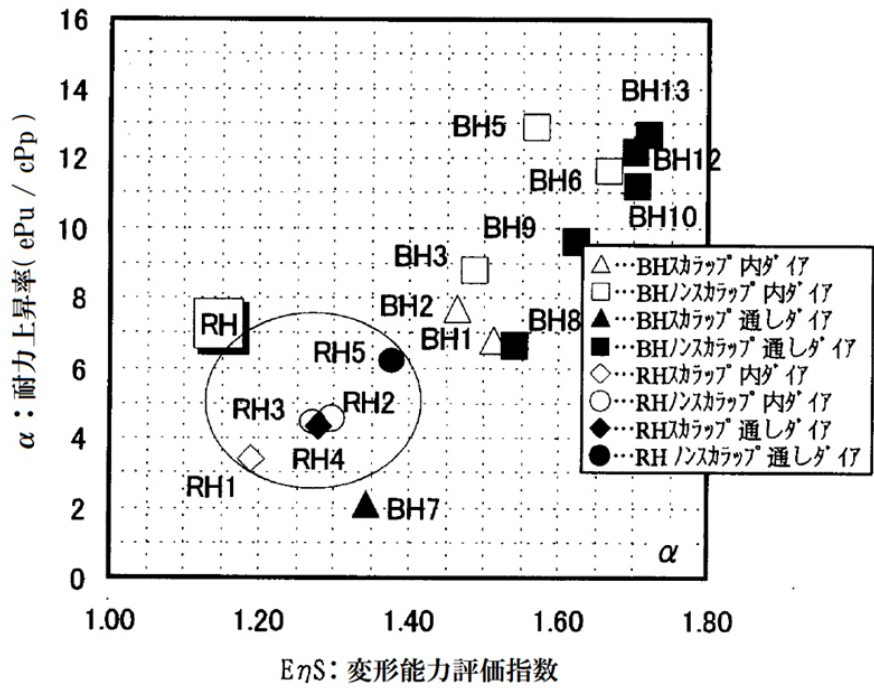


図 8 α - $E\eta S$ 関係

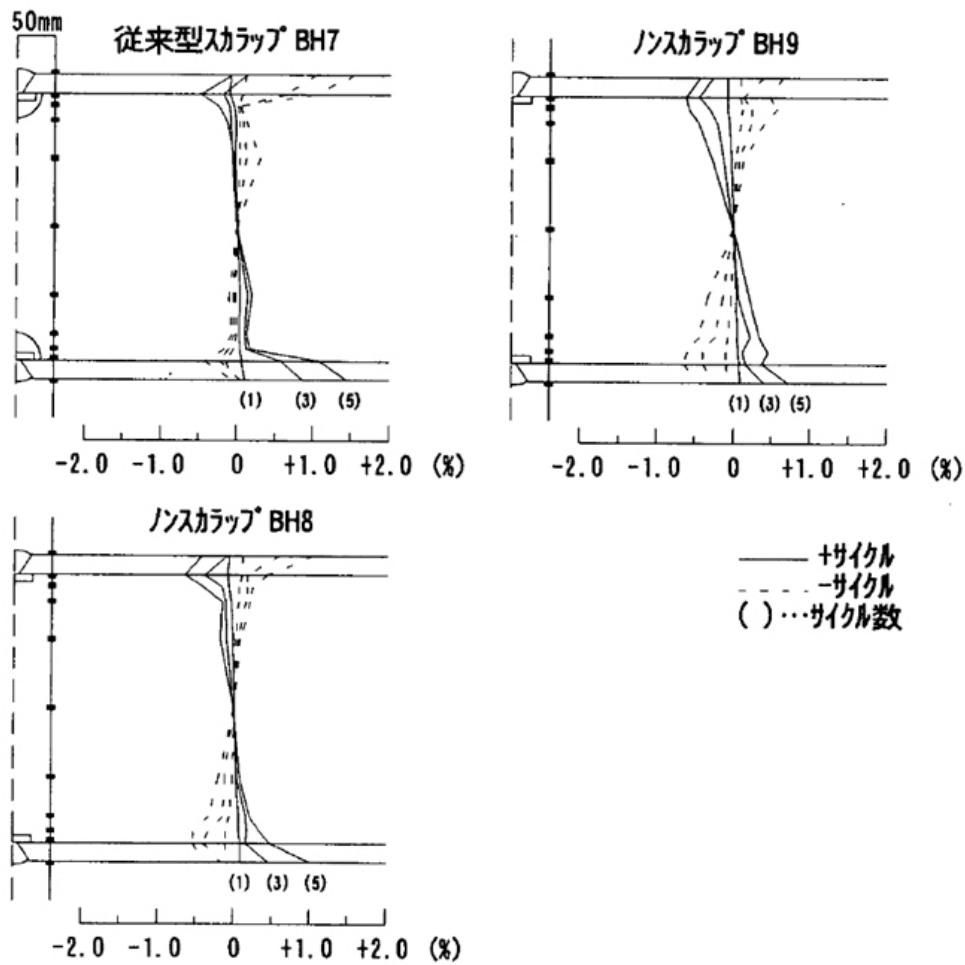


図 9 ひずみ分布 (梁ウェブ)

2.3.2 梁部材がRH（圧延H形鋼）の場合

梁部材にRHを用いた場合、BHに比べて全体的に $E\eta S$ は小さい傾向がある。これは、降伏比が低い方が塑性変形能力は大きい傾向があること²⁾、 $E\eta S$ の評価において降伏点の高いRH材では $c\delta p$ が大きくなることが要因として挙げられる。梁端ディテールの影響もBHと同様に見られるが顕著に表われていない。改良型スカラップ試験体RH1の $E\eta S$ が最も小さいのに対し、RH4はRH1より $E\eta S$ が大きい。ノンスカラップ試験体ではRH2、RH3を比較すると若干 $E\eta S$ でRH2>RH3となっていることもあるので、梁フランジの開先加工の際に梁ウェブを開先角度のままカットすることは初層部の溶接施工における問題からも避けるべきと考える。また、2.3.1のノンスカラップBH8と同形状のRH5が最も大きな $E\eta S$ を示した。このタイプは図9で示した傾向はあるが、改良型スカラップと同等以上の変形能力が期待できるディテールと認識すべきである。内ダイアフラム形式のノンスカラップ試験体に比べて通しダイアフラムRH5の方が変形能力に優れており梁部材にBHを用いた試験体の結果とは異なるが、原因については明らかでない。また、 α (耐力上昇率)は $E\eta S$ に比例する傾向が見られるが、値はBHに比べて全体的に小さい。

2.4 まとめ

工場溶接接合形式における柱梁溶接接合部（スカラップ部の脆性破壊）を対象として、ノンスカラップ梁端ディテールの変形能力に対する影響を実験的に検討した結果、本実験において以下のことが明らかになった。

- (1) 鋼材、部材、ダイアフラム形式が同じ場合において、耐力・変形能力は従来型スカラップ工法<改良型スカラップ工法<ノンスカラップ工法の順に優れている。ゆえにノンスカラップ工法を用いることが重要である。
- (2) ノンスカラップ工法でも変形能力に差があり、耐力・変形能力に優れたノンスカラップ工法の梁端ディテールは、梁ウェブに断面欠損がなく、初層部の溶接施工性が良い試験体である。図2の記号で示すとBH3、BH5、BH6（内ダイアフラム）、BH9、BH10、BH12、BH13（通しダイアフラム）である。
- (3) 梁部材の降伏比が低い方が変形能力は大きく、梁端ディテールの差異による影響が顕著に現れる傾向がある。
- (4) 通しダイアフラム形式では、ダイアフラム厚を梁フランジの2サイズアップとし、適切なノンスカラップ梁端ディテールを採用することで十分な変形能力が得られ、内ダイアフラム形式の場合との差は見られなかった。

参考文献

- 1) 日本建築学会「鋼構造建築溶接部の超音波探傷検査基準・同解説」
- 2) 宿野部勇佑、中込忠男、村井正敏、的場耕、會田和広、白井嘉行：梁材の降伏比が柱梁溶接接合部の変形能力に与える影響に関する実験的研究 日本建築学会大会学術講演梗概集（中国）pp529-530 1999年9月
- 3) 中込忠男、山田丈富、村井正敏、的場耕、會田和広：ノンスカラップ工法における梁端ディテールが柱梁溶接接合部の変形能力に及ぼす影響に関する実験的研究 日本建築学会構造系論文集 pp121-128 2001年8月

<略歴>

中込 忠男（なかごみ ただお）

1977年 東京工業大学 大学院 理工学研究科 博士課程修了 工学博士
1983年 信州大学 工学部 建築学科 助教授
1989年 同 教授
2014年 同 名誉教授
現在に至る