

論文 ガス圧接継手の性能評価に関する研究

中澤 春生^{*1}・成原 弘之^{*2}・陸好 宏史^{*3}・林 静雄^{*4}

要旨：ガス圧接継手の性能評価として、継手単体の試験においてガス圧接のふくらみ部分で破断する頻度が相対的に高いSD490の試験結果を分析し、所要性能との比較検討を行った。SD490の同鋼種同径および異鋼種異径ガス圧接継手単体の性能評価試験より、引張試験における強度と伸びの関係を明らかにして圧接部破断に対する強度基準を提示するとともに、曲げ試験結果が引張試験結果と相関しないことを示した。さらに、既往のRC部分架構実験の結果に基づき、梁の塑性ヒンジ領域に設ける継手の所要性能について考察し、強度基準が概ね適当である事、適切に施工されたガス圧接継手が所要性能を満たしている事を示した。

キーワード：ガス圧接、高強度鉄筋、継手性能、梁、塑性ヒンジ領域

1. はじめに

鉄筋のガス圧接は、鉄筋同士を直接つなぐ継手の標準的な工法として広く施工されており、重ね継手以外の継手の約80%を占めている。その一方で、機械式継手や溶接継手の性能判定のために行う試験や評価基準の対象から除外されてきたため、いわゆる構造部材における引張力の小さい部分以外に使用する主筋の継手としての性能評価ができない状況となっていた。日本圧接協会では、そのような事情に鑑みて、溶接継手の性能判定基準に準じた試験を行って¹⁾²⁾ガス圧接継手の性能を確認するとともに、引張力の小さい部分以外に使用するA級ガス圧接継手の性能判定基準と施工時の品質管理要件を定めている。本論文は、その試験のうちSD490に関する試験結果をさらに分析するとともに、試験で得られた継手単体性能と鉄筋コンクリート部材中の主筋の継手に必要とされる性能との比較を行うものである。

これまでに行われたガス圧接継手の試験³⁾では、塑性域において引張力の除荷と載荷を繰返した後に継手を引張破断させる一方向繰返し引張試験と継手の曲げ試験が行われているが、引張試験において圧接面で破断するケースや曲げ試験において圧接面で折損するケースに関しては、SD490のガス圧接継手とSD390以下の継手でその頻度に差異はなく、両者ともそのような破壊が生じることはきわめて稀である。それに対して、圧接によって生じるふくらみ部分での破断や折損が生じる頻度は、SD490の方がSD390以下の継手に比べて高くなっているが、それを確実に防止するのは容易でないため、それらの破壊が生じる継手の性能の定量化とその影響を把握することが重要となる。本論文で検討する試験結果は、SD490の同鋼種同径継手とSD490を含む異鋼種異径継手に関するものである。

2. SD490 同鋼種同径継手の試験結果および検討

2.1 試験概要

SD490の同鋼種同径ガス圧接継手について実施した試験の試験体一覧を表-1に示す。試験種類は一方向繰返し引張試験と曲げ試験の2種類である。各試験の試験方法の概要を図-1および図-2に示す。一方向繰返し引張試験では、試験体に引張力を載荷して鉄筋を降伏させ、圧接面を中心とする $6d$ (d :鉄筋径)の検長区間におけるひずみが3%となった時の応力とその応力の5%の応力の間で20回の除荷と載荷を繰返した後、さらに引張力を加えて試験体を破断させる方法とした。曲げ試験は、JIS Z 2248による押し曲げ法として、押し金具が当たる部分のみを削った試験体を曲げ角度 90° まで押すこととした。曲げ試験では、継手種類ごとに1本ずつに図-3に示す曲げ引張側となる試験体のリブ上にポンチマークを打刻しておき、 30° 、 45° 、 60° 、 90° の曲げ角度時に

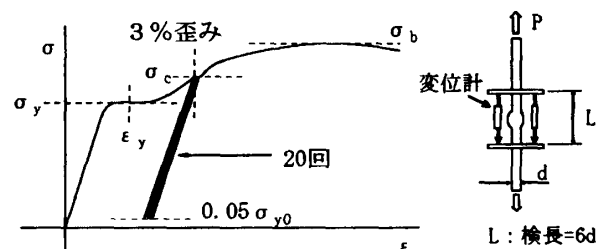


図-1 一方向繰返し引張試験方法の概要

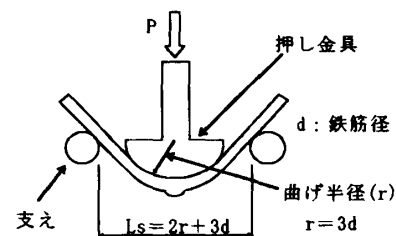


図-2 曲げ試験方法の概要

*1 清水建設(株) 技術研究所生産技術センター主任研究員 工博(正会員)

*2 大成建設(株) 技術センター建築技術研究所主席研究員 工博(非会員)

*3 埼玉大学 大学院理工学研究科教授 工博(正会員)

*4 東京工業大学 建築物理研究センター教授 工博(正会員)

表-1 SD490 同鋼種同径ガス圧接継手試験の試験体および試験結果一覧

継手 記号	鉄筋	鉄筋 メーカー	鉄筋の機械的性質			圧接 施工者	バーナ 種類	一方向繰返し引張試験結果				90° 曲げ試験	
			降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)			試験体 記号	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	破断位置	試験本数	試験結果
a	D29 横節	A社	517	698	22	①	リング	a-4	520	672	母材	リブ曲げ: 3 節曲げ: 2	全て○
e		B社	528	691	24	①	リング	e-1	520	676	母材	リブ曲げ: 3 節曲げ: 2	全て○
g	D29 ねじ節	C社	515	680	25	①	リング	g-1	515	676	母材HAZ	リブ曲げ: 3 節曲げ: 2	全て○
k		A社	538	732	20	①	リング	k-2	529	707	母材HAZ	リブ曲げ: 3 節曲げ: 2	全て○
b	D35 横節	A社	522	689	18	①	リング	b-1	529	705	母材HAZ	リブ曲げ: 3 節曲げ: 2	全て○
h	D35 ねじ節	C社	514	682	23	①	リング	h-1	512	681	母材	リブ曲げ: 3 節曲げ: 2	全て○
c	D41 横節	A社	510	704	21	②	リング	c-1 c-8	499 500	664 691	圧接部 母材	c-5(リブ曲) 残り4本	圧接部折れ(60°) ○
d		A社	c と同じ鉄筋			③	ゾーン	d-1	498	679	母材HAZ	リブ曲げ: 3 節曲げ: 2	全て○
f		B社	522	700	18	②	リング	f-1	519	693	母材	リブ曲げ: 3 節曲げ: 2	全て○
i	D41 ねじ節	C社	517	678	15	③	リング	i-1	513	676	母材	リブ曲げ: 3 節曲げ: 2	全て○
j		C社	i と同じ鉄筋			③	ゾーン	j-1	515	678	母材HAZ	リブ曲げ: 3 節曲げ: 2	全て○
l		A社	512	697	19	②	リング	l-1	502	681	母材	リブ曲げ: 3 節曲げ: 2	全て○

(破断位置の説明) 圧接部: 圧接によって生じたふくらみ部分, 母材 HAZ; ふくらみの外側 1.0d の範囲, 母材: 前記以外の母材部分

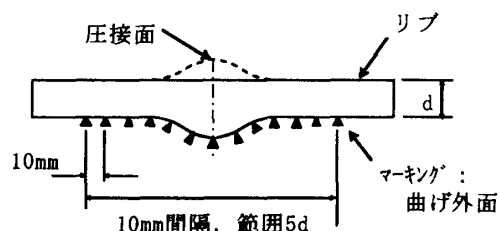


図-3 曲げ試験体のポンチマーキング

除荷したうえで、ポンチ間の距離をノギスで測定した。

表-1 中に示すように、試験に供した継手の種類は、合計 12 種類で、各継手種類において、1 本を一方向繰返し引張試験に充て、5 本 (3 本: リブ曲げ, 2 本: 節曲げ) を曲げ試験に充てることとしたが、記号 c の継手は一方方向繰返し引張試験で圧接部破断が生じたため、予備材として作製しておいた継手を使用して一方向繰返し引張試験を 1 本追加した。使用した鉄筋は D29, D35, D41 の SD490 の JIS 規格品で、各径とも横節鉄筋とねじ節鉄筋の 2 種類を用意し、それぞれ同じ径・種類の鉄筋をガス圧接により接合した継手とした。D29 と D41 の継手では、両方の節形状について、鉄筋メーカー別の継手を加えている。また、D41 の継手では、両方の節形状の 1 種類ずつについて、継手の軸方向の一定幅を同時に加熱するゾーンバーナを用いた圧接によるものを加えている。これ以外の継手の圧接に使用したバーナは、一断面で加熱を行うリングバーナである。継手の作製は、手動ガス圧接技量 4 種の資格者 3 名が鉄筋のガス圧接工事標準仕様書⁴⁾に従って行った。圧接する鉄筋の端面は、圧接直前に冷間直角切断機で切断したままとした。使用した鉄筋の機械的性質は表-1 中に示すとおりである。

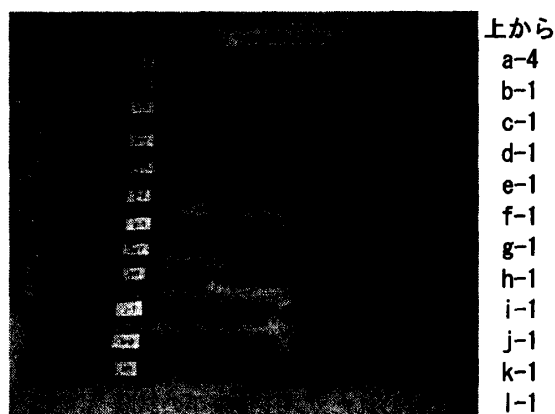


写真-1 一方向繰返し引張試験後の破断状況

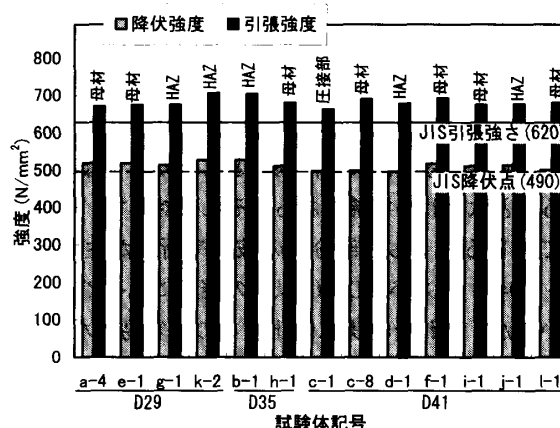


図-4 一方向繰返し引張試験による継手強度

2.2 一方向繰返し引張試験結果および検討

同鋼種同径継手の一方向繰返し引張試験結果の一覧を表-1 中に、破断状況を写真-1 に、試験における降伏強度と引張強度を図-4 に示す。12 種類の継手のうち

1 種類(c-1)で圧接によって生じたふくらみ部分(圧接部)での破断が生じた。また、5 種類ではふくらみのすぐ外側の、圧接時の加熱によって軟化等の熱影響が考えられる位置(母材 HAZ)で破断し、残りの 6 種類は圧接部から離れた母材部分で破断している。なお、圧接部破断が生じた種類 c では追加の試験を行ったが、追加試験体の破断位置は圧接部から離れた母材部分であった。いずれの継手でも、破断位置によらず、降伏強度、引張強度ともに SD490 の JIS 規格値を上回る強度を示している。

鉄筋継手を構造部材の塑性ヒンジが生じる部分で使用するためには、強度のみでなく、ヒンジの塑性回転を保证するに足る伸び能力も必要となる。そこで、この試験における各継手の伸びについて以下に検討する。試験における継手応力と検長 6d におけるひずみの関係を図-5 に例示する。図-6 は、各継手に用いた鉄筋の引張強さに対する継手の引張強度試験値の比と、試験の最大荷重時ひずみのプロットである。ここに、鉄筋の引張強さはミルシート値であるため、母材破断であっても継手の引張強度と鉄筋の引張強さは一致していない。しかしプロットは、最大荷重時ひずみが 8%以上の群と、ひずみが約 7%の母材 HAZ 破断試験体(k-2)、ひずみが約 5%の圧接部破断試験体(c-1)とに分けて見ることができる。試験体 k-2 の強度値は母材の引張強さとはほぼ同等であるが、図-5 の応力-ひずみ関係を見るとひずみ 70000 μ 以後に応力が低下しており、母材 HAZ 部の軟化の影響も懸念される。また、試験体 c-1 の強度値は明らかに母材の引張強さより低い。これらから、継手の伸びは試験における強度によって類推できると思われる。しかし、母材破断以外で母材の引張強さを知ることはできないため、試験で知ることができる継手の実降伏強度を基準とする継手の伸びの推定についても検討する。図-7 は、本試験のすべての継手の実降伏強度に対する引張応力度比と継手のひずみとの関係を、ひずみ 4~6%の範囲でプロットした図である。使用鉄筋の降伏比等の違いによりばらつきがあるが、いま、一方向繰返し引張試験における強度の合格判定基準を実降伏点の 1.3 倍とすると、平均的には 5%、低くとも 4%の継手の伸びを保証し得るものと推定できる。なお、この 4%や実験結果の 5 ないし 7%という伸びが鉄筋コンクリート部材中の主筋継手として適当であるかについては、後で考察する。

2.3 曲げ試験結果

同鋼種同径継手の曲げ試験結果の一覧を表-1 中に、試験後の状況を写真-2 に示す。12 種類の合計 60 本の曲げ試験の結果、1 本(c-5)で曲げ角度 60° における圧接部折れが生じ、その他の 59 本は 90° までの曲げ試験で折損しなかった。図-8 に圧接部折れを生じた継手と同じ種類の継手の曲げひずみ分布を示す。その他の種類の

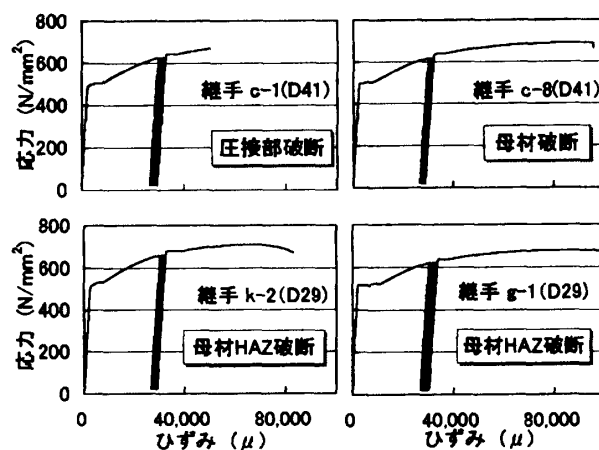


図-5 応力-ひずみ関係例

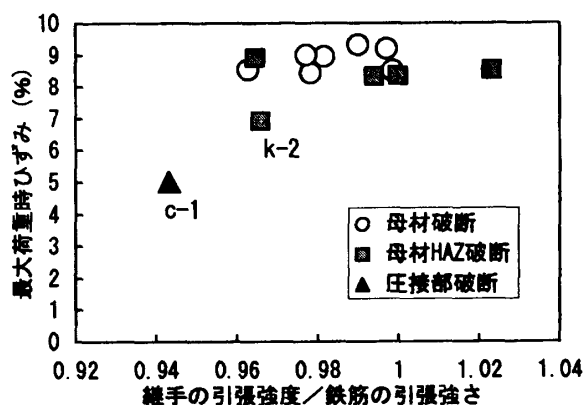


図-6 継手の強度比と最大荷重時ひずみの関係

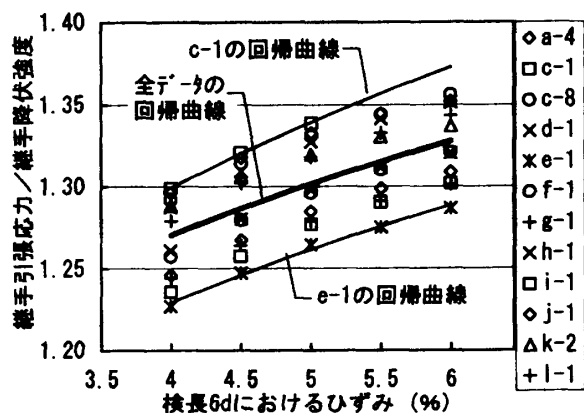


図-7 継手実降伏点に対する応力比とひずみの関係

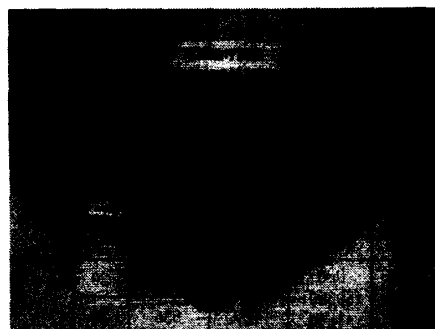


写真-2 同鋼主同径継手の曲げ試験結果例(継手 M)

継手でも曲げひずみ分布は同じ傾向にあり、ガス圧接継手の曲げ試験におけるひずみは、ふくらみ部のすぐ外側

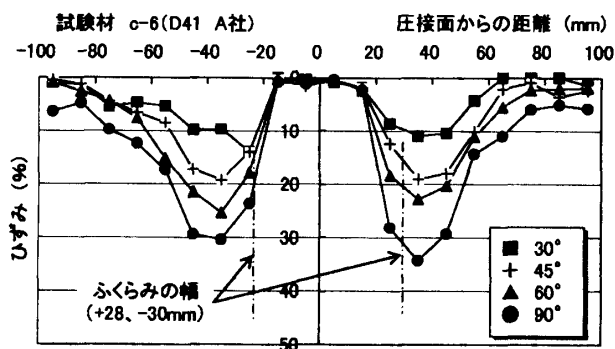


図-8 同鋼種同径継手曲げ試験時のひずみ分布例

に集中して発生している。これに対応するように、継手の変形状態も膨らみのやや外側で屈曲する様相を呈していた。曲げ引張側に生じる最大ひずみは、曲げ角度45°時に約20%で、90°時には30%を超えるきわめて大きなひずみに達している。

3. SD490 異鋼種異径継手の試験結果および検討

3.1 試験概要

SD490の異鋼種異径ガス圧接継手について実施した試験の試験体一覧を表-2に示す。試験種類は、同鋼種同径継手と同様に、一方向繰返し引張試験と曲げ試験の2種類である。試験方法についても同鋼種同径継手と同様であるが、異鋼種異径継手では接合する鉄筋の強度や径が異なるため、一方向繰返し試験の繰返し点を3%ひずみではなく、低強度となる側の鉄筋の降伏点の1.2倍の応力に達した時点で20回の除荷と載荷を繰返すこととし、ひずみの検量は細径側の鉄筋径の6倍とした。また、曲げ試験では押し金具の曲げ半径および曲げスパンは細径側の鉄筋径を基準とし、曲げ半径は保有治具の都合により細径側鉄筋の約2.5倍とした。

試験に供した継手の種類は合計6種類で、I,J,KではD35-SD490を、M,N,OではD41-SD490を基準鉄筋として、それぞれ基準鉄筋よりも低強度となる鉄筋を接合している。継手IとMは基準鉄筋に対して1サイズ細径のSD390を圧接した異鋼種異径継手であり、JとNは基準鉄筋と同径のSD390を圧接した異鋼種同径継手、KとOは基準鉄筋に対して1サイズ細径のSD490を圧接した同鋼種異径継手である。鉄筋は2社より入手し、ガス圧接は2名の手動ガス圧接技量4種資格者がリングバーナーを使用して行った。圧接方法は標準仕様書³⁾に従って実施したが、特に異鋼種異径継手での方法の規定はないため、圧接面が密着した後の幅焼き工程において、幅焼き長さ加熱時間を加減して圧接面がふくらみの中心となるように圧接作業を行った。

3.2 一方向繰返し引張試験結果および検討

一方向繰返し引張試験結果の一覧を表-2中に、破断状況の例を写真-3に示す。一方向繰返し引張試験による破断は、全て低強度となる鉄筋において生じ、全18本の継手のうち、低強度側もSD490のK-3の1本がふくらみ部で破断する圧接部破断となり、やはり低強度側がSD490となるK-3以外の継手(KとO)は全てふくらみのすぐ外側で破断する母材HAZ破断となった。一方、低強度側がSD390である異鋼種継手は全て母材破断となっている。一般に、加熱によってふくらみ部は硬化し、



写真-3 異鋼種異径継手の破断状況

表-2 SD490を含む異鋼種異径ガス圧接継手試験の試験体および試験結果一覧

継手 記号	鉄筋 (H)	鉄筋 (L)	鉄筋の機械的性質 注)			圧接 施工者	一方向繰返し引張試験				90° 曲げ試験	
			降伏点 (N/mm ²)	引張 強さ (N/mm ²)	伸び (%)		試験体 記号	降伏 強度 (N/mm ²)	引張 強度 (N/mm ²)	破断位置	試験体 記号	試験結果
I	D35 (SD490) A社製	D32 (SD390) A社製	514	699	22	①	I-1	443	632	母材	I-5	○
			433	630	24		I-2	442	626	母材	I-6	○
							I-3	437	616	母材	I-7	○
J	D35 (SD490) A社製	D35 (SD390) A社製	I-(H) と同じ鉄筋				J-1	441	619	母材	J-4	○
			441	624	23		J-2	440	617	母材	J-5	圧接面折れ(36.5°)
							J-6	圧接面折れ(42.0°)				
							J-3	442	623	母材	J-7, J-8	○
							J-9~J-14	○				
K	D35 (SD490) A社製	D32 (SD490) A社製	I-(H) と同じ鉄筋				K-1	524	694	母材HAZ	K-5	○
			522	690	24		K-2	525	693	母材HAZ	K-6	○
						K-3	524	693	圧接部	K-7	○	
M	D41 (SD490) B社製	D38 (SD390) A社製	523	702	20	②	M-1	432	643	母材	M-5	(L)側圧接部折れ(57.0°)
			429	636	23		M-2	434	638	母材	M-6	○
M-3	436	645					母材	M-7	(L)側圧接部折れ(72.5°)			
N	D41 (SD490) B社製	D41 (SD390) B社製	M(H) と同じ鉄筋				N-1	438	635	母材	N-5	○
			430	618	20		N-2	436	631	母材	N-6	(H)側圧接部折れ(30.0°)
							N-3	437	632	母材	N-7	(L)側圧接部折れ(51.0°)
O	D41 (SD490) B社製	D38 (SD490) B社製	M① と同じ鉄筋				O-1	522	692	母材HAZ	O-5	(L)側圧接部折れ(39.5°)
			518	684	22		O-2	525	692	母材HAZ	O-6	(L)側圧接部折れ(45.0°)
							O-3	515	686	母材HAZ	O-7	(L)側圧接部折れ(25.5°)

注) 各継手の上段に(H)側鉄筋、下段に(L)側鉄筋の機械的性質を記載

そのすぐ外側は軟化するが、この結果より、相対的にSD490の方が加熱による影響が機械的性質に現われやすいと推測される。ただし、図-9に示すように、継手強度はいずれもJIS規格値を上回る強度を示している。異鋼種異径継手の破断までの伸びを知るために、本試験では低強度側の鉄筋に標点を打刻しておき、破断後に標点間の伸びを測定した。図-10はその値と試験における引張強度と降伏強度の比をプロットしたものである。試験体により標点間で破断したものと標点外で破断したものがあ、前者は破断伸びを、後者は破断時の一様伸びを測定したことになる。同鋼種同径継手の試験結果から、継手の降伏強度の1.3倍以上の強度を確保すれば、最大強度時の伸びが平均で5%となることを示したが、この図より、同強度比を確保した継手の破断時の一様伸びは約10%と推定できる。しかし、きわめて脆性的に圧接部破断する場合もあることから、同強度比を確保した場合の継手の伸びは、やはり4%程度と評価すべきと考える。

3.3 曲げ試験結果および検討

曲げ試験結果を表-2中に、試験後の試験体の状況を写真-4に示す。異径継手の曲げ試験では細径側が大きく曲がり、曲げの中心も細径側にずれていく傾向が顕著であった。記号Jの継手は圧接時に火炎が圧接面からずれていた懸念があったが、その条件で作製した4本の継手のうち2本で圧接面折れが生じ、それらの破面には折損の起点となったフラット破面が観察された。そのため、施工状況を修正した継手を6本追加して作製したところ、それらは全て90°まで折損しなかった。一方、圧接部折れは、全てD38以上の太径鉄筋で生じており、一方向繰返し引張試験で圧接部破断が生じた継手Kでも90°まで折損していない。それに対して、引張試験で母材破断であった継手M,Nで圧接部破断が生じたほか、継手Oは全数が圧接部破断となった。異鋼種異径継手の曲げ試験における継手各部の曲げひずみ分布を図-11に例示する。異径継手の曲げひずみは細径側に集中し、曲げ角度45°で40%以上のひずみに達している。一方、異鋼種同径継手ではそのような傾向はなく、曲げ角度45°におけるひずみは両側とも20%程度であり、同鋼種同径継手と同等である。

以上の結果と同鋼種同径継手の結果を合わせて考えると、曲げ試験における圧接部折れと一方向繰返し引張試験の圧接部破断は必ずしも相関せず、曲げ試験によって引張力を受けるガス圧接継手の伸び能力を評価することは困難である。しかし、圧接施工に問題がある場合等の圧接面の欠陥については、曲げ試験の方がそれを検知しやすいため、曲げ試験はその目的に限定して行うべきと考えられる。また、その場合、表-2中のJ-5,J-6のように圧接面での折損は比較的小さい曲げ角度で生じ

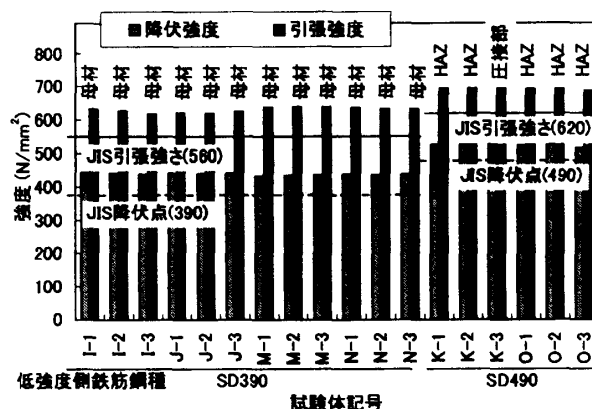


図-9 一方向繰返し試験による継手強度

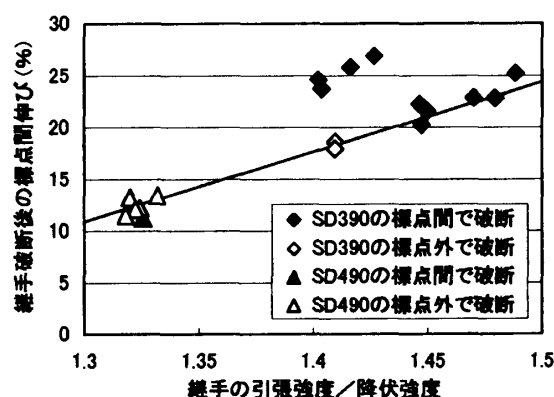


図-10 異鋼種異径継手の破断後の標点間伸び



写真-4 異鋼種異径継手の曲げ試験結果例(継手M)

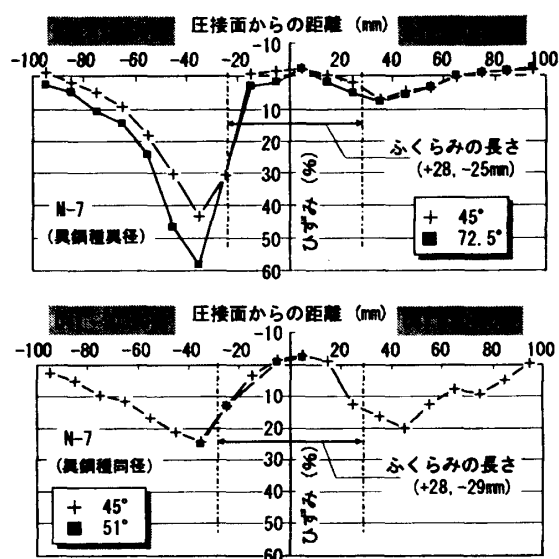


図-11 異鋼種異径継手曲げ試験時のひずみ分布例

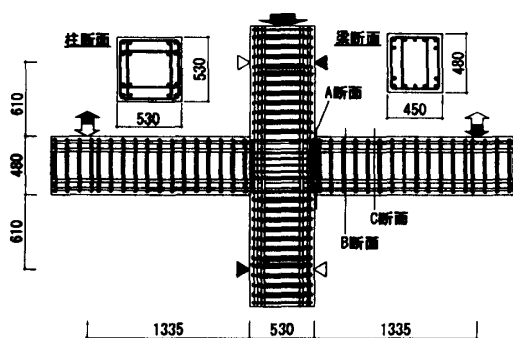


図-12 部分架構試験体形状・配筋

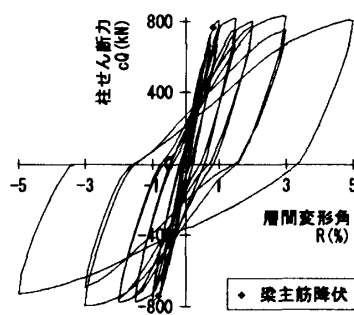


図-13 柱せん断力—層間変形角関係

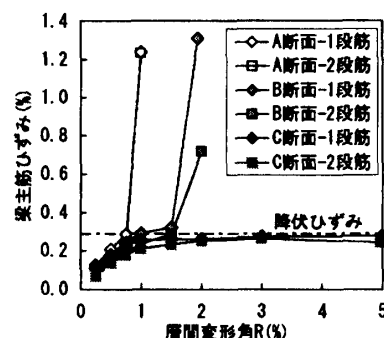


図-14 梁主筋ひずみ

ることから、曲げ試験における曲げ角度は 45° で上記の目的を達し得ると考えられる。

4. RC 部材における鉄筋継手の所要性能に関する考察

ここでは、以上に述べたガス圧接継手の単体性能が RC 部材中の鉄筋継手として適当であるかについて考察を加える。RC 部材においてガス圧接の対象となる鉄筋は、柱や梁の主筋であり、建築構造物の場合、主筋降伏後の伸びを期待する箇所は梁主筋の端部が代表的である。そこで、主筋に SD490 を用いた柱梁部分架構実験⁴⁾の梁主筋ひずみに基づいて検討を行う。

検討対象とした実験の試験体形状・配筋を図-12 に、実験結果の柱せん断力(cQ)―層間変形角(R)関係を図-13 に示す。柱・梁ともに主筋は D22-SD490 であり、実験時のコンクリート強度は、梁が 40N/mm^2 、柱が 89N/mm^2 である。破壊モードは梁曲げ破壊型であり、 $R=3\%$ 以後で繰返し载荷に伴ってやや耐力低下しているが、全体的に安定した履歴性状を示した。この試験体の梁主筋の柱フェース断面(A)、柱フェースから梁せい分離した断面(C)と、それらの中央断面(B)における一段目主筋および二段目主筋についてひずみゲージによって計測したひずみと層間変形角との関係を図-14 に示す。柱フェース断面の梁主筋のひずみは、一段目、二段目主筋とも $R=1\%$ で 1.2% を超え、その後、ひずみの計測ができなくなっている。B 断面においては、 $R=2\%$ で一段目梁主筋ひずみが 1.3% 、二段目が 0.7% 程度であり、C 断面では $R=5\%$ まで降伏ひずみ以下に留まっている。建築物の構造架構においては、きわめて稀に発生する大地震に対する最大応答層間変形角を 1% 程度に収まる設計とし、それに対する余裕を考慮した架構設計変形が $R=2\%$ を超えない値とするのが一般的である。また、主筋の継手を柱フェース位置に設けることは作業スペースが取れず、施工的に困難であるため、ヒンジ領域内で継手を設けるのに現実的な箇所は B 断面程度であるといえる。結果から、柱フェースから梁せいの $1/2$ の断面位置での梁主筋に所要の伸びは 2% に収まるものと考えられる。これに対して、前述したように、降伏強度の 1.3 倍の強度を有す

るガス圧接継手の伸び能力は検長 $6d$ のひずみとして 4% と推定できるが、検長には塑性変形を生じないふくらみ部分を含むため母材部分には 4% 以上の伸び能力が期待できること、 $6d$ という長さがヒンジ領域長に比べて十分に小さいことを考慮すると、上記の伸び能力は所要性能に照らして適当と判断できる。

5. まとめ

標準仕様書³⁾に従って施工された SD490 の同鋼種同径・異鋼種異径ガス圧接継手の単体性能確認のための試験結果の分析と既往実験結果に基づく RC 部分架構における梁主筋の所要伸びの検討を行い、以下の知見を得た。

- (1) 一方向繰返し引張試験において圧接部破断や母材 HAZ 破断となった継手でも、一樣伸びとして 5% 以上の伸びを示しており、降伏強度の 1.3 倍以上の継手強度を確保することで 4% 以上の伸びを保証し得る。
- (2) 継手の曲げ試験における圧接部折れと一方向繰返し引張試験の圧接部破断は関連しないが、施工時の問題等に起因する圧接面の欠陥の検知には有効である。
- (3) RC 架構における梁主筋の伸びの所要性能は 2% 程度と考えられ、適切に施工されたガス圧接継手はこの性能を満足し得る。

参考文献

- 1) 中澤春生，矢部喜堂，成原弘之，林静雄：ガス圧接継手の曲げ試験について，コンクリート工学，Vol.44，No.12，pp.23-30，2006.12
- 2) 中澤春生，成原弘之，林静雄，矢部喜堂：異種異径鉄筋のガス圧接継手性能評価，日本建築学会大会学術講演梗概集 C-2，pp.95-96，2007.8
- 3) 成原弘之，矢部喜堂，中澤春生，林静雄：鉄筋のガス圧接継手性能評価，コンクリート工学，Vol.42，No.10，pp.23-30，2004.10
- 4) 日本圧接協会：鉄筋のガス圧接工事標準仕様書，2005
- 5) 中澤春生，黒瀬行信ほか：機械式定着と折曲げ定着を併用した RC 造柱梁接合部の構造性能，日本建築学会大会学術講演梗概集 C-2，pp.487-488，2003.9