

論文 欠陥を有する異形鉄筋ガス圧接継手の強度特性

鈴木元敏^{*1}・長野岳宏^{*2}・館石和雄^{*3}・足立一郎^{*4}

要旨：本研究では欠陥を意図的に入れた圧接継手と健全な圧接継手から試験片を切出し、欠陥による不良接合面と健全な接合面の引張、疲労強度特性を実験的に明らかにした。また、内部欠陥の有無によるガス圧接継手の疲労強度の違いを実験的に明らかにした。さらに、弾塑性解析により、母材と圧接部のひずみ状態を求め、その結果と実験より得られた強度曲線から、ふくらみ径と疲労強度の関係を明らかにした。その結果、不良接合面の引張及び疲労強度は非常に弱く、ガス圧接継手においても疲労強度は著しく低下することが明らかとなり、今回の試験体では、圧接部は母材径の1.4倍以上必要であると判断できた。

キーワード：鉄筋ガス圧接継手、内部欠陥、フラット破面

1. はじめに

鉄筋のガス圧接継手は、一般に正しく圧接作業を行えば、母材と同等もしくは母材以上の強度を有する。しかし、施工を誤ると圧接界面に欠陥が生じ、著しく脆弱な不良圧接部（以下内部欠陥）になることが明らかにされている¹⁾²⁾。一般的にこのような内部欠陥が存在する場合、圧接界面での破断現象がみられ、破断面にはフラット破面と呼ばれる平坦な部分が存在する¹⁾。このような内部欠陥は、外観検査では検出することが出来ないため、ガス圧接継手の内部欠陥の検出は、超音波探傷検査により行われている。超音波試験では、圧接継手の内部欠陥を必ずしも十分に検出できないことが報告されている²⁾。万一鉄筋コンクリート構造物において、圧接時の施工不良により内部欠陥が生じた場合、圧接部破断による構造物倒壊にもつながりかねない。以上のことから、圧接部の接合状態について十分な検討を行うことが必要である。

本研究では、健全なガス圧接継手と欠陥を施したガス圧接継手を作製し、各種継手の圧接面から放電加工により試験体を作製し、実験によ

り、健全な接合状態の圧接面（以下健全接合面）と欠陥による不良接合状態の圧接面（以下不良接合面）の引張強度と伸び及び疲労強度を明らかにする。また、ガス圧接継手の疲労強度に着目し、実験と解析から、内部欠陥の有無によるガス圧接継手の疲労強度の違いを明らかにするものである。

2. 圧接部の局所的な強度特性

母材、各圧接面から試験片を切り出し、切り出した試験片を用いて、母材と健全接合面、不良接合面の局所的な強度特性を実験的に明らかにする。

2.1 試験体

圧接継手は以下の3種類の方法で作製した。

- 1) 圧接協会の標準仕様書に準じた手順、条件で圧接作業を行った圧接継手(記号ST)
- 2) 加熱前に鉄筋端面間に1mmの隙間を空け、初期の加熱中に意図的に加熱炎を圧接部から10秒間外し、再び圧接作業を行った圧接継手(記号AT)
- 3) 鉄筋端部をグラインダー研削処理後、片

*1 千葉工業大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (正会員)

*2 芝浦工業大学 工学部土木工学科

*3 東京大学生産技術研究所助教授 (正会員)

*4 千葉工業大学教授 工学部土木工学科 (正会員)

側端面部全体に合成樹脂エナメル塗料
(以下塗料)を付着させ圧接作業を行っ
た圧接継手(記号PT)

2)は、圧接面にできる酸化皮膜により、3)は
鉄筋端面の塗料により、欠陥を発生させること
を目的とした。使用した異形鉄筋は、JIS G 3112
に適合する SD345 の D19 の高炉品である。鉄
筋の材料特性を表一1に示す。

表一1 鉄筋の材料特性

Size (mm)	製法	化学成分(%)					
		C ×100	Si ×100	Mn ×100	P ×1000	S ×1000	C+Mn/6 ×100
D19	高炉	20	42	127	20	19	41

Size (mm)	製法	引張試験		
		降伏点 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	伸び (%)
D19	高炉	414	581	23

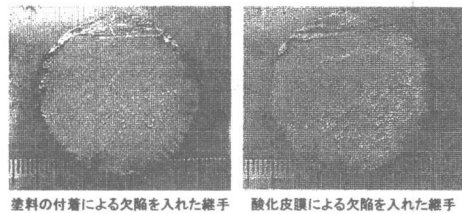
欠陥をいれることを目的として作製した継手
の圧接界面における欠陥の有無を把握するため、
超音波探傷検査を行ったが内部欠陥を検出する
ことができなかった。そこで、圧接面にノッチ
を入れ、曲げ载荷により圧接面で破断させた。
ただし健全な圧接を行った継手においては圧接
面での破断は認められなかった。各欠陥を入
れた継手の破断面を写真一1に示す。写真に示
すように、塗料の付着による欠陥を入れた継手
においては、ほぼ破断面全体にフラット破面が
形成されており、酸化皮膜の欠陥を入れた継手
においても破断面の中心部の周りにフラット破
面が形成されていることが確認できる。このこ
とから、健全接合面及び不良接合面の試験体と
して図一1に示すように、健全接合面は ST の
断面中心部から、不良接合面は AT, PT 共に断
面の中心周辺から、図一2に示すような試験片
(最小直径：約3mm，試験片平行部：約10mm，
全長：50mm)を放電加工により切り出した。
また、比較のために、母材からも同様の試験片
を切り出した。各継手の種類と切出し試験片の
記号を表一2に示す。

2. 2 実験方法

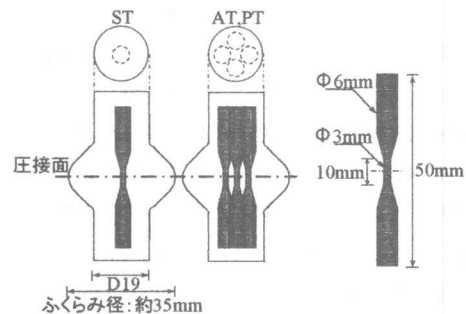
引張試験では、試験前に試験片平行部(約
10mm)の両端に軸方向と垂直に罫書き線を引
き、引張試験前・後における罫書き線間の距離
を測定し、破断伸びを算出した。また、試験片
平行部に取りつけた変位計によりひずみを計測
した。正負交番繰返し試験は 3000~18000μ 計
5段階のひずみ振幅を設定し、ひずみ制御によ
り行い、各ひずみ振幅と繰返し回数を測定した。

表一2 圧接継手の種類と切出した試験体

圧接継手の種類	切出した試験片
通常の圧接継手(ST)	タイプS
酸化皮膜による欠陥を入れた圧接継手(AT)	タイプA
塗料の付着による欠陥を入れた圧接継手(PT)	タイプP
母材(B)	タイプB



写真一1 各欠陥を施した継手の破断面



図一1 試験片切出し位置 図一2 試験体概要図

2. 3 実験結果及び考察

各試験による試験体の破断位置が圧接界面で
あるかを確認するため、試験前に各欠陥部の試
験体にエッチング処理を行い、圧接界面の位置
を把握した後、引張試験、正負交番繰返し試験
を行ったところ、試験体の破断位置は圧接界面
であることを確認した。

引張試験結果（応力-ひずみ関係）の代表例を図-3に示すように、タイプA、タイプPの引張強度は、タイプSと比較すると小さくなる傾向を示した。試験片種類と伸びの関係をもとめたものを図-4に示す。両図からタイプBとタイプSはほぼ等しい値を示した。しかし、タイプSと比較し、タイプA、タイプPの伸びは顕著に低下する傾向を示し、タイプA、タイプPの間においても伸びに若干の違いが認められる。

図-5に正負交番繰返し試験結果（ひずみ振幅-破断寿命関係）を示す。各試験片を比較すると、タイプSとタイプBの疲労強度はほぼ同等であった。しかし、タイプSに対し、タイプAは1/6、タイプPは1/20程度に破断寿命が低下することがわかった。

また、マイクروسコープを用いた目視による各種試験片の破面観察を行ったところ、タイプA、タイプPに関してはフラット面が確認できたが、タイプSに関してはフラット面が全く確認できなかった。そこで、タイプA及びタイプPに関し、フラット面の面積を画像解析により算出し、破面全体の面積からフラット面の面積率（フラット破面率）を求めた。試験片種類とフラット破面率の関係を図-6に示す。タイプPに関してはフラット破面率が約60~90%、タイプAに関しても約40~90%のフラット破面率を示した。ただし、タイプSに関しては圧接界面で疲労破断が生じたが、フラット部が確認できないため0%である。このことから、フラット破面の形成が引張強度及び疲労強度を著しく低下させる要因になっていることがわかる。

以上のことから、タイプS及びタイプA、タイプPの引張強度と疲労強度として、タイプSはタイプBとほぼ同等であること、また、タイプAとタイプPにおいては、タイプSに比べ引張強度、疲労強度ともに非常に小さく、伸びも非常に小さいことがわかった。また、フラット破面率はタイプAとタイプPとではほぼ同じ割合であるが、疲労強度は、顕著に差が生じる

ことがわかった。

3. 圧接継手部の疲労強度特性

前章で明らかにした各接合面の局部的強度特性を含む各種の圧接継手そのものがどのような疲労強度なのか実験的に明らかにする。

3.1 試験体

使用した異形鉄筋は、JIS G 3112に適合するSD345のD13の高炉品である。鉄筋の材料特性を表-3に示す。ガス圧接継手は、前章同様、ST、AT、PTの三種類を作製した。

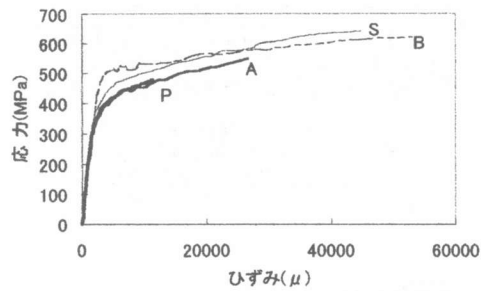


図-3 応力-ひずみ曲線

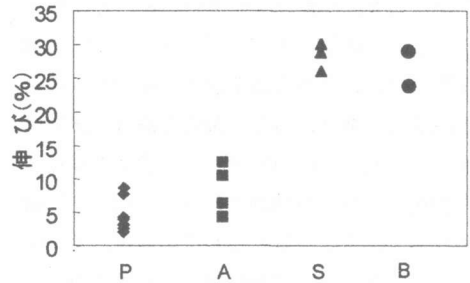


図-4 各試験片と伸びの関係

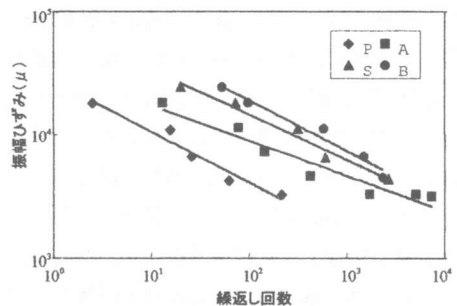
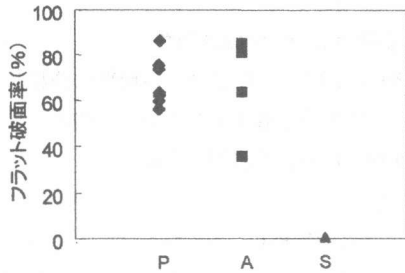


図-5 正負交番繰返し試験結果



図—6 各試験片とフラット破面率の関係

表—3 鉄筋の材料特性

Size (mm)	製法	化学成分 (%)					
		C × 100	Si × 100	Mn × 100	P × 10000	S × 10000	C+Mn/6 × 100
D13	高炉	21	29	124	23	16	42

Size (mm)	製法	引張試験		
		降伏点 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	伸び (%)
D13	高炉	413	577	28

3. 2 実験方法

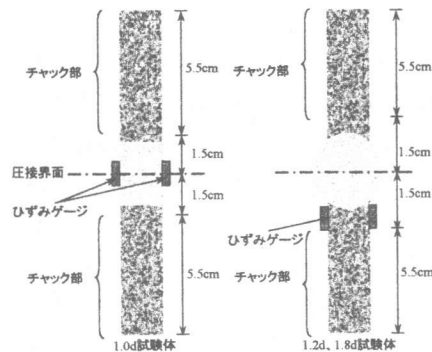
試験体は圧接部のふくらみ径が 1.8d, 1.2d, 1.0d の 3 種類の圧接継手とした。ただし、ふくらみ径が 1.0d の場合は全種類、ふくらみ径が 1.8d, 1.2d の場合は PT のみとした。1.2d, 1.0d の試験体は、1.8d の各継手をグラインダーを用いて圧接面を削り取った。載荷方法は、試験体に貼り付けたニカ所のひずみゲージによりひずみを測定し、ひずみ制御で行った。図—7 に試験体を示す。また、試験体が圧縮荷重による座屈を起こさないように試験部を圧接部のみとした。試験機はサーボパルサー 10t を用いた。

3. 3 実験結果及び考察

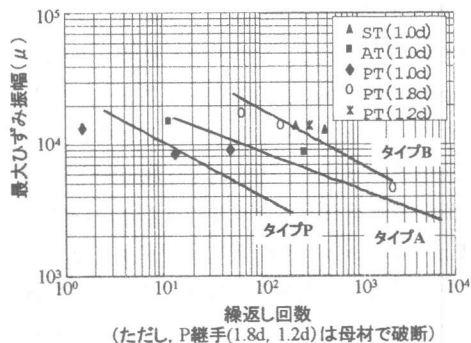
各圧接継手において正負交番繰返し試験を行った結果、圧接部のふくらみ径が 1.8d, 1.2d の PT 及び ST において、全ての試験体はチャック部と圧接部との間の母材で疲労破断した。しかし、圧接部のふくらみ径が 1.0d では、AT 及び PT はすべて圧接界面で破断した。図—8 に最大ひずみ振幅と繰返し回数の関係を示す。ただし、図中の実線は前章にて説明したガス圧接界面の各不良接合面と母材の疲労強度特性である。ま

た、本実験値はチャック部内で破断したものの以外を採用した。図に示すように圧接部のふくらみ径に関係なく、本実験により得られた実験値と各不良接合面及び母材の疲労強度特性はほぼ一致した。また、ふくらみ径 1.0d において、ST に比べ欠陥を意図的に入れた AT, PT の疲労強度は著しく低下することがわかった。

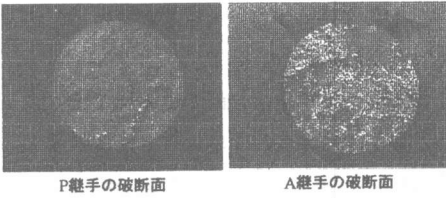
写真—2 に破面観察の一例を示す。写真に示すように、欠陥を意図的に入れた圧接継手の破断面にはフラット破面が形成され、かつ、欠陥の種類によって、フラット破面の大きさは非常に異なることがわかった。このことから、フラット破面が大きいほど圧接継手の疲労強度は低下すると考えられる。



図—7 試験体



図—8 正負交番繰返し試験結果



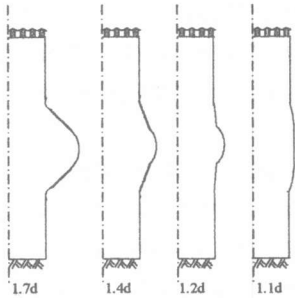
写真—2 欠陥を入れた圧接継手の破断面

4. ガス圧接継手の形状と疲労強度の関係

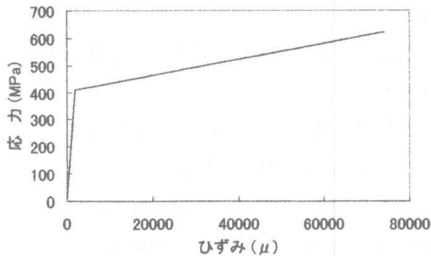
前章までの検討により内部欠陥の存在は圧接部の疲労強度を著しく低下させることが明らかになったことから内部欠陥が存在する場合、圧接界面で破断する可能性がある。そこで弾塑性解析により母材と圧接部のひずみ状態を求め圧接部の形状と疲労強度の関係について検討する。

4. 1 弾塑性 FEM 解析方法

FEM 解析モデルを図—10 に示す。また、解析手法は軸対称の非線形構造解析とし、また、図—3 から、不良接合面と健全接合面の材料特性がほぼ同等なことから、実験値をもとに、弾性係数を 2.06×10^5 MPa、ポアソン比 0.3、降伏後剛性 2.85×10^3 MPa、降伏応力 4.1×10^2 MPa とした (図—11)。



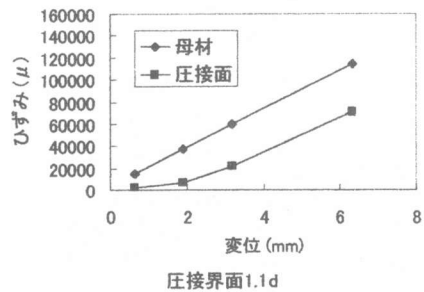
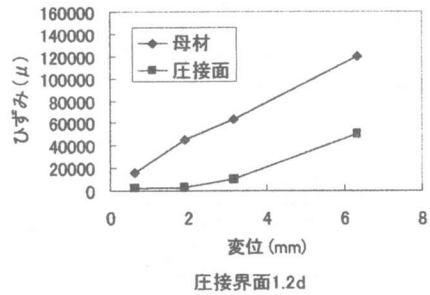
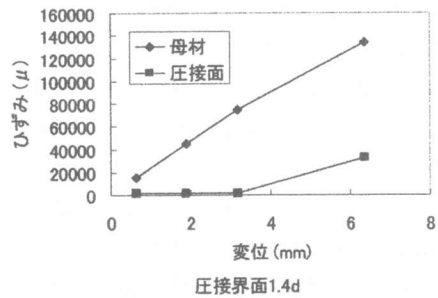
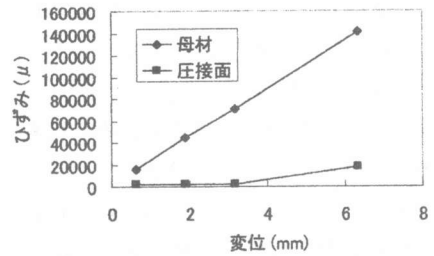
図—10 解析モデル



図—11 応力-ひずみ曲線

4. 2 弾塑性解析結果及び考察

図—12 に各形状における母材と圧接界面部の与えた変位とひずみを示す。



図—12 解析結果

図に示される母材と圧接面のひずみの関係と正負交番繰返し結果を照合し、AT及びPTのふくらみ径が 1.4d~1.1d の場合における疲労強度を推定する。一例として、母材に 60000μ の

ひずみが与えられた時の圧接面のひずみは、1.4dの場合約2500 μ 、1.2dの場合約8000 μ 、1.1dになると22000 μ となる。図-5に示す正負交番繰返し試験結果より、それぞれの圧接面に生じるひずみに対応するPTの破断繰返し回数を求めると、1.4dでは700回、1.2dでは19回、1.1dでは1回、一方60000 μ のときの母材の破断繰返し回数は6回である。よって径が1.2d以上の場合は母材で、それ以下の場合は欠陥のある圧接面で疲労破壊することが予測できる。このような比較を行った結果を図-13に示す。図より、PTにおいては、ふくらみ径が1.4dの場合には母材に非常に大きなひずみを与えても、圧接面での破断はおこらず、すべて母材で疲労破断することが考えられる。しかし、1.1dの場合、母材に40000 μ 以上、1.2dの場合、母材に70000 μ 以上、のひずみが与えられると圧接面で疲労破断すると判断できる。また、ATにおいては、ふくらみ径が1.4dの場合には圧接面での破断は起こらなが、1.1dの場合、母材に60000 μ 以上のひずみが与えられると、圧接面で破断する可能性があるとして判断できる。

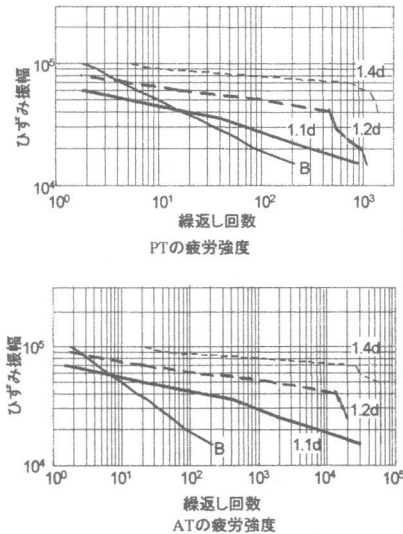


図-13 各ふくらみ形状の疲労強度

5. まとめ

本研究より、今回作製した試験体では、欠

陥が存在する場合の鉄筋ガス圧接継手について以下のことがわかった。

①健全接合面、各不良接合面の引張及び疲労強度特性として、健全接合面は母材とほぼ同等であることがわかった。しかし、各不良接合面においては、引張強度、伸び及び疲労強度は健全接合面に比べ著しく低下することがわかった。さらに、各不良接合面間においても、顕著に差が生じており、欠陥の種類によって引張及び疲労強度特性は全く異なることがわかった。

②正負交番繰返し試験を行った結果、圧接継手の疲労強度は圧接界面及び母材から得られた疲労強度特性とほぼ一致し、圧接部に内部欠陥が存在する場合のみ圧接界面で疲労破断し、健全な圧接継手に比べ、疲労強度は著しく低下する。ただし、ふくらみ形状が1.8d、1.2dにおいては、圧接面では破断しなかった。

③弾塑性解析を行った結果、圧接界面に塗料による内部欠陥が存在する圧接継手及び圧接界面に酸化皮膜による欠陥が存在する圧接継手の場合にはふくらみ径が1.2d以下の場合、母材に非常に大きなひずみを与えられると圧接界面で破断するおそれがある。しかし、いずれの継手においても1.4d以上あれば圧接界面での疲労破断は起こらず、母材部で疲労破断すると判断できる。

謝辞:本研究を行うにあたり、試験体の作製にご協力頂いた日本ガス圧接株式会社ならびに、多大なご協力を頂いた、東京大学国際産学共同研究センター魚本健人教授、東京大学生産技術研究所第五部魚本研究室助手加藤佳孝氏、同研究室技官、研究員の方には心から感謝致します。

参考文献

- 1) 日本圧接協会：鉄筋のガス圧接入門、平成9年1月9日発行
- 2) 日本圧接協会：鉄筋ガス圧接工事標準仕様書、平成6年5月20日改訂第4版1刷
- 3) 建設省土木研究所：鉄筋のガス圧接継手に関する共同研究報告書(1)、(2)、1997.8、1998.3