論文　塑性変形を受けた鉄筋の疲労特性

山中　憲行[*1]・林　貞夫[*2]

要旨：RC構造物において，せん断補強筋の折り曲げ部，主筋や補強筋のひび割れ面近傍は，大きな塑性変形を受ける。塑性変形を受けた鉄筋の疲労特性は明らかにされていない。本研究では，90度まで折り曲げた後曲げ戻しを行った鉄筋(曲げ加工鉄筋)と最大ひずみ度0.5%～10%までの引張力をかけた鉄筋(引張加工鉄筋)の疲労試験を行った。疲労寿命は，曲げ加工鉄筋では無加工鉄筋の3割～5割程度であった。一方，引張加工鉄筋では，最大ひずみ度0.5%～3%の間は無加工鉄筋に比べて最大で3割程度延びる場合があり(延命効果)，3%～10%の間は短くなった。延命効果は，鉄筋内部の亀裂伸展状況を用いれば説明できる。

キーワード：塑性変形，異形鉄筋，疲労，曲げ加工，引張加工，延命効果

1. はじめに

RC構造物において，コンクリートがアルカリシリカ反応によって膨張し，せん断補強筋の折り曲げ加工部で変形が集中し破断する，という報告があった[1)]。折り曲げ部は，過大な塑性変形を受ける所で，破断が繰返し荷重による疲労で起こる危険性がある。更に，ひび割れがコンクリートに発生し，そのひび割れがコンクリート内部の主筋もしくは補強筋にまで達したとき，そこの鉄筋は局部的な引張塑性変形を受ける。引張塑性変形を受けた部分に繰返し荷重が作用すれば，疲労により破断する危険性がある。しかし，塑性変形を受けた鉄筋の疲労特性は明らかにされていない。

本研究では，補強筋の折り曲げ部を想定し一旦折り曲げた後曲げ戻しを行った鉄筋(以下，曲げ加工鉄筋)，および主筋や補強筋のひび割れ面近傍を想定し0.5%～10%のひずみ度となるまで引張力をかけた鉄筋(以下，引張加工鉄筋)を考え，これらの加工を施した鉄筋の疲労試験を行い疲労特性を考察する。併せて，静的試験も行い疲労特性と比較する。

2. 実験概要

試験体は，鉄筋D16(SD295A)を使用する。

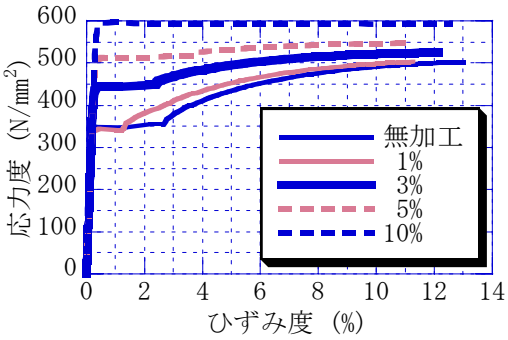
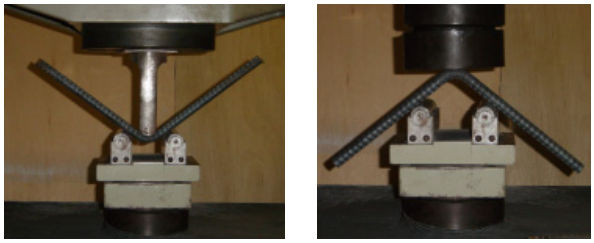


図-1　応力度-ひずみ度関係
(無加工鉄筋および引張加工鉄筋)



(1) 折り曲げ中　　**(2) 曲げ戻し中**

写真-1 曲げ加工状況

図-1に，試験体の応力度-ひずみ度関係を示す。図中の「無加工」は加工していない鉄筋を意味し，その他の凡例内の数値は後述する。

無加工鉄筋の降伏強度は346 N/mm²，ヤング係数は1.91×10⁵ N/mm²，引張強度は514 N/mm²であった。

加工は，曲げ加工と引張加工の2種類を行う。

写真-1に曲げ加工状況を示す。曲げ加工は，梁の1点集中曲げ加力形式(スパン間100 mm)で

*1　前橋工科大学　工学部建築学科助手　工修　(正会員)
*2　前橋工科大学　工学部建築学科教授　工博　(正会員)

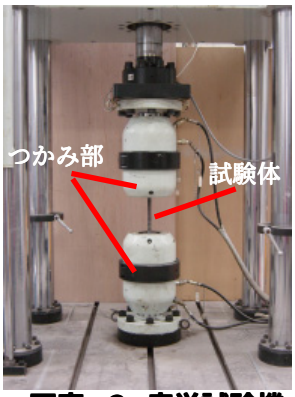


写真 - 2　疲労試験機

表－1　引張加工鉄筋の材料特性

最大ひずみ度 (%)	単位重量 (g/mm)	補正断面積 (mm^2)	降伏強度 (N/mm^2)		ヤング係数 ($10^5 N/mm^2$)		引張強度 (N/mm^2)	
			補正前	補正後	補正前	補正後	補正前	補正後
無加工	1.504	199.0	346	346	1.91	1.91	514	514
0.5	1.500	198.5	339	340	1.87	1.88	511	512
1	1.494	197.7	354	356	1.89	1.90	512	515
2	1.476	195.3	385	392	1.83	1.87	512	522
3	1.462	193.4	428	441	1.80	1.85	514	529
4	1.447	191.4	467	485	1.81	1.89	525	546
5	1.435	189.8	488	512	1.79	1.87	525	551
10	1.374	182.2	547	598	1.79	1.96	549	600

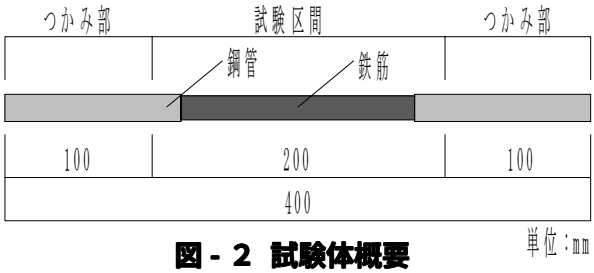


図 - 2　試験体概要

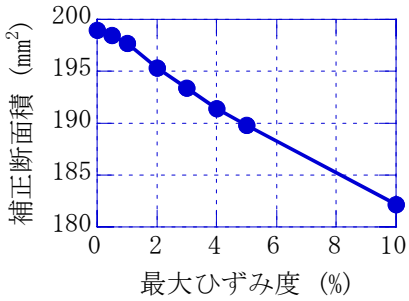


図 - 3　補正断面積 - 最大ひずみ度関係

鉄筋が90度になるまで折り曲げた後，直棒となるように曲げ戻しを行う。90度に折り曲げた直後に曲げ加工部の節と節の間隔をノギスで測定すると，ひずみ度で20%～30%程度変形していた。

引張加工は無加工鉄筋を試験区間1000 mmで引張力をかけながら試験区間の変形量を測定し，所定の変形量となったのち除荷する。所定の変形量をひずみ度で換算すると(以下，最大ひずみ度)，0.5%，1%，2%，3%，4%，5%，10%である。なお，引張加工した鉄筋は端部100mmずつを切り落とし，試験体2体分を作るため長さ400mmに切り分け試験体全長にわたり塑性変形を受けた状態とした。

疲労試験および静的試験はひずみ時効を考慮し，加工後10日間以上加力せず放置したのち行う。**写真 - 2** に疲労試験機を示す。加力は，鉄筋端部を疲労試験機のつかみ部(つかみ長さ100 mm)で固定し荷重を加える。

図 - 2 に，疲労試験の試験体概要を示す。試験区間は，試験体長さから両端部のつかみ長さを引いた値で200 mmである。端部固定の際，鉄筋に傷がつくため，そこから疲労破壊が始まらないように鋼管によって補強した。なお，試験区間と鋼管被覆部が重なるが，試験区間では鋼管と鉄筋に隙間があるため鋼管による影響はないと考えられる。

静的試験の試験区間は，引張加工および無加工鉄筋では文献[2)]を参考に鉄筋の呼び名の10倍で160 mmとした。曲げ加工鉄筋では，曲げ加工による影響を見るためには160mmでは短かったためそれより長くし350mmとした。

加力履歴は，無加工鉄筋の疲労寿命が約50万回もしくは80万回となるものを設定し，最小応力度をゼロとし，最大応力度(引張)を285 N/mm^2もしくは270 N/mm^2の完全片振りの2種類とする。試験体数は，両加力履歴とも，曲げ加工および引張加工鉄筋では6体，無加工鉄筋では9体とする。応力波形は正弦波，加力速度は20 Hzとする。

ここで，引張加工鉄筋の疲労試験を無加工鉄筋と同一の作用荷重(最大応力度と公称断面積の積)で行うと，引張加工鉄筋は塑性変形により断面積が縮小しているため，無加工鉄筋より高い応力度が作用してしまう。そこで作用荷重を，断面縮小を考慮した補正を行う。補正は，鉄筋の単位長さ当たりの重量を測定し無加工鉄筋に比例する形で断面積を求め，この断面積に各最大応力度を乗した値を作用荷重とする。

表 - 1 に補正した断面積を，**図 - 3** に補正した

断面積 - 最大ひずみ度関係を示す。補正断面積は，最大ひずみ度が大きくなるにつれ, 直線的に小さくなる。なお，曲げ加工鉄筋の加力履歴は断面積補正を行わなかった。

3. 曲げ加工鉄筋の静的特性および疲労特性

曲げ加工鉄筋を，曲げ加工部(以下，加工部)を中心にセットして静的引張試験を行った。加工部の中心と，加工部の中心から100 ㎜離れた位置にゲージを貼ってひずみ度を測定した。

図 - 4 に，測定結果を示す。応力度 - ひずみ度関係は，加工部では降伏棚がみられず引張強度に達してもひずみ度は1.5%程度であったが，100 ㎜離れた位置では降伏棚がみられ一般的な性状であった。曲げ加工部の中心は，一旦塑性化したことで変形しづらくなっていることがわかる。

写真 - 3 に, 破断後の写真を示す。写真内の鉄筋はゲージを貼らずに静的試験を行ったものであるが，破断位置は加工部の中心から100 ㎜離れた位置であった。曲げ加工部は，静的試験では破断しなかった。

以上は静的特性の考察であったが，以下では疲労特性を考察する。

表 - 2 に破断位置と，**写**

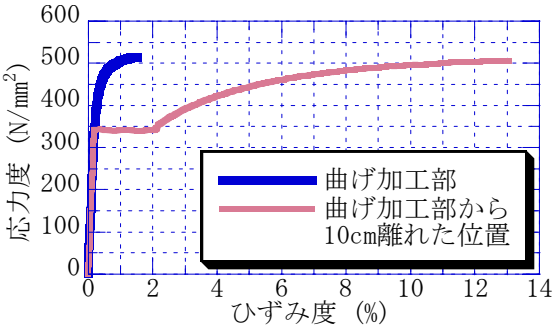


図 - 4 応力度 - ひずみ度関係 (曲げ加工鉄筋)

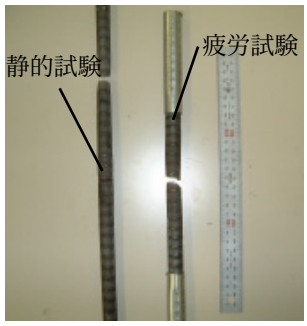


写真 - 3 破断状況 (曲げ加工鉄筋)

表−2 破断位置と疲労寿命

加工		D285シリーズ			D270シリーズ		
		破断位置	疲労寿命 (回)	平均寿命 (回)	破断位置	疲労寿命 (回)	平均寿命 (回)
無加工		端部	354, 142	449, 915	端部	474, 849	759, 565
		端部	398, 582		中間部	499, 910	
		中間部	399, 909		端部	594, 914	
		端部	431, 362		端部	673, 934	
		中間部	440, 111		中間部	713, 269	
		端部	464, 154		端部	715, 826	
		中間部	498, 987		端部	874, 289	
		中間部	519, 326		中間部	948, 649	
		端部	542, 658		端部	1, 340, 445	
曲げ加工		加工部	152, 206	225, 342	加工部	160, 817	252, 522
		加工部	194, 266		加工部	172, 846	
		加工部	227, 753		加工部	231, 015	
		加工部	228, 494		加工部	258, 629	
		加工部	268, 558		加工部	267, 757	
		加工部	280, 776		加工部	424, 065	
引張加工	0. 5	端部	376, 526	471, 247	端部	527, 017	689, 771
		端部	425, 451		中間部	550, 449	
		端部	469, 286		中間部	633, 382	
		中間部	474, 393		端部	672, 456	
		端部	505, 802		中間部	758, 445	
		端部	576, 022		中間部	996, 877	
	1. 0	端部	443, 092	579, 909	中間部	537, 646	646, 206
		中間部	446, 185		端部	566, 773	
		中間部	507, 463		中間部	665, 281	
		端部	604, 689		中間部	681, 522	
		中間部	683, 456		端部	691, 182	
		端部	794, 569		中間部	734, 834	
	2. 0	端部	412, 205	476, 055	端部	443, 446	638, 148
		端部	437, 211		中間部	537, 200	
		端部	486, 733		端部	658, 834	
		端部	488, 261		中間部	670, 204	
		端部	511, 075		端部	739, 226	
		中間部	520, 845		中間部	779, 977	
	3. 0	端部	369, 686	455, 695	端部	456, 394	686, 664
		端部	410, 922		端部	475, 973	
		端部	431, 398		端部	655, 911	
		端部	460, 274		端部	668, 245	
		端部	489, 685		端部	850, 782	
		端部	572, 205		端部	1, 012, 681	
	4. 0	端部	354, 694	445, 637			
		端部	360, 281				
		端部	409, 855				
		端部	466, 434				
		端部	541, 090				
		端部	541, 470				
	5. 0	端部	355, 063	406, 010			
		端部	378, 437				
		端部	392, 537				
		端部	405, 901				
		端部	408, 474				
		端部	495, 647				
	10. 0	端部	280, 541	382, 670	端部	278, 031	466, 315
		端部	297, 170		端部	371, 657	
		端部	328, 563		端部	462, 178	
		端部	398, 868		端部	511, 495	
		端部	454, 736		端部	526, 490	
		端部	536, 141		端部	648, 041	

真-3に破断後の写真を示す。破断位置は，D285シリーズおよびD270シリーズとも全ての試験体において，曲げ加工部の中心であった。破断位置は，疲労試験と静的試験では異なった。なお，無加工鉄筋の破断位置は，鋼管被覆されている「端部」と被覆されていない「中間部」の2種類があった。破断位置は，曲げ加工による影響が現れた。

表-2に疲労寿命を示す。疲労寿命は，両シリーズとも，ばらつきが大きい。以下では，曲げ加工による影響を明瞭にするため，疲労寿命を平均した値(以下，平均寿命)で考察する。

図-5に，無加工鉄筋と曲げ加工鉄筋の平均寿命を比較した図を示す。

D285シリーズの平均寿命は，無加工鉄筋では45万回，曲げ加工鉄筋では23万回であった。D270シリーズの平均寿命は，無加工鉄筋では76万回，曲げ加工鉄筋では25万回であった。平均寿命は，両シリーズとも，曲げ加工によって短くなった。これは，曲げ加工時に生じた残留応力が影響している，と考えられる。

図-6に，無加工鉄筋の平均寿命に対する曲げ加工鉄筋の平均寿命の比率を示す。比率は，D285シリーズでは50%，D270シリーズでは33%であった。曲げ加工によって，平均寿命は無加工鉄筋の3割～5割程度になった。

図-7に，D270シリーズの平均寿命に対するD285シリーズの平均寿命の比率を示す。比率は，無加工鉄筋では59%であったのに対し，曲げ加工鉄筋では92%であった。平均寿命は，曲げ加工による影響の方が疲労試験時の最大応力度の違いより大きいことがわかる。このことから，補強筋の折り曲げ部は最大応力度が小さくても疲労に注意する必要がある，といえる。

4．引張加工鉄筋の静的特性および疲労特性

表-1に引張加工鉄筋の材料特性を，**図-1**に応力度-ひずみ度関係を示す。図の縦軸の応力度は，断面積補正を行った後の値である。また，紙幅の都合上，最大ひずみ度0.5%，2%，4%の応力度-ひずみ度関係は図から省略した。

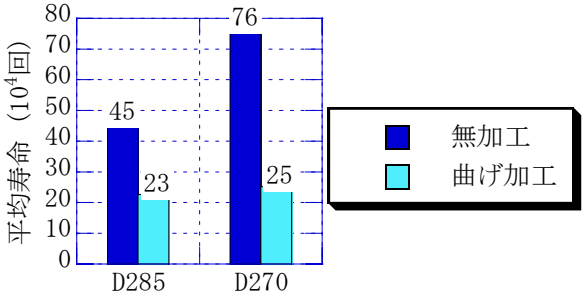


図-5 無加工鉄筋と曲げ加工鉄筋の平均寿命

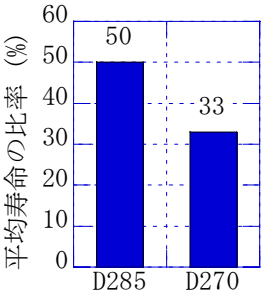


図-6 無加工鉄筋の平均寿命に対する曲げ加工鉄筋の平均寿命の比率

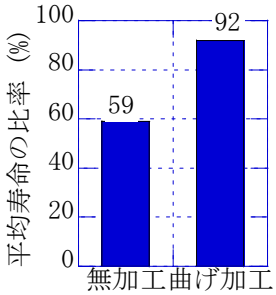


図-7 D270シリーズの平均寿命に対するD285シリーズの平均寿命の比率

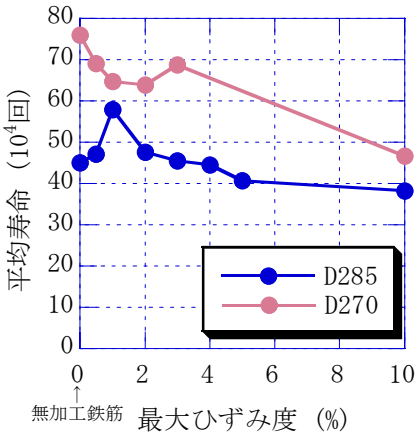


図-8 平均寿命-最大ひずみ度関係

断面積補正を行った後の降伏強度と引張強度は，最大ひずみ度の増大に伴い，大きくなった。なお，破断位置は，どの最大ひずみ度でも，中間部であった。

以上は静的特性の考察であったが，以下では疲労特性を考察する。

表-2に破断位置を示す。破断位置は，D285シリーズおよびD270シリーズともに，最大ひずみ度3%を境にこれより大きくなると「端部」のみであった。破断位置は，引張加工によって，つかみ部での鉄筋固定による微細な傷や応力の乱れによる影響が大きくなる，といえる。

表 - 2 に疲労寿命を示す。疲労寿命は，引張加工鉄筋でもばらつきが大きい。以下では，最大ひずみ度によって，平均寿命がどのような影響を受けるかを考察する。

図 - 8 に，平均寿命 - 最大ひずみ度関係を示す。図中の最大ひずみ度ゼロは無加工鉄筋のことを指す(以下，同様)。

平均寿命は次のとおりであった。

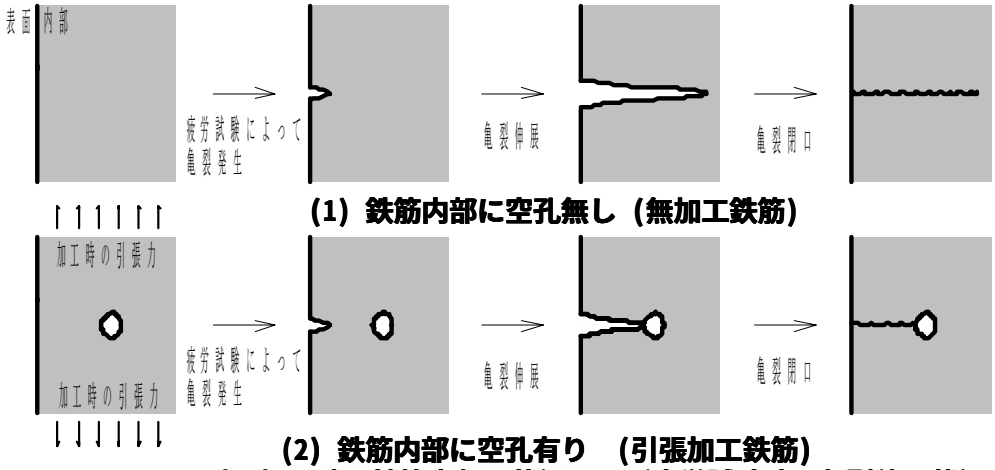
D285 シリーズでは，最大ひずみ度ゼロは 45 万回，0.5% は 47 万回，1% は 58 万回，2% は 48 万回，3% は 46 万回，4% は 45 万回，5% は 41 万回，10% は 38 万回であった。平均寿命は，最大ひずみ度がゼロから 1 % と大きくなるにつれ延び，それ以降は短くなった。引張加工によって，平均寿命は無加工鉄筋より延びることがある(延命効果)。同様の効果を，鋼材(SS400 材)ではあるが文献[3]でも指摘している。

一方，D270 シリーズでは，最大ひずみ度ゼロは 76 万回，0.5% は 69 万回，1% は 65 万回，2% は 64 万回，3% は 69 万回，10% は 47 万回であった。平均寿命は，最大ひずみ度がゼロから 2% まで大きくなるにつれ短くなり，2% から 3% となるにつれ延び，それ以降は短くなった。

延命効果が現れた理由を，転移論[4]および鋼橋の疲労対策で用いられるストップホール[5]の考え方に基づき説明を試みる。

図 - 9 に，引張加工時の鉄筋内部の状況および疲労試験時の亀裂伸展状況をミクロ的にみた図を示す。図中の上側と下側の違いは，鉄筋内部に空孔が無いか有るかである。

転移論に基づき引張力を受ける鉄筋の内部状況をモデル化すると，塑性変形によって転移の増殖および移動が起き，内部欠陥として空孔が発生するもしくは拡大する(図の一番左下)。なお，図中では，空孔は1つしかないが実際には多数存在する。



(1) 鉄筋内部に空孔無し（無加工鉄筋）

(2) 鉄筋内部に空孔有り　(引張加工鉄筋)

図 - 9　引張加工時の鉄筋内部の状況および疲労試験時の亀裂伸展状況 (ミクロ的な観点に基づく)

疲労試験を開始し亀裂が発生すると(図の左から 2 番目)，最大応力状態に達する間に亀裂が伸展し(図の左から3番目)，最小応力状態では亀裂が閉じる(図の一番右)。この亀裂伸展状況を亀裂先端でみると，空孔の有無で異なる挙動を示すはずである(図の上下)。亀裂先端は，空孔が無い状態では表面から亀裂先端まで閉じるが(完全閉口状態)，空孔が有る状態では亀裂先端が完全に閉じない(不完全閉口状態)。

ここで，空孔を意図的に作り亀裂伸展を抑制した対策「ストップホール」を考えてみる。ストップホールの考え方は，不完全閉口状態とすることで亀裂先端の応力集中を完全閉口状態より緩和し亀裂伸展を遅延させる。その結果，不完全閉口状態の平均寿命は完全閉口状態より延びる。

以上をまとめると，引張加工時に発生した空孔が亀裂伸展を遅延させ，延命効果に寄与したと考えられる。空孔は，最大ひずみ度の増大に伴い，発生数の増加および拡大するため延命効果の促進に繋がるとも考えられるが，実験結果は必ずしもそうなっていない。これは，空孔も数が多すぎれば断面欠損は過大となり亀裂伸展は早まる。更に，最大ひずみ度の増大に伴い残留応力も増加する。従って，最大ひずみ度が大きいから

といって，延命効果は起きるとは限らない。また，D270シリーズは延命効果が起きなかったが，このことは更に加力履歴を増やし考察を加えていく予定である。

図-10に，無加工鉄筋の平均寿命を100としたときの引張加工鉄筋の平均寿命の比率を示す。

この比率は次のようになった。

D285シリーズは，最大ひずみ度がゼロから3%間では100%～127%でそれ以降は85%まで低下した。一方，D270シリーズは，最大ひずみ度ゼロから3%間では85%～100%で，それ以降は60%まで低下した。引張加工鉄筋の平均寿命は，無加工鉄筋の0.6倍～1.3倍程度であった。また，上記の比率は，どの最大ひずみ度でも，D285シリーズの方がD270シリーズより大きい。従って，疲労試験時の最大応力度が小さい方が，平均寿命に与える引張加工の影響は大きい，といえる。

ここで，指針式[6)]から求めた疲労寿命を，曲げ加工鉄筋と最大ひずみ度10%の引張加工鉄筋の疲労寿命の最小値を比較する。**図-11**に比較した図を示す。疲労寿命の最小値は，曲げ加工および引張加工鉄筋の両方とも，指針式の寿命より長い。曲げ加工および引張加工鉄筋の疲労寿命は，本試験範囲内であれば，指針式を用いれば安全側の設計ができる。

5．まとめ

試験体は異形鉄筋D16(SD295A)を考え，曲げ加工鉄筋と引張加工鉄筋の疲労試験を行った。加力履歴は，引張応力度で285 N/mm^{2}と270 N/mm^{2}の完全片振り加力の2種類とした。

疲労寿命は，曲げ加工鉄筋では無加工鉄筋の3割～5割であった。また，破断位置は，疲労試験では曲げ加工部であったが，静的試験では曲げ加工部から離れた位置であった。以上のことから，せん断補強筋の折り曲げ部は疲労を考える必要がある。

引張加工鉄筋の疲労寿命は，0.5%～3%間のひずみ度まで引張加工した場合は無加工鉄筋の3割も延びることがあり(延命効果)，3%～10%間のひずみ度までの場合は短くなった。延命効果は，鉄筋内部の亀裂伸展状況を用いれば説明できる。

今後は加力履歴を増やして更なる考察を行う。

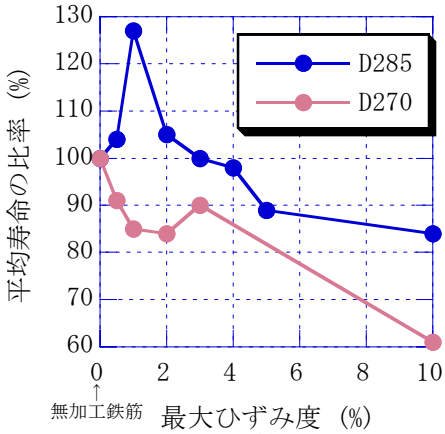


図-10 無加工鉄筋の平均寿命を100としたときの比率

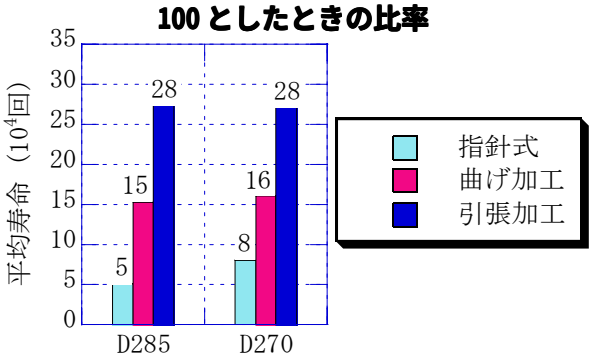


図-11 指針式と比較

参考文献

1) 中島俊和ほか ： ASR膨張がコンクリート構造物の鉄筋破断に与える影響，コンクリート工学年次論文集，Vo.25，No.1，pp.1535-1540，2003

2) 日本建築学会 ： 建築実験用教材，1989

3) 増山琢也ほか ： 塑性履歴を受けた2，3の鋼構造要素の疲労寿命，土木学会第39回年次学術講演梗概集，1-130，pp.259-260，1984

4) 加藤雅治ほか ： 材料強度学，朝倉書店，1999

5) 山田健太郎ほか ： ガセットを溶接した引張部材の疲れ強さとストップホールの効果，土木学会論文報告集，第341号，pp.129-136，1984.1

6) 土木学会 ： コンクリート標準示方書(構造性能照査編)，2002.12