

論文 緊張した連続繊維プレートで補強した RC はりの曲げ疲労特性

井上 真澄*¹・濱田 譲*²・高木 宣章*³・児島 孝之*³

要旨: 本研究では、炭素繊維プレートを緊張・定着することにより既存コンクリート部材にプレストレスを導入して補強する方法を実用化することを目的として、緊張した炭素繊維プレートで補強した RC はりの曲げ疲労載荷試験を実施し、その疲労強度やプレートの付着・定着特性に及ぼす繰返し荷重の影響等を検討した。TL-20 荷重に対して設計された RC はりをプレート補強することにより、B 活荷重相当の繰返し荷重が作用しても、補強前のはりの損傷度およびプレート緊張力に関わらず、十分な耐疲労性能が得られた。

キーワード: 炭素繊維プレート, 曲げ疲労, プレストレス, 補強, 剥離

1. はじめに

緊張したシートあるいはプレートなどの補強材をコンクリート部材に接着し、接着剤硬化後、補強材を切断してコンクリートと補強材間の付着により部材にプレストレスを導入する方法¹⁾がある。この補強方法は、接着剤の硬化に日数がかかること、プレストレス導入時に補強材が剥離する可能性があること、補強材の高強度を有効に利用できないなどの問題点が指摘されている²⁾。

本研究では、引抜き成形された炭素繊維プレート(以下、プレート)を緊張・定着することにより既存コンクリート部材にプレストレスを導入して補強する方法を実用化することを目的として、緊張したプレートで補強した RC はりの曲げ疲労載荷試験を実施し、その疲労強度やプレートの付着・定着特性に及ぼす繰返し荷重の影響を検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

連続繊維には炭素繊維を使用し、引抜き成型寸法を 50×2mm としてブルトルージョン法に

より製作した。プレートの力学的特性を表-1 に示す。繊維体積含有率は 62.2% である。プレートの接着には、エポキシ系接着剤を使用した。

コンクリートの示方配合を表-2 に示す。セメントには普通ポルトランドセメント(密度: 3.16)を使用し、水セメント比は 52% とした。表-3 に曲げ疲労載荷試験時のコンクリートの力学的特性を示す。

表-1 炭素繊維プレートの力学的特性

設計幅 (mm)	50
設計厚 (mm)	2
保証耐力 (kN)	234
弾性係数 (N/mm ²)	150
破断ひずみ (μ)	15600

表-2 コンクリートの示方配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
		W	C	S	G	SP
52	41.9	157	302	756	1077	0.755

注) スランプ: 80mm, 空気量: 4.5%

表-3 コンクリートの力学的特性

	ひび割れ導入時	載荷時
圧縮強度	29.5	38.9
引張強度	2.72	2.96
曲げ強度	5.41	6.94
弾性係数	32000	32000

(単位: N/mm²)

2.2 供試体の概要

表-4 に供試体の名称および実験要因を、図

*1 立命館大学大学院 理工学研究科総合理工学専攻 工修 (正会員)

*2 ドービー建設工業 (株) 技術センター 工修 (正会員)

*3 立命館大学教授 理工学部土木工学科 工博 (正会員)

表-4 供試体名称および実験要因

シリーズ	供試体名称	ひび割れ導入	補強方法		疲労载荷条件	
			目標緊張量(kN)	中間定着具	上限荷重* (kN)	下限荷重 (kN)
I	I-N-00	無し	11.4 [5%]	無し	26.0 ~ 85.1 (9.8kN ずつ増加)	11.0 (8.7%)
	I-D-50P	有り	116.8 [50%]	有り		
II	II-N-50P-70	無し	116.8 [50%]	有り	88.2 (70%)	11.0 (8.7%)
	II-N-50P-60				75.6 (60%)	
	II-N-50P-50				63.0 (50%)	

注) 上限荷重* シリーズ I : 図-2 に示すように順次上限荷重を増加, 下限荷重は一定
 シリーズ II : 上限荷重および下限荷重は一定
 [] : プレートの目標緊張力と保証耐力の比率, () : (上限荷重/N-50P 供試体の静的曲げ耐力: 126kN³⁾)

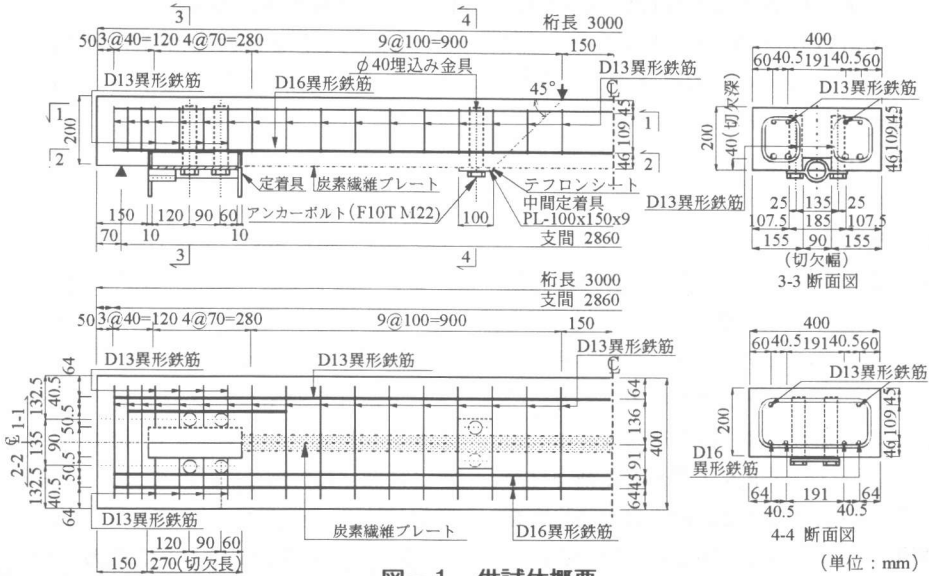


図-1 供試体概要

一 1 に供試体の概要を示す。供試体の寸法は、400×200×3000mm である。プレート緊張に用いた定着具を供試体に定着するために、支点近傍には幅 90mm、深さ 40mm、長さ 270mm の切り欠きを設けた。シリーズ I は、TL-20 荷重に対して設計された橋梁に B 活荷重が作用した時の疲労に対するプレート補強効果を検討するシリーズである。ここで、TL-20 荷重は旧道路橋示方書において 1 等橋の設計時に載荷する活荷重 (総重量 196kN) であり、B 活荷重は現行の道路橋示方書において総重量 245kN の大型車の走行頻度が比較的高い状況を想定した活荷重である。一方、シリーズ II は、プレート補強した橋梁の曲げ疲労特性を検討するシリーズである。実験に用いた RC はりは、荷重履歴を受けていないはり (健全はり : TypeN) と、引張鉄筋が降伏するまで曲げ載荷してひび割れ損傷

を与えたり (損傷はり : TypeD) の 2 種類とした。シリーズ I の健全はりではプレートを接着補強した I-N-00 供試体以外は、プレートの目標緊張力をプレート保証耐力の 50% として、中間定着具を設置した。

引張鉄筋には、D16 (SD295, $f_{py}=355\text{N/mm}^2$) を 4 本使用した。有効高さは 154mm、引張鉄筋比は 1.29% である。曲げ破壊に先行してせん断破壊が生じないように、スターラップには D13 (SD295, $f_{py}=368\text{N/mm}^2$) を 100mm 間隔で配置した。

2.3 補強方法

プレートの定着には、規格膨張圧 30N/mm^2 の定着用膨張材を用いた定着長 250mm の付着型定着具を使用した。

プレストレス導入手順を以下に示す。プレートを所定の長さに切断し、定着用膨張材を用い

て両端に定着具を取り付け、定着具を養生する。はり供試体のプレート接着面をディスクサンダーで表面処理した後、プライマーを塗布する。プライマーの養生後、形鋼を組み合わせて製作した緊張用フレームにプレートをセットし、油圧ジャッキで所定の緊張力まで緊張する。続いて、緊張用フレームにプレートを仮固定した後、プレートにエポキシ樹脂系接着剤を塗布し、供試体に予め設置した埋め込み金具(φ40mm)とアンカーボルト(F10T, M22mm)を用いて定着具を供試体に定着する。その後、速やかに緊張用フレームの仮固定装置を開放することにより、供試体にプレストレスが導入され、プレートはコンクリート面に接着される。中間定着具を設置する場合は、一連の緊張作業が終了した後、載荷点から250mm離れたせん断スパン内に予め設置した埋込み金具とアンカーボルトを用いて、鋼板(軸方向長さ100mm×厚さ9mm)を供試体に固定した。鋼板端部におけるプレートの角折れを緩和するために、プレートと鋼板の間にはテフロンシートを挿入した。

2. 4 載荷方法および測定項目

載荷条件は、支点間距離2860mm、曲げスパン300mm、せん断スパン有効高さ比(a/d)8.31の対称2点集中載荷とした。疲労試験の繰返し載荷速度は0.5~4Hzとし、正弦波による部分片振り繰返し載荷とした。

図-2にシリーズIの載荷パターンを示す。シリーズIでは、曲げひび割れの発生を確認した後、初期上限荷重(26kN)まで静的載荷を行い、上限荷重到達後、下限荷重を11kNとして200万回繰返し載荷を行った。その後、上限荷重を9.8kNずつ増加して順次20万回の繰返し載荷を供試体が破壊するまで行った。なお、初期上限荷重は、TL-20荷重で設計された5径間連続RC中空床版道路橋(支間=5×15m=75m)にB活荷重を載荷した場合の試設計を行い、引張鉄筋応力度を算定した結果を供試体に反映して決定した。すなわち、補強前の橋梁にB活荷重が作用した時、支間中央断面の引張鉄筋応力度は

181N/mm²であった。そこで、無補強供試体の引張鉄筋応力度が181N/mm²になる荷重を逆算して上限荷重とした。また、下限荷重(11kN)は、支間中央断面の死荷重作用時の引張鉄筋応力度が76.7N/mm²であったことに基づき、初期上限荷重と同じ方法で逆算して求めた。

シリーズII供試体の上限荷重は、N-50P供試体の静的曲げ耐力(126kN)³⁾に対する比率が、それぞれ70, 60, 50%となるように決定した。下限荷重は、シリーズIと同じ11kN(8.7%)とした。なお、200万回の繰返し載荷を行っても供試体が疲労破壊しない場合は、疲労載荷終了後静的曲げ載荷試験を実施し、供試体の残存曲げ耐力を確認することとした。

計測項目は、スパン中央圧縮縁および引張縁のコンクリートひずみ、引張鉄筋ひずみ、プレートひずみ、スパン中央たわみおよび曲げスパン内のひび割れ幅とした。また、1万回から50万回毎に繰返し載荷を中断して静的曲げ載荷を実施し、所定の計測を行った。

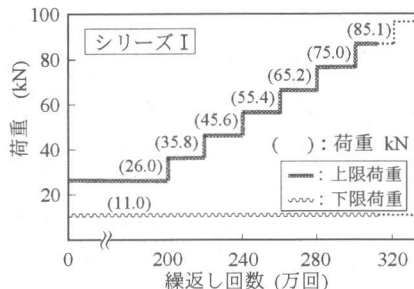


図-2 載荷パターン (シリーズI)

3. 実験結果および考察

表-5に疲労試験結果を示す。有効緊張力は、載荷直前のプレートひずみにプレートの弾性係数と断面積を乗じて算定した。なお、全ての供試体において、プレートは疲労破断しなかった。破壊に至るまで、定着具からのプレートの抜け出しも観察されなかった。また、端部および中間定着具付近のコンクリートおよびアンカーにも、繰返し載荷に伴う変状は観察されなかった。

3. 1 シリーズI

B活荷重相当の繰返し荷重が作用しても、

表-5 疲労試験結果

供試体名称	η (%)	上限荷重 (kN)	曲げ破壊耐力(kN)		上限荷重比 (%) *4	疲労寿命 N	破壊モード*6
			実験値*2	計算値*3			
I-N-00	15	75.0 *1	86	91.4	82.1	92,461 [2,892,461]	B
I-D-50P	50	85.1 *1	126	123.6	68.9	67,024 [3,067,024]	P → B
II-N-50P-70	53	88.2	126	125.4	70.3	192,581	P → B
II-N-50P-60	51	75.6		124.2	60.9	647,417	P → B
II-N-50P-50	49	63.0		123.0	51.2	2,000,000 *5	—

注) η : プレートの有効緊張力と保証耐力の比率(有効緊張力比), []: 累積繰返し回数
 *1: 最終上限荷重, *2: 参考文献³⁾
 *3: 各供試体の有効緊張力比を考慮して, 断面分割法を用いて算定した曲げ破壊耐力
 *4: 上限荷重/曲げ破壊耐力計算値, *5: 200万回で繰返し載荷を終了
 *6: Pはプレート剥離, Bは鉄筋破断

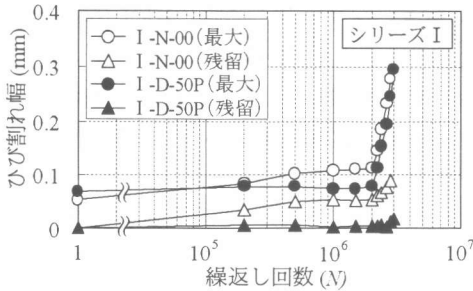


図-3 ひび割れ幅と繰返し回数の関係 (シリーズI)

200万回の繰返し回数までは, 補強前の損傷程度およびプレート緊張力に関わらず十分な耐疲労性能が得られた。I-N-00 供試体は, 上限荷重 75.0kN の载荷中に破壊し, 累積繰返し回数は約 289 万回であった。破壊モードは, 引張鉄筋の疲労破断であり, プレートの剥離は観察されなかった。これに対し, I-D-50P 供試体は, 上限荷重 85.1kN の载荷中に累積繰返し回数約 307 万回で破壊に至り, 疲労寿命は前者より長くなった。破壊モードはプレート剥離であり, 剥離後数十回の繰返し載荷を受けた後に, 引張鉄筋が疲労破断して最終的な破壊に至った。

図-3にひび割れ幅と繰返し回数の関係を示す。図には, 上限荷重载荷時の最大ひび割れ幅と, 除荷時の残留ひび割れ幅を示している。I-N-00 供試体では, 繰返し回数 200 万回までの初期上限荷重の载荷中においても, 最大ひび割れ幅および残留ひび割れ幅は増加した。これに対し, I-D-50P 供試体は, 補強前に荷重履歴を受けているので, 载荷初期のひび割れ幅は I-N-00 供試体よりも大きくなった。しかし, B 活荷重相当の初期上限荷重の载荷中(200 万回

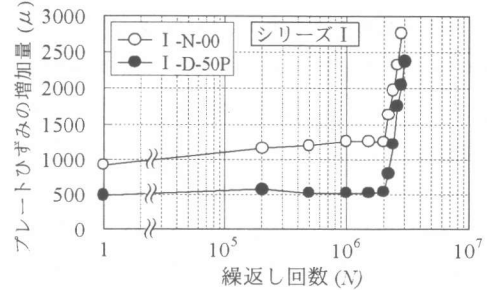


図-4 プレートひずみの増加量と繰返し回数の関係 (シリーズI)

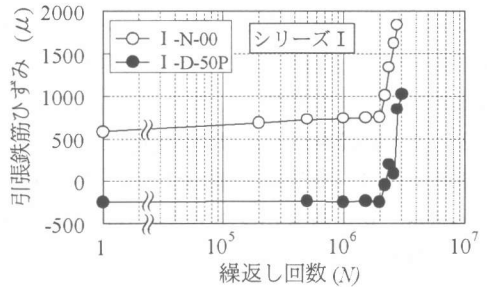


図-5 引張鉄筋ひずみと繰返し回数の関係 (シリーズI)

まで)に, 最大ひび割れ幅は増加せず, プレートを緊張する効果が確認できた。また, その後上限荷重を段階的に増加しても, 残留ひび割れ幅は 0.015mm 程度であり, プレートの有効緊張力比が大きい場合には, 優れたひび割れ抑制効果を発揮することが確認された。

上限荷重時のプレートひずみの増加量および引張鉄筋ひずみと繰返し回数の関係を各々図-4, 5に示す。I-N-00 供試体のプレートひずみの増加量および引張鉄筋ひずみは, プレートの緊張力が小さいため, 最大ひび割れ幅と同様に, 初期上限荷重の载荷中においても繰返し回数に伴い増加した。I-D-50P供試体のプレート

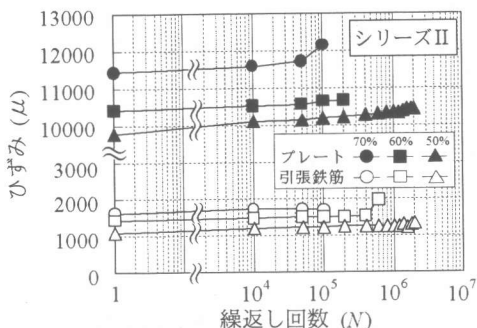


図-6 プレートひずみおよび引張鉄筋ひずみと繰返し回数の関係 (シリーズII)

ひずみの増加量はプレートの緊張力が大きいために、ひび割れ抑制効果により I-N-00 供試体よりも小さくなった。また、引張鉄筋ひずみも I-N-00 供試体より小さい値を示しており、引張鉄筋の応力負担を低減している。したがって、繰返し载荷に伴うプレート剥離は、遅延されたものと考えられる。

3.2 シリーズII

II-N-50P-70およびII-N-50P-60供試体の疲労寿命は、それぞれ約19万回および約65万回であった。破壊モードは、I-D-50P供試体と同様にプレート剥離であり、プレート剥離後引張鉄筋が疲労破断した。これに対し、上限荷重が比較的小さいII-N-50P-50供試体は、200万回の繰返し载荷を終えても疲労破壊しなかった。しかし、比較的幅の広い曲げひび割れ付近では、部分的にプレートが剥離していることが確認された。

図-6に上限荷重時のプレートひずみおよび引張鉄筋ひずみと繰返し回数の関係を示す。破壊近傍で、鉄筋あるいはプレートのひずみが急増している供試体はあるものの、通常のRCはりの曲げ疲労試験で鉄筋が疲労破断するときの鉄筋ひずみと繰返し回数の関係と同様の傾向が観察された。

図-7にシリーズIIにおけるS-N曲線とその回帰式を示す。縦軸の S_r および S_{min} は、各々RCはりに作用している荷重振幅および下限荷重と静的曲げ耐力の比である。静的曲げ耐力には、供試体の有効緊張力を考慮して、断面分割法により計算した曲げ耐力を用いた。また、図には

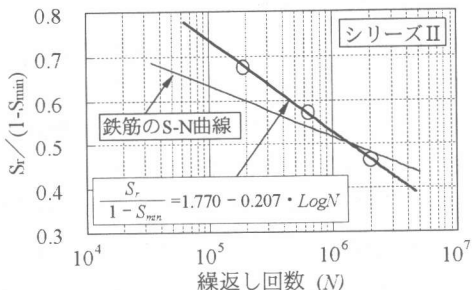


図-7 S-N曲線 (シリーズII)

引張鉄筋のS-N曲線図も示している。鉄筋のS-N曲線は、各上限荷重に対応する引張鉄筋の応力振幅(f_{srd})と下限応力(σ_{sp})を断面分割法により算出し、土木学会「コンクリート標準示方書(設計編)」⁴⁾に規定されている式(1)より疲労寿命(N)を逆算して求めた。

$$f_{srd} = 190 \frac{10^a}{N^k} \left(1 - \frac{\sigma_{sp}}{f_{ud}}\right) / \gamma_s \quad (1)$$

f_{srd} : 鉄筋の設計疲労強度(応力振幅)

N: 疲労寿命, σ_{sp} : 永久荷重による鉄筋応力度(下限荷重時に鉄筋に作用する応力度は圧縮となるため, $\sigma_{sp}=0$ として算定)

f_{ud} : 鉄筋の設計引張強度, k: 係数(=0.12)

γ_s : 鉄筋に対する材料係数(=1.0)

$a = k_0(0.81 - 0.003\phi) = 0.762$

ϕ : 鉄筋直径(=16mm)

k_0 : 鉄筋のふしの形状に関する係数(=1.0)

II-N-50P-70 およびII-N-50P-60 供試体の破壊モードは、プレート剥離であった。また、II-N-50P-50 供試体では、繰返し载荷終了時点で、部分的ではあるがプレートの剥離が進行していた。そこで、S-N 曲線の回帰式は、全供試体の破壊モードをプレート剥離と仮定し、実験値を最小二乗法で回帰して求めた。その結果、S-N 曲線の回帰式と実験値には、高い相関関係が認められた。したがって、本実験の範囲においては、この回帰式を用いてプレート補強したRC はりのプレート剥離疲労強度を求めることができるものと考えられる。

各供試体の疲労寿命と引張鉄筋の平均疲労寿命を比較すると、 $S_r / (1 - S_{min})$ が 0.5 以上の場

合、鉄筋の疲労寿命の方が幾分小さくなった。これは、式(1)が鉄筋の疲労寿命を安全側に与えているためである⁵⁾。したがって、プレート補強したRC部材の曲げ疲労破壊は、構成材料である鉄筋の疲労性状に基づいて推定する⁶⁾と同時に、繰返し载荷に伴うプレートの剥離性状に基づいて推定することが必要であると考えられる。本実験の範囲において、プレートにより補強したRCはりの200万回疲労強度は、静的曲げ耐力の約50%であると推察される。

3.3 残存曲げ耐力確認試験

II-N-50P-50供試体は、200万回の繰返し载荷を行っても疲労破壊に至らなかったため、静的曲げ载荷試験を実施し、繰返し载荷後の残存曲げ耐力を確認した。図-8に荷重と支間中央たわみの関係を示す。図には、コンクリートの配合が同じでプレートの緊張力がほぼ等しい既報告³⁾のD-50P供試体の静的载荷試験時のたわみ曲線も示す。II-N-50P-50供試体のたわみは、上限荷重レベル(63kN)ではD-50P供試体より2mm程度しか増加していない。破壊近傍で、プレートは数回の剥離音とともにスパン全長にわたって剥離し、それとほぼ同時に曲げスパン圧縮部コンクリートが圧壊して破壊した。残存耐力は114kNとなり、D-50P供試体の静的曲げ耐力(126kN)より小さくなった。これは、疲労载荷中にプレートとコンクリート間の付着が劣化し、プレートの剥離が部分的に進行していたためであると考えられる。

4. 結論

- (1) TL-20荷重に対して設計されたRCはりをプレート補強することにより、B活荷重相当の繰返し荷重が作用しても、補強前のRCはりの損傷度およびプレート緊張力に関わらず、十分な耐疲労性能が得られた。
- (2) プレート補強したRCはりの200万回疲労強度は、静的曲げ破壊耐力の約50%程度であり、破壊モードはプレート剥離であった。
- (3) プレート補強したRC部材の曲げ疲労破壊は、

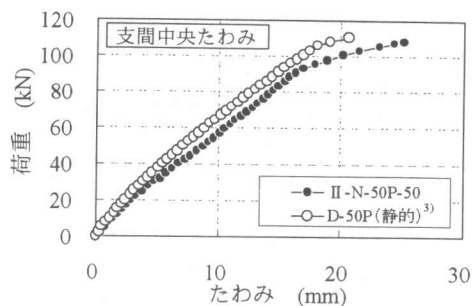


図-8 荷重と支間中央たわみの関係
(残存曲げ耐力確認試験時)

鉄筋の疲労性状と繰返し载荷に伴うプレートの剥離性状に基づいて推定することが必要である。

謝辞: 本研究で使用した炭素繊維プレートは、日鉄コンポジット(株)より提供して頂いた。また、RCはりの製作は、(株)国際建設技術研究所のご協力を得た。ここに記して、感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 関島謙蔵, 木暮明人, 鈴木秀人, 大塚靖: FRPプレートを緊張材に用いたPC補強工法の開発, コンクリート構造物の補修工法と電気防食に関するシナジウム論文報告集, pp.85-92, 1994
- 2) 呉智深, 松崎智優, 福沢公夫, 神田建: CFRPシート緊張接着による鉄筋コンクリート曲げ部材の補強効果に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.641/V-46, pp.153-165, 2000
- 3) 濱田譲, 阪上徳行, 高木宣章, 児島孝之: 緊張した連続繊維プレートで補強したRCはりの曲げ特性に関する研究, セメント・コンクリート論文集, No.54, pp.446-453, 2000
- 4) 土木学会: コンクリート標準示方書[設計編], pp.17-44, 1996
- 5) 岡村甫, 二羽淳一郎: 鉄筋コンクリート部材の疲労, コンクリート工学, Vol.21, No.1, pp.22-30, 1983
- 6) 松下博通, 高倉克彦: 限界状態設計法におけるコンクリートの疲労強度の特性値とせん断疲労耐力の設計用値, コンクリート工学, Vol.22, No.8, pp.14-23, 1994