

[1109] アルカリ骨材反応を受けた PC はり部材の耐荷性状に関する研究

正会員 小林和夫 (京都大学工学部)
 正会員 ○井上 晋 (京都大学工学部)
 山崎鷹生 (阪神高速道路管理技術センター)
 正会員 中野錦一 (大阪セメント研究所)

1. はじめに

本研究は、アルカリシリカ反応 (ASR) を呈する反応性骨材を用いた PC はり供試体に対して、促進養生試験により膨張・ひびわれ発生状況を調査した後、静的載荷試験と疲労試験により基本的部材特性を非反応性骨材を使用したものと比較し、ASRを受けた PC はり部材の保有耐荷特性を評価する上での基礎的資料を得ることを目的としたものである。

2. 試験概要

1) PC はり供試体の種類

幅×全高×全長=10×20×160cmの長方形断面単純はりとし、次の3要因を選定した。

(i)コンクリートの種類：設計基準強度を350kg/cm²とした次の3種類のコンクリートを採用した。ただし、細骨材はいずれも非反応性普通骨材とした。

配合Ⅰ：粗骨材を全て非反応性とした普通コンクリート (Ⅰ)

配合Ⅱ：粗骨材を全て反応性とし、NaClの添加によってNa₂O当量を6kg/m³とした膨張ひずみの比較的小さなASRコンクリート (Ⅱ)

配合Ⅲ：粗骨材の混合割合に対するベシマム効果を考慮して容積比で反応性：非反応性=0.5：0.5とし、NaClの添加によってNa₂O当量を8kg/m³とした膨張ひずみのかなり大きなASRコンクリート (Ⅲ)

(ii)導入プレストレス：断面下縁での目標プレストレス (三角形分布) を50kg/cm² (PC鋼棒φ11使用) と100kg/cm² (PC鋼棒φ15使用) の2レベルとした。

(iii)せん断スパン・有効高さ比：静的試験ではa/d=2.5, 4.0の2種類、疲労試験ではa/d=4.0の1種類とした。

なお、腹鉄筋には矩形スターラップ (D6) を10cm間隔で配置し、腹鉄筋比を0.56%とした。これは道路橋PC桁の平均的な値に対応する。

以上の組合せにより作製した供試体の種類と

表-1 PCはりの種類・最終膨張量およびコンクリート強度

供試体	φ1配 合 PC 鋼棒	促進養生 期間 (日)	最終膨張量				プレストレス導入時 ^{*2} コンクリート強度		はり載荷試験時 コンクリート強度		
			PC鋼棒 (×10 ⁻⁵)	組立筋 (上) (×10 ⁻⁵)	組立筋 (下) (×10 ⁻⁵)	スター ラップ (×10 ⁻⁵)	圧縮強度 (kg/cm ²)	弾性係数 (kg/cm ²)	圧縮強度 (kg/cm ²)	割裂強度 (kg/cm ²)	弾性係数 (kg/cm ²)
I-1	φ11	284	39	73	-176	245	356	2.73x10 ⁵	503	34.2	4.20x10 ⁵
I-2	φ15	284	-37	249	-139	372	356	2.73x10 ⁵	503	34.2	4.20x10 ⁵
I-3	φ15	405	-88	358	-115	581	356	2.73x10 ⁵	557	42.4	3.81x10 ⁵
I-4	φ15	405	-48	456	-78	400	356	2.73x10 ⁵	557	42.4	3.81x10 ⁵
I-5	φ15	284	-32	210	-195	332	356	2.73x10 ⁵	503	34.2	4.20x10 ⁵
II-1	φ11	284	99	570	-19	388	347	2.65x10 ⁵	518	26.8	3.89x10 ⁵
II-2	φ15	284	116	382	-109	465	347	2.65x10 ⁵	518	26.8	3.89x10 ⁵
II-3	φ15	405	-65	345	-102	508	347	2.65x10 ⁵	565	39.2	4.01x10 ⁵
II-4	φ15	405	57	614	-244	624	347	2.65x10 ⁵	565	39.2	4.01x10 ⁵
II-5	φ15	284	12	501	-65	479	347	2.65x10 ⁵	518	26.9	3.89x10 ⁵
III-1	φ11	181	376	1101	166	1626	421	2.46x10 ⁵	307	18.7	1.76x10 ⁵
III-2	φ15	181	135	868	-103	1470	421	2.46x10 ⁵	307	18.7	1.76x10 ⁵
III-3	φ15	181	193	840	-186	1426	421	2.46x10 ⁵	307	18.7	1.76x10 ⁵
III-4	φ11	181	376	920	133	1490	421	2.46x10 ⁵	307	18.7	1.76x10 ⁵

*1 表-2参照
 *2 材令29日

断面寸法をそれぞれ表-1, 図-1に示す。

2) 使用材料

セメントは普通ポルトランドセメント, 細骨材は非反応性の川砂, 粗骨材は反応性, 非反応性のいずれも最大寸法20mmの砕石を用いた。P C鋼棒には $\phi 11\text{mm}$ ($f_{py}=110\text{kg/mm}^2$)と $\phi 15\text{mm}$ ($f_{py}=106\text{kg/mm}^2$), スターラップ筋と組立筋にはD6異形鉄筋($f_{sy}=32\text{kg/mm}^2$)を使用した。

3) コンクリートの示方配合および養生方法

普通コンクリート(I), ASRコンクリート(II, III)の示方配合を表-2に示す。

供試りは材令28日まで 20°C 室内で湿空養生

し, 材令29日でプレストレスを導入した後, 表-1に示す期間, 40°C , R.H.100%で促進養生を実施した。

4) 試験方法

(i) 膨張特性試験

促進養生開始時を基点
(20°C 室内での値を基準

値として測定後, 直ちに促進養生室に設置)としたP C鋼棒, スターラップ, 上下組立筋のひずみ変化を電気抵抗線ひずみゲージ(焼付処理: 貼付位置図-1参照)で測定した。

(ii) 静的載荷試験

曲げ卓越型, せん断卓越型載荷条件下での耐荷性状を検討するため, スパン140cmの単純はりの対称2点集中荷重方式($a/d=4.0, 2.5$)とし, 設計荷重時(断面下縁に導入時プレストレスと同大の引張応力が発生する荷重)以降, 適当な荷重レベルで完全除荷・再載荷を行いながら破壊までのスパン中央たわみ, P C鋼棒とスターラップ筋のひずみを測定した。

(iii) 疲労試験

普通コンクリート(I), ASRコンクリート(II)のP Cはり各2本についてスパン140cm, $a/d=4.0$ の対称2点集中荷重で, 下限荷重を1.0t, 上限荷重を第一ステップでは設計荷重, 第二ステップ以降では設計荷重と静的曲げ破壊荷重(計算値)間を5等分した各荷重に設定し, 各 10^5 回ずつ繰返し載荷した。各上限荷重において繰返し数が $10^3, 10^4, 5 \times 10^4, 10^5$ 回に達した時に静的載荷を行い, スパン中央たわみを測定した。

3. 試験結果および考察

1) 膨張特性

P C鋼棒, スターラップ筋, 上下組立筋ひずみの経時変化の一例を図2に示す。なお, 本実験では, 普通コンクリート(I)でも, 定常状態でスターラップ筋やプレストレスが0に近い上側組立筋に平均して 300×10^{-6} 程度の引張ひずみが発生しているが, これはひずみ測定の基長を 20°C 室内とし, 以後の測定は 40°C , R.H.100%室内での促進養生下で実施したため, 両者の温度差

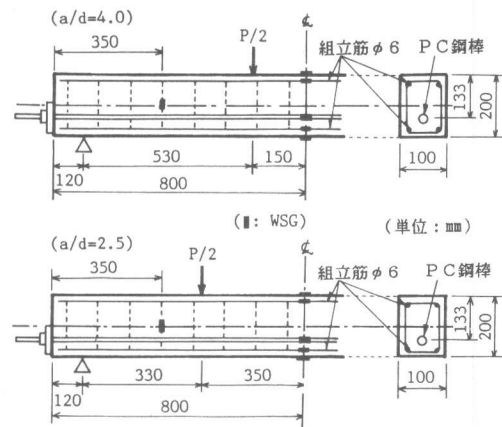


図-1 P Cはりの断面寸法

表-2 コンクリートの示方配合

種別	W/C (%)	s/a (%)	単位重量 (kg/m ³)						水和剤 ウインゾル (C×%)	備考 Na ₂ O (kg/m ³) ^{a)}
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G		Na ₂ O (kg/m ³) ^{a)}		
						非反応性	反応性			
I (N)	5.0	44.0	176	352	767	1018	—	0.010	—	
II (A)	5.0	44.0	176	352	767	—	961	0.010	6	
III (A)	5.0	44.0	176	352	780	516	487	0.010	8	

a) Na₂O量 (kg/m³): セメントからのNa₂O量を差し引き, 残りをNaClで添加し, 総量でそれぞれ6, 8kg/m³とした。

と湿潤膨張によるものと考えられる。

まず、プレストレス作用方向と直交するスターラップ筋ひずみに着目すると、ASRコンクリート(Ⅱ)では、普通コンクリートに較べて引張ひずみの増大は最大で 200×10^{-6} 程度であって、損傷レベルとしては軽微でひびわれは認められなかった。これに対し、ASRコンクリート(Ⅲ)では、引張ひずみは 1500×10^{-6} 程度に達し普通コンクリートに較べて 1200×10^{-6} 程度大きく、損傷レベルとしてはきわめて激しいものと判断され、ASR特有の多数の部材軸方向ひびわれが観察された(後述図5参照)。

次に、PC鋼棒と上下組立筋の最終ひずみ測定値に基づいて断面の軸方向ひずみ分布を求めた結果を図-3に示す。なお、図中の点線($\phi 11$)、実線($\phi 15$)は同一条件供試体についての平均値を表す。同図のように断面下縁プレストレスを 100kg/cm^2 程度とした場合、下側組立筋位置(プレストレス 90kg/cm^2 程度)では普通コンクリート(Ⅰ)、ASRコンクリート(Ⅱ、Ⅲ)間でほとんど差異はなくいずれも圧縮(収縮)を呈し、この程度のプレストレスが存在すればASRによる膨張はほぼ完全に拘束されることを示す。上側組立筋位置(プレストレス 10kg/cm^2 程度)については、ASRコンクリート(Ⅲ)では 850×10^{-6} 程度で普通コンクリートと比較すると 500×10^{-6} 程度大きな引張ひずみが発生しているが、この値は上記のスターラップ筋の引張ひずみに較べると著しく小さく、 10kg/cm^2 程度のプレストレスでもかなり大きな膨張拘束効果が期待できることを示唆している。一方、断面

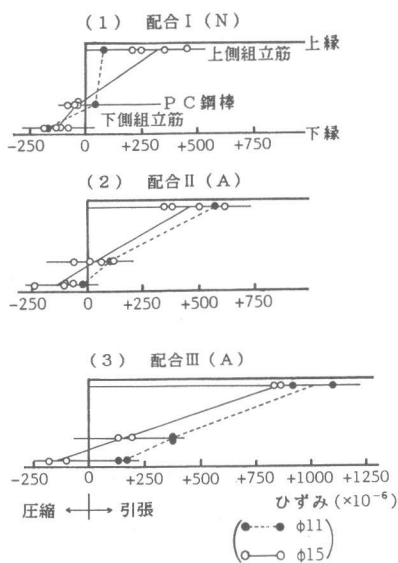


図-3 促進養生終了時の断面軸方向ひずみ分布

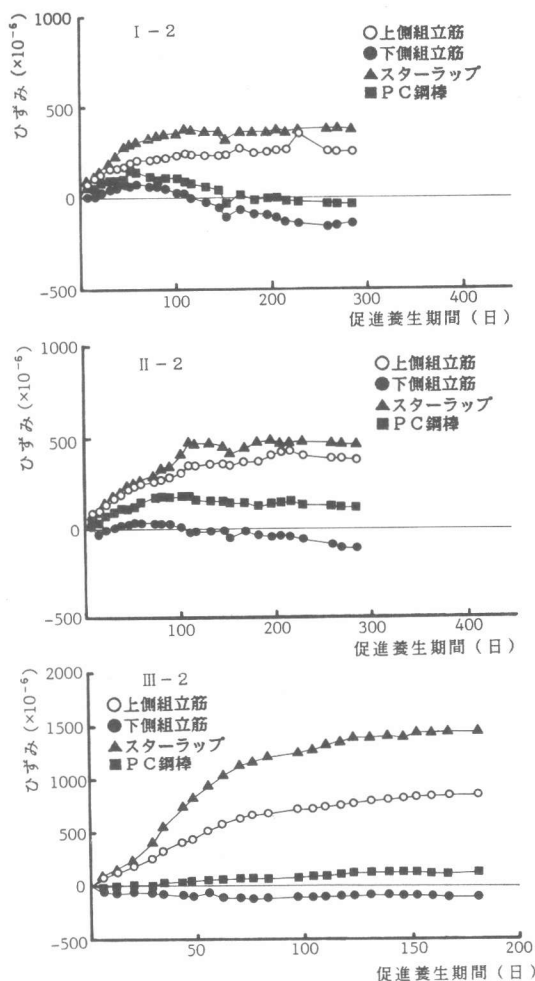


図-2 ひずみの経時変化の一例 (+: 引張, -: 圧縮)

下縁プレストレスを $50\text{kg}/\text{cm}^2$ 程度とした場合、下側組立筋位置（プレストレス $45\text{kg}/\text{cm}^2$ 程度）のひずみは、普通コンクリートでは圧縮，ASRコンクリート（Ⅱ）ではほぼ0であるのに対して，ASRコンクリート（Ⅲ）では 150×10^{-6} 程度の引張を示している。

また，ASRコンクリート（Ⅲ）について，断面内の各位置での初期導入プレストレスとひずみ（最終値）の関係を整理したものを図-4に示すが，膨張ひずみはプレストレスレベルによって著しく相違するものの，少量のプレストレスでかなり大きな膨張拘束効果が得られることがうかがえる。

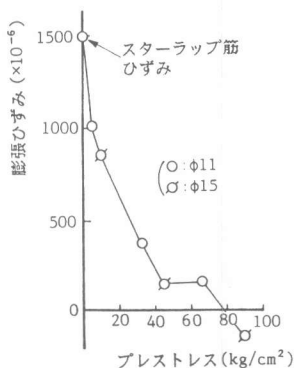


図-4 膨張ひずみとプレストレスの関係

2) シリンダー供試体によるコンクリート特性

PCはりのプレストレス導入時（ 20°C ，材令29日）と載荷試験時（ 40°C ，R.H.100%促進養生終了後）の $\phi 10 \times 20\text{cm}$ シリンダー供試体によるコンクリート強度と弾性係数（圧縮強度の1/3点割線係数）を表-1に示す。促進養生終了後においては，ASRコンクリート（Ⅱ）の無拘束下での圧縮強度，引張強度，弾性係数は同一設計基準強度の普通コンクリートと同等であるが，ASRコンクリート（Ⅲ）ではそれぞれ60%，50%，40%程度に低下し

表-3 PCはりの静的試験結果

供試体	配合	a/d	設計荷重 P_d' (ton)	設計荷重時 たわみ			曲げひびわれ発生荷重 (実験値) P_{cr} (ton)	最大荷重 ^{*)3)}	
				δ (mm)	δ' ^{*)1)} (mm/ton)	α ^{*)2)}		実験値 P_u (ton)	計算値 P_u' (ton)
I-1	I	4.0	1.72	0.42	0.244	1.00	2.00	7.50	6.50
II-1	II	4.0	1.73	0.31	0.179	0.73	3.75	7.37	6.52
III-1	III	4.0	1.88	0.53	0.282	1.16	3.00	6.95	6.08
I-2	I	4.0	3.08	0.68	0.221	1.00	4.00	10.25	9.57
II-2	II	4.0	3.10	0.84	0.271	1.23	4.00	10.60	9.62
III-2	III	4.0	3.42	0.86	0.251	1.14	4.00	8.99	8.46
I-3	I	2.5	4.98	0.80	0.161	1.00	7.50	18.00	15.65
II-3	II	2.5	4.97	0.78	0.157	0.98	7.50	18.50	15.68
III-3	III	2.5	5.49	1.24	0.226	1.40	7.00	17.40	13.59
III-4	III	2.5	3.02	0.69	0.228	1.42	3.00	13.15	9.76

^{*)1)} δ /設計荷重

^{*)2)} 各群で普通コンクリート（配合I）PCはりのたわみを1.00としたときのたわみ比

^{*)3)} 計算値はFpyを使用した曲げ破壊荷重の計算値

ている。

3) PCはりの部材特性

(i) 静的特性

a. 耐荷力

曲げひびわれ発生（断面下縁ひずみ測定により確認）と最大荷重の実験値を表-3に，また，PCはりのひびわれ・破壊状況の一例を図-5に示す。

シリンダー供試体ではASRコンクリート（Ⅲ）の引張強度は普通コンクリートの50%程度まで低下しているが，PCはりとしての曲げひびわれ耐力は同等もしくはむしろ前者の方が大きくなっている。これは，PCはりではプレストレスによるASRの膨張拘束効果によって無拘束下のシリンダー供試体のような著しい強度劣化が生じない可能性が高いこと，また図-3の断面ひずみ分布からASRコンクリートでは膨張によりPC鋼材引張力の減退が小さく，むしろ初期値より増大することもあり得ること，などによるものと考えられる。

一方，図-5に示すようにPCはりはコンクリート種類，導入プレストレス，a/dに関係なくいずれも最終的には曲げ破壊を呈した。

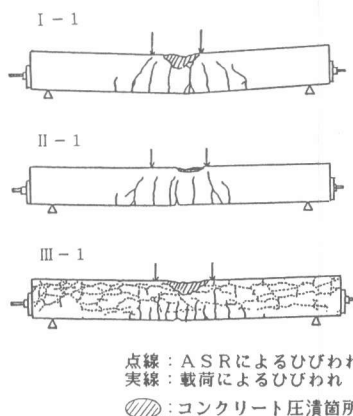


図-5 PCはりのひびわれ・破壊状況の一例（静的試験）

表-1によると、ASRコンクリート(Ⅲ)のようにスターラップ筋の引張ひずみが 1200×10^{-6} 程度にも達し、多数の軸方向ひびわれが発生するようなきわめて激しいASR条件下でも、終局曲げ耐力の低下は最大で10%程度であって、腹鉄筋比で0.5%程度のスターラップ筋を有すると、 $a/d = 2.5$ というせん断卓越型載荷下でもせん断破壊が起こらず、静的にはきわめて健全な耐荷力を保有することが示される。

b. 変形特性

荷重-スパン中央たわみ(P- δ)関係の一例を図-6に示すが、荷重上昇域および下降域(最大耐力以降のフォーリングブランチ領域)のP- δ 曲線については、普通コンクリート(Ⅰ)、ASRコンクリート(Ⅱ、Ⅲ)間で特に顕著な相違は認められない。同図にはコンクリートとPC鋼材の応力-ひずみモデル[1]を適用したP- δ の計算値を併記した。ただし、ASRコンクリート(Ⅲ)の圧縮強度は普通コンクリートに等しいものと仮定した。いずれについても、フォーリングブランチ領域を含めたP- δ 曲線はこのような方法によって比較的良好に表現できることが示される。

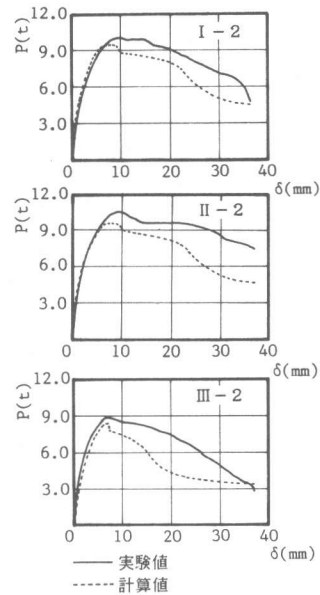


図-6 荷重～たわみ(P～ δ)関係の一例(静的試験)

一方、表-3には各PCはりの設計荷重作用時のスパン中央たわみを併記した。コンクリートの種類以外はすべて同一条件のPCはり間でも実導入プレストレスの差によって設計荷重が多少相違するので、ここでは設計荷重作用時たわみ δ を設計荷重で除した値 δ' で比較することとする。

表-3によると、ASRコンクリート(Ⅱ)のPCはりの δ' は普通コンクリートとほぼ同等であるが、ASRコンクリート(Ⅲ)では $a/d = 4.0$ で約15%増、 $a/d = 2.5$ で約40%増となっている。しかし、ASRコンクリート(Ⅲ)のシリンダー供試体による弾性係数は普通コンクリートの45%程度であり、これからすると δ' の増加率は120%程度と推定されるが、PCはり部材としての剛性低下はこれに較べて著しく小さく、部材中での膨張拘束の存在が示唆される。

(ii) 疲労特性

a. 破壊性状・疲労寿命

表-4に示すように、普通コンクリートを用いたPCはり2体のうち、1体は上限荷重レベル5ステップ目の $N = 99820$ 回でPC鋼材の破断により、また他の1体は6ステップ目(静的終局曲げ耐力計算値に相当)の $N = 60$ 回で曲げスパン内コンクリートの圧潰によって疲労破壊した。一方、ASRコンクリート(Ⅱ)のPCはり2体は上限荷重レベル6ステップ目の $N = 40, 120$ 回において曲げスパン内コンクリートの圧潰によって疲労破壊した。

このように、PCはりの曲げ疲労寿命に関しては、普通コンクリートとASRコンクリート(Ⅱ)の間ではほとんど差は認められない。また、ひびわれ発生状況につい

表-4 PCはりの疲労試験結果

供試体	配合	a/d	設計荷重 Pd' (ton)	終局荷重計算値 Pu' (ton) ^{a1)}	疲労寿命 (回) ^{a2)}	破壊形式
I-4	I	4.0	3.11	9.74	⑤段階 99820	PC鋼材破断
I-5	I	4.0	3.08	9.58	⑥段階 60	コンクリート圧潰
II-4	II	4.0	3.09	9.76	⑥段階 120	コンクリート圧潰
II-5	II	4.0	3.10	9.62	⑥段階 40	コンクリート圧潰

a1) 計算値は f_{py} を使用した曲げ破壊荷重の計算値
a2) 疲労荷重段階(各段階10万回)
①Pd' ②Pd' + (Pu' - Pd') / 5 ③Pd' + 2(Pu' - Pd') / 5
④Pd' + 3(Pu' - Pd') / 5 ⑤Pd' + 4(Pu' - Pd') / 5 ⑥Pu'

ても、両者で顕著な差はみられなかった。

b. 変形特性

図-7のように、いずれも上限荷重レベルが4ステップ目（静的終局曲げ耐力計算値の73%）以下の場合、 $N \leq 10^5$ 回では繰返し回数の増大ともなうたわみの増加はほとんど認められない。しかし、上限荷重が5ステップ目（静的終局曲げ耐力計算値の87%）に達すると、 $N = 10^4$ 回以後たわみが急激に増大し始め、この段階から疲労損傷が顕著となることが示唆される。しかし、繰返し荷重下の変形特性に関しては、疲労寿命と同様に普通コンクリート（I）とASRコンクリート（II）の間でほとんど差は認められない。

4. 結論

ここでは、スターラップ（腹鉄筋比0.56%）の実測引張（膨張）ひずみが 200×10^{-6} 、 1200×10^{-6} 程度のASRコンクリート（II）、（III）のPCはり（断面下縁の初期導入プレストレス：50, 100kg/cm²程度）の膨張特性と静的・疲労耐荷特性を検討した。

本研究から得られた主要な結果を要約すると以下のとおりである。

- ① ASRコンクリート（II）の無拘束下でのシリンダー供試体による圧縮強度、引張強度、弾性係数は同一設計基準強度の普通コンクリートと同等であるが、ASRコンクリート（III）ではそれぞれ60%、50%、45%程度に低下する。
- ② ASRによる部材軸方向の膨張ひずみは導入プレストレスによって著しく相違するが、少量のプレストレス（10kg/cm²程度）でもかなり大きな拘束効果が期待できる。
- ③ $a/d = 2.5, 4.0$ のいずれのPCはりも静的載荷下では曲げ破壊を呈し、ASRコンクリート（III）でも普通コンクリートに対する終局曲げ耐力の低下は最大で10%程度である。
- ④ ASRコンクリート（III）のPCはりでも、設計荷重作用時のたわみはシリンダー供試体の弾性係数から推定されるものに較べて著しく小さく、また最大耐力以降のフォーリングブランチ領域の荷重～たわみ特性（じん性）についても普通コンクリートとほとんど差異はみられない。
- ⑤ ASRコンクリート（III）の疲労試験は実施しなかったが、ASRコンクリート（II）のPCはりの曲げ疲労特性は普通コンクリートとほとんど差が認められない。

参考文献

- [1] Thompson, K.J. & Park, R: "Ductility of Prestressed and Partially Prestressed Concrete Beam Sections", PCI Journal, p.p.46~70, 1980, Mar.-Apr.

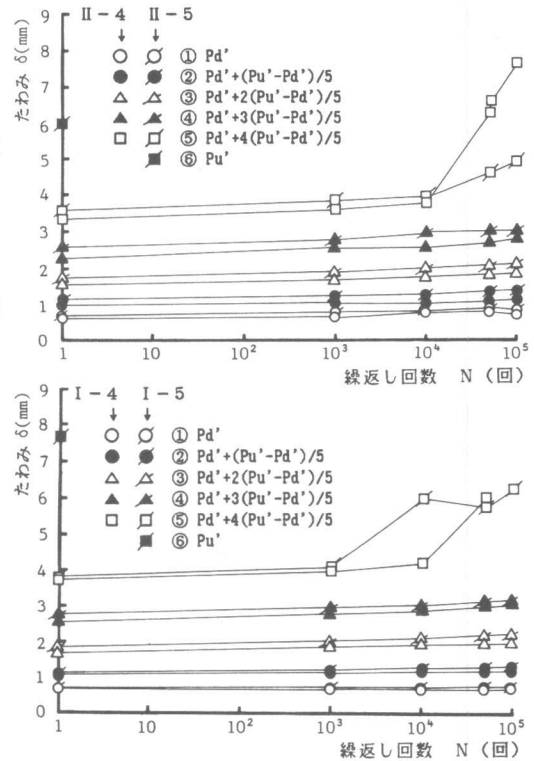


図-7 最大たわみ～繰返し回数
関係（疲労試験）