

港 湾 技 研 資 料

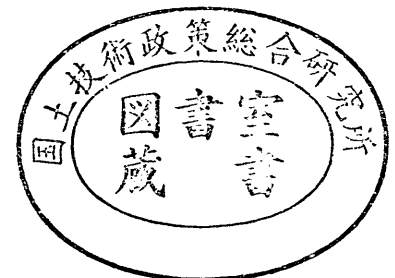
TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 559 Sept. 1986

コンクリートはり部材の水中における力学的特性
に関する実験的研究

大 即 信 明
大 越 康 史
横 井 聰 之

運輸省港湾技術研究所



目 次

要 旨	3
1. まえがき	3
2. 本研究における検討内容	4
3. 実験の概要	4
3.1 鉄筋コンクリート (RC) はりを用いた載荷試験	4
3.2 プレストレストコンクリート (PC) はりを用いた載荷試験	4
4. 供試体の製作	4
4.1 供試体形状	4
4.2 供試体製作材料	6
4.3 コンクリートの配合および打設	8
4.4 供試体の脱型およびプレストレスの導入	8
5. 実験方法	9
5.1 載荷装置および載荷方法	9
5.2 測定項目および測定方法	9
6. 解析方法	10
6.1 終局限界状態	10
6.2 使用限界状態	13
6.3 疲労限界状態	14
7. 実験結果およびその考察	15
7.1 終局限界状態	15
7.2 使用限界状態	17
7.3 疲労限界状態	30
7.4 本実験結果の適用範囲	53
7.5 設計上の対策	54
8. 結 論	54
9. あとがき	54
参考文献	54

コンクリートはり部材の水中における力学的特性 に関する実験的研究

大即 信明*
大越 康史**
横井 聰之***

要 旨

コンクリートはり部材の水中における力学的特性が気中のものと異なることは定性的には知られていたが、設計に反映されることはなかった。これは、種々の安全率により安全であるという工学的判断があったためと思う。しかしながら、十分な裏づけはないものと思う。したがって、この問題についての検討は必要である。

さらに、最近のすう勢として、コンクリート構造物の設計法は、限界状態設計法に移行しつつあり、港湾構造物においても同設計法の採用が検討されている。限界状態設計法においては、一般に、終局限界状態、使用限界状態および疲労限界状態に対して、構造物の安全性および使用性の検討を行うことが要求される。そのため、コンクリート部材のより詳細な力学的特性に関する知識が必要となる。なお、通常の状態（気中）におけるコンクリート部材の力学的特性に関しては、従来より他機関で研究が行われており、知見が得られており、これをもとにコンクリートの設計法が築かれている。

本研究では、コンクリートはり部材の水中における力学的特性の把握を目的とし、水中および気中において、代表的なコンクリート部材であるはり部材（鉄筋コンクリート製およびプレストレストコンクリート製）について載荷試験（静的および疲労試験）を実施した。実験結果をもとに、水中と気中におけるコンクリートはり部材の力学的特性（コンクリートの強度、部材の耐力、たわみ、ひびわれ、疲労強度等）の相違を明らかにすることによってコンクリートはり部材の水中における力学的特性を把握することとした。

本研究により得られた主要な結論は、以下のとおりである。

- (1) 鉄筋コンクリートおよびプレストレストコンクリートはり部材の静的耐力は、試験の環境の相違（水中および気中）によっては顕著な影響は受けなかった（重ね継手のない場合）。
- (2) 繰り返し荷重下ではその影響が現れ、水中での疲労強度は、気中でのそれに比べて、10～20%の低下がみられた。
- (3) 鉄筋の重ね継手を有するはりでは、水中での静的耐力および疲労強度は、気中に比べて約25%低い値となった。

また、これらの結果は、設計に反映できると判断した。

1. まえがき

コンクリート部材の水中における力学的特性が、通常の気中におけるものとはやや相違するということは定性的には知られていた。しかしながら、それは定量的に把

握されていず、また、設計にも反映されていなかった。この理由は、気中のコンクリートはり部材の力学的特性との差は小さいであろうという判断とコンクリートの安全率3でその差は十分カバーされているとの判断があったものと推察した。

* 構造部 材料施工研究室長

** 前構造部 材料施工研究室（現運輸省港湾局）

*** 構造部長

しかしながら、水中にあるコンクリート部材の設計をより合理的に行うには、コンクリート部材の水中での力学的特性をより明確に把握する必要がある。

また、現在、コンクリート構造物の設計法は、港湾構造物を含め、これまでの許容応力度設計法から、限界状態設計法に移行するすう勢にある。現在、土木学会により提案されている限界状態設計法指針¹⁾においては、水中での力学的特性についての記述は非常に少ない。港湾コンクリート構造物の設計法として、限界状態設計法を採用する場合には、水中でのコンクリート部材の力学的特性を十分把握しておく必要がある。

上記の2つの理由、すなわち、学術的および設計法上の理由により、コンクリート部材の水中における力学的特性を定量的に把握することは意義がある。

本研究においては、代表的なコンクリート部材であるコンクリートはり部材の載荷試験(静的および疲労)を気中および水中で行い、コンクリートはり部材の力学的特性(静的耐力、疲労強度、鉄筋とコンクリートの付着強度、断面の曲げ剛性、ひびわれ性状など)に関する実験を行った。この実験結果より、コンクリートはり部材の水中における力学的特性を気中のものと比較することによって把握することとした。

2. 本研究における検討内容

本研究は、コンクリートはり部材の水中における力学的特性について検討するものである。また、最終的には限界状態設計法への適用も考えているので、限界状態設計法において必要となる力学的特性を中心に検討する。

さて、限界状態設計法において考慮すべき限界状態は3種類あり、以下にそれらの定義を記す^{1), 2)}。

終局限界状態 — 構造物または部材が破壊したり、転倒、座屈、大変形などを起こし、安定や機能を失う状態

使用限界状態 — 構造物または部材が過度のひびわれ、変位、変形、振動などを起こし、正常な使用ができなくなったり、耐久性を損なったりする状態

疲労限界状態 — 構造物または部材が、変動荷重の繰り返し作用により疲労破壊する状態

設計では、これらの限界状態のおおのについて検討すべき力学的特性がある。これらの力学的特性を示す。

(1) 終局限界状態

終局限界状態に関しては、コンクリート部材の終局耐力(曲げ耐力およびせん断耐力)を検討する。

(2) 使用限界状態

使用限界状態に関しては、ひびわれ(ひびわれ発生荷重およびひびわれ幅)、部材のたわみ、曲げ剛性、コン

クリートおよび鋼材のひずみについて検討する。

(3) 疲労限界状態

繰り返し荷重による破壊回数を検討する。

3. 実験の概要

本研究では、水中での力学的特性を、十分解明されている気中でのそれを基準として検討することとした。すなわち、以下に示す実験を気中および水中で実施し、両者の結果を比較検討することとした。なお、コンクリートはり部材としては、一般に使用されている鉄筋コンクリートはりおよびプレストレストコンクリートはりを対象とした。

3.1 鉄筋コンクリート(RC)はりをを用いた載荷試験

RCはりでは、普通のはり(重ね継手、打継目等がない)の静的な実験および疲労実験を行った。さらに、鉄筋の重ね継手を有するはりについても静的な実験および疲労実験を行った。以下に概要を示す。

(1) RCはり静的実験(実験I)^{3), 4)}

実験Iでは、く(矩)形断面のRCはりをを用いて、静的載荷実験を行った。この実験では、支点間距離を変化させて、曲げまたはせん断により破壊するRCはりの、終局耐力、ひびわれ性状等の検討を行った。

(2) RCはり疲労試験(実験II)⁵⁾

く形断面のRCはりをを用いて疲労試験を行った。鉄筋径を変化させ、その影響も検討した。

(3) 鉄筋の重ね継手を有するRCはりの疲労試験(実験III)⁶⁾

水中では、鉄筋とコンクリートの付着力が低下することが考えられるため、鉄筋の重ね継手の強度に及ぼす水の影響を検討した。

3.2 プレストレストコンクリート(PC)はりをを用いた載荷試験

(1) く形PCはり静的試験(実験IV)^{3), 4)}

この実験では、く形PCはりにより、実験Iと同様に静的試験を行い、曲げまたはせん断を受けるはりの性状を検討した。

(2) く形PCはり疲労試験(実験V)⁷⁾

く形PCはり供試体を用いて、疲労試験を行った。

(3) T型PCはり疲労試験(実験VI)

PCはりは、T型で用いられることが多いため、T型断面のPCはり供試体を用いて疲労試験を行った。

実験I～実験VIの試験条件等を、表-1に示す。

4. 供試体の製作

4.1 供試体形状

供試体形状の概要を以下に示す。

表-1 試験条件概要

実験 No.	供試体種類	供試体名	載荷手順	a/d	備考
実験 I	く形 RC	RCA	S, B	5.0, 3.75, 2.5, 1.25	静的試験
実験 II	"	RCB	B, FF	3.75	
		RCC			重ね継手有
実験 III	"	RCJ	S, F	"	
実験 IV	く形 PC	PCA	S, B	5.0, 3.75, 2.5, 1.25	静的試験
実験 V	"	PCB	S, F	3.75	
実験 VI	T型 PC	PCT	S, F	"	曲げ区間補強

注) RC J 供試体の重ね継手長は, 32, 40, 48, 56, 64cm の 5 種類で, 供試体名は, それぞれ RCJA, RCJB, RCJC, RCJD, RCJE である。

(1) 実験 I および実験 II (く形 RC はり, 供試体 RCA, RCB および RCC)

形状は, 幅 10cm, 高さ 15cm, 長さ 200cm である。

(2) 実験 III (く形 RC はり, 重ね継手あり, 供試体 RCJ)

形状は, 幅 10cm, 高さ 15cm, 長さ 200cm であり, 重ね継手長としては, 32, 40, 48, 56, および 64cm の 5

種類を用いた。

この供試体の鉄筋の重ね継手に関し補足説明を加えると, 「コンクリート標準示方書 (55 年度版)」⁹⁾により算定すれば, 所要重ね継手長 48cm が得られる。ここでは, 継ぎ手長の長さによる耐力への影響を調べるため, 継ぎ手長を上記の値 (順に, 供試体 RCJA, RCJB, RCJC, RCJD, RCJE の重ね継手長に対応する) とした。

(3) 実験 IV および実験 V (く形 PC はり, 供試体 PCA, および PCB)

形状は, 幅 10cm, 高さ 15cm, 長さ 200cm である。

(4) 実験 VI (T 型 PC はり, 供試体 PCT)

形状は, フランジ幅 25cm, ウェブ幅 10cm, 高さ 22cm, 長さ 200cm である。

以上に説明した実験 I ~ VI に用いた供試体の形状および配筋状況の概要を, 図-1 ~ 図-4 に示す。

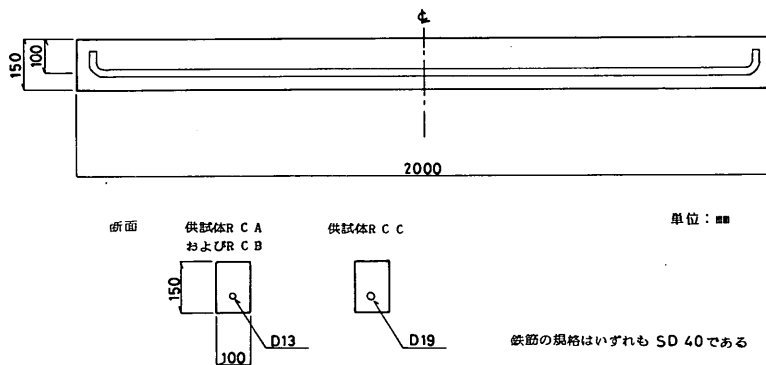


図-1 供試体の形状 (RC, 実験 I および実験 II)

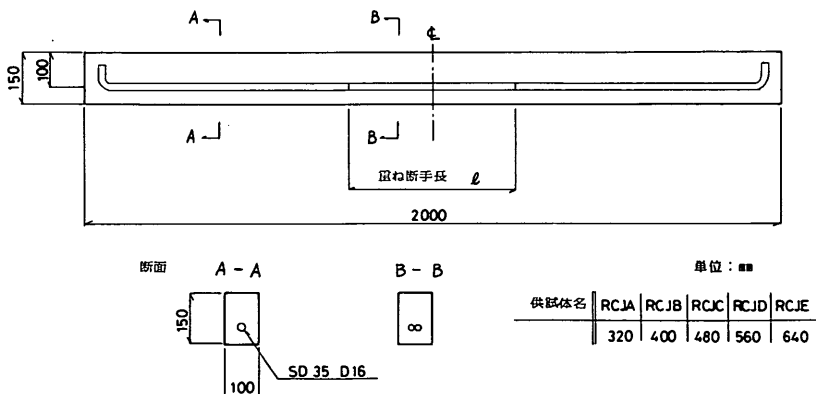
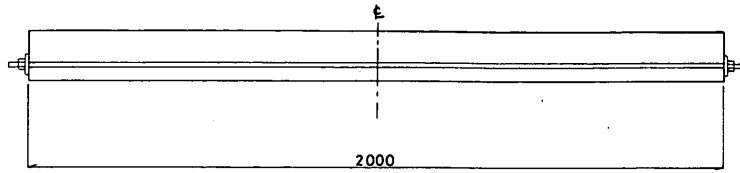


図-2 供試体の形状 (RC, 実験 III)



単位：mm

断面 (供試体 PCA PCB とも)

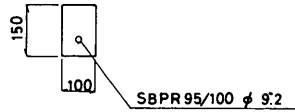
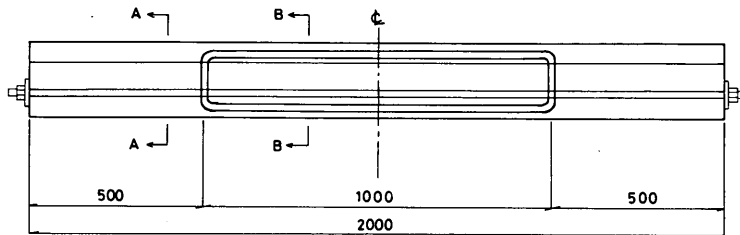


図-3 供試体の形状 (PC, 実験IVおよび実験V)



単位：mm

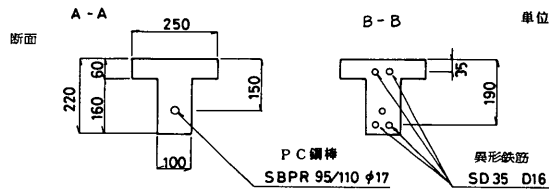


図-4 供試体の形状 (PC, 実験VI)

4.2 供試体製作材料

(1) コンクリート

セメントは、供試体RCJに普通ポルトランドセメントを用い、その他の供試体には早強ポルトランドセメントを用いた。

細骨材としては、川砂または砕砂を用い、粗骨材としては、川砂利または碎石（最大寸法 20mm）を用いた。

使用したセメントおよび骨材の試験成績書を表-2～表-6に示す。

さらに、AE減水剤を用いた。

(2) 鋼材

供試体RCA (実験I)に用いた鉄筋は、SD40 D13 (JIS G3112「鉄筋コンクリート用棒鋼」に適合するもの)である。

供試体RCB (実験II)に用いた鉄筋は、SD30 D13 (JIS G3112「鉄筋コンクリート用棒鋼」に適合するもの)である。

供試体RCC (実験II)に用いた鉄筋は、SD30 D19 (JIS G3112「鉄筋コンクリート用棒鋼」に適合するもの)である。

供試体RCJ (実験III)に用いた鉄筋は、SD35 D16 (JIS G3112「鉄筋コンクリート用棒鋼」に適合するもの)である。

供試体PCA, PCB (実験IVおよび実験V)に用いたPC鋼棒は、SBPR 95/110 φ9.2mm (JIS G3109「PC鋼棒」に適合するもの)である。

供試体PCT (実験VI)に用いたPC鋼棒は、SBPR 95/110 φ13mm (JIS G3109「PC鋼棒」に適合するもの)で

表-2 セメントおよび骨材の試験成績 (RCA, PCA)

セメントの試験成績表 (早強ポルトランドセメント)

比 重	比表面積 (cm ² /g)	凝 結			安定性	フロー値 (mm)	曲 げ 強 さ (kgf/cm ²)			圧 縮 強 度 (kgf/cm ²)		
		水 量 (%)	始 発 時 分	終 結 時 分			3 日	7 日	28 日	3 日	7 日	28 日

骨材試験

骨材の種類	比 重	単位容積重 (kgf/m ³)	粗粒率	吸水率 (%)	洗い試験 (%)	粘土塊試験
粗骨材	2.62	1530	6.77	1.0	0.8	—
細骨材	2.58	1620	3.15	1.7	2.2	—

表-3 セメントおよび骨材の試験成績 (RCB, RCC)

セメントの試験成績表 (早強ポルトランドセメント)

比 重	比表面積 (cm ² /g)	凝 結			安定性	フロー値 (mm)	曲 げ 強 さ (kgf/cm ²)			圧 縮 強 度 (kgf/cm ²)		
		水 量 (%)	始 発 時 分	終 結 時 分			3 日	7 日	28 日	3 日	7 日	28 日

骨材試験

骨材の種類	比 重	単位容積重 (kgf/m ³)	粗粒率	吸水率 (%)	洗い試験 (%)	粘土塊試験
粗骨材	2.65	1540	6.79	0.7	0.7	—
細骨材	2.58	1670	2.84	1.2	2.4	—

表-4 セメントおよび骨材の試験成績 (RCJ)

セメントの試験成績表 (普通ポルトランドセメント)

比 重	比表面積 (cm ² /g)	凝 結			安定性	フロー値 (mm)	曲 げ 強 さ (kgf/cm ²)			圧 縮 強 度 (kgf/cm ²)		
		水 量 (%)	始 発 時 分	終 結 時 分			3 日	7 日	28 日	3 日	7 日	28 日

骨材試験

骨材の種類	比 重	単位容積重 (kgf/m ³)	粗粒率	吸水率 (%)	洗い試験 (%)	粘土塊試験
粗骨材	5号: 2.70	1586	6.69	0.48	1.1	—
	6号: 2.65					
細骨材	2.60	1660	2.97	1.69	2.3	0.4

5号: 寸法13~20mm, 6号: 寸法5~13mm

表-5 セメントおよび骨材の試験成績 (PCB)

セメントの試験成績表 (早強ポルトランドセメント)

比重	比表面積 (cm ² /g)	凝 結			安定性	フロー値 (mm)	曲 げ 強 さ (kgf/cm ²)			圧 縮 強 度 (kgf/cm ²)		
		水 量 (%)	始 発 時 分	終 結 時 分			3 日	7 日	28 日	3 日	7 日	28 日
3.12	4160	29.7	2-10	3-15	良	244	52	67	81	251	349	463

骨材試験

骨材の種類	比 重	単位容積 重 量 (kgf/m ³)	粗粒率	吸水率 (%)	洗い試験 (%)	粘土塊試験
粗骨材	5号: 2.68	1600	6.63	0.28	0.3	0.18
	6号: 2.68			0.71		
細骨材	2.62	1720	2.98	1.89	3.4	0.45

5号: 寸法13~20mm, 6号: 寸法5~13mm

表-6 セメントおよび骨材試験成績 (PCT)

セメントの試験成績表 (早強ポルトランドセメント)

比 重	比表面積 (cm ² /g)	凝 結			安定性	フロー値 (mm)	曲 げ 強 さ (kgf/cm ²)			圧 縮 強 度 (kgf/cm ²)		
		水 量 (%)	始 発 時 分	終 結 時 分			3 日	7 日	28 日	3 日	7 日	28 日
3.12	4140	29.9	2-20	3-24	良	245	55	68	80	252	356	469

骨材試験

骨材の種類	比 重	単位容積 重 量 (kgf/m ³)	粗粒率	吸水率 (%)	洗い試験 (%)	粘土塊試験
粗骨材	5号: 2.70	1586	6.69	0.48	1.1	—
	6号: 2.65					
細骨材	2.60	1666	2.97	1.69	2.3	0.4

5号: 寸法13~20mm, 6号: 寸法5~13mm

ある。

これらの鋼材の機械的性質を、表-7に示す。

4.3 コンクリートの配合および打設

コンクリートの示方配合, 配合強度, 試験時のコンクリート強度を表-8に示す。

コンクリート用材料は, バッチャープラントにより練り混ぜ, 型枠内に打設した。コンクリートのスランプおよび空気量は, 打設直前に測定し, 所定の条件を満足していることを確認した。また, コンクリートの締め固めには, 棒状バイブレーターを使用した。

4.4 供試体の脱型およびプレストレスの導入

供試体の脱型は, コンクリート打設後1日程度で行った。PC供試体の養生方法は, 常温室内湿潤養生とした。PC供試体については, 蒸気養生を行い, 所定の強度に

達したのち, プレストレスの導入を行った。

表-7 鋼材の機械的性質

供試体	鋼材種類	規 格	径 (mm)	強度 (kgf/mm ²)		伸 び (%)
				降伏点	引張り強さ	
RCA	異形鉄筋	SD40	D13	48	65	24
RCB	"	"	D13	47	65	23
RCC	"	"	D19	44	61	25
RCJ	"	SD35	D16	41	58	23
PCA	PC鋼棒	SBPR95/110	φ9.2	110	115	11
PCB	"	"	φ9.2	138	149	9
PCT	"	"	φ17	109	116	12
	異形鉄筋	SD35	D22	41	63	21

表-8 コンクリートの配合

供試体	配合強度 (kg/cm ²)	試験強度 (kg/cm ²)	粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランパ の範囲 (cm)	空気量の 範囲 (%)	水セメン ト比 (%)	細骨材率 (%)	単 位 量 (kg/m ³)					
								水	セメント	細骨材	粗骨材		混和剤 (l/m ³)
											13~20mm	5~13mm	
RCA, PCA	400	598	20	5 ± 1	4 ± 1	40	43	161	415	735	593	396	4.57
RCA, RCB	240	355	20	8 ± 1	4 ± 1	67.4	48	170	250	879	587	391	2.5
R C J	240	329	20	8 ± 1	4 ± 1	67	48	170	252	887	595	397	2.52
P C B	400	561	20	5 ± 1	4 ± 1	45	43.1	154	342	786	637	425	1.54
P C T	400	443	20	5 ± 1	4 ± 1	40	43	152	382	767	629	419	3.82

ただし、配合強度は、材令7日における目標値である。

5. 実験方法

5.1 荷重装置および荷重方法

はり供試体の荷重試験には、当所海洋構造実験場の油圧式疲労試験機を使用した。この試験機の概要を表-9に示す。

表-9 疲労試験機概要

最大荷重：静的±75tf、動的±50tf(押引)
 ストローク：±100mm
 振動数：0.001~50Hz
 駆動方式：油圧式

荷重の際の試験機の荷重レンジ(最大荷重)としては、T形PCはり供試体(供試体PCT)の試験時には25tf、他の供試体では10tfのレンジを用いた。

荷重は、図-5に示すように2点荷重とし、供試体の荷重条件(せん断スパン比： a/d とも表す)に応じて、

荷重点間距離あるいは支点間距離を変化させた。

荷重手順は、単調静的荷重(荷重手順S)、漸増静的荷重(荷重手順B)、漸増繰り返し荷重(荷重手順FF)および繰り返し荷重(荷重手順F)の4種類とした。これらのうち、前者2つの荷重方法は静的荷重であり、後者2つは疲労(繰り返し)荷重である。各荷重手順のパターンを図-6に示す。また、繰り返し荷重(手順FFおよび手順F)における荷重波形としては正弦波を用い、この場合の繰り返し荷重の周期は、原則として2~3Hzとした。

水中において荷重するものは、試験1週間前より供試体を水中に浸漬しておき、コンクリート中に水を十分に浸透させた。荷重試験の際も、水を張った水槽中に供試体を設置し、供試体が常に水中にある状態で実験を行った。気中において荷重するものは、室内に供試体を放置しておき、荷重も気中で行った。

5.2 測定項目および測定方法

はりのたわみ、コンクリートおよび鋼材のひずみ、ひびわれの幅および進行状況、はりの曲げ剛性等について

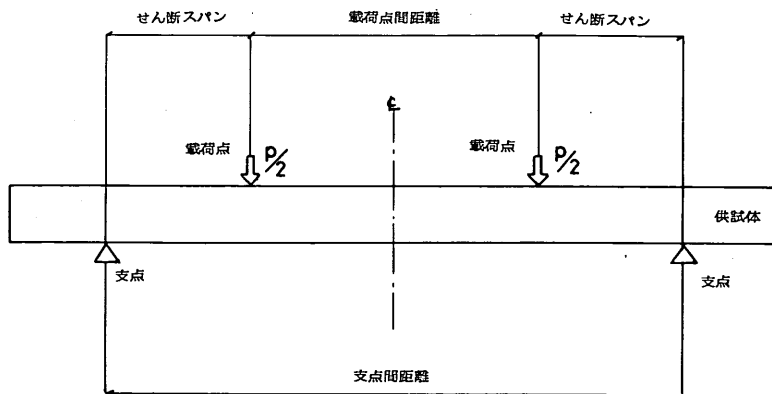


図-5 荷重方法

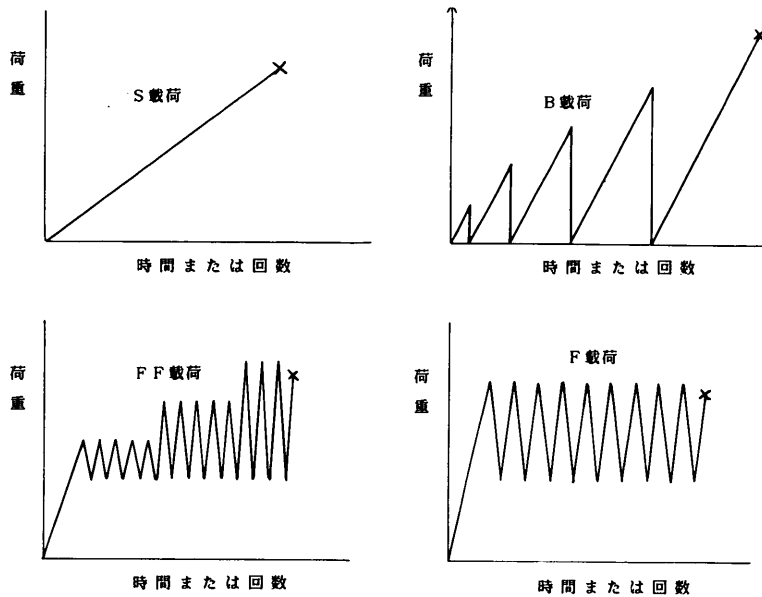


図-6 載荷手順

測定を行った。

はりのたわみは、支間中央および左右の支点位置の計3点について、変位計あるいはダイヤルゲージとの併用により測定した。

コンクリートのひずみは、はり上面の支間中央に貼付したストレインゲージにより圧縮縁のひずみを測定した。ただし、水中載荷の際使用するストレインゲージには、絶縁不良による機能の低下を防ぐため、コーティング剤およびパラフィンにより表面に防水コーティングを施した。なお、また一部の供試体については、内部鋼材に貼付したストレインゲージにより、鋼材のひずみを測定した。

ひびわれ幅は、クラックスケールあるいは、供試体側面に貼付した π 型ゲージ(ストレインゲージタイプ)、または、コンタクトゲージにより測定を行った。さらに、供試体側面のひびわれを目視によりスケッチし、ひびわれ進行状況を記録した。

はりの曲げ剛性は、供試体側面の支間中央の上部および下部に貼付した2枚の π 型ゲージの伸びの差より算定した。

上記の変位計およびゲージ類は、多点デジタル静ひずみ計に接続し、測定は、各荷重ごとに載荷荷重を保持して静的に行うものとした。変位計、ゲージ等の取り付け位置を図-7～図-8に示す。

6. 解析方法

6.1 終局限界状態

終局限界状態に関して、終局曲げモーメントおよびせん断耐力の算定式を示す。

(1) 終局曲げモーメントの算定

供試体の終局曲げ耐力の算定は、前出の「コンクリート構造の限界状態設計法指針(案)」に基づいて行った。ただし、本稿においては、コンクリートおよび鋼材の強度などとして、規格強度ではなく、実際の試験により求められた値を用いた。また、材料係数などの安全係数は乗じていない。

図-9のような断面を有するはりについて、断面耐力の算定を行う。一般に、曲げモーメント、軸方向力、および曲げモーメントと軸方向力の作用する棒部材の断面耐力の算定は、以下の仮定に基づいて行う。

- ① 断面のひずみは中立軸からの距離に比例する。
- ② コンクリートの引張応力を無視する。
- ③ コンクリートの応力—ひずみ曲線は、図-10による。
- ④ 鋼材の応力—ひずみ曲線は、図-11による。

また、終局状態でのコンクリートの応力分布は、図-12に示した等価応力ブロックを用いる。ここで、計算に必要な記号は、以下のとおり定義する。

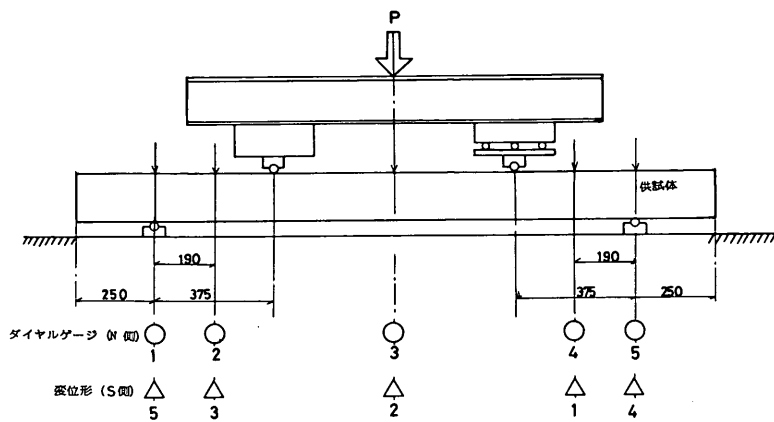


図-7 ダイヤルゲージおよび変位計取り付け位置 (例)

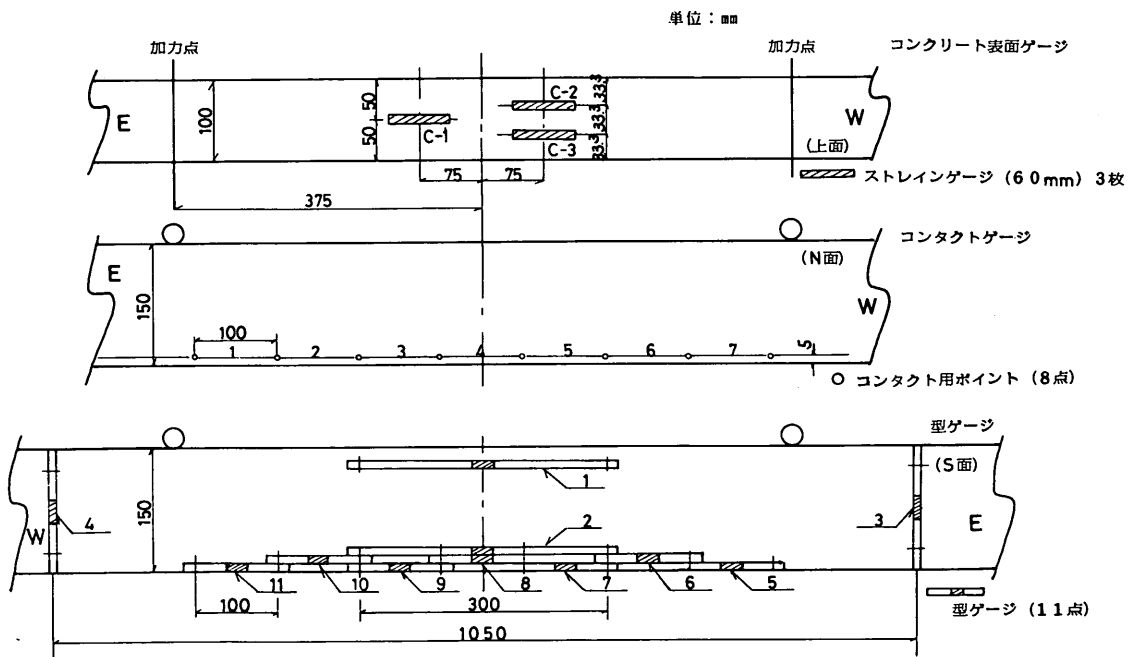


図-8 各ゲージ類取り付け位置 (例)

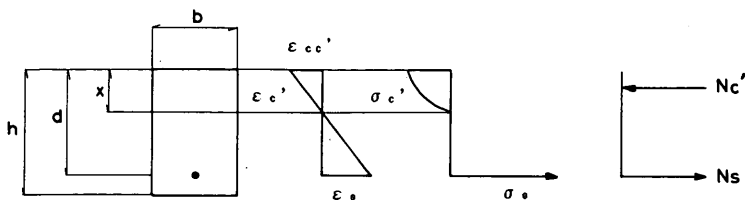


図-9 断面の応力およびひずみの状態

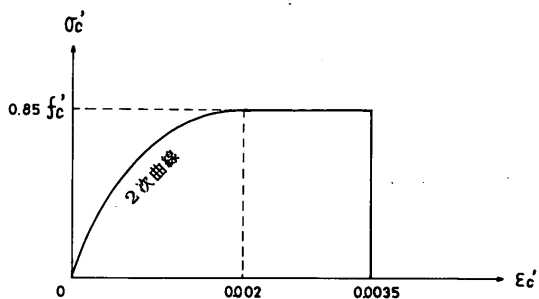


図-10 コンクリートの応力-ひずみ曲線

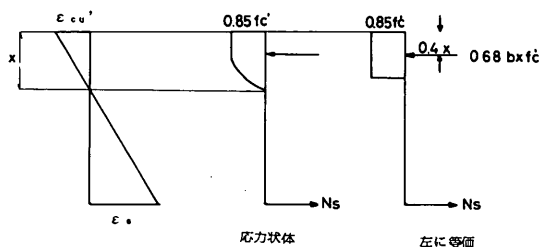
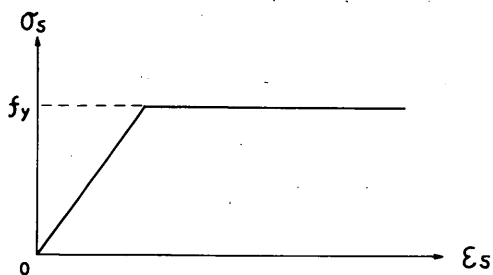
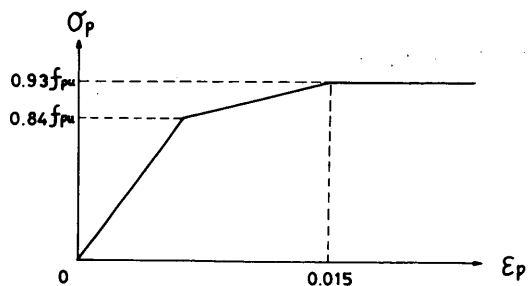


図-12 等価応力ブロック



(a) 鉄筋の応力-ひずみ曲線



(b) PC鋼棒の応力-ひずみ曲線

図-11 鉄筋およびPC鋼棒の応力-ひずみ曲線

- A_p : PC 鋼材の断面積
- A_s : 引張り鉄筋の断面積
- b : 断面の幅
- d_p : PC 鋼材の有効高さ
- d_s : 引張り鉄筋の有効高さ
- E_p : PC 鋼材のヤング係数
- E_s : 引張り鉄筋のヤング係数
- f_c' : コンクリートの圧縮強度
- f_y : 鉄筋の降伏強度
- f_{pu} : PC 鋼材の引張り強度
- h : 断面の高さ
- M_u : 断面の終局曲げモーメント
- N_c' : コンクリートの圧縮合力
- N_p : PC 鋼材の合力
- N_s : 引張り鉄筋の合力
- p : 鋼材比; $p = A_s / b d_s$, または, $p = A_p / b d_p$
- x : 圧縮縁から中立軸までの距離
- ϵ_c' : コンクリートの圧縮ひずみ
- ϵ_{cc}' : 圧縮縁位置での ϵ_c'
- ϵ_{cy}' : 中立軸から y の位置における ϵ_c'
- ϵ_p : PC 鋼材のひずみ
- ϵ_s : 引張り鉄筋のひずみ
- σ_c' : コンクリートの圧縮応力度
- σ_p : PC 鋼材の応力度
- σ_s : 引張り鉄筋の応力度

終局限界状態における軸方向の内力の釣り合い条件は、以下の式で表される。

$$\begin{aligned} N_c' &= N_s + N_p \\ N_c' &= 0.68 b x \cdot f_{cd}' \\ N_s &= A_s \sigma_s \\ N_p &= A_p \sigma_p \end{aligned}$$

本稿においては、上記釣り合い式でパラメータ x について繰り返し計算を行い、 x 、 σ_s および σ_p を決定した。 x 、 σ_s および σ_p が決まれば、次式により終局曲げモーメントが求められる。

$$M_u = N_c'(h/2 - 0.4x) + N_s(d_s - h/2) + N_p(d_p - h/2)$$

本稿においては、供試体の曲げ耐力の算定には上記の方法を用いた。

しかし、この方法を簡略化した下記に示す式¹⁾により算定しても、その誤差は、わずか1%未満に過ぎなかった。

$$M_u = A_s f_y (1 - 0.6 p f_y / f_c')$$

ただし、PC鋼棒は、降伏強度が $f_y = 0.93 f_{pu}$ の鉄筋と考え、プレストレスの影響を無視して計算を行った。

(2) せん断耐力

せん断耐力の算定も、前出「コンクリート構造の限界状態設計法指針(案)」に基づいた。コンクリートの強度、安全係数等についても、終局曲げモーメントの算定の項と同様である。

せん断スパン比 (a/d) がおよそ2~3以上の場合、せん断補強筋をもたないはりのせん断耐力は、次式により求められる。

$$V_c = 0.94 f_c'^{1/3} (0.75 + 1.4 a/d) (1 + \beta_p + \beta_d + \beta_n) b d$$

ここで、

V_c : せん断補強鉄筋を用いない部材のせん断耐力

$$\beta_p = (100 p_w)^{1/2} - 1 \leq 0.73$$

ただし、 $p_w = A_s / b d$

$$\beta_d = (100/d)^{1/4} - 1 \geq 0$$

$$\beta_n = 2 M_0 / M_u$$

M_0 : 断面下縁の応力度が0となるまでに作用し得る曲げモーメント

はりの支点付近に荷重が作用する場合、ウェブコンクリートに圧縮応力が作用して、タイドアーチ的な耐荷機

構が形成し、せん断耐力の増加が起こる。この部分でのせん断耐力は、以下の式により算定できる。

$$V_c = 6.82 f_c'^{1/3} (1 + \beta_p + \beta_d + \beta_n) b d / [1 + (a/d)^2]$$

6.2 使用限界状態

使用限界状態に関して、ひびわれ発生曲げモーメントとひびわれ幅の算定について述べる。

(1) ひびわれ発生曲げモーメントの算定

供試体のひびわれ発生曲げモーメントは、以下の方法により算定した。

・RCはりの場合

ひびわれ発生までの段階では、鉄筋の影響は無視でき、また、コンクリートに作用する応力が小さいため、コンクリートは弾性体と仮定できる。したがって、曲げひびわれモーメントは次式により算定できる。

$$M_{cr} = f_t \cdot I_g / y_t$$

ここに、

M_{cr} : 曲げひびわれモーメント

I_g : コンクリート断面の断面図心に関する断面2次モーメント

f_t : コンクリートの引張り強度、 $f_t = 0.5 f_c'^{2/3}$ とする。

y_t : 中立軸から引張り縁までの距離

・PCはりの場合

プレストレスコンクリートはりの曲げひびわれ発生モーメントは、一般に、以下の式で求められる。

$$M_{cr} = \frac{I_e}{y_{et}} \left(\frac{P_e}{A_e} + \frac{P_e \cdot e_{pe}}{I_e} \cdot y_{et} + f_t \right)$$

ここに、

A_e : 換算断面の断面積

I_e : 換算断面の断面2次モーメント

P_e : PC鋼材の有効引張力

e_{pe} : 換算断面の図心からPC鋼材重心位置までの距離

(2) ひびわれ幅の算定

ひびわれ幅の推定に関しては、数多くの算定式が提案されているが、本稿においては、文献1)の「コンクリート構造の限界状態設計法指針(案)」の提案式、および比較的精度の良い値を与えるといわれるCEB-FIP 1978年⁹⁾の式を採用した。

(a) コンクリート構造の限界状態設計法指針(案)の提案式

$$W = \tau_a \frac{k_3 \sigma_s}{K} \sqrt[3]{c \phi (c + \frac{\phi}{2})^2}$$

ただし、 $\tau_a = 1.2$ とする。

また、 W : ひびわれ幅

c : 鋼材のかぶり

$c\phi$: 鋼材の中心間隔

ϕ : 鋼材径

σ_s : 鋼材応力度の増加量

k_1 : 一般に 0.5 としてよい。

k_3 : 鉄筋の付着性状を表す定数で、一般に、異形鉄筋の場合に 1、丸鋼の場合に 1.3、PC 鋼棒では 1.3 としてよい。

K : 定数 600×10^3 (kgf/cm²)

(b) CEB-FIP 1978 年の式

$$W_k = 1.7 W_m$$

ただし、 W_k : 表面ひびわれ幅特性値

W_m : 平均ひびわれ幅、 $W_m = S_{r,m} \cdot \epsilon_{s,m}$

$S_{r,m}$: 平均ひびわれ間隔、 $S_{r,m} = 2 \left(c + \frac{s}{10} \right) + K_1 K_2 \frac{\phi}{\rho}$

c : 引張り鋼材のかぶり

s : 引張り鋼材間隔

ϕ : 引張り鋼材径

K_1 : 引張り鋼材付着特性に関する係数；異形鉄筋の場合 = 0.4、丸鋼の場合 = 0.8

K_2 : ひずみ分布性状に関する係数、 $K_2 = 0.25 (\epsilon_1 + \epsilon_2) / 2\epsilon_1$ 、ただし、 ϵ_1 および ϵ_2 は、それぞれ断面のひずみの最大値および最小値

ρ_r : 引張り鋼材比； $\rho_r = A_s / A_{c,ef}$

$A_{c,ef}$: 引張り鋼材がひびわれ制御上有効に作用するコンクリート断面

A_s : $A_{c,ef}$ 内の全引張り鋼材断面積

$\epsilon_{s,m}$: 引張り鋼材平均引張りひずみ増加量

$$\epsilon_{s,m} = \frac{\Delta \sigma_s}{E_s} \left[1 - \beta_1 \beta_2 \left(\frac{\Delta \sigma_{sr}}{\Delta \sigma_s} \right)^2 \right] \geq 0.4 \frac{\Delta \sigma_s}{E_s}$$

$\Delta \sigma_s$: ひびわれ断面における引張り鋼材の引張応力度増加量

$\Delta \sigma_{sr}$: コンクリート引張り縁応力度がコンクリート引張り強度に等しくなる時のひびわれ面での引張り鋼材引張り応力度増加量

β_1 : 引張り鋼材の付着特性に関する係数；

$\beta_1 = 1 / 2.5 K_1$

β_2 : 荷重特性に関する係数； $\beta_2 = 1.0$ (初載荷

時)、 $\beta_2 = 0.5$ (長期持続、繰返し荷重作用の場合)

E_s : 引張り鋼材の弾性係数

6.3 疲労限界状態

部材の疲労強度の算定は、前出「コンクリート構造の限界状態設計法指針 (案)」に基づいて行った。以下、同書によるコンクリート部材の曲げおよびせん断の疲労強度の算定方法について記す。

(1) 曲げ疲労に対する検討

曲げ外力を受けるコンクリート部材の疲労強度は、圧縮縁コンクリートが疲労破壊する場合と引張り鋼材が疲労破断を起こす場合とにわけて検討する。すなわち、繰返しの上限荷重下での圧縮縁のコンクリート応力度および引張り鋼材の応力度を、それぞれコンクリートの疲労振幅強度および鋼材の疲労振幅強度と比較するわけである。

コンクリートの疲労振幅強度は次式により算定する。

$$f_{rk} = k_1 f_k (1 - \sigma_p / f_k) (1 - \log N / K)$$

ここで、 f_{rk} : 疲労振幅強度の特性値

f_k : コンクリート強度の特性値

σ_p : 永久荷重によるコンクリートの応力度；

ただし本稿の場合は、繰返し荷重の下限値におけるコンクリートの応力度とする

N : 疲労寿命

K : 定数；普通コンクリートで継続してあるいはしばしば水で飽和される場合は、 $K = 10$ 、その他の場合は、 $K = 17$ とする

k_1 : 定数；圧縮および曲げ圧縮疲労振幅強度の場合、 $k_1 = 0.85$ 、引張りおよび曲げ引張り疲労振幅強度の場合、 $k_1 = 1.0$ とする

一方、鋼材の疲労振幅強度は、以下のように定めるものとする。

$$f_{rsk} = (1 - \sigma_{sp} / f_u) 10^a / N^k$$

ただし、 $f_{rsk} \leq f_y - \sigma_{sp}$

ここに、 f_{rsk} : 鋼材の疲労振幅強度の特性値

f_u : 鋼材の引張り強度の特性値

f_y : 鋼材の引張り降伏強度の特性値

σ_{sp} : 永久荷重による鋼材の応力度

a, k : 定数； $N \leq 2 \times 10^6$ の場合、D 32 以下の異形棒鋼に対して、 $a = 4.3$ 、 $k = 0.18$ 、また、PC 鋼棒に対しては、 $a = 4.7$ 、 $k = 0.22$ としてよい。

(2) せん断疲労に対する検討

せん断補強鉄筋を用いない部材のせん断疲労振幅耐力は、一般に次式により求めてよい。

$$V_{rc} = V_c (1 - V_p/V_c) (1 - \log N/11)$$

ここに、 V_c : せん断補強鉄筋以外が受け持つことのできるせん断疲労振幅耐力

V_c : せん断補強鉄筋を用いない部材のせん断耐力、5.1 (2) で求めた値

V_p : 永久荷重によるせん断力、ただし、本稿においては、繰り返し荷重の下限値によるせん断力

7. 実験結果およびその考察

7.1 終局限界状態

ここでは、静的耐力とこれに関連するひずみについて述べる。

(1) 静的耐力

a) 実験結果

表-10 および表-11 に実験 I の試験結果および実験 II～実験 VI のうち静的載荷を行った供試体の破壊荷重およびそれらの計算値を示す。計算値は、6.1 および 6.2 において求めた値である。

b) 水中と気中での相違

試験条件の影響、すなわち気中試験と水中試験との比較を行う。

まず、RC はりの曲げ耐力に関しては、実験 I および実験 II のく形はりでは、気中、水中とも破壊荷重は、ほぼ同程度の値であり、試験環境の影響はほとんどみられなかった。

表-10 RC はり静的試験

	供試体名	a/d	載荷条件	載荷方法	ひびわれ発生荷重		破壊荷重		破壊形式
					実験値	計算値	実験値	計算値	
実験 I	RCA 1-D-S	5.0	気中	S	0.45	0.53	2.42	2.20	曲げ
	RCA 1-D-B	"	"	B	0.58		2.28	(3.11)	"
	RCA 1-W-S	"	水中	S	0.70		2.35		"
	RCA 1-W-B	"	"	B	0.70		2.38		"
	RCA 2-D-S	3.75	気中	S	0.70	0.71	2.87	2.93	せん断
	RCA 2-D-B	"	"	B	0.70		3.04	(3.39)	"
	RCA 2-W-S	"	水中	S	0.88		3.00		曲げ
	RCA 2-W-B	"	"	B	0.80		2.93		せん断
	RCA 3-D-S	2.5	気中	S	1.16	1.06	4.93	4.40	曲げ
	RCA 3-D-B	"	"	B	1.38		4.82	(3.95)	"
	RCA 3-W-S	"	水中	S	1.60		4.77		"
	RCA 3-W-B	"	"	B	1.79		5.30		"
	RCA 4-D-S	1.25	気中	S	3.20	2.13	11.60	8.79	せん断
	RCA 4-D-B	"	"	B	2.60		12.38	(8.54)	曲げ
RCA 4-W-S	"	水中	S	3.60		11.20		せん断	
RCA 4-W-B	"	"	B	3.40		13.20		曲げ	
実験 II	RCB 2-D-B	3.75	気中	B	0.40	0.50	4.15	2.86	せん断
	RCB 2-W-B	"	水中	"	0.70		4.00	(2.85)	"
	RCC 2-D-B-1	3.75	気中	"	0.60	0.50	4.4	5.32	せん断
	RCC 2-D-B-2	"	"	"	0.60		5.0	(3.69)	"
	RCC 2-W-B	"	水中	"	0.80		4.7		"
実験 III	RC JA2-D-S-1	3.75	気中	S	0.80	0.47	3.0	3.71	付着
	RC JA2-D-S-2	"	"	"	0.60		3.5	(2.81)	"
	RC JA2-W-S-1	"	水中	"	0.80		2.6		"
	RC JA2-W-S-2	"	"	"	0.60		2.4		"
	RC JB2-W-S	"	"	"	0.80		3.4		"
	RC JC2-W-S-1	"	"	"	0.80		3.6		せん断
	RC JC2-W-S-2	"	"	"	0.80		3.4		付着
	RC JD2-W-S	"	"	"	0.80		3.8		曲げ
	RC JE2-W-S	"	"	"	-		4.2		"

注) 破壊荷重の計算値は、上段が曲げ耐力、下段のカッコ内がせん断耐力である。(単位: tf)

表-11 PCはり静的試験

(単位: tf)

	供試体名	a/d	載荷条件	載荷方法	ひびわれ発生荷重		破壊荷重		破壊形式
					実験値	計算値	実験値	計算値	
実 験 IV	PCA 1-D-S	5.0	気中	S	2.10	1.43	3.12	2.65	曲げ
	PCA 1-D-B	"	"	B	1.93		3.16	(3.71)	"
	PCA 1-W-S	"	水中	S	2.08		3.06		"
	PCA 1-W-B	"	"	B	2.18		3.18		"
	PCA 2-D-S	3.75	気中	S	2.68	1.91	4.55	3.53	曲げ
	PCA 2-D-B	"	"	B	2.60		4.24	(4.05)	"
	PCA 2-W-S	"	水中	S	2.79		4.28		"
	PCA 2-W-B	"	"	B	2.80		4.07		"
	PCA 3-D-S	2.5	気中	S	3.88	2.86	6.92	5.29	曲げ
	PCA 3-D-B	"	"	B	4.40		6.82	(4.72)	"
	PCA 3-W-S	"	水中	S	4.40		6.25		"
	PCA 3-W-B	"	"	B	4.30		6.42		せん断
	PCA 4-D-S	1.25	気中	S	9.60	5.73	17.28	10.58	曲げ
	PCA 4-D-B	"	"	B	8.80		13.84	(10.20)	"
	PCA 4-W-S	"	水中	S	10.60		18.74		"
	PCA 4-W-B	"	"	B	10.40		17.20		"
実 験 V	PCB 2-D-S	3.75	気中	S	2.6	2.01	4.6	4.43	曲げ
	PCB 2-W-S-1	"	水中	S	2.6		4.8	(3.82)	せん断
	PCA 2-W-S-2	"	"	S	2.6		4.4		曲げ
実 験 VI	PCT 3-D-S-1	2.5	気中	S			14.5	26.4	せん断
	PCT 3-D-S-2	"	"	S			15.0	(8.0)	"
	PCT 3-W-S-1	"	水中	S			13.7		"
	PCT 3-W-S-2	"	"	S			14.0		"

しかし、RC はりのうちでも、実験Ⅲに用いた重ね継ぎ手を有する供試体では、水の影響が顕著に現れていた。例えば、重ね継ぎ手長が32cmの供試体について試験の結果を比較すると、水中で試験したもののほうが気中で試験したものに比べて約25%強度が低下している。これらの破壊形式は、いずれも継ぎ手部の部材側面に曲げひびわれより進展した鉄筋にそったひびわれが発生し、この部分を割裂するようにして破壊に至っている。

PC はりに関しては、実験ⅥのT型はりを除くと、水中載荷の供試体のほうが気中載荷のものに比べて、破壊耐力は同程度か5%程度低下している。

次に、せん断破壊を起こす実験ⅥのT型はりについて検討すると、この供試体では、水中での静的せん断耐力は、気中とそれに比べて、約6%低下している。

また、載荷手順Sにより得られた結果と載荷手順Bにより得られたものとを比較しても、その耐力には明確な差は現れていない。したがって、今回の実験にかぎらず、静的載荷においては、数回の荷重繰返しによる耐力への影響はないものと考えられる。

これらの結果に対する考察を述べる。

RC はりの曲げ耐力については次のようである。一般に、引張り鉄筋が降伏した後にコンクリートが圧縮破壊して断面の破壊に至るいわゆる曲げ引張り破壊の場合、断面の耐力に対しては、はりの有効高さおよび引張り鉄筋の降伏強度の影響が大きく、コンクリートの圧縮強度の影響は小さい。通常の断面のRC はりでは、たとえコンクリートの圧縮強度が1/2になったところで、その終局曲げ耐力にはほとんど影響のないことが知られている¹⁾。ちなみに、著者等の報告^{3),4)}に示すように、無筋コンクリートの圧縮強度は、水中では気中に比べて5%程度低下する程度である。このため、これらのRC はりでは、試験環境による破壊耐力への影響がほとんどなかったものと思われる。

重ね継ぎ手を有する供試体では、水の影響が顕著に現れていたこと理由は次のように考えられる。

重ね継ぎ手は、相互の強度の伝達を両鉄筋間のコンクリートを介して行っているため¹⁰⁾、鉄筋とコンクリートとの間に滑動が起こりやすく、また、コンクリートの強度もやや低い水中では、気中に比べて鉄筋の付着強度が低下し、はりの耐力も低下したものと思われる。また、

この実験Ⅲでの供試体の破壊形式について検討すると、水中では、重ね継ぎ手長がコンクリート標準示方書どおりの48cmのものでも継ぎ手の付着破壊を起こしていることは注目に値する。

PCはりに関して、水中載荷の供試体のほうが気中載荷のものに比べて、破壊耐力は同程度か5%程度低下したことの理由は次のように考えられる。

すなわち、RCはりでは、曲げ破壊に関して水の存在が耐力の上に、ほとんど影響を及ぼさなかったのに対して、PCはりでは若干影響が現れたことの原因として、その使用鋼材の表面形状の相違が挙げられる。はりに使用した鋼材は、PCはりでは丸鋼、RCはりでは異形棒鋼を使用しているが、「第2回異形棒鋼シンポジウム」¹¹⁾によれば、丸鋼の付着強度は、異形棒鋼に比較して約50%低下するといわれている。また、同書では、丸鋼および異形棒鋼における付着の破断形式にも基本的な相違があることが指摘されている。丸鋼では、鋼材の滑動による付着破断が起こるが、異形棒鋼では、鋼材周囲のコンクリートの内部ひびわれ発生を伴う微小な破壊が進行して付着破断を起こす。前者においては、後者においてよりも水の影響は大きいため、丸鋼を用いたPCはりでは、水中での破壊耐力が低下したものと考えられる。

次に、PCはりのせん断耐力については次のように考えられる。

一般に、せん断補強鉄筋をもたないはりのせん断耐力は、主として骨材のかみ合わせ作用、軸方向鉄筋のほぞ作用および圧縮部コンクリートのせん断抵抗によって定まると言われている。骨材のかみ合わせ作用は、コンクリートの品質、鉄筋比および断面の有効高さによって、鉄筋のほぞ作用は、鉄筋比および作用する曲げモーメントとせん断力の比率によって、圧縮部コンクリートのせん断抵抗はコンクリート強度および鉄筋比によって、それぞれ定まるといわれている¹⁾。水中においては、コンクリートの強度が低下すること、また、骨材とモルタルマトリックスとの間に侵入した水が潤滑油のような役割を果たして、気中に比べて骨材が滑動しやすくなること等により、せん断破壊を起こすはりでは、曲げ破壊を起こすものよりも水の存在の影響が大きく現れたものと思われる。

c) 計算値との比較

破壊耐力の実験値と計算値とを比較すると、RCはりでは、実験Ⅰの $a/d = 1.25$ の場合および実験Ⅲの重ね継ぎ手を有する供試体を除くと、両者はよく一致しており、これらのケースにおいては、本稿で用いた計算方法は十分適用可能であることがわかった。しかし、実験Ⅰ

の $a/d = 1.25$ の場合には、実験値は約40%も計算値を上回っていた。

PCはりの場合、実験Ⅳの $a/d = 5.0$ 、3.75 および実験Ⅴの供試体では、実験値と計算値との差は、10~20%程度（いずれも実験値のほうが大きい）であった。しかし、実験Ⅳの $a/d = 2.5$ の場合、その差は約40%、さらに $a/d = 1.25$ の場合には80%にも達していた。また、実験Ⅵのせん断疲労試験に使用した供試体PCTでは、実験値は計算値の2倍近くもあった。

したがって、本稿で用いた計算方法（曲げ、せん断とも）は、RCおよびPCいずれも、 a/d が大きい場合（およそ3.75以上）には、実際の耐力に近い値を与えることがわかった。また、 a/d が小さい場合には相当安全側であることも分かった。

(2) コンクリートおよび鋼材のひずみ

実験Ⅰおよび実験Ⅳ、すなわちRCはり、PCはりの静的試験において得られた供試体圧縮縁のコンクリートひずみを図-13~図-19に示す。次に、同時に得られた鉄筋およびPC鋼材のひずみを図-20~図-27に示す。

ひびわれ発生前のコンクリートひずみは、RCはり、PCはりとも、気中と水中とによる相違は明確ではない。また、コンクリートひずみは、RC、PCともひびわれ発生とともに急激に大きくなっている。気中と水中の差について比較すると、水中におけるコンクリートのひずみは、全体的にみると、気中に比べて、やや大きくなる傾向にあるということができる。たとえば、RCはりでは、水中のひずみは、せん断スパン比(a/d)が5.0および $a/d = 2.5$ の場合、気中におけるひずみより大きく、また、PCはりでは $a/d = 5.0$ の場合および $a/d = 3.75$ の場合に、水中におけるひずみが気中におけるひずみより大きくなっている。さらに、鉄筋および鋼材のひずみについても、水中と気中の影響に関しては、ほぼコンクリートのひずみと同一の傾向にある。

7.2 使用限界状態

この節では、使用限界状態に関するものとして、ひびわれ発生荷重、ひびわれ幅、ひびわれ図、曲げ剛性、およびたわみについて述べる。

(1) ひびわれ発生荷重

表-10および表-11に示した静的試験結果に基づき、供試体のひびわれ発生荷重について検討する。なお、ひびわれ発生荷重の計算値は、6.2において示した方法により求めた値である。

水中におけるひびわれ発生荷重は、気中に比べて、RCはりの場合10~30%、PCはりの場合10%弱大きな値を示している。水中では、コンクリート強度が気中に比べて

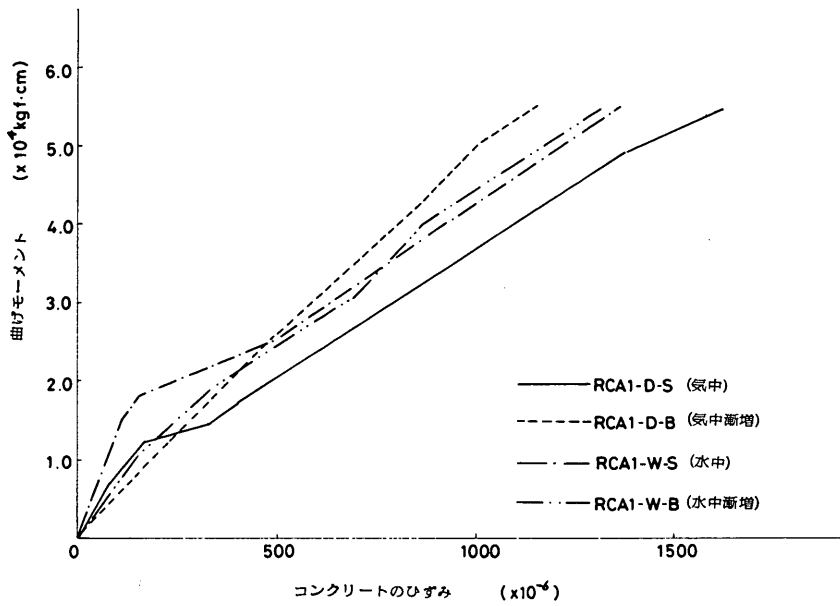


図-13 コンクリートのひずみ (RC, $a/d = 5.0$)

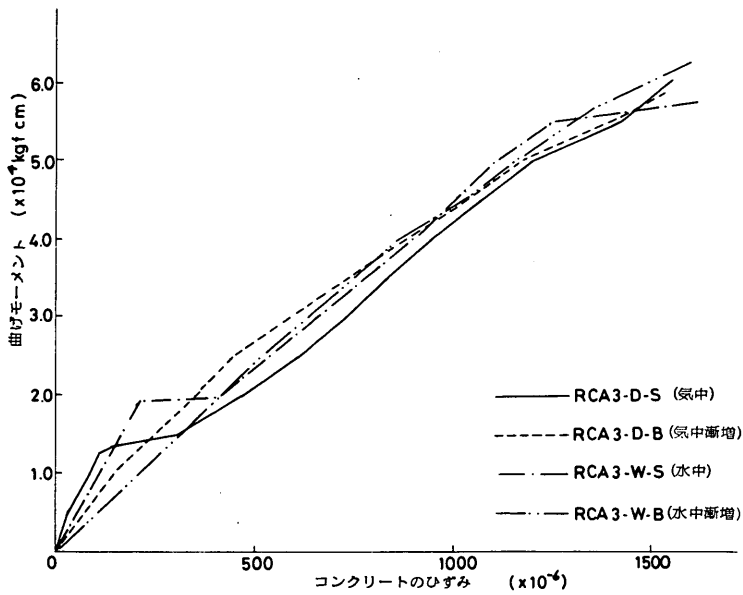


図-14 コンクリートのひずみ (RC, $a/d = 2.5$)

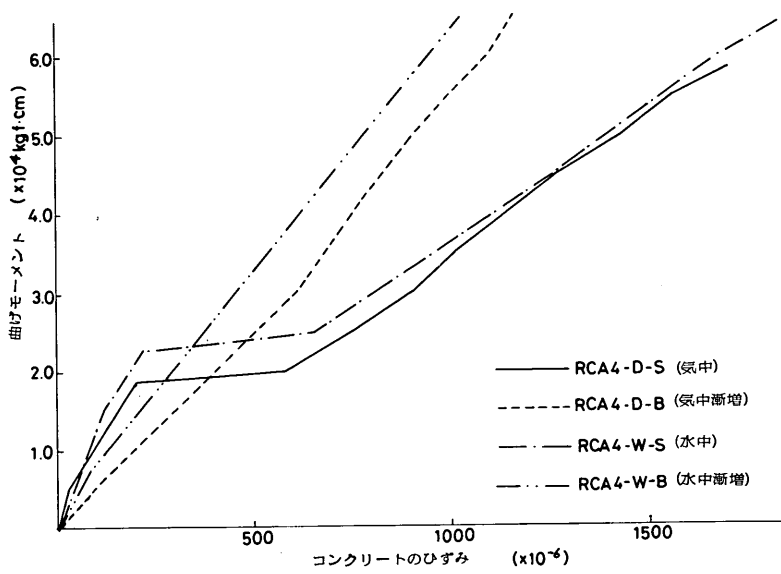


図-15 コンクリートのひずみ (RC, $a/d = 1.25$)

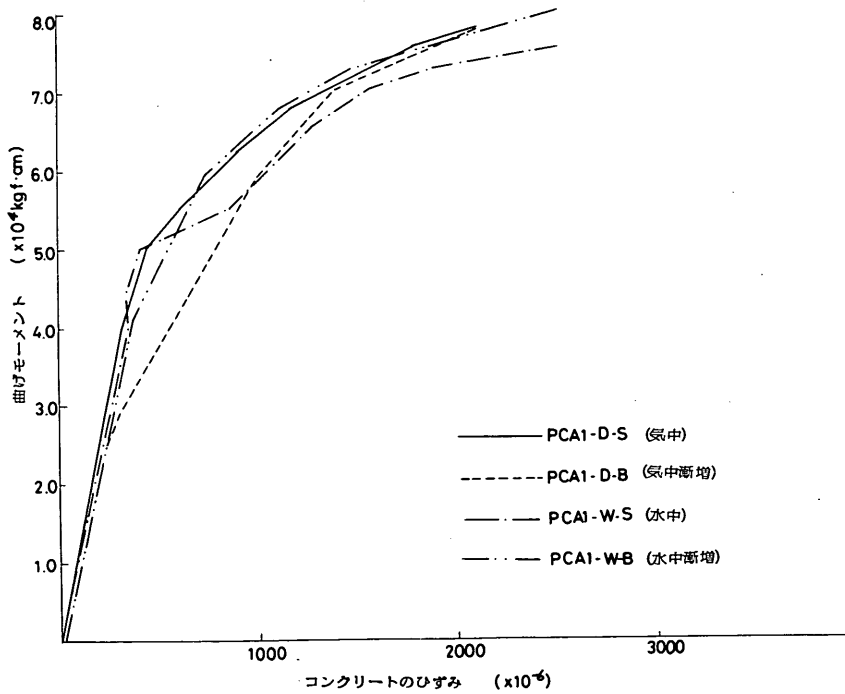


図-16 コンクリートのひずみ (PC, $a/d = 5.0$)

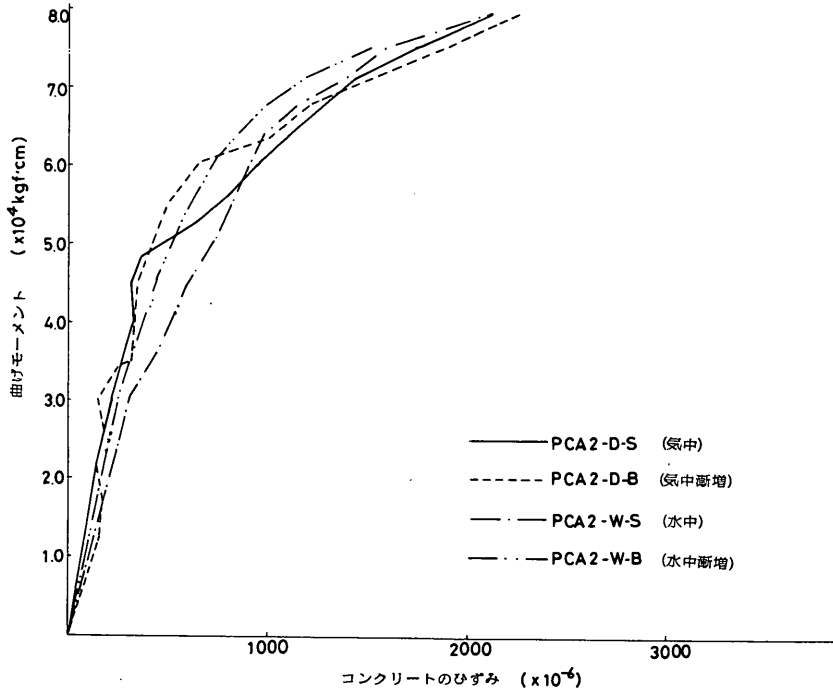


図-17 コンクリートのひずみ (PC, $a/d = 3.75$)

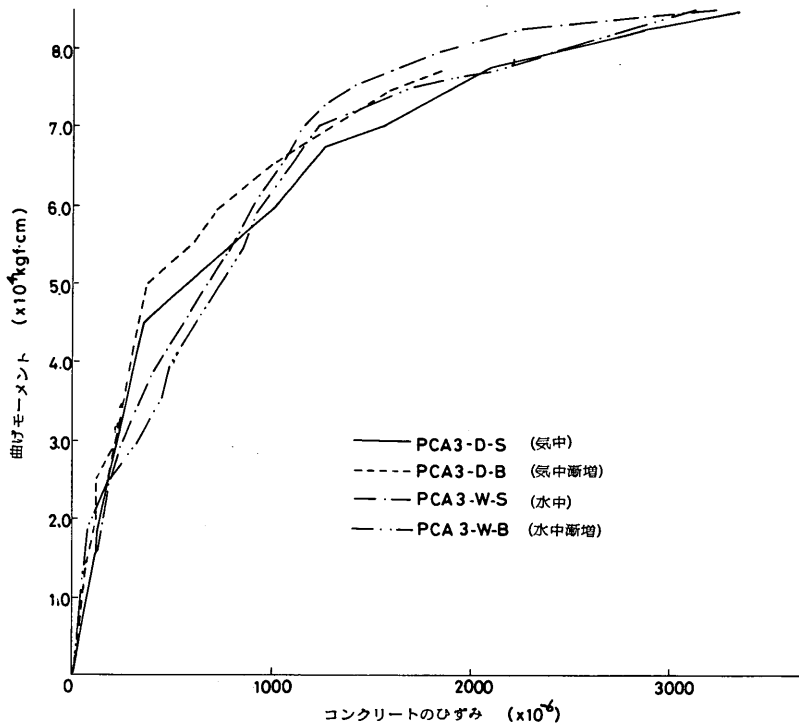


図-18 コンクリートのひずみ (PC, $a/d = 2.5$)

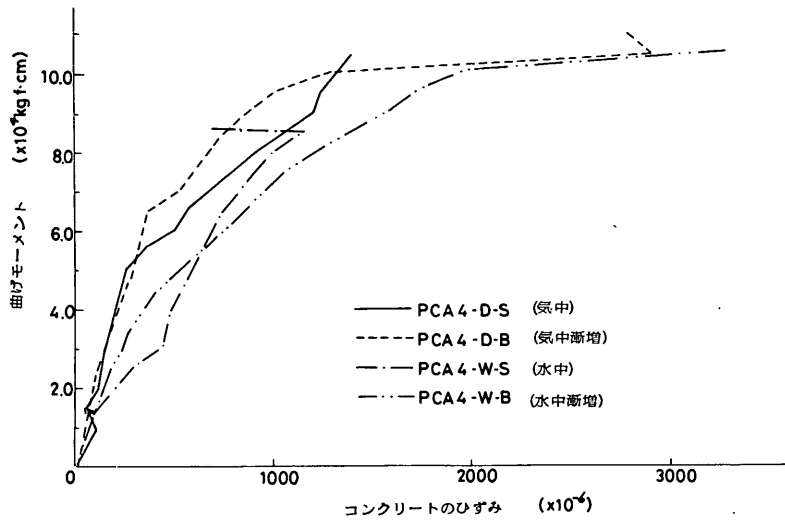


図-19 コンクリートのひずみ (PC, $a/d = 1.25$)

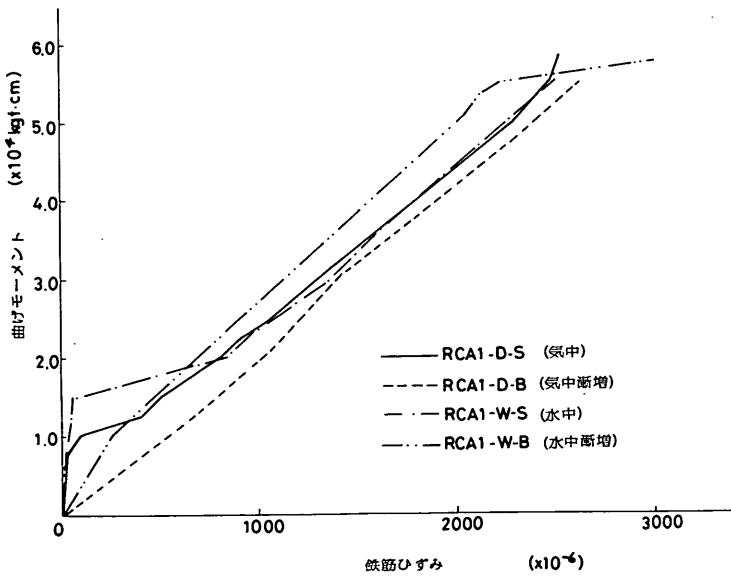


図-20 鋼材のひずみ (RC, $a/d = 5.0$)

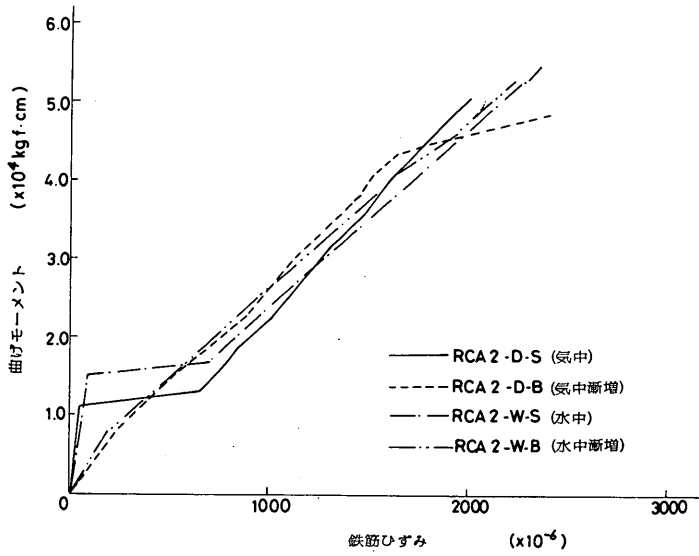


図-21 鋼材のひずみ (RC, $a/d = 3.75$)

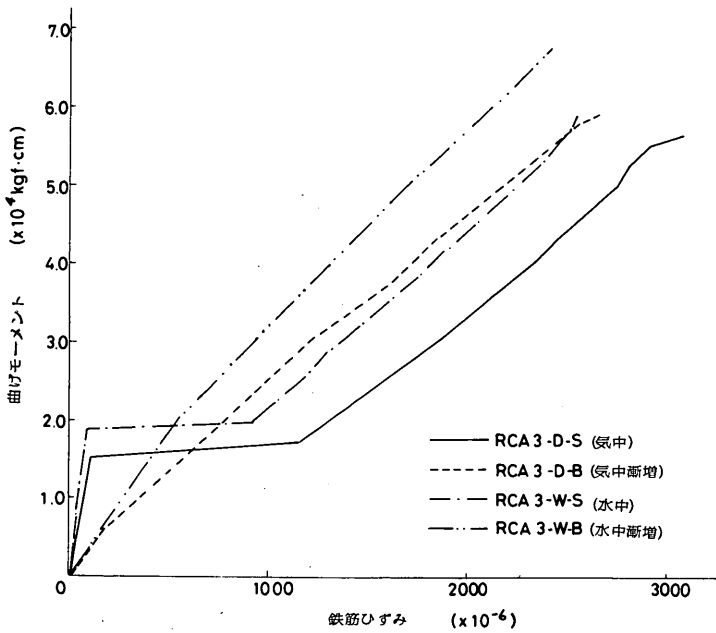


図-22 鋼材のひずみ (RC, $a/d = 2.5$)

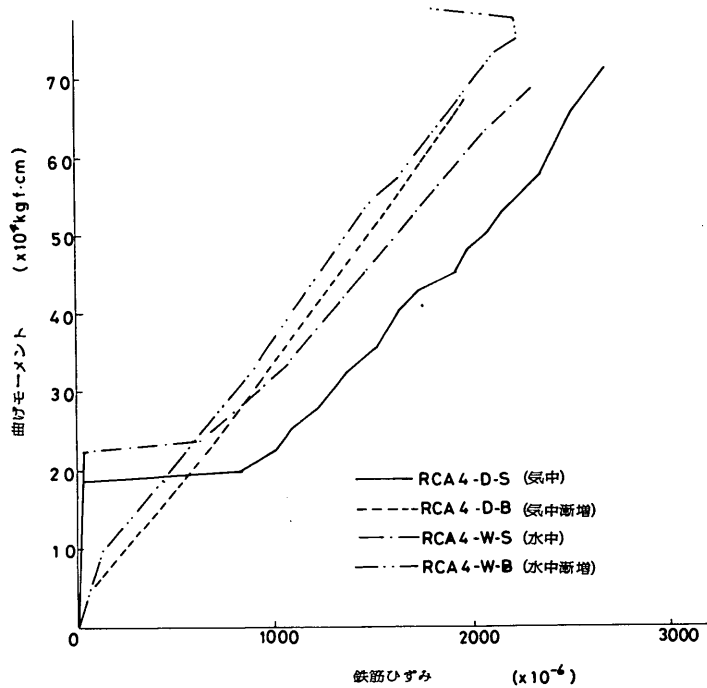


図-23 鋼材のひずみ (RC, $a/d = 1.25$)

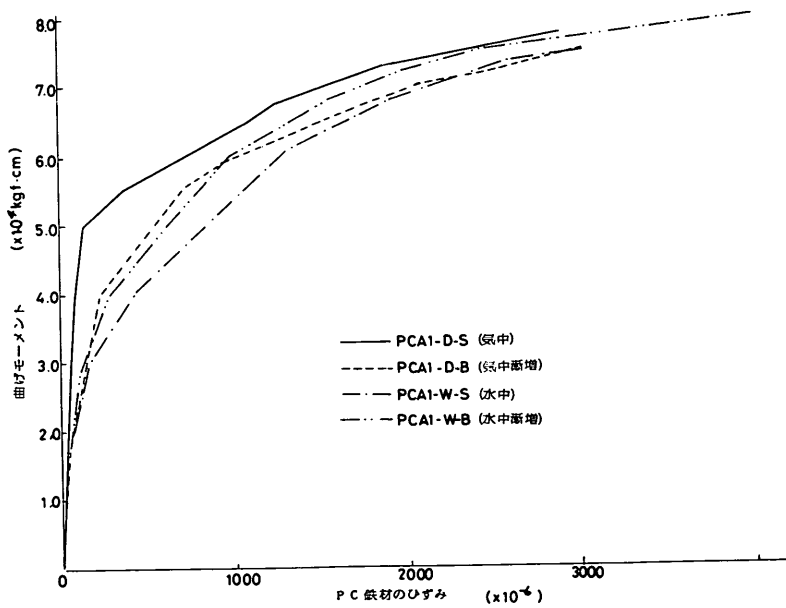


図-24 鋼材のひずみ (PC, $a/d = 5.0$)

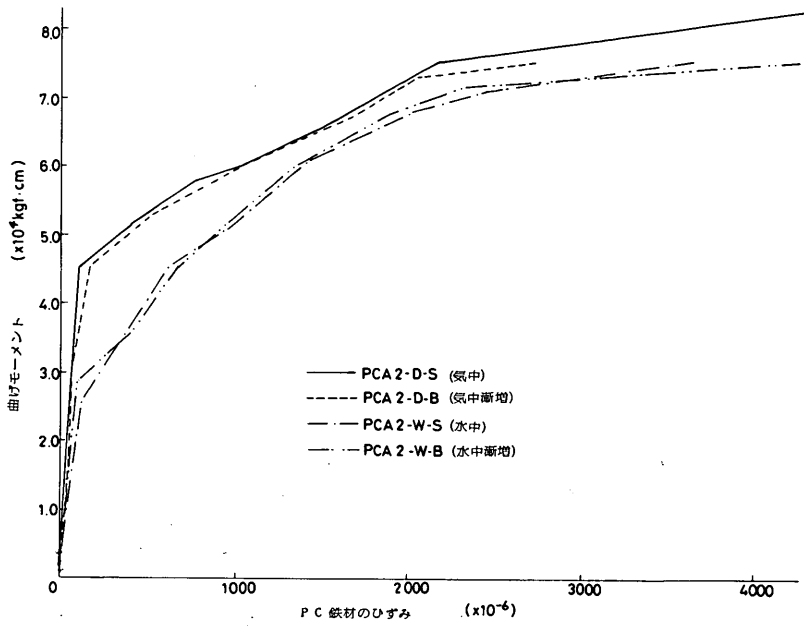


図-25 鋼材のひずみ (PC, $a/d = 3.75$)

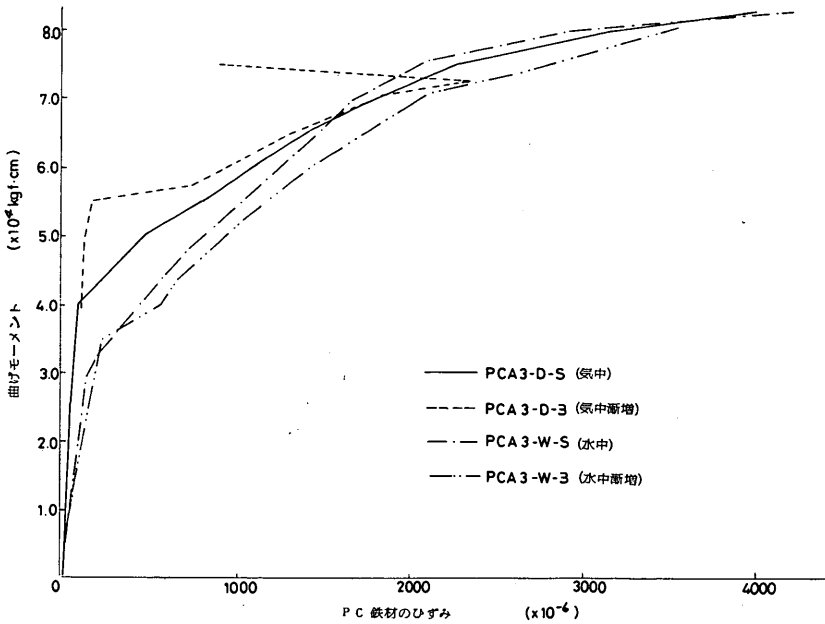


図-26 鋼材のひずみ (PC, $a/d = 2.5$)

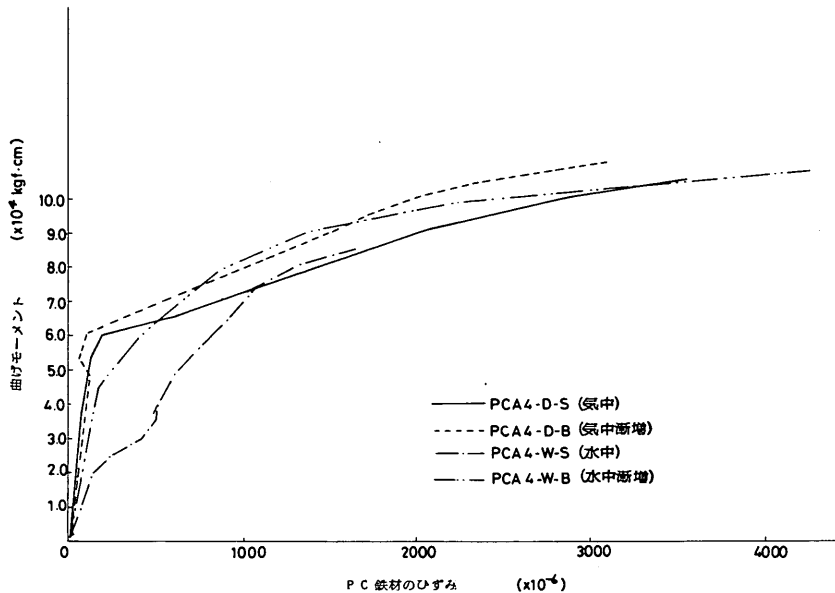


図-27 鋼材のひずみ (PC, $a/d = 1.25$)

低下するのにかかわらず、ひびわれ発生荷重が大きくなるのは、環境条件による乾燥収縮の相違の影響であると思われる。すなわち、水中では乾燥収縮がないのである。

ひびわれ発生荷重の実験値と計算値とを比較すると、RCの場合、ほぼ実験値と計算値とは一致していた。

しかし、実験Ⅰの $a/d = 2.5$ および $a/d = 1.25$ の場合には、実験値は計算値より20~40%程度大きかった。また、実験Ⅲの重ね継ぎ手を有する供試体では、実験値は計算値を30~80%程度上回っていたが、これは、継ぎ手部の断面では鉄筋量が2倍に増していることが原因と考えられる。

また、PCでは、全体に、実験値が計算値を30~60%上回っていた。

(2) ひびわれ幅

図-28~図-35に、静的試験の本数が最も多い、実験Ⅰおよび実験Ⅳにおいて得られた載荷荷重—最大ひびわれ幅の関係を示す。

試験環境の影響については明確でないものもあるが、RCでは、おおむね気中でのひびわれ幅のほうが、水中においてよりも若干大きいようである。PCでは、水中と気中の差は明らかではなかった。

なお、ひびわれ幅の実験値は、クラックスケールおよびコンタクトゲージにより測定した値である。また、供

試体のひびわれ幅の計算値は、前述のように、「コンクリート構造の限界状態設計法指針(案)」に提案されている式およびCEB-FIP(1978)の式、の2種類のひびわれ幅算定式により求めたものである。

実験結果をみると、RCはりの場合、2式ともクラックスケールにより測定した結果とよく一致していた。

なお、全体的に、クラックスケールにより測定した値よりも、コンタクトゲージにより測定したデータのほうが大きな値を示しているが、この原因は、コンタクトゲージは、コンクリート表面に貼付した標点間の長さ変化を読み取る方式であり、ひびわれ幅のみならず、コンクリートの伸びを含めて測定してしまうためと考えられる。

一方、PCについては、ひびわれ幅の値としては、限界状態設計法指針(案)の式による計算値が実験値に近いといえるが、曲線の勾配は、実験値のほうがはるかに急(すなわち、曲げモーメントの増加に対するひびわれ幅の増加が大きい)で、勾配としては、CEB-FIPのほうがより実験値に近い場合が多かった。しかし、ひびわれ発生モーメントの算定値が実験値よりかなり小さかったため、CEB-FIPの式による計算値は、実際よりはるかに大きな値を示していた。

(3) ひびわれ図

静的試験および疲労試験での供試体のひびわれ図を、

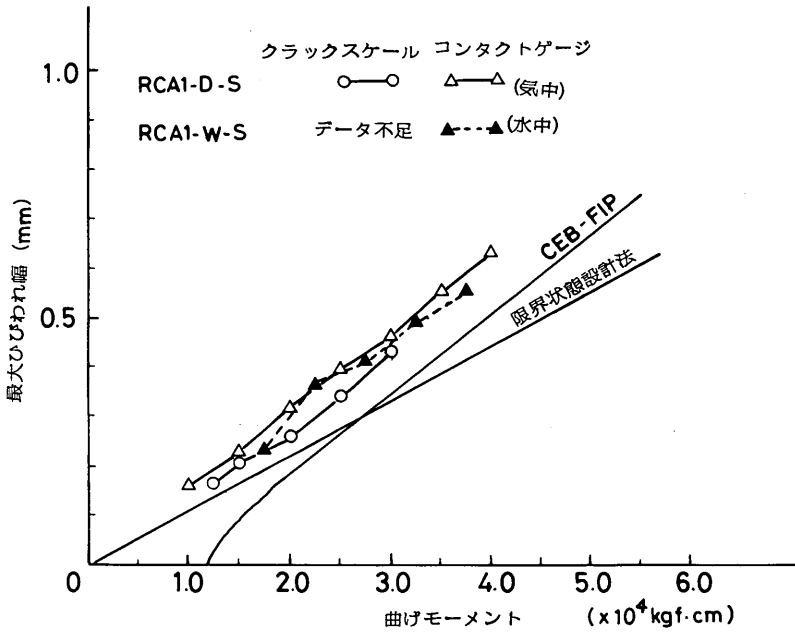


図-28 曲げモーメント～最大ひびわれ幅 (RC, $a/d = 5.0$)

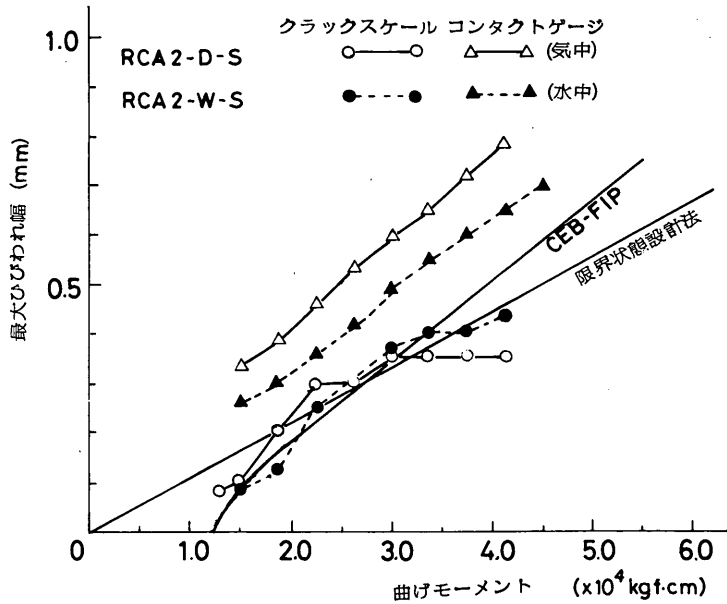


図-29 曲げモーメント～最大ひびわれ幅 (RC, $a/d = 3.75$)

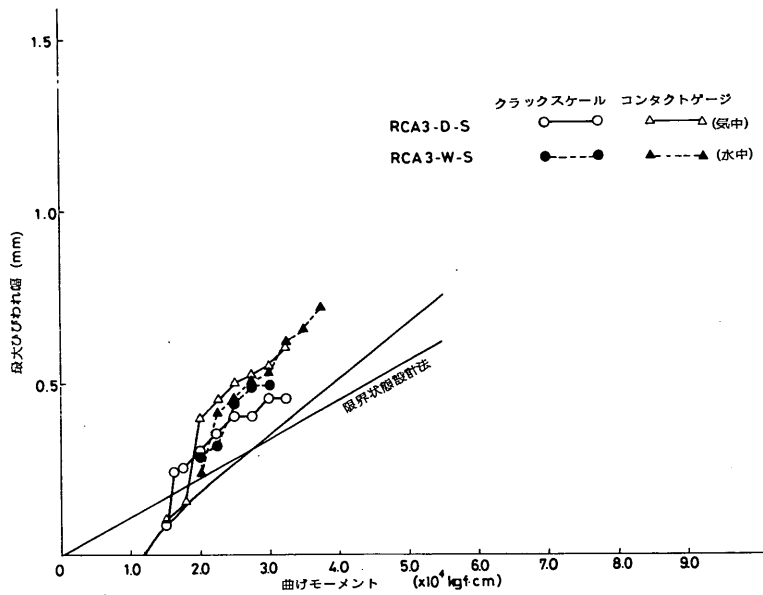


図-30 曲げモーメント～最大ひびわれ幅 (RC, $a/d = 2.5$)

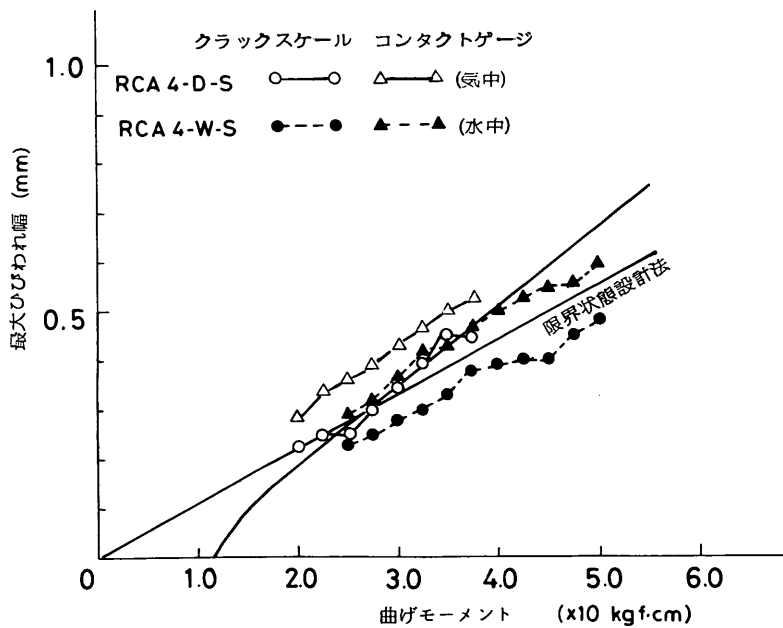


図-31 曲げモーメント～最大ひびわれ幅 (RC, $a/d = 1.25$)

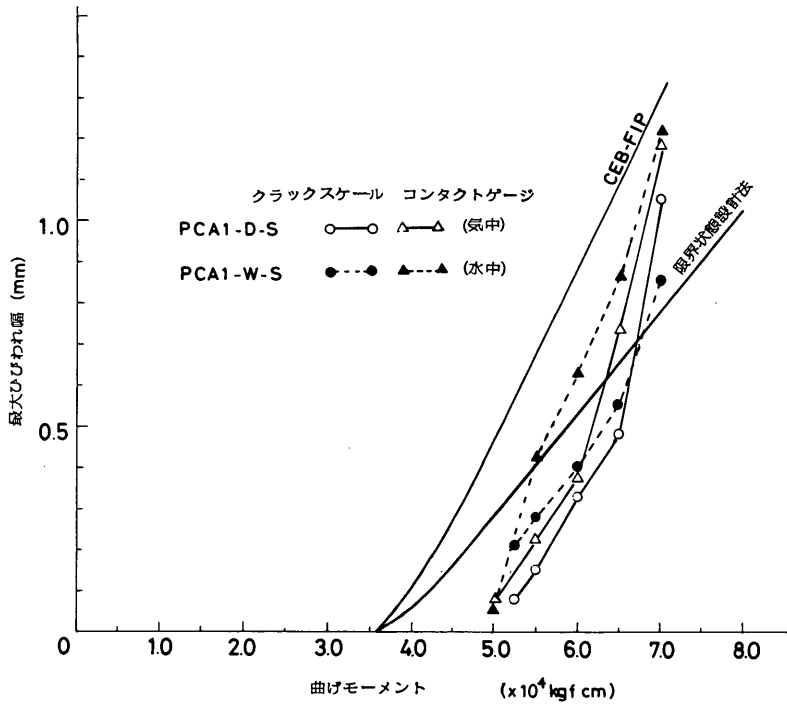


図-32 曲げモーメント～最大ひびわれ幅 (PC, $a/d = 5.0$)

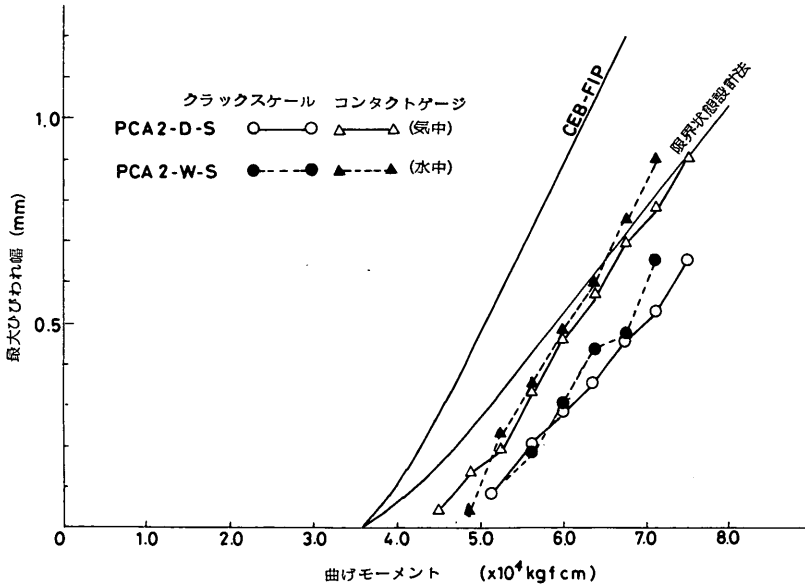


図-33 曲げモーメント～最大ひびわれ幅 (PC, $a/d = 3.75$)

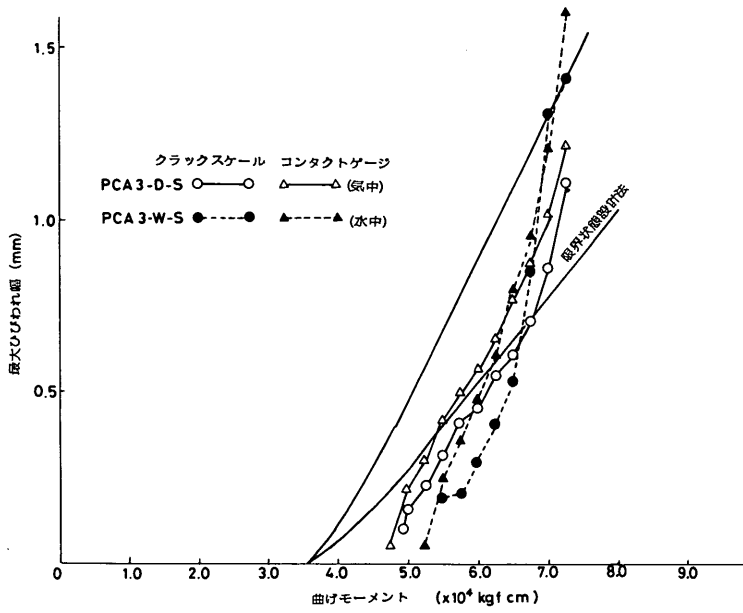


図-34 曲げモーメント～最大ひびわれ幅 (PC, $a/d = 2.5$)

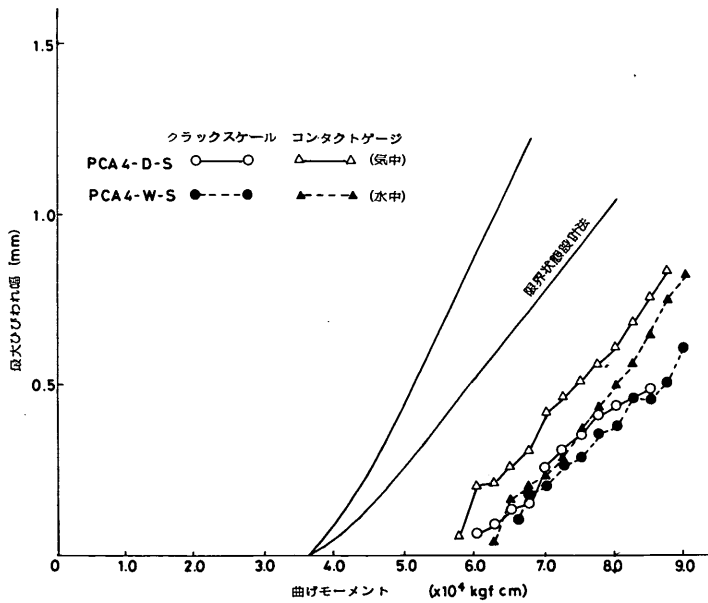


図-35 曲げモーメント～最大ひびわれ幅 (PC, $a/d = 1.25$)

図-36～図-42に示す。

気中のものに比較して、水中でのひびわれ間隔がやや大きく、また、付着破壊に関連するひびわれが認められた。しかし、全体としては大きな差ではない。

(4) 曲げ剛性

静的試験において得られた供試体の断面曲げ剛性と載荷荷重との関係を、図-43～図-50に示す。断面の曲げ剛性EIは、供試体のスパン中央に上下2枚貼付した π 型ゲージの長さ変化の差により曲率半径 ρ を算出し、 $1/\rho = M/EI$ （ただし、M：荷重により断面に生ずる曲げモーメント）の関係より求めたものである。

これらの図より、曲げ剛性は、ひびわれ発生前の荷重が小さいうちは、全断面が有効であるためほぼ一定の値を示しているが、ひびわれ発生とともに急激に低下していることがわかる。

水中と気中の差については、ひびわれ発生前では、若干ではあるが水中でのほうが曲げ剛性は大きいようである。しかし、ひびわれが発生し、曲げ剛性が低下した後は、両者に明確な差は認められなかった。

これらの理由として次のことが考えられる。

すなわち、ひびわれ発生前では、コンクリートを水中に長時間浸漬すると、コンクリート内部の微細な空隙への水の浸透および膨潤すなわち体積の増加現象が起こるが、このとき空隙中に浸透した水は、その表面張力によりモルタルマトリックスの結合力を増加させ弾性係数を増大¹²⁾させるためと考えられる。ひびわれ発生後にPCの曲げ剛性が水中で小さい原因は、おそらくひびわれより侵入する水の影響であると思われる。前述のようにPCはりでは、その鋼材に丸鋼を用いており、異形棒鋼を用いているRCはりに比べて、水の存在によるコンクリートと鋼材の付着力の低下は大きい。したがって、水中のPCはりでは、コンクリートと鋼材の間で滑動が起こりやすくなる。その結果として、コンクリートと鋼材とのひずみ差が気中に比べて増大し、ひびわれが進展するため、曲げ剛性の低下が起こると推察した。

(5) たわみ

図-51～図-56に静的載荷試験において得られた載荷荷重とスパン中央のたわみとの関係を示す。これらの傾向として、ひびわれ発生前の荷重が小さいうちは、荷重とたわみとはほぼ直線的な関係、すなわちはりは弾性的な挙動を示しているが、曲げひびわれの発生時に急激にたわみが増大し、その後は荷重の増大とともに曲線の傾きが減少し、ついには破壊に至っているようすが表れている。

これらの供試体では、気中と水中との試験環境差につ

いては、気中と水中との差は明確とはならなかった。

7.3 疲労限界状態

(1) 疲労強度

a) 試験結果

表-12および表-13に疲労試験（実験Ⅱ、実験Ⅲ、実験Ⅴおよび実験Ⅵ）により得られた結果を示す。

ここで、実験Ⅱの静的試験に用いた供試体RCBでは、気中および水中での静的耐力を両者とも4.0tfとみなした。また、供試体RCCについては、疲労試験に先んじて行った静的試験では、気中、水中とも1本ずつしか行わなかったが、得られた値をそのまま静的耐力とした（それぞれ、4.4tfおよび4.7tf）。

また、実験Ⅲのうち供試体RCJA（重ね継ぎ手長32cm）において得られたS～N線図を図-57に示す。これは、繰り返し載荷の際の上限荷重を縦軸に、また、それに対応する供試体の破壊までの繰り返し回数を対数目盛で横軸に取り、環境条件ごとのデータを直線で結び、S～N線としたものである。また、図中の計算値は、5.において求めた、コンクリートの疲労振幅強度および鉄筋の疲労振幅強度より定まるはり供試体のS～N線である。

く形PCはりについては、図-58にS～N線図の実験値と計算値を示すが、実験値のS～N線は、環境条件別のデータにより最小二乗法を用いて求めたものである。ただし、静的試験のデータは、その破壊荷重を繰り返し回数1回の位置に、また、繰り返し回数100万回で破壊しなかった供試体（供試体PCC2-W-S-3）は、回数100万回の位置にそれぞれプロットし、S～N線を定めるためのデータの1つとしている。

T型PCはりのせん断実験により得られた結果とその計算値（5.に示したせん断疲労振幅強度の算定式による値）を図-59にS～N曲線として示す。

b) 水中と気中での相違

供試体RCBは、気中では上限荷重3.2tfを760回繰り返し返した時点、水中では同2.4tfを1,920回繰り返し返した時点で破壊に至っている。また、供試体RCCでは、気中が上限荷重3.5tfを10回、水中では同3.3tfを3,310回繰り返し返したところで破壊に至っている。荷重、繰り返し回数が異なるため、定量的な判断はできないが、水中では、疲労強度は明らかに低下することが認められた。

重ね継手のある場合、図-57より、供試体の数が少ないため明確なことはいえないが、この供試体の疲労強度は、水中では気中に比べて25%程度低下しており、これは、重ね継ぎ手を有するRCはりの静的耐力とほぼ同様の結果である。また、静的試験において、水中では、継ぎ手長が48cm（現行の示方書通り）でも付着破壊を

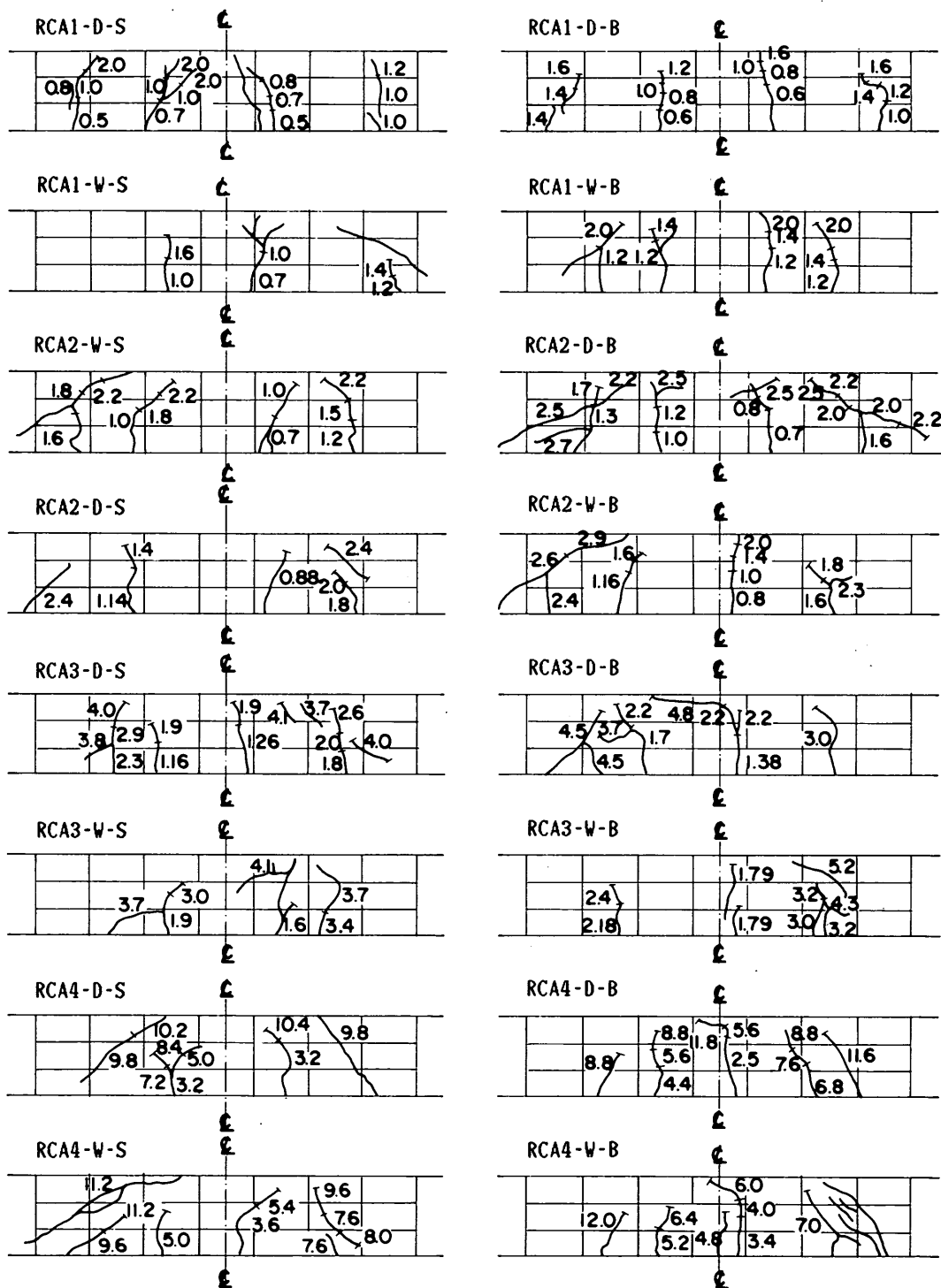
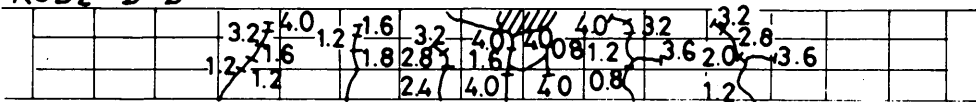
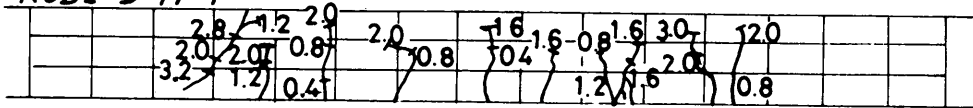


図-36 ひびわれ図 (実験 I, 供試体 RCA)

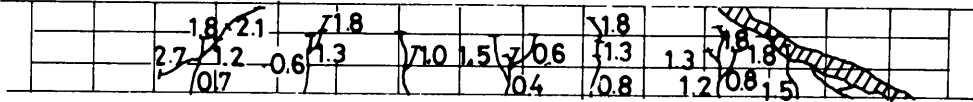
RCB2-D-B



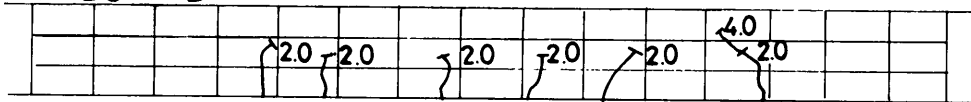
RCB2-D-FF-1



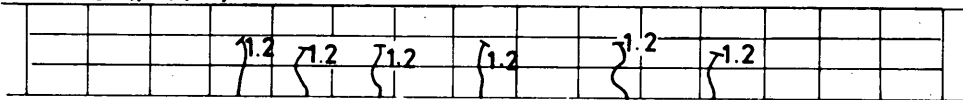
RCB2-D-FF-2



RCB2-W-B



RCB2-W-FF-1



RCB2-W-FF-2

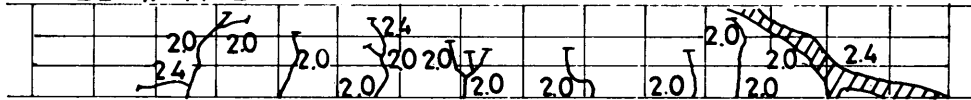
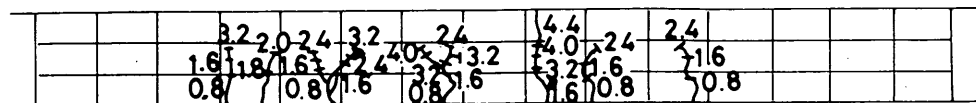
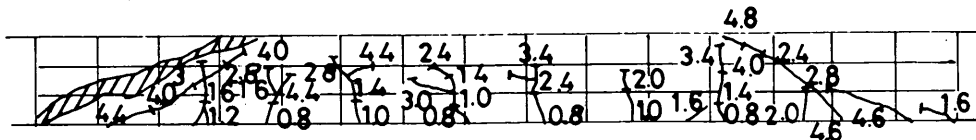


図-37 ひびわれ図 (実験II, 供試体RCB)

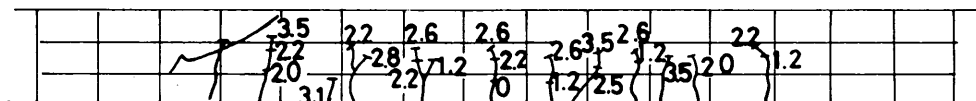
RCC2-D-B-1



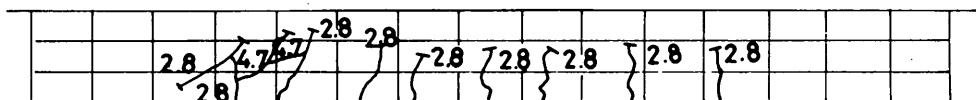
RCC2-D-B-2



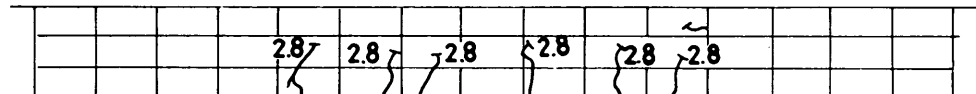
RCC2-D-FF



RCC2-W-B



RCC2-W-FF-1



RCC2-W-FF-2

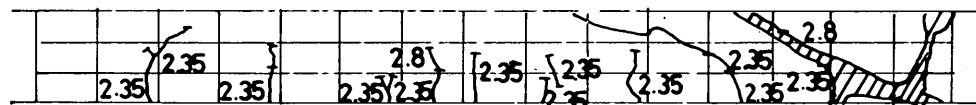
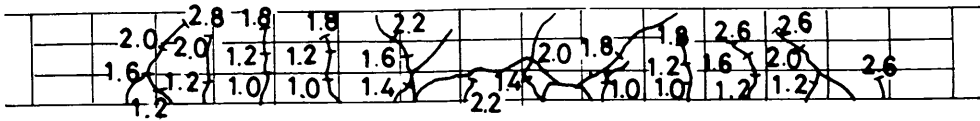
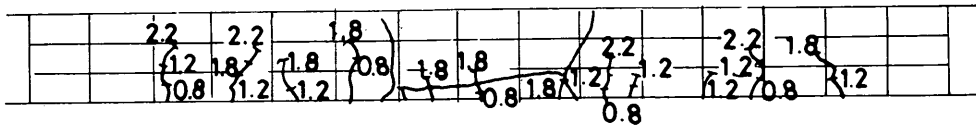


図-38 ひびわれ図 (実験Ⅱ, 供試体 RCC)

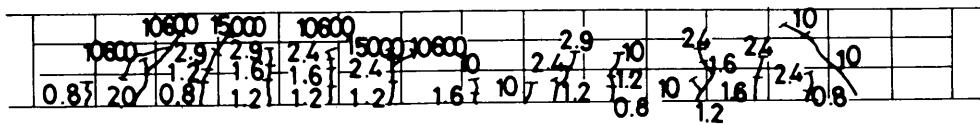
RCJA2-D-S-1



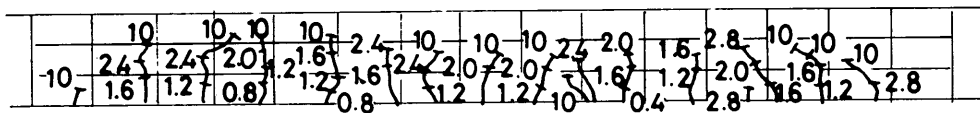
RCJA2-D-S-2



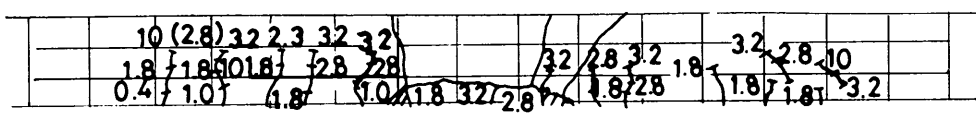
RCJA2-D-F-1



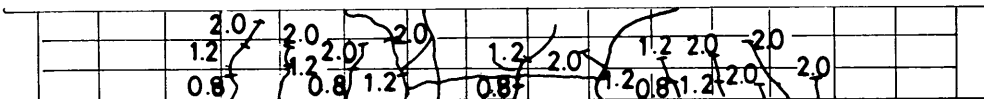
RCJA2-D-F-2



RCJA2-D-FF



RCJA2-W-S-1



RCJA2-W-S-2

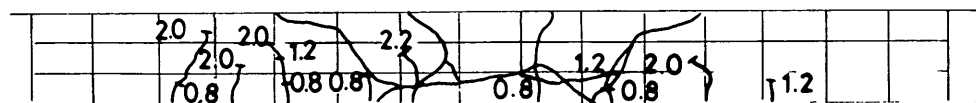
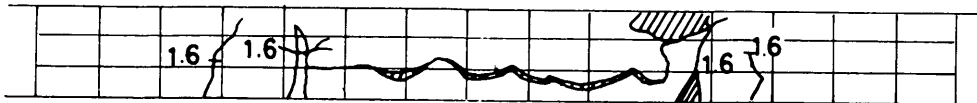
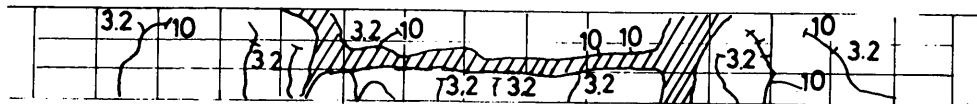


図-39(b) ひびわれ図 (実験Ⅲ, 供試体 RCJ)

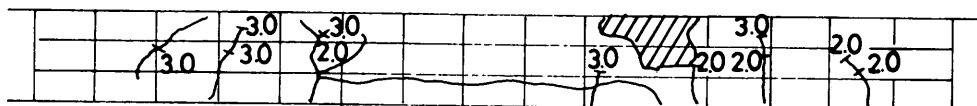
RCJD2-W-S



RCJD2-W-F



RCJE2-W-S



RCJE2-W-F

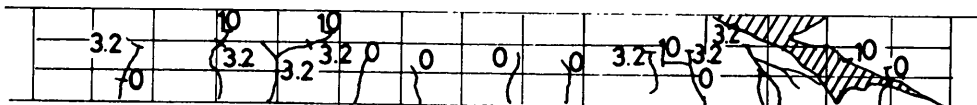


図-39(c) ひびわれ図 (実験Ⅲ, 供試体 RCJ)

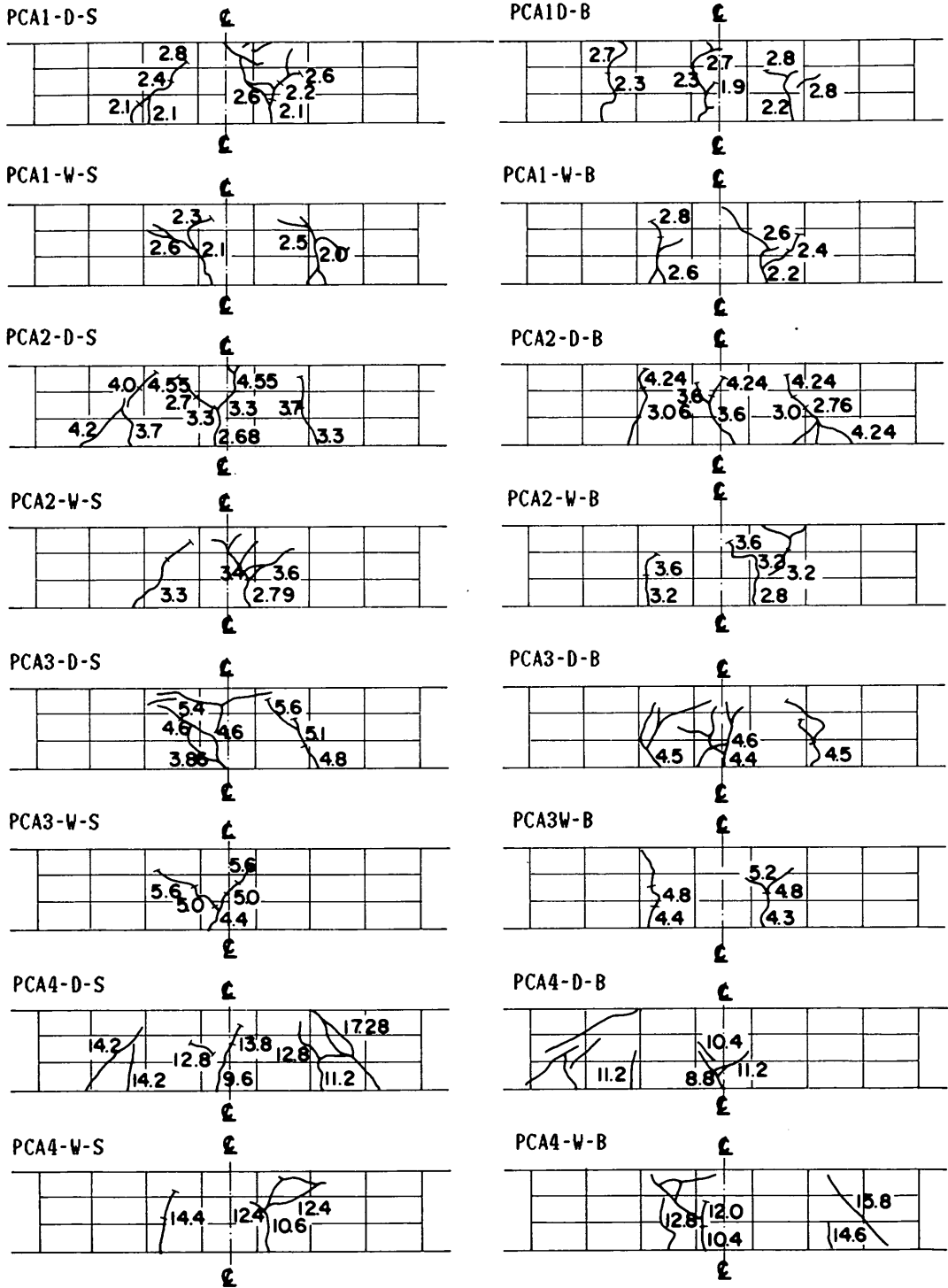
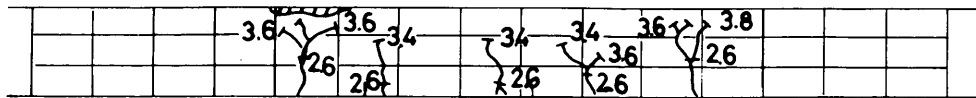
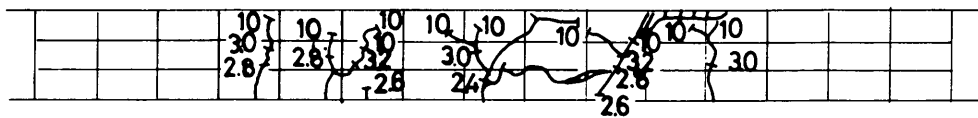


図-40 ひびわれ図 (実験IV, 供試体 PCA)

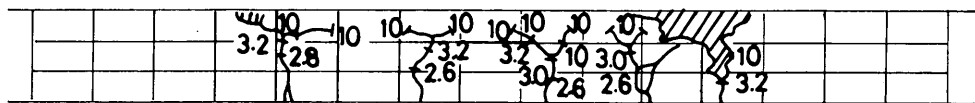
PCB2-D-S-1



PCB2-D-S-2



PCB2-D-F-1



PCB2-D-F-2

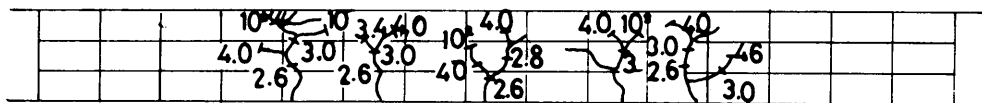
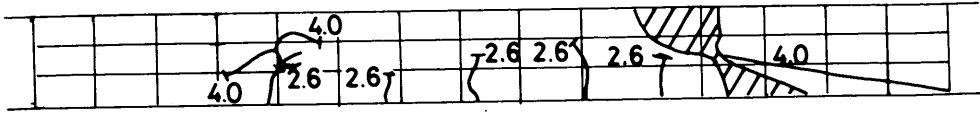
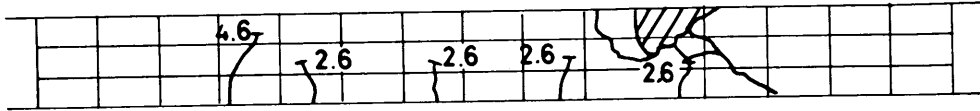


図-41(a) ひびわれ図 (実験V, 供試体 PCB)

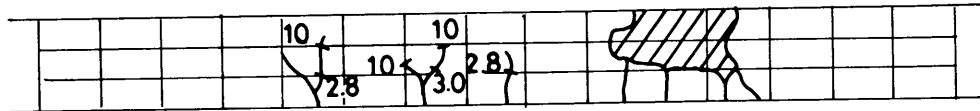
PCB2-W-S-1



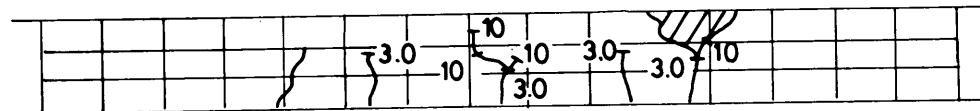
PCB2-W-S-2



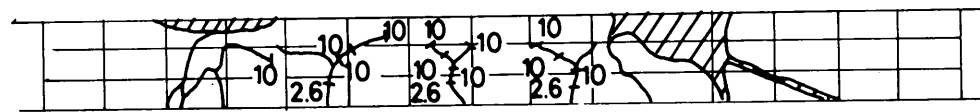
PCB2-W-F-1



PCB2-W-F-2



PCB2-W-F-3



PCB2-W-F-4

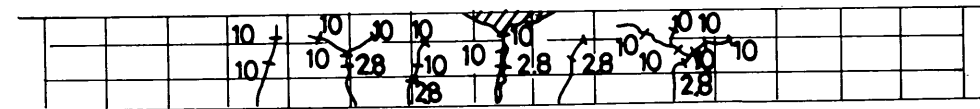
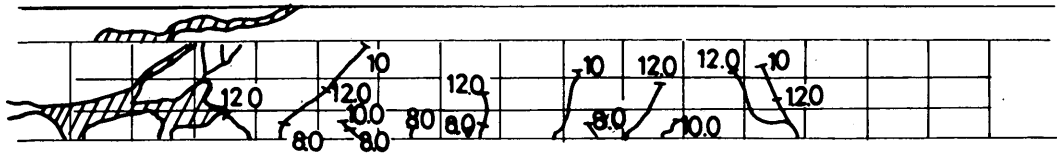
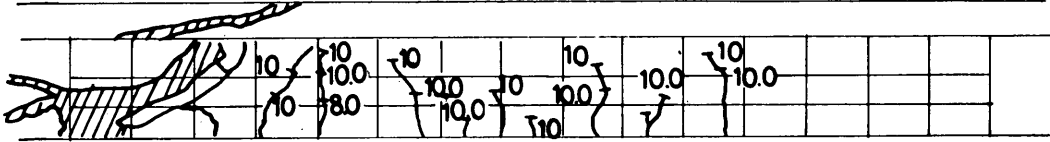


図-41(b) ひびわれ図 (実験V, 供試体 PCB)

PCT3-W-F-4



PCT3-W-F-5



PCT3-W-F-6

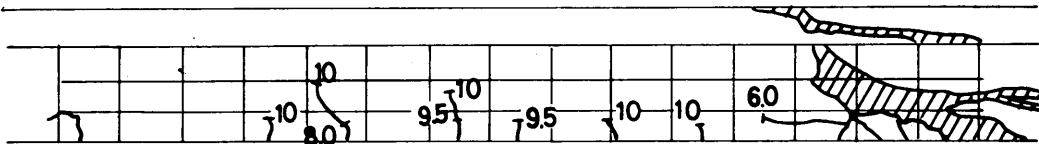


図-42(c) ひびわれ図 (実験VI, 供試体 PCT)

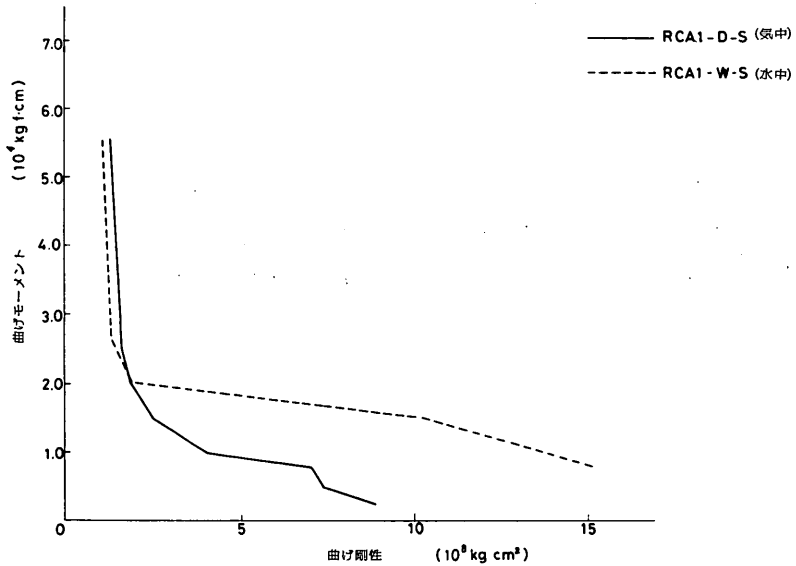


図-43 曲げモーメント～曲げ剛性 (RC, $a/d = 5.0$)

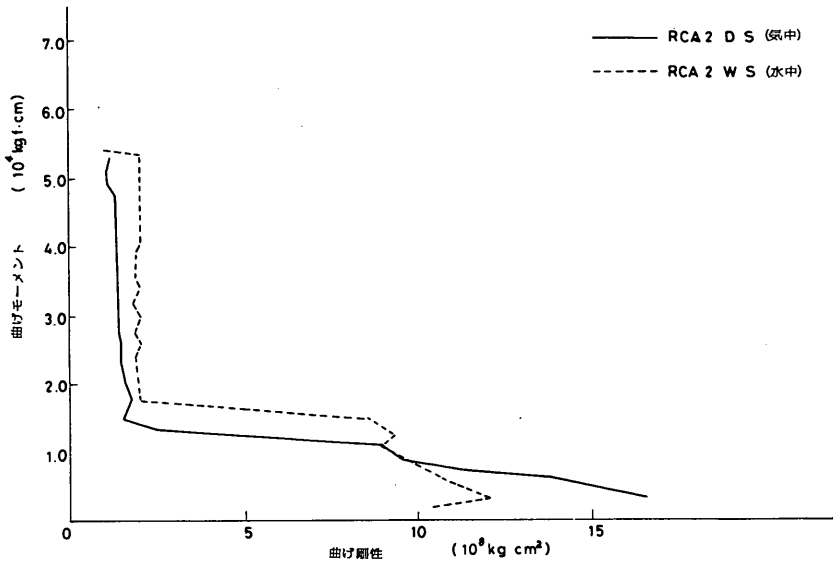


図-44 曲げモーメント～曲げ剛性 (RC, $a/d = 3.75$)

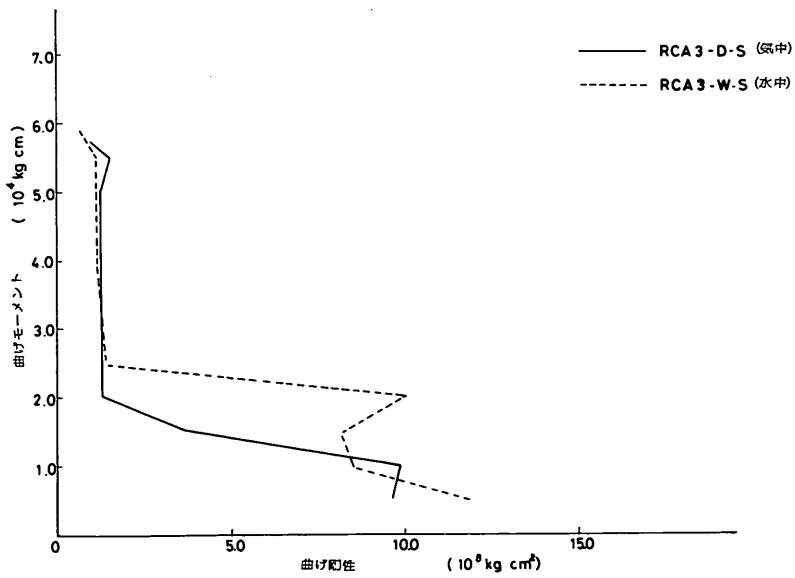


図-45 曲げモーメント～曲げ剛性 (RC, $a/d = 2.5$)

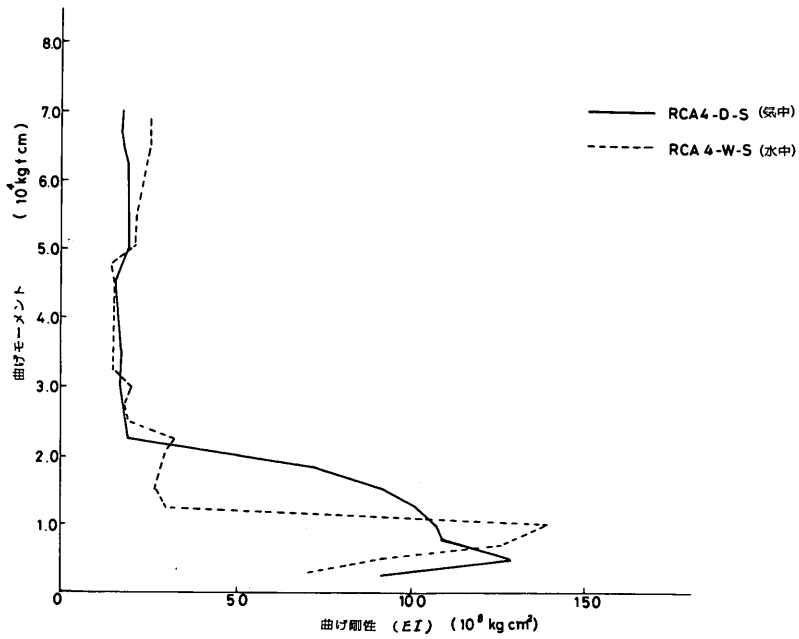


図-46 曲げモーメント～曲げ剛性 (RC, $a/d = 1.25$)

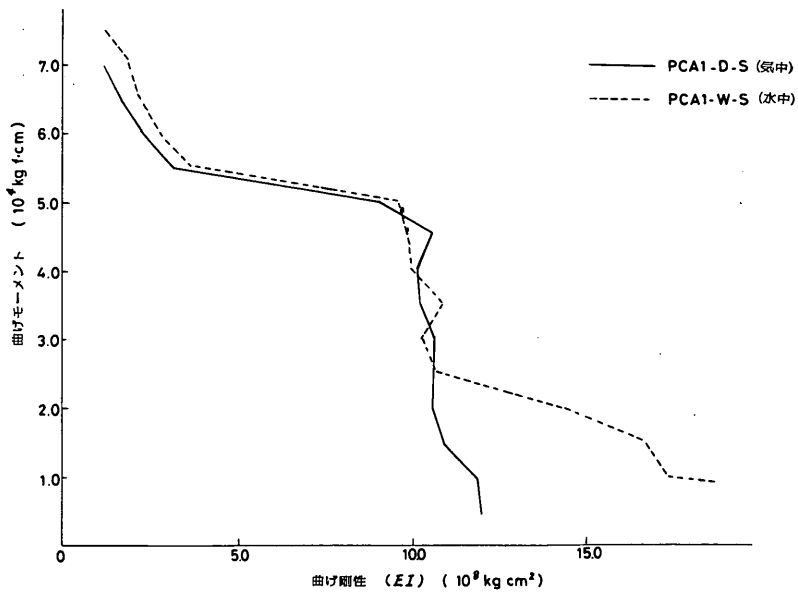


図-47 曲げモーメント～曲げ剛性 (PC, $a/d = 5.0$)

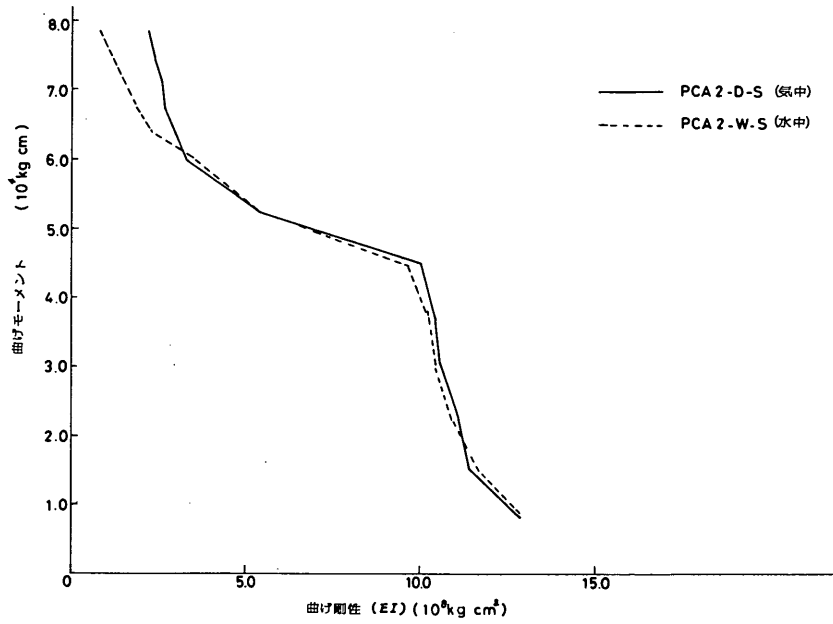


図-48 曲げモーメント～曲げ剛性 (PC, $a/d = 3.75$)

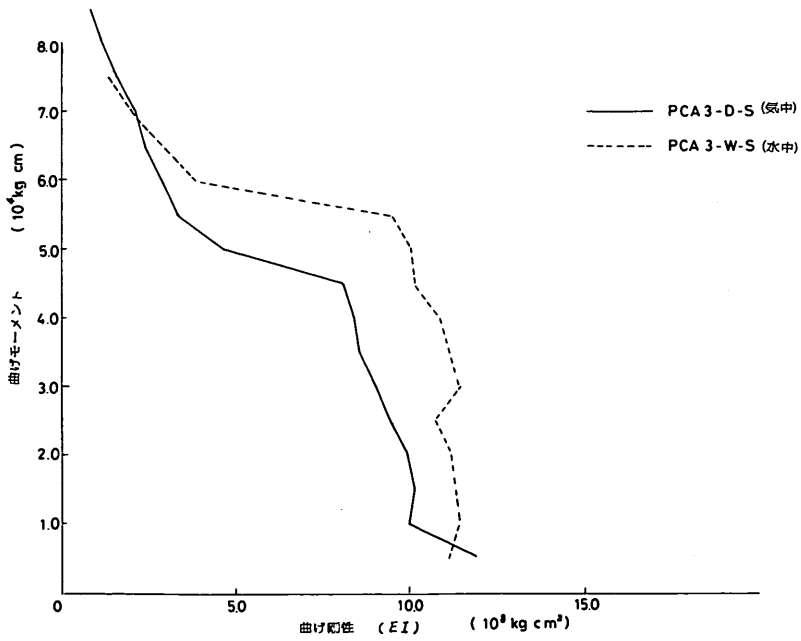


図-49 曲げモーメント～曲げ剛性 (PC, $a/d = 2.5$)

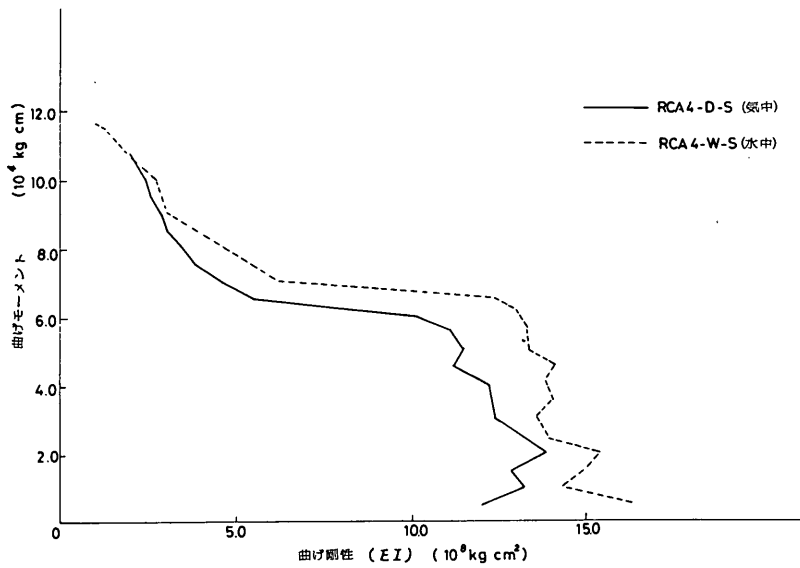


図-50 曲げモーメント～曲げ剛性 (RC, $a/d = 1.25$)

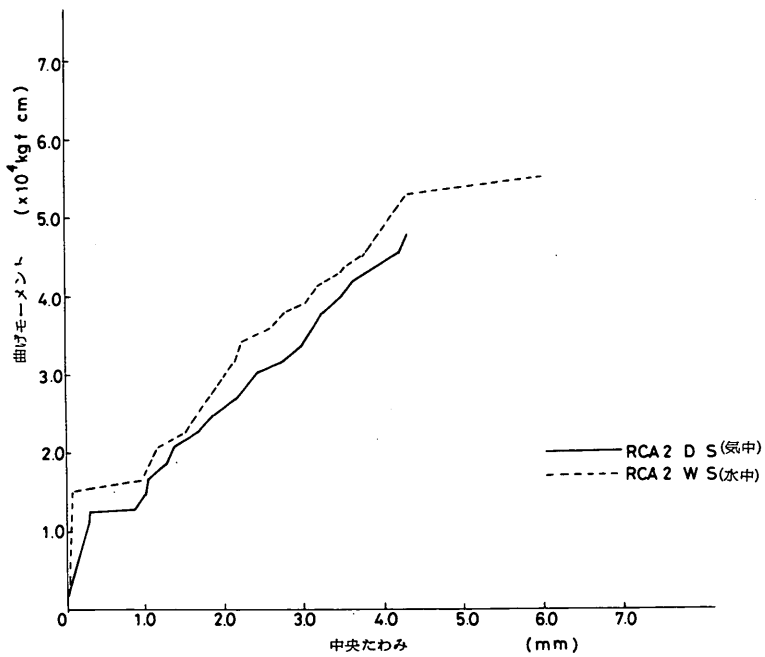


図-51 スパン中央部のたわみ (RC, $a/d = 3.75$)

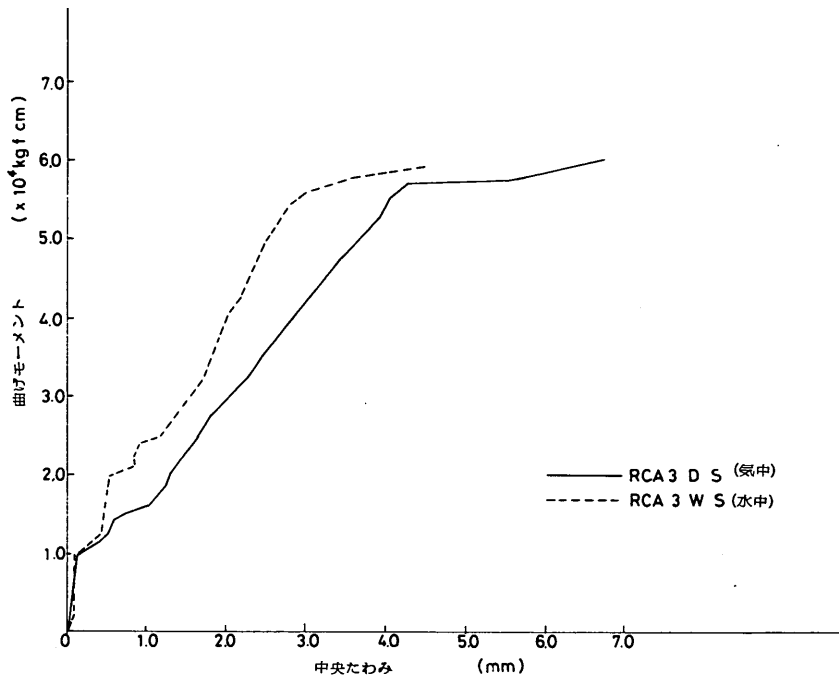


図-52 スパン中央部のたわみ (RC, $a/d = 2.5$)

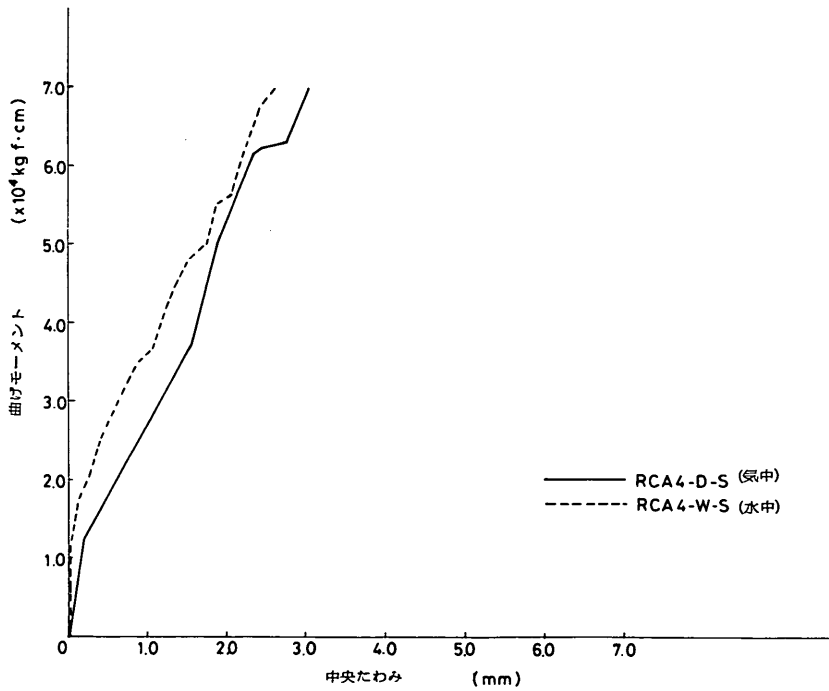


図-53 スパン中央部のたわみ (RC, $a/d = 1.25$)

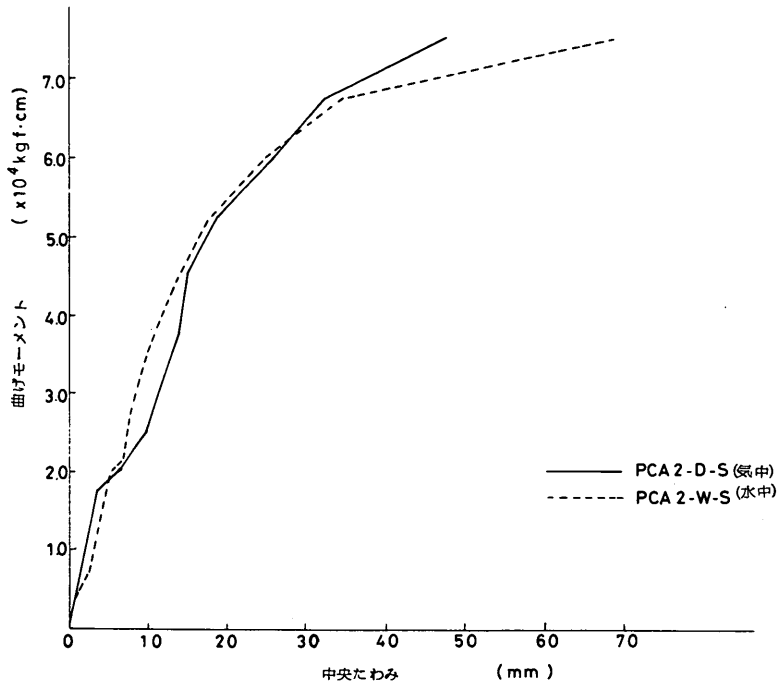


図-54 スパン中央部のたわみ (PC, $a/d = 3.75$)

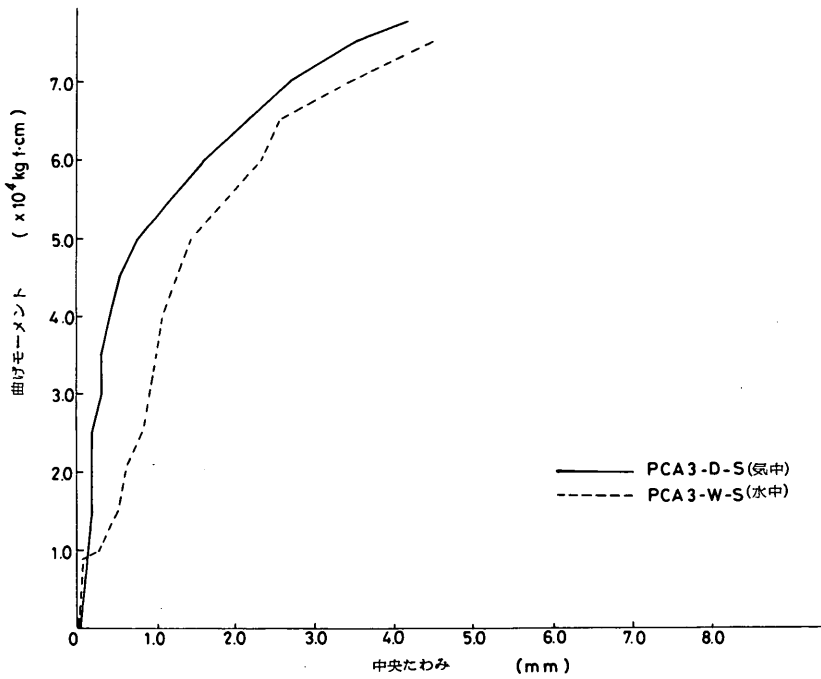


図-55 スパン中央部のたわみ (PC, $a/d = 2.5$)

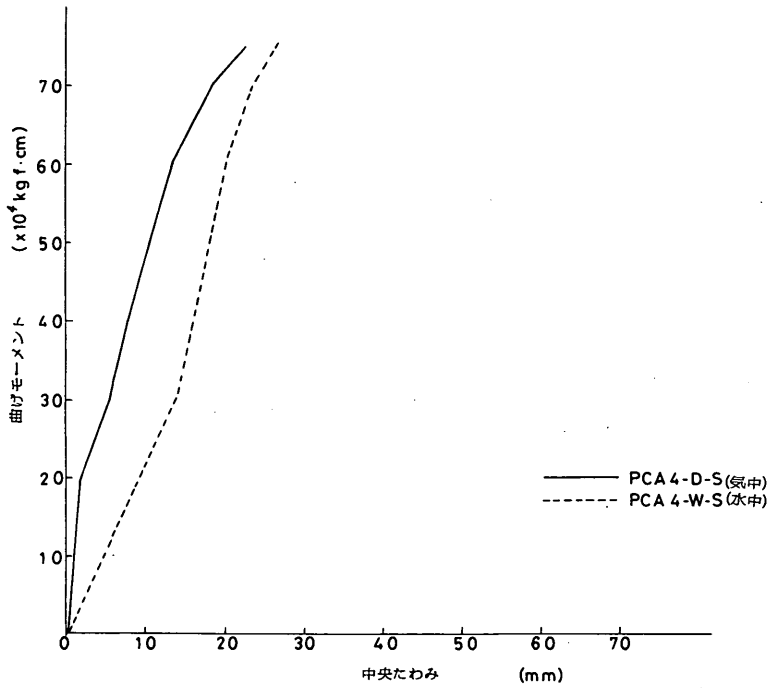


図-56 スパン中央部のたわみ (PC, $a/d = 1.25$)

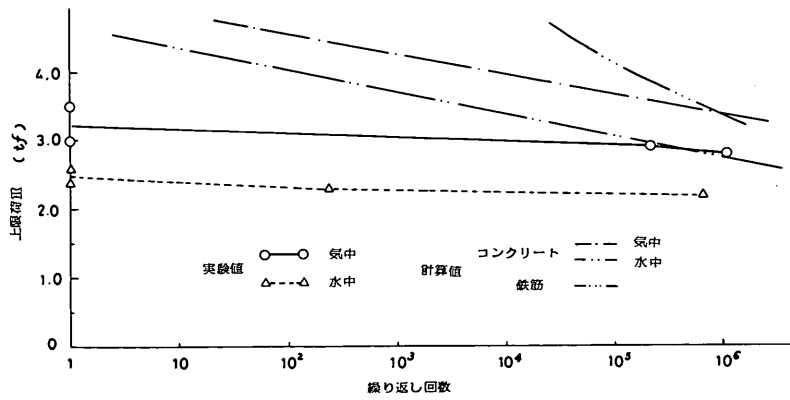


図-57 S~N線図 (実験Ⅲ, 供試体 RCJA)

表-12 RCはり疲労試験

	供試体名	a/d	載荷条件	載荷方法	上限荷重または破壊荷重 (tf)	回数	破壊形式
実 験	RCB2-D-B	3.75	気中	B	4.15	静的	せん断
	RCB2-D-FF	"	"	FF	2.0~3.2	760	"
	RCB2-W-B	"	水中	B	4.00	静的	"
	RCB2-W-FF-1	"	"	FF	2.0, 2.4	1,920	"
	RCB2-W-FF-2	"	"	"	2.0, 2.4	740	"
II	RCC2-D-B-1	3.75	気中	B	4.4	静的	せん断
	RCC2-D-B-2	"	"	"	5.0	"	"
	RCC2-D-FF	"	"	FF	2.2~3.5	10	"
	RCC2-W-B	"	水中	B	4.7	静的	"
	RCC2-W-FF-1	"	"	FF	2.35~3.3	3,310	"
	RCC2-W-FF-2	"	"	"	2.35, 3.3	4,440	"
実 験	RCJA2-D-S-1	3.75	気中	S	3.0	静的	付着
	RCJA2-D-S-2	"	"	"	3.5	"	"
	RCJA2-D-F-1	"	"	F	2.9	214,650	"
	RCJA2-D-F-2	"	"	"	2.8	1,063,600	破壊せず
	RCJA2-W-S-1	"	水中	S	2.6	静的	"
	RCJA2-W-S-2	"	"	"	2.4	"	"
	RCJA2-W-F-1	"	"	F	2.2	647,600	"
	RCJA2-W-F-2	"	"	"	2.3	230	"
	RCJB2-W-S	3.75	水中	S	3.4	静的	破壊せず
	RCJB2-W-F	"	"	F	2.7	140	"
RCJB2-W-FF	"	"	FF	2.0~2.7	1,000	"	
III	RCJC2-W-S-1	3.75	水中	S	3.6	静的	せん断
	RCJC2-W-S-2	"	"	"	3.4	"	付着
	RCJC2-W-FF	"	"	FF	2.9~3.2	530	"
	RCJD2-W-S	3.75	水中	S	3.8	静的	曲げ
	RCJD2-W-F	"	"	F	2.7	1,400	付着
	RCJE2-W-S	3.75	水中	S	4.2	静的	曲げ
	RCJE2-W-F-1	"	"	F	3.2	710	せん断
	RCJE2-W-F-2	"	"	"	2.8	1,510	"

起こしていることは既に述べたが、疲労試験では、継ぎ手長が56cmのものでも付着破壊を起こしていた。このように水中では、鉄筋継ぎ手の強度は気中にある場合よりも著しく低下するということがわかった。なお、継ぎ手長が64cmの供試体では、水中の疲労試験でも付着破壊は起こっていない。したがって、この形状のはりでは、水中で繰り返し荷重を受ける場合、継ぎ手長は最低64cm必要であると思われる。

く形PCはりでは、静的耐力は、水中、気中とも同じ値を示していたが、疲労強度では、両者に差が現れてい

た。S~N線は、繰り返し回数が大きくなるほど試験環境の相違による疲労強度の差が広がっており、およそ10~20%水中での疲労強度のほうが小さかった。

さて、繰り返し荷重下で、水中および気中での疲労強度に差が現れた原因としては、以下のことが考えられる。すなわち、水中ではコンクリート中の空隙に水が存在する。このため、水中での繰り返し荷重下では、この空隙における水圧がコンクリートの微小破壊を促進するため、水中での疲労強度は低下するといわれている。したがって、この微小破壊は、コンクリートの弾性率、ひいては

表-13 PC はり疲労試験

	供試体名	a/d	載荷条件	載荷方法	上限荷重または破壊荷重 (tf)	回数	破壊形式
実 験 V	PCB2-D-S	3.75	気中	S	4.6	静的	曲げ
	PCB2-D-F-1	"	"	F	3.2	266,410	PC鋼棒破断
	PCB2-D-F-2	"	"	"	3.4	38,720	曲げ
	PCB2-D-F-3	"	"	"	4.0	340	"
	PCB2-W-S-1	"	水中	S	4.8	静的	せん断
	PCB2-W-S-2	"	"	"	4.4	"	曲げ
	PCB2-W-F-1	"	"	F	3.4	440	"
	PCB2-W-F-2	"	"	"	3.0	7,640	"
	PCB2-W-F-3	"	"	"	2.6	1,000,000	破壊せず
	PCB2-W-F-4	"	"	"	2.8	171,000	曲げ
実 験 VI	PCT3-D-S-1	2.5	気中	S	14.5	静的	せん断
	PCT3-D-S-2	"	"	"	15.0	"	"
	PCT3-D-F-1	"	"	F	10.0	917,350	"
	PCT3-D-F-2	"	"	"	11.0	674,690	"
	PCT3-D-F-3	"	"	"	12.0	1,410	"
	PCT3-D-F-4	"	"	"	11.5	14,560	"
	PCT3-W-S-1	"	水中	S	13.7	静的	"
	PCT3-W-S-2	"	"	"	14.0	"	"
	PCT3-W-F-1	"	"	F	11.0	1,710	"
	PCT3-W-F-2	"	"	"	10.0	22,870	"
	PCT3-W-F-3	"	"	"	9.0	586,480	"
	PCT3-W-F-4	"	"	"	12.0	120	"
	PCT3-W-F-5	"	"	"	10.5	25,250	"
	PCT3-W-F-6	"	"	"	9.5	37,860	"

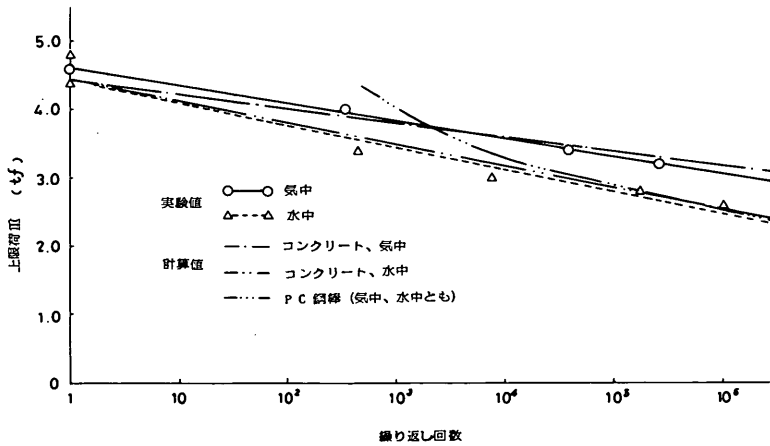


図-58 S~N線図(実験V, 供試体PCB)

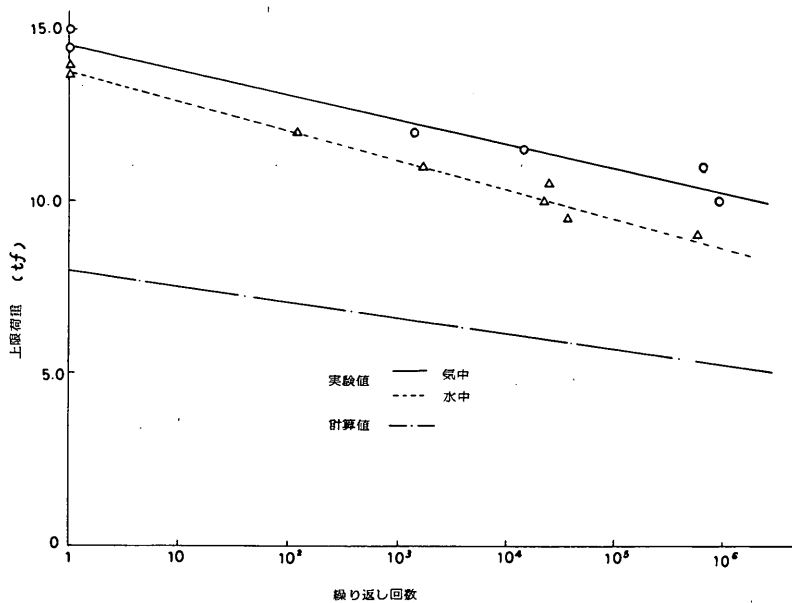


図-59 S～N線図 (実験Ⅵ, 供試体 PCT)

はりの曲げ剛性の低下によるひずみの増大, およびひびわれ進展の助長に結びつき, その結果として, はりの疲労強度を低下させたものと考えられる。

図-58よりT型PCはりのせん断繰り返し載荷時には, 気中と水中での強度差は, 静的載荷時よりさらに広がり, 水中では気中に比べて20%程度の強度減となった。静的終局耐力の項で述べたように, 水中では, モルタルと骨材の間に存在する水が潤滑油の役目を果たして, せん断耐力を低下させると考えられる。したがって, その効果が, 繰り返し荷重によりさらに促進され, 骨材のかみ合わせ作用が著しく阻害されたことにより, 水中で大幅に耐力が低下したものと考えられる。また, 別な要因としては, 上記に示したコンクリートの微小破壊による影響が, コンクリートの強度に依存する部分が曲げ耐力においてよりもさらに大きいせん断耐力に表れたことをも挙げることができる。

c) 計算値との比較

PCく形はりでは実験値と計算値を比較すると, 気中および水中とも, 実験値のS～N線は, コンクリートの疲労振幅強度より求められるものとよく一致していた。計算によれば, 気中では, およそ2000回以上の荷重繰り返しにより疲労破壊を生ずる場合には, PC鋼棒の破断により部材が破壊することが予想されたが, 実験において

PC鋼棒の破断を生じたのは, 供試体PB2-D-F-1 (気中試験, 266,410回で破壊) 1本のみであり, この供試体の疲労強度も, 計算値より2割程度大きな値であった。したがって, 今回の実験に関しては, 限界状態設計法 (土木学会) による疲労強度の推定式は, コンクリートに関してはほぼ実験値どおりの値となっているが, PC鋼棒より定まるはりの疲労強度は, 実験値よりもかなり安全側の値を与えていると推察された。

また, T型PCはりのせん断では図-59に示されるようにS～N線の計算値に関しては, 計算によるはりの静的耐力が実験値を大きく下回っていたため, 疲労強度についても, 計算値は実験値よりもはるかに小さな値を示していた。

(2) ひびわれ幅

図-60～図-61に載荷手順FFにより行った疲労試験での荷重繰り返し回数と曲げひびわれの最大値との関係を示す。

全体的な傾向として, 水中でのひびわれは繰り返し荷重によって気中のものに比較して, ひびわれ幅が増加する傾向が認められた。その例として, 実験Ⅱの供試体RCB2-D-FF (気中) とRCB2-W-FF (水中) とを比較する。ひびわれ幅は, 初載荷時には気中試験のほうが大きく, 上限荷重2.0tf (静的耐力の5割, 気中, 水中とも)

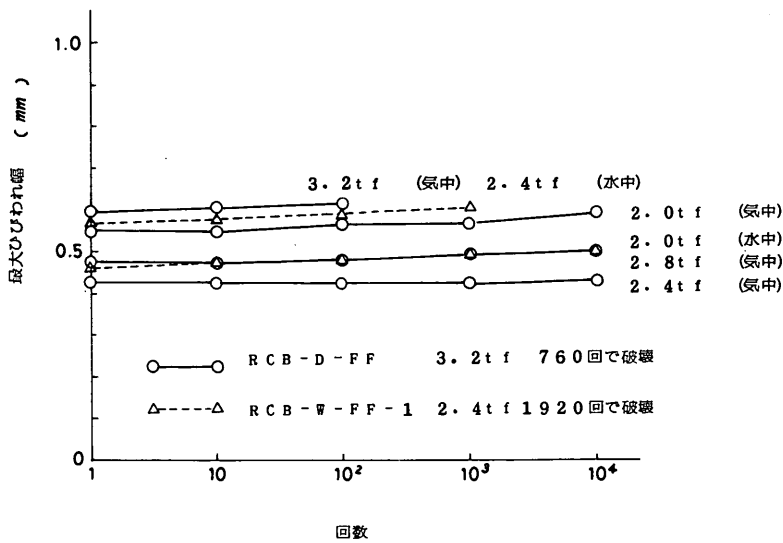


図-60 荷重繰り返し回数～ひびわれ幅 (供試体 RCB)

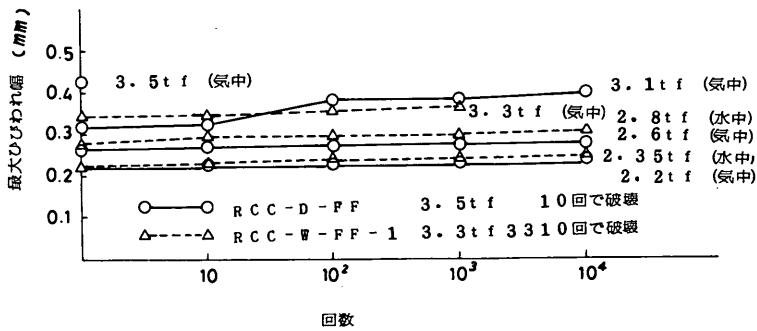


図-61 荷重繰り返し回数～ひびわれ幅 (供試体 RCC)

を 10^4 回繰り返した後では、両者ともほぼ同程度のひびわれ幅の増加を示していた。しかし、次のステップの上限荷重2.4tf(同6割)の繰り返し回数 10^3 でのひびわれ幅は、気中のほうが2.4tf初載荷時とほとんど変化していないのに対して、水中では増加し続けており、ついには1760回で破壊に至っている。

このように、気中と水中とで荷重繰り返しによるひびわれ幅の増加の程度に差が現れた原因としては、ひびわれ部での水くさび効果があるとも考えられる。すなわち、繰り返し荷重の作用する限りでは、ひびわれは荷重の増減に応じて開閉するが、コンクリート部材が水中にある

場合、ひびわれ部に侵入した水は、水の粘性によりスミーズには排出されず、ちょうどひびわれ部にくさびを打込んだような状態になると思われる。このため、水中ではひびわれが進行しやすく、ひいては水中での疲労強度の低下の一因となると考えることもできる。

7.4 本実験結果の適用範囲

前節までに述べたように、コンクリートはり部材の力学的性質は、水中と気中ではやや異なる。しかしながらこの結果は、寸法が高々縦 $25 \times 25 \times 200$ cmの小型供試体の実験結果である。そのため、実大の部材に対してどの程度の適用範囲を有するかを検討する必要がある。

前節までの結果を概観すると、コンクリートはり部材の力学的性質の水中と気中での相違は、主として、コンクリート自体の疲労特性（水中で疲労強度が低下）およびコンクリートと鋼材との付着特性によるものと考えられた。

コンクリート自体の疲労特性について供試体が大きくなると、水中と気中の差がどのようなようになるかの検討はない。しかしながら、水中と気中とでのコンクリートの物性の差は主としてコンクリートが濡れているか乾いているかによるので、小型供試体のほうがより影響を受けると考えられる。このため、実際の部材では、小型供試体の場合よりも、コンクリート自体の疲労特性の差は少ないと判断される。

問題は、コンクリートと鋼材との付着特性に絞られる。しかしながら、これが問題となるのは、せん断破壊の中で付着に関係する場合である。

せん断破壊が付着によって支配される場合はまれで、一般には考慮されていず、特殊な場合以外は、実際の部材で問題とならないと判断される。とはいえ、部材の有効高さが大きくなると、鉄筋径は相対的に小さくなり、従って、付着面積が相対的に増すので、付着強度の影響が大きくなる。このため、せん断力の占める割合が相対的に強く、かつ、部材の有効高さが1 m以上となるような場合には、定量的なデータには乏しいが、本実験の結果よりも水中と気中の差が大きくなる可能性がある。

なお、重ね継手は、部材が大きくなることの影響はほとんど受けず、むしろ鉄筋径の影響を受けると考えられる。そのため、本実験で用いたD 16より大きな径の鉄筋ではより水中と気中の差は大きいことが考えられる。

7.5 設計上の対策

水中のコンクリート部材の設計を行う場合、気中の部材を対象とした基準（たとえば、土木学会コンクリート標準示方書）を用いることを考える。この際に、ほぼ同一の安全性をとることを考えると本実験結果より次の対策を採ることが望ましいと考えられる。

(1) 水中で繰り返し荷重を受ける部材については、曲げ及びせん断の疲労強度を気中でのものより20%低減して設計する。

(2) D16以下の径の鉄筋の重ね継手をゆうする部材では継手長を30%増しとして設計する。なお、D16より径の大きい鉄筋の重ね継手は検討してから使用することとするが、現状では他の継手を使用するのが望ましい。

8. 結 論

今回の実験によりコンクリート部材の水中での力学的性質に関して判明した事項は、以下のとおりである。

(1) 水中で静的載荷した鉄筋コンクリートおよびプレレストレストコンクリートはりのひびわれ発生荷重は、気中に比べ10%前後大きかった。

(2) 鉄筋コンクリートおよびプレレストレストコンクリートはり部材の終局耐力は、水中と気中では顕著な差は認められなかった（重ね継手のない場合）。

(3) 繰り返し荷重を受ける鉄筋コンクリートおよびプレレストレストコンクリートはり部材の水中での疲労強度は気中のものに比較して10~20%低下していた。

(4) 鉄筋の重ね継手を有するはりでは、水中での静的耐力および疲労強度は、気中に比べて25%低い値となった。

(5) 水中では、荷重の繰り返しによるひびわれ幅の増加は、気中の場合と比べて急速である。

また、これらの結果に対する適用の範囲および設計上の対策を7.4および7.5で述べた。

9. あとがき

本研究により、水中で繰り返し荷重を受けるRCおよびPCはりの挙動は、疲労強度、ひびわれ性状などの点で、気中の場合とかなり相違のあることが確認できた。また、鉄筋の重ね継手に関して、現行の示方書の規定では、継手長が不足であることなどが認められた。本研究の結果が、今後の港湾コンクリート構造物の設計の上に貢献するところがあれば幸いである。

(1986年6月25日受付)

参考文献

- 1) 岡村 甫：コンクリート構造の限界状態設計法〔第2版〕、共立出版、1984年
- 2) 土木学会：コンクリート構造の限界状態設計法指針(案)、1983年
- 3) 森 好生、大即信明、下沢 治、甲斐一夫：コンクリート部材の水中強度予備試験、研究室レポート、1980年
- 4) 甲斐一夫、大即信明、森 好生：コンクリートの水中における載荷試験、土木学会第36回年次講演会講演概要集、1981年
- 5) 井岡隆雄、大即信明：コンクリートの水中における疲労試験、土木学会第37回年次講演会講演概要集、1982年
- 6) 烏山郁夫、横井聡之、大即信明：重ね継手を有する鉄筋コンクリート部材の水中における疲労試験、土木学会第38回年次講演会講演概要集、1983年

- 7) 大越康史, 大即信明, 横井聡之, 原茂雅光: プレストレストコンクリート部材の水中における疲労試験, 第10回海洋開発シンポジウム論文集, 1985年
- 8) 土木学会: コンクリート標準示方書(55年度版)
- 9) CEB and FIP: CEB-FIP MODEL CODE FOR CONCRETE STRUCTURES, CEB-FIP International Recommendations 3rd Edition 1978年
- 10) F. レオンハルト著: コンクリート構造の限界状態と変形, 鹿島出版会, 1984年
- 11) 土木学会: 第二回異形棒鋼シンポジウム, 1965年
- 12) A. M. ネビル: コンクリートの特性, 技報堂出版, 1979年

港湾技研資料 No. 559

1986.9

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 阿部写真印刷株式会社

Published by the Port and Harbour Research Institute
Nagase, Yokosuka, Japan.