

土木研究所資料

宮ヶ瀬ダムコンクリート 力学特性試験報告書

(1) コンクリートの伸び能力

昭和62年12月

建設省土木研究所
地質化学部コンクリート研究室

「Copyright © (1987) by P. W. R. I

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P. W. R. I

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。」

宮ヶ瀬ダムコンクリート力学特性試験報告書

地質化学部コンクリート研究室

室長 小林 茂 敏

研究員 森 濱 和 正

“ 丹 野 弘

要 旨

宮ヶ瀬ダムでは、RCD工法による合理化施工が考えられている。このダムは、堤高155mでこれまでRCD工法で建設されたダムよりかなり高いため、温度ひびわれの発生防止の検討が一層重要となっている。

RCD工法ではパイプクーリングが実施できないため、ひびわれ防止にコンクリートの伸び能力への依存が大きくなる。そのため本調査では、コンクリートの伸び能力を実験により検討したものである。実験はコンクリートの配合、材令、載荷速度を変えた曲げ試験を行った。その結果、伸び能力は曲げ強度あるいは圧縮強度との関係が高く、載荷速度（超低速）の影響は小さいことがわかった。

キーワード：貧配合硬練りコンクリート，伸び能力，曲げ試験，緩速載荷

目 次

1. ま え が き	1
2. 使 用 材 料	2
3. 供 試 体 作 製	6
4. 実 験 方 法	8
5. 実験結果と考察	14
6. ま と め	27
7. あ と が き	29
付 録	
1. 振動テーブルの能力	33
2. 乾燥防止試験	36
3. 試験結果データ一覧	38
3.1 曲げ試験	38
3.2 割裂試験	43

1. ま え が き

宮ヶ瀬ダムではRCD工法による合理化施工法が検討されている。このダムは堤高155 mで、これまでRCD工法で建設されたダムよりかなり高いためブロックのダム軸直角方向の長さも長くなり温度ひびわれの発生防止についての検討が一段と重要になると考える。

RCD工法は、その施工の特性からパイプクーリングなどによる温度上昇抑制をするかあるいは、また、温度ひびわれについての高度な解析により、ひびわれ発生を避けるようにしなければならない。従来はコンクリートの引張りの強度に基づいて行なわれてきたが、発生応力を求める際のコンクリートの弾性係数の影響が非常に大きいので、応力を用いないでひびわれの検討を行なう方法が重要になってきた。この場合には引張り強度に変わってコンクリートの伸び能力が必要になってくる。そのため本調査ではコンクリートの伸び能力を実験により検討した。

コンクリートの伸び能力についてはこれまでの研究から、

- ①コンクリートの強度
- ②材料
- ③載荷速度

が影響することが報告されており、その特性を概説すると次のようになる。

- ①単位セメント量が増加^{1), 2)}する、あるいは水セメント比が小さくなる^{3), 4)}などして強度が大きくなる^{5)~8)}ほど伸び能力は大きくなる。
- ②骨材の弾性係数が大きいほど^{3), 4)}、粗骨材量が多い（最大寸法が大きくなる、細骨材率が小さくなる）ほど⁹⁾伸び能力は小さくなる。また、セメントをスラグやフライアッシュで置き換えた場合には、伸び能力に影響を与えない⁸⁾。
- ③載荷速度が小さくなるほどコンクリートのクリープにより伸び能力は大きくなる^{7), 10), 11)}。

しかし、宮ヶ瀬ダムで必要とするような貧配合、超硬練りのコンクリートについての検討は少ない。また実際の施工にあたっては、温度応力の生じる材令や温度勾配によって温度応力が変化する速度は異なることが考えられる。そこで、今回はスランプ、強度の異なるコンクリートについて試験材令、載荷速度を変えた曲げ試験および割裂試験を行い、貧配合、超硬練りコンクリートの低速載荷時における伸び能力を求めることを目的とした。

2. 使用材料

(1) 骨材

粗骨材および細骨材は、現地から搬入されたものを使用した。骨材は南山産のものであり、以前骨材の物理試験、化学的安定性試験、コンクリートによる凍結融解、乾燥湿潤繰り返し、暴露試験を実施し、耐久的であることを確認したものである¹²⁾。骨材の搬入は60年(A)、61年(B)の2回にわかれており、それぞれの骨材の物理試験結果は表-1、表-2のとおりである。

なお、コンクリート供試体作製には、粗骨材、細骨材ともA、Bを1:1の割合で混合して使用した。そのときの物理的性質は表-1、2に示したとおりである。

(2) セメント、混和剤

セメントは、普通ポルトランドセメントを使用した。試験成績を表-3に示す。

混和剤は、AE剤（ヴィンソル）20倍布釈液で使用した。

(3) コンクリートの配合

コンクリートの種類は表-4の3種類とした。配合Aは圧縮強度 240 kg/cm^2 程度のコンクリート、配合Bは水セメント比 W/C を大きくとり、目標圧縮強度 120 kg/cm^2 程度の低強度としたもの、配合CはRCD等を想定して水量を少なくし、超硬練りとしたものである。そのときの水量は(4)「締固め試験」により決定した。3配合ともモルタル分がほぼ一定になるよう、細骨材率 s/a を一定とした。このような条件を満足するよう、試験練りによって配合を表-5のように定めた。

(4) 締固め試験

配合Cは、次のような締固め試験を行い、供試体作製時の締固め時間を決めた。試験方法はモールド（ $\phi 15 \times 30\text{ cm}$ ）を振動テーブルに固定（図-1）し、コンクリートを2層に詰め、一層目は突き棒により25回突き固め、30秒間振動を加えた。2層目はまず突き棒による突き固めを行い、その上に10kgのおもりをのせてから振動を加えた。水量は、試験練りによりモールドとおもりのすきまからモルタル分が浮き上がらないうち、最小の水量とした。締固め時間は、振動時間を変化させて供試体を作製し、コンクリート硬化後の測定した表乾重量、水中重量から単位体積重量を求め、その結果単位体積重量が、ほぼ最大に達する時間のうち、過振動とならないように最少の時間を求め、その時間に決定した。その結果は表-6、図-2のとおりであり、決定された締固め時間は90秒であった。

締固め試験に使用した振動テーブルの能力は、巻末付録1に示した。

表-1 粗骨材の物理試験結果

粗 骨 材	表乾比重	吸水率(%)	粗 粒 率
A	2.62	2.42	6.73
B	2.61	2.44	6.63
混 合	2.62	2.43	6.68

表-2 細骨材の物理試験結果

細 骨 材	表乾比重	吸水率(%)	粗 粒 率
A	2.56	3.18	2.84
B	2.57	3.02	2.60
混 合	2.56	3.10	2.72

表-4 コンクリートの配合条件

配合の種類	設定強度 (kg/cm ²)	粗骨材の最大 寸法 (mm)	目標スランプ (cm)	目標空気量 (%)	水セメント比 W/C (%)	単位水量 (kg/m ³)
A	240 kg/cm ²	20	8 ± 2.5	3.5 ± 1	70	大
B	120 kg/cm ²	20	8 ± 2.5	3.5 ± 1	90	大
C	120 kg/cm ²	20	0	3.5 ± 1	90	小

表-5 コンクリートの配合

配 合	粗骨材の 最大寸法 (mm)	目 標 スランプ (cm)	目 標 空 気 量 (%)	水セメント 比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)				
						水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤
A	20	8.0	3.5	70	47	213	304	788	915	0.076
B	20	8.0	3.5	90	47	213	237	814	944	0.059
C	20	0	3.5	90	47	160	178	901	1044	0.045

表-6 C配合における締固め試験結果

No.	締固め時間	表乾重量 (kg)	水中重量 (kg)	単位重量(kg/m ³)	フレッシュコン クリート重量(kg)
1	30 秒	12.183	6.903	2,308	12.04
2	60 秒	12.242	6.945	2,311	12.25
3	90 秒	12.394	7.104	2,343	12.41
4	120 秒	12.376	7.090	2,341	12.40
5	150 秒	12.367	7.070	2,335	12.40
6	180 秒	12.421	7.120	2,343	12.42

表-3 セメントの試験成績



御中

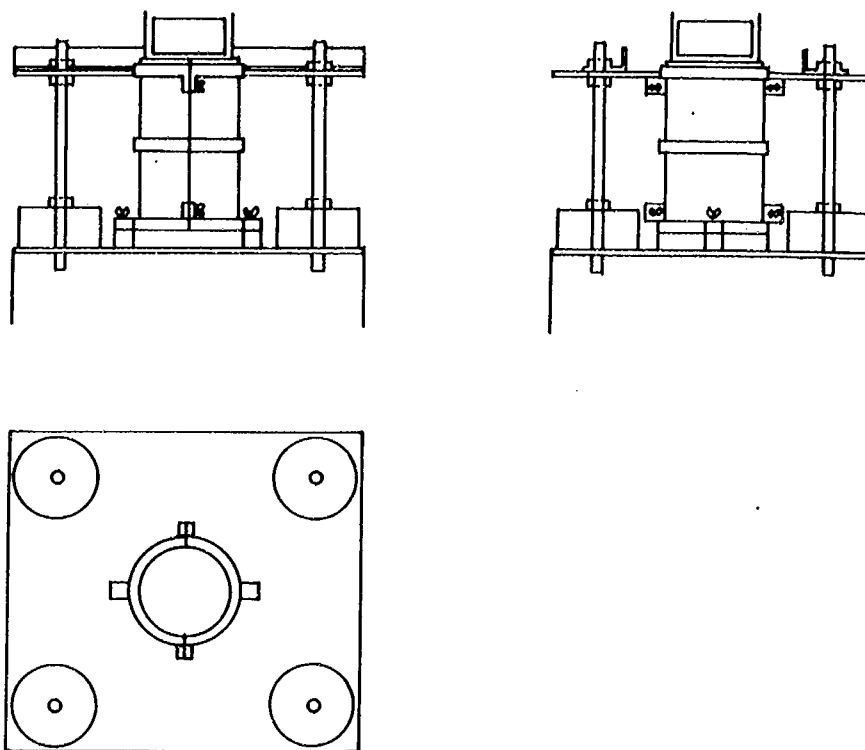
試験成績表

報告番号 26

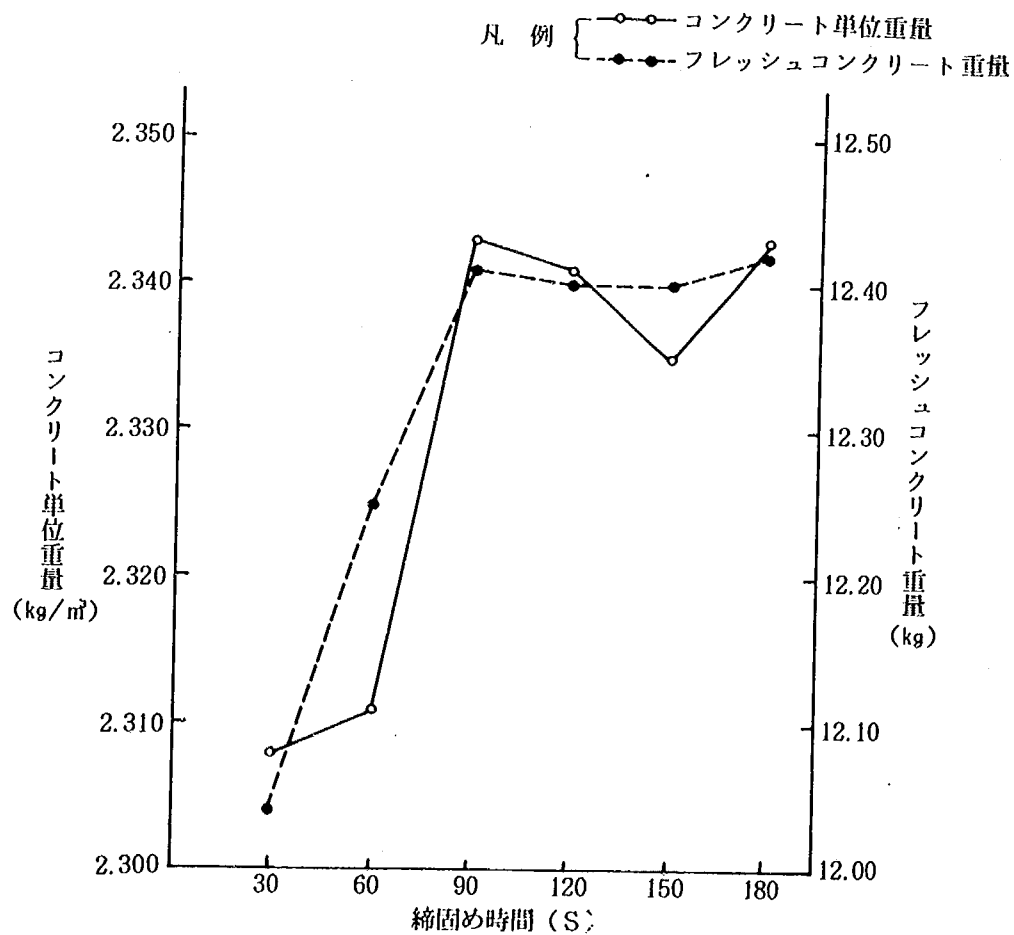
昭和 61 年 6 月 23 日

日本セメント株式会社

種類	比重	比表面積 ブレン 方法) (cm ² /g)	凝 結					安定性 (煮沸方 法)	フロー値 (mm)	曲 げ 強 さ (kgf/cm ²)				圧 縮 強 さ (kgf/cm ²)			
			室 温 (°C)	湿 度 (%)	水 量 (%)	始 発 (時-分)	終 結 (時-分)			1 日	3 日	7 日	28 日	1 日	3 日	7 日	28 日
普通セメント	3.15	3250	20.0	91	29.6	2-17	3-33	良	266		37	52	67		171	258	412
種類	化 学 成 分 (%)									比 率 係 数						水 和 熱 (cal/g)	
	強熱 減分	不溶 残分	二酸化 けい素	酸化アル ミニウム	酸化第 二鉄	酸化カル シウム	酸化マグ ネシウム	三酸化 硫 質		合計	水硬率	活動 係数	けい 酸率	アルミナ 鉄 比	石 灰 飽和度		
	lg.loss	Insol.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃		Total	H.M.	A.I.	S.M.	I.M.	L.S.D.	7 日	28 日
普通セメント	0.7	0.2	21.6	5.3	2.9	64.2	2.0	2.0		98.9	2.11	4.1	2.6	1.8	0.91		
備 考	5/20 出荷品 40 袋口																



図一1 締固め試験および割裂供試体作製



図一2 コンクリート単位重量と締め固め時間との関係

3. 供試体作製

(1) 供試体の種類

実験目的に応じ、コンクリートの種類、材令、載荷速度の違いごとに曲げ用供試体（ $15 \times 15 \times 53$ cm）および圧縮強度試験用供試体（ $\phi 10 \times 20$ cm）を作製した。また、一部には割裂用供試体（ $\phi 15 \times 30$ cm）も作製した。

(2) 供試体の作製

コンクリートの練りまぜは、100リットル強制練りミキサーに骨材およびセメントを交互に投入30秒間空練りを行った後、引続き回転させた状態で30秒間で練りまぜ水を投入、120秒間練りまぜを行った。その後ただちにスランプおよび空気量試験を実施し、供試体作製を行った。供試体の作製法は、配合A、Bのコンクリートについては2層詰めし、各層ごとにバイブレータで締め固めた。

配合Cのコンクリートは、締め固め試験と同様、2層詰めとし各層を突き棒で25回突き固め、1層目は30秒振動を加え、2層目は上におもり（曲げ用（図-3）は40 kg、割裂用（図-1）は10 kg、圧縮用（図-4）は5 kg）を載せ90秒間振動を加えた。

(3) 養生

脱型はおおむね24時間で実施した。その間濡れ布で覆い、コンクリートの初期乾燥を防いだ。脱型後ただちに20℃の恒温水槽で所定の材令まで水中養生を行った。

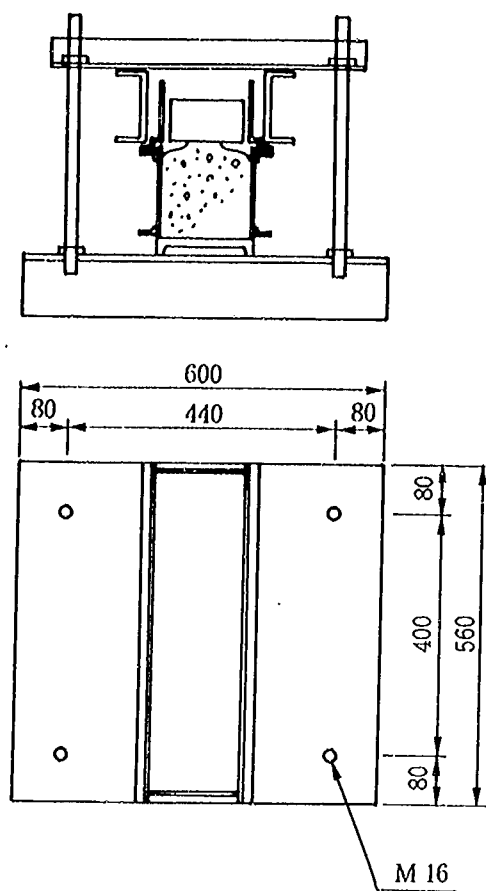


図-3 曲げ供試体作製

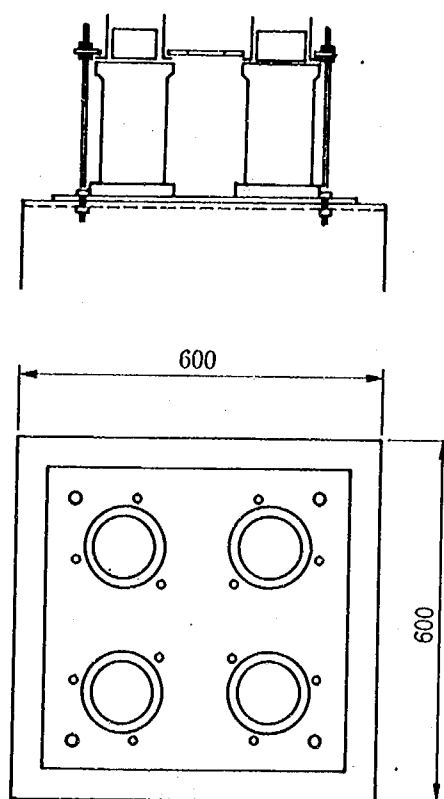


図-4 圧縮供試体作製

4. 実 験 方 法

(1) 試験方法

試験は、以下の条件を組合わせて行い

- ①コンクリートの種類（配合 A, B, C）
- ②材令（3, 7, 28, 91, 365 日）
- ③載荷方法（曲げ, 割裂）
- ④載荷速度 6 段階（S, 1, 2, 3, 4, 5）

コンクリートの伸び能力を測定した。

曲げ試験による伸び能力の試験は、各配合のコンクリートとも材令28日目に、載荷速度を6種類に変化させて実施した（表-7）。また、配合Aのコンクリートは材令3, 7, 28, 91, 365日において表-8に示すような組合せで載荷速度を変えて試験した。

割裂試験は、表-9に示すように3種類の配合について材令28日で載荷速度を3段階(S, 1, 2)に変えて行った。載荷スピードSはJIS A 1106「コンクリートの曲げ強度試験方法」およびJIS A 1113「コンクリートの引張強度試験方法」に基づく荷重制御による標準載荷である。スピード1は変形制御により、スピードSとほぼ同じ載荷速度としたもので、試験機のクロスヘッドのスピードを0.3 mm/minとした。スピード2, 3, 4, 5の各載荷における載荷速度は表-8注)に示すとおりである（スピード5を0.00005 mm/minとしたのは、試験機の最低載荷速度をとったためである）。

割裂による引張強度試験は材令28日の各配合コンクリートについて実施した。載荷速度は、JIS A 1113「コンクリートの引張強度試験方法」に基づく荷重制御による載荷とそれに相当する変位制御による載荷（0.5 mm/min）およびその1/10（0.05 mm/min）の載荷速度の3段階とした。

試験装置は写真-1に示す荷重制御変位制御両用タイプの載荷試験機を使用した。また、試験状況等を写真-2～5に示す。

なお、長時間の載荷となるスピード4および5の供試体は、試験中の乾燥収縮を防ぐため養生終了後供試体表面にワックスを塗布した。ワックス塗布による乾燥防止の予備試験の結果（付録2）、ワックスを厚目に塗布すれば試験期間中の乾燥はほとんど防ぐことができるものと考えられる。

(2) 測定、計測方法

コンクリートの伸びひずみの測定は、ワイヤストレーンゲージによった。ゲージの貼付位置は図-5のとおりである。

ゲージの貼付は、試験の数日前に養生水槽から供試体を引き上げ表面を乾燥したのち、ゲージ接着面に防水のためのベースをつくりゲージを貼付しその上に樹脂、ワックスによるコーティングを施した。硬化したのち、再度試験直前まで水中養生した。

ひずみの計測結果はデジタルひずみ計により印字記録するとともに、ペンレコードによる連続記録も行った。

表-7 実験ケース (配合)

材令28日

配合 \ スピード	S	1	2	3	4	5
A	○	○	○	○	△*	△**
B	○	○	○	○	△*	△**
C	○	○	○	○	△*	△**

* 材令 40~60日程度で実施

** 材令 300日程度で実施

表-8 実験ケース (材令)

配合 \ スピード	S	1	2	3	4	5
3	○	○	○			
7	○	○	○			
28	○	○	○	○	△*	△**
91	○	○	○	○		
365	○	○		○		○

* 材令 40~60日程度で実施

** 材令 300日程度で実施

注) スピード S $\sigma_b = 10 \text{ kgf/cm}^2/\text{min} \rightarrow 750 \text{ kgf/min}$ (3分)

1 0.3 mm/min (3分)

2 0.03 " (30分)

3 0.003 " (5時間)

4 0.0003 " (2日)

5 0.00005 " (10日)

() 内は、破壊までに要するおおよその時間

○: 繰返し数 3回

△: " 2回

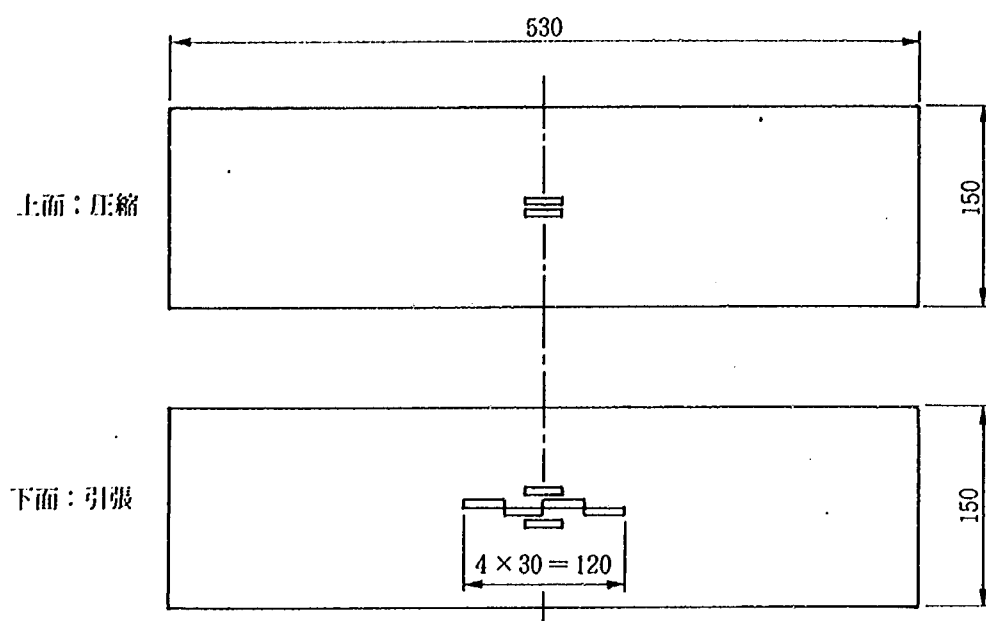
表-9 割裂試験

配合 \ スピード	S	1	2
A	○	○	○
B	○	○	○
C	○	○	○

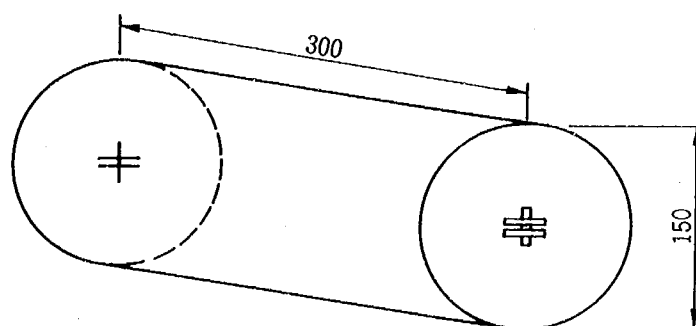
注) スピード S $\sigma_t = 5 \text{ kgf/cm}^2/\text{min} \rightarrow 3600 \text{ kgf/min}$ (4分)

1 0.5 mm/min (4分)

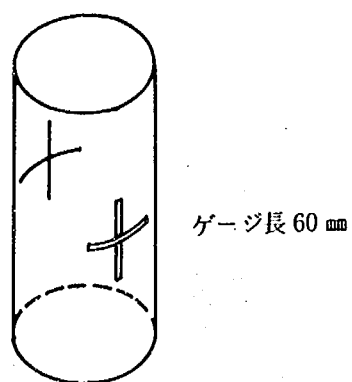
2 0.05 mm/min (40分)



(a) 曲げ ゲージ長 30 mm

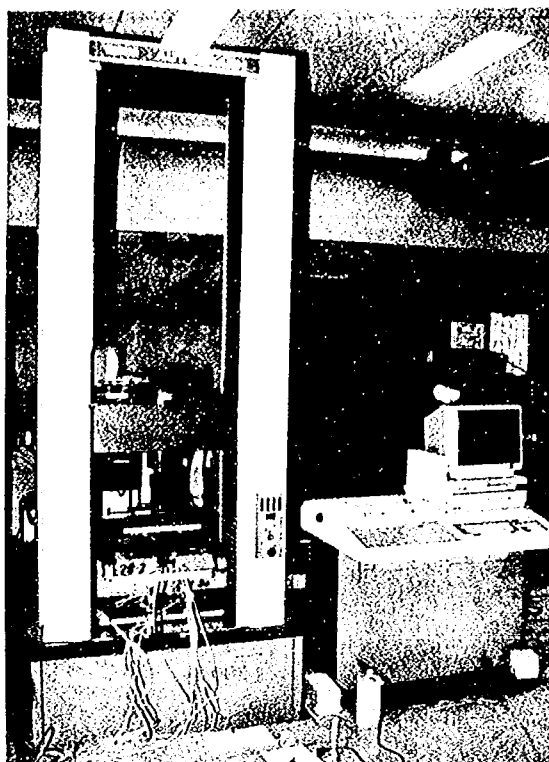


(b) 割裂 ゲージ長 30 mm



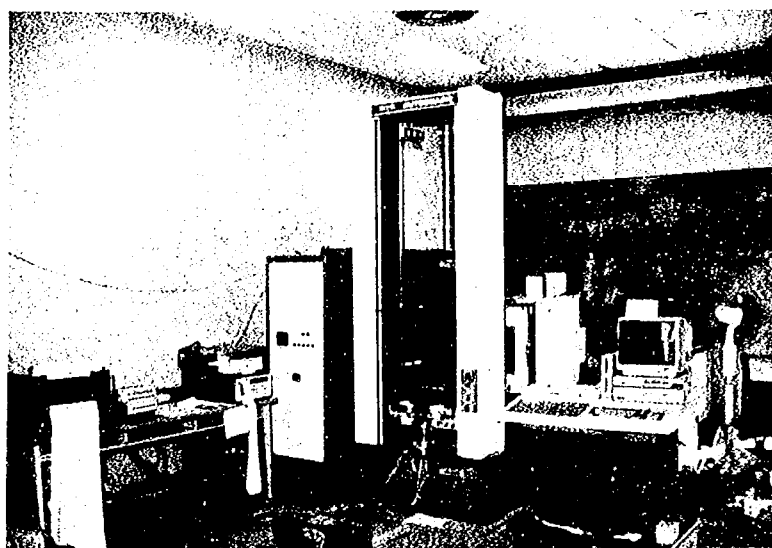
(c) 圧縮

図-5 ゲージ貼付



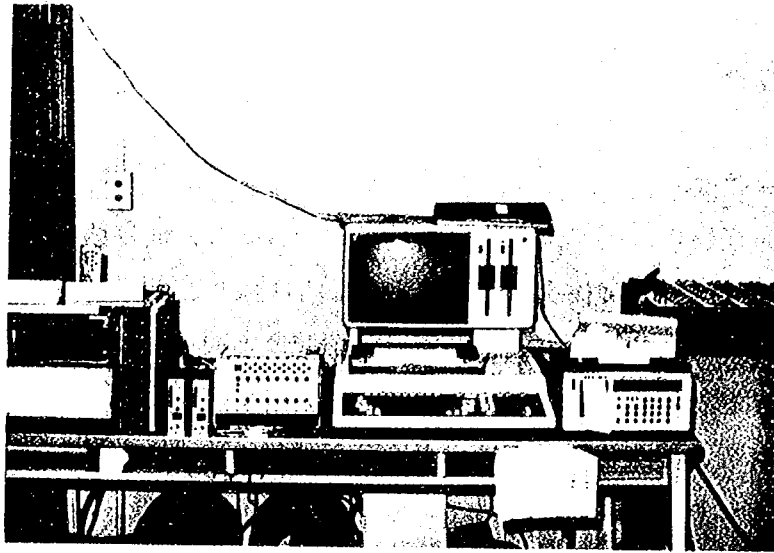
本体 制御装置

写真-1 試験装置



計測器 試験機

写真-2 試験状況



ペン ひずみアンブ パーソナル デジタル スイッチ
レコーダ コンピュータ ひずみ計 ボックス

写真-3 測定器

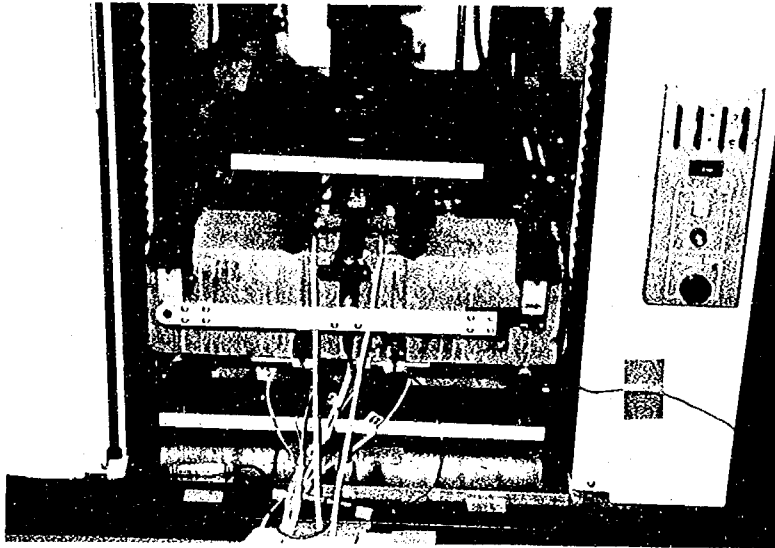


写真-4 曲げ载荷状況

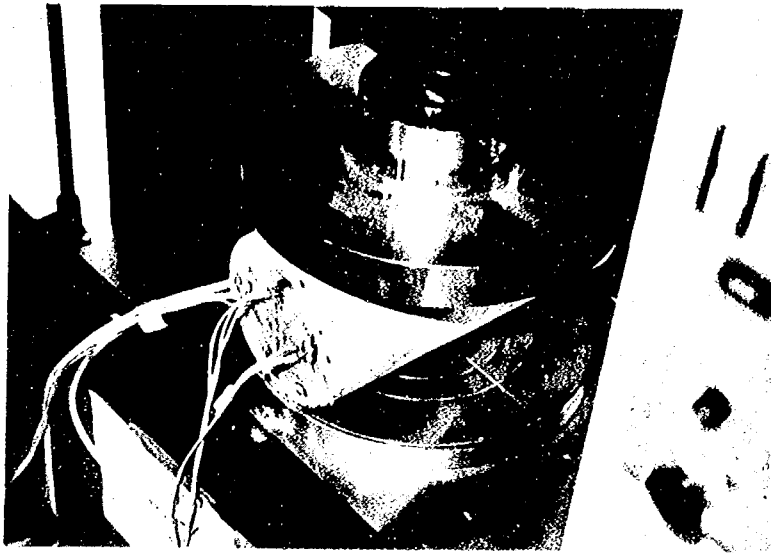


写真-5 割裂状況

5. 実験結果と考察

(1) 圧縮強度と曲げ強度

コンクリートの伸びひずみ測定のための曲げ試験で得られた曲げ強度 σ_b とJISの試験方法による標準供試体の圧縮強度 σ_c の関係を図-6に示す。曲げ強度と圧縮強度の比の σ_b/σ_c を表-10および図-6に示す。これより材令が28日までは圧縮強度と曲げ強度は比例関係にある。しかし、材令がそれ以上になると圧縮強度が高くなっても曲げ強度は大きくならないことがわかる。コンクリートの配合、材令の異なるコンクリートの圧縮強度、ヤング係数、ポアソン比の測定結果は表-11、図-7のとおりであった。図-7より、今回のコンクリートは単位水量が多かったため、ヤング係数は圧縮強度に比べ小さい傾向にある。これより、弾性ひずみとクリープひずみは大きくなることが考えられる。

(2) 載荷速度と伸び能力の求め方

載荷速度は次のように求めた。荷重制御（スピード $S=p_s$ ）および変位制御（緩速載荷）による曲げ試験では、載荷される荷重と時間の関係は図-8のようであった。荷重制御では、荷重と時間は比例する。変位制御では本来、変位一定制御のためひずみ速度が一定となる。しかし、今回の実験は、変形がきわめて小さいため、試験機の変形の影響も大きくなる。そのため、変位の小さい時の荷重の増加速度は小さく、変位が大きくなると次第に荷重も大きくなるので、図-8のような時間-荷重曲線をえがく。よって、変位制御時の載荷速度は図-8のように曲げ最大荷重の2/3と最大荷重の平均勾配とした。

引張ひずみはひびわれ発生位置とゲージ貼付位置の関係により図-9のようになる。ひびわれとゲージ貼付位置が一致していれば、ひずみはひびわれ発生直前に急激に伸びる（図-9の④）。しかし、ゲージ貼付位置がひびわれ位置から離れていれば、ひびわれ直前には荷重の増加はほとんどなくひずみはほぼ一定値となる（図-9の⑥）。④の状態では伸びひずみを定めることが難しく、非常に大きい伸びひずみを与え、危険となり、実用的ではない。これより、伸び能力は弾性限界付近とすることが適当と考えられる。図-9より、破壊荷重の90%程度の伸びひずみが弾性限界付近となっている。よって伸び能力は最大荷重の90%のときの伸びひずみとした。割裂試験についても曲げ試験の場合と同様に載荷速度、伸び能力を求めた。

(3) コンクリートの配合と伸び能力

コンクリートの配合ごとに載荷速度を変化させたときの伸び能力は、図-10のとおりである。図-10では、スピードの違いによる伸び能力の変化はほとんど見られない。しかし、各スピードごとに供試体を作製したバッチが違っており、強度などが変化しているため単純な比較はできない。

配合の違いによる伸び能力は $A > B > C$ の順となっている。図-11の配合、載荷速度ごとの曲

げ強度の比較より、配合による伸び能力の相違は曲げ強度に非常に大きい影響を受けていることがわかる。

伸び能力は、曲げ強度との関係も強いようである。そこで図-12にスピードSの伸び能力と曲げ強度を基準にそれぞれの比率を示した。伸び能力の比率と曲げ強度の比率の差が大きければ、曲げ強度に対して伸び能力が大きいことになる。たとえば、配合Bの場合、載荷速度がゆっくりになるにしたがい曲げ強度は小さくなっているが、伸び能力はほぼ一定となっておりその差は大きくなっているため、載荷速度が遅くなるにしたがい伸び能力は大きくなっていることがわかる。しかし、配合A、Cではばらつきなどもあり、かならずしもそういった傾向は見られない。配合Bについても伸びの増加割合はスピードがSの1/1000倍程度（スピード4）で20%程度である。

(4) 材令と伸び能力

材令と載荷速度の関係は図-13のように、この場合も載荷速度による伸びの増加は明確ではない。

材令28日までは材令の増加とともに伸び能力も増加しているが、91日、365日ではむしろ減少している（図-14）。これは、材令の増加により圧縮強度は増加しているものの、曲げ強度が増加していない（図-6）ことに加え、ヤング係数は増加（表-11）したためと考えられる。

強度の影響を無視するため図-12と同様にスピードSの曲げ強度、伸び能力を基準にそれぞれの比率を図-16に示す。3日、7日の若材令では低速スピード載荷時に伸び能力の増加傾向がみられるが、91日、365日になればスピード3からスピード5程度では伸びの増加はほとんど認められない。

(5) 曲げ、圧縮強度と伸び能力

コンクリートの伸び能力は、配合、材令、載荷速度にかかわらず曲げ強度に大きく影響されることがわかった。そこで、図-17のように曲げ強度と伸び能力の関係を表し、最小二乗法により回帰式を求めた。回帰式は、直線および指数曲線について求めた。直線式は簡単であるが①強度ゼロのとき伸び能力がゼロとならないこと。②そのため低強度域での関係を表すことができないこと。③高強度において増加率が低減することを表すことができないため、指数曲線についても求めた。その結果、回帰式および相関係数はつぎのとおりであった。

$$\text{直線式} \quad \epsilon = 94.76 + 2.166 \sigma_b \cdots \cdots (1)$$

$$r = 0.872$$

$$\text{指数曲線} \quad \epsilon = 38.23 \sigma_b^{0.4223} \cdots \cdots (2)$$

$$r = 0.894$$

指数曲線のほうが相関係数が高く、測定値に良くあっていることがわかる（図-17）。

通常、設計には圧縮強度が用いられるため、図-18には圧縮強度と伸び能力の関係および回帰式を求めた。回帰式および相関係数はつぎのようであった。

$$\text{直線式} \quad \epsilon = 134.6 + 0.1662 \sigma_c \quad (3)$$

$$r = 0.600$$

$$\text{指数曲線式} \quad \epsilon = 48.99 \sigma_c^{0.2339} \quad (4)$$

$$r = 0.684$$

圧縮強度と伸び能力の関係は、曲げ強度との関係ほどではない。それは、とくに材令が28日を過ぎると曲げ強度、圧縮強度比が小さくなる（表-10、図-6）ためである。回帰式は指数曲線では圧縮強度と伸び能力もある程度高い相関関係のあることがわかる。しかし、曲げ強度との関係のように強度の低いところでの適合性はあまり良くない。

(6) 割裂強度と伸び能力

割裂試験による引張強度と圧縮強度の関係を図-19に示す。引張強度と圧縮強度の比の平均は0.1043（1/9.59）、変動率10.3%で通常のコンクリートで得られるものとはとくに差はなかった。

図-20に配合および載荷スピードと伸び能力の関係を示すように明確な関係はわからない。その原因は、割裂ひびわれ発生とひずみ測定面との関係にある。ひずみゲージは円柱供試体の両面に貼付した（図-5(b)）。割裂ひびわれの発生は、両面でわずかに時間的なずれを生じていた。はじめにひびわれを生じた面は、載荷途中からかなり大きなひずみを生じたが反対の面のひずみは小さくなり、ばらつきが大きくなったものである。

割裂試験による伸び能力はばらつきが大きいため、割裂試験を行った27個のうち両面のひずみがほぼ等しかった7個（付録3の割裂試験結果の伸び能力に＊を付したもの）について伸び能力の関係を求めた。図-21は、引張強度と伸び能力の関係である。図-22は、曲げ試験と割裂試験による伸び能力の関係を求めたものである。図-22の横軸は曲げ強度であり、引張強度を曲げ強度にあわせるため引張強度を1.88倍（曲げ強度/圧縮強度=0.196（表-10）と引張強度/圧縮強度=0.104の比0.196/0.104=1.88）したものをプロットした。図-22にはそのときの回帰直線と（1）式の曲げ強度と伸び能力の回帰直線も示した。割裂試験による伸び能力はばらつきが大きく、個数も少ないものの、回帰直線は曲げ試験で得た伸び能力とほぼ一致している。曲げ試験で求めた伸び能力（1）式と割裂試験による伸び能力は同程度になる可能性のあることを示しているものと考えられる。

表-10 圧縮強度曲げ強度比

コンクリートの種類		平均圧縮強度 曲げ強度比	変 動 率 (%)
配 合	材 令		
A B C	3, 7, 28	0.196 (1/5.10)	13.7
A	91	0.135 (1/7.43)	9.5
A	365	0.118 (1/8.51)	9.6
全 平 均		0.181 (1/5.52)	21.5

表-11 圧縮強度試験結果

配 合	材 令 (日)	圧 縮 強 度 (kgf/cm ²)	ヤング係数 ($\times 10^5$ kgf/cm ²)	ポアソン比
A	3	91	1.02	0.14
	7	140	1.50	0.20
	28	255	1.97	0.19
B	28	149	1.73	0.18
C	28	171	1.90	0.19
A	91	313	2.27	0.21
	365	338	2.43	0.22

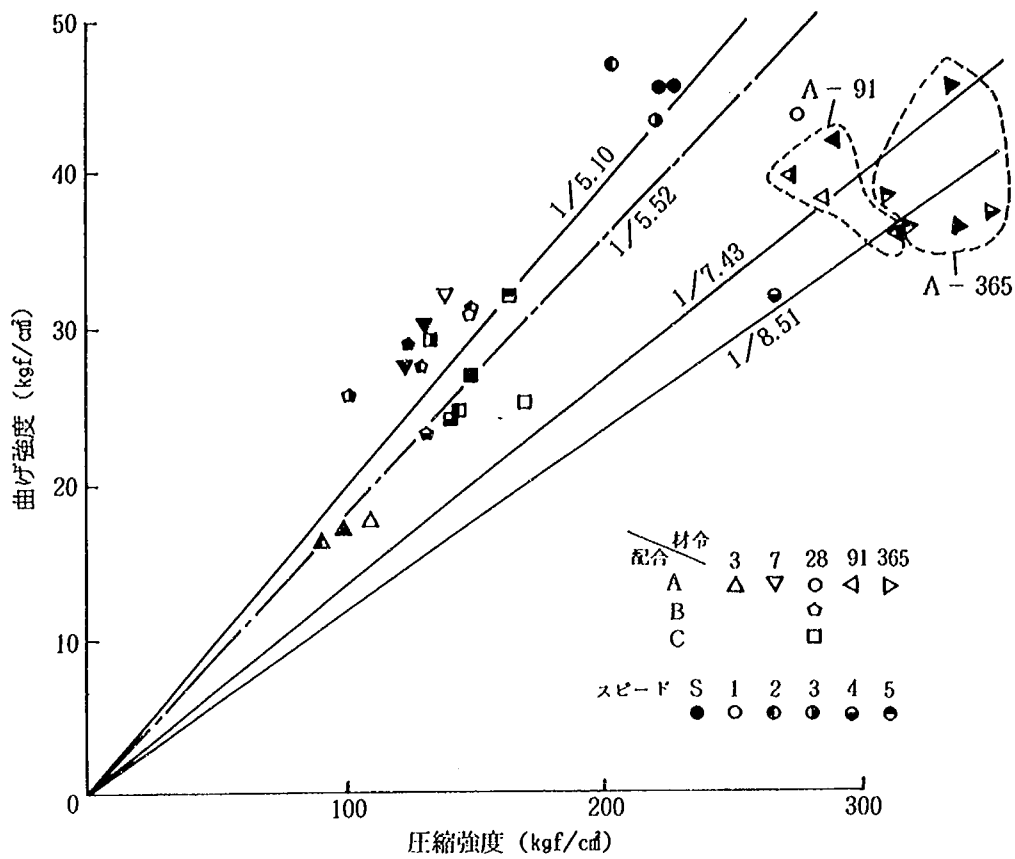


図-6 曲げ強度と圧縮強度

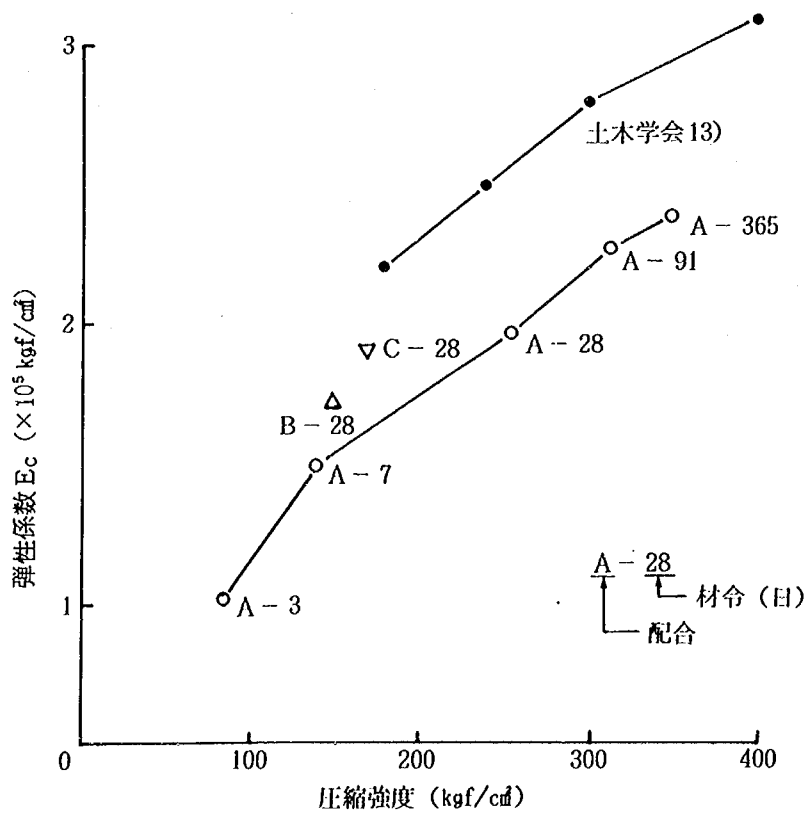


図-7 圧縮強度と弾性係数

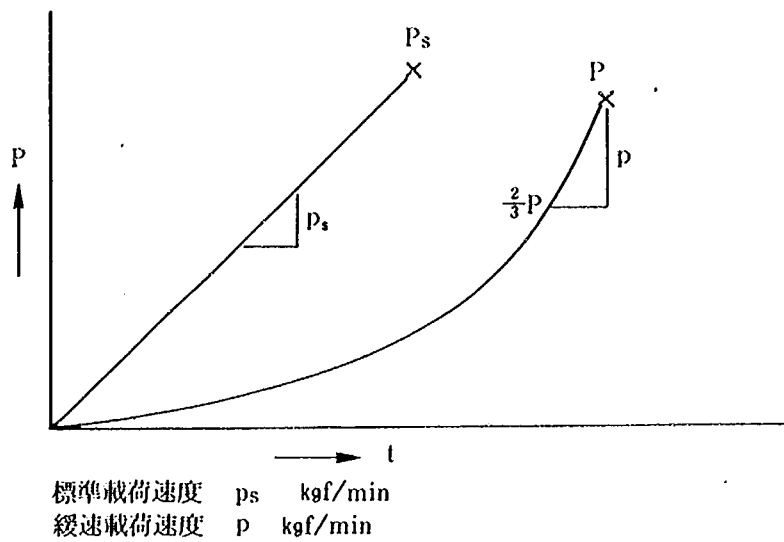


図-8 荷重速度

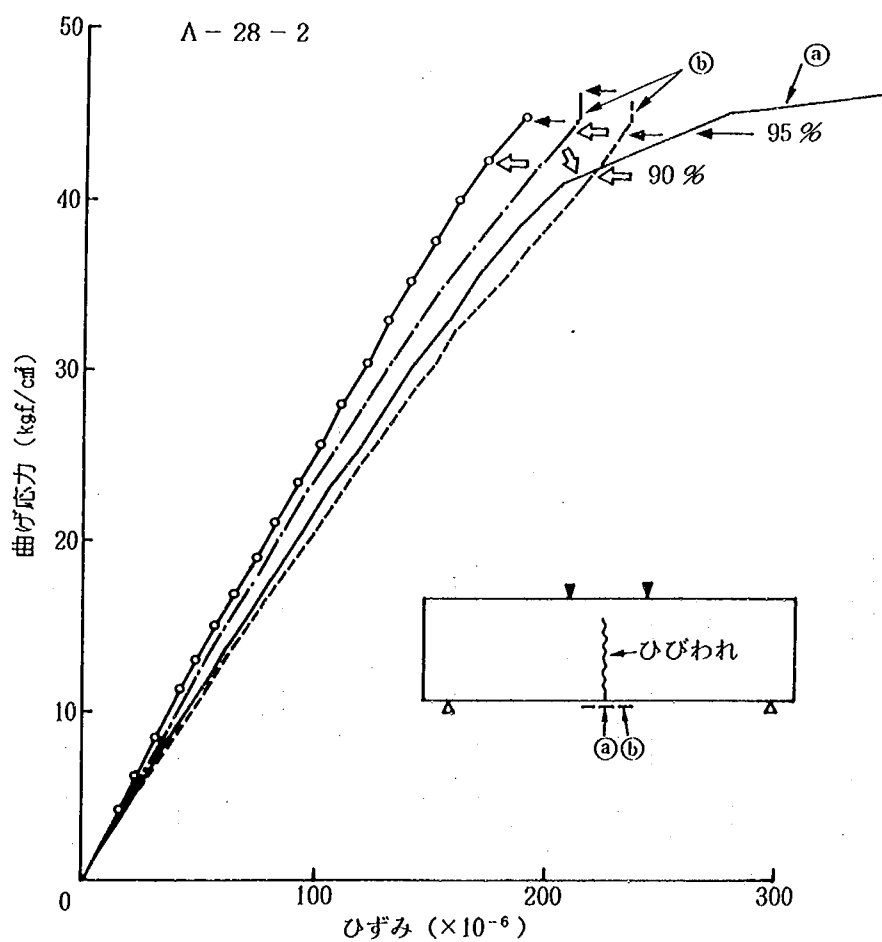


図-9 ひずみ測定位置と引張ひずみの関係

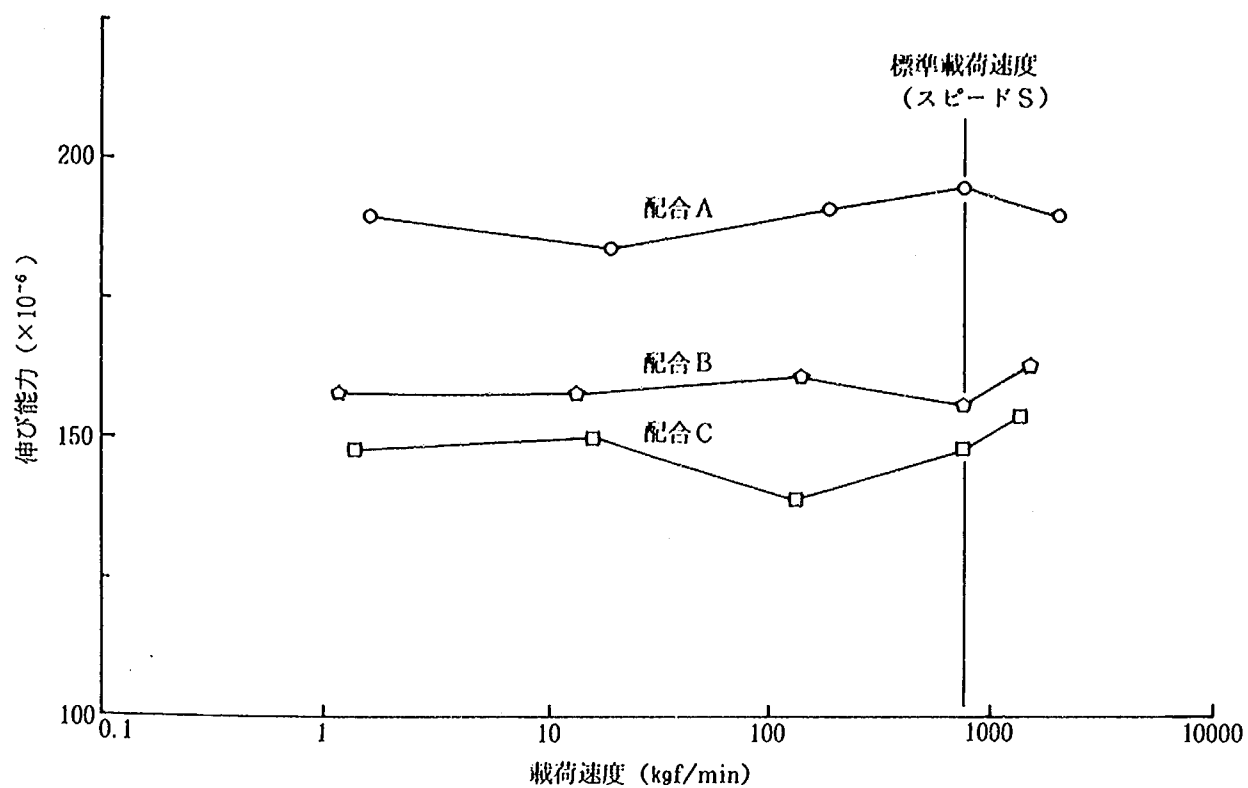


図-10 配合のちがいによる伸び能力

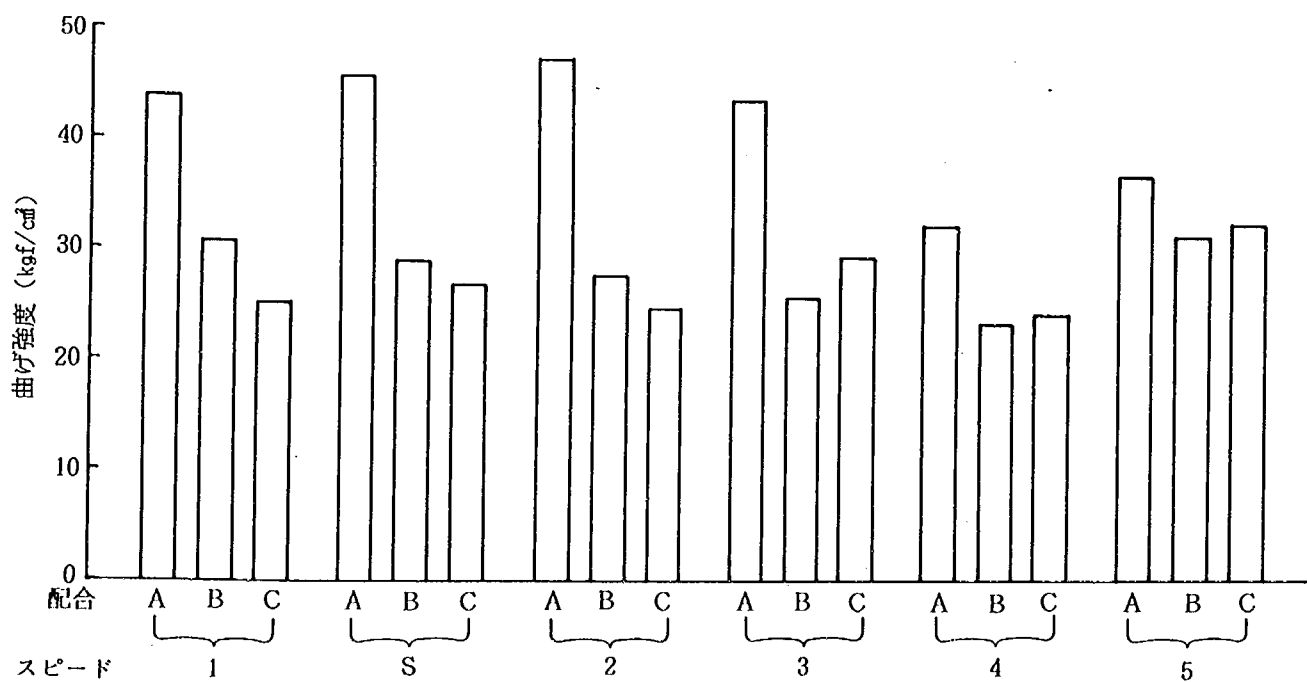


図-11 配合のちがいによる曲げ強度比較

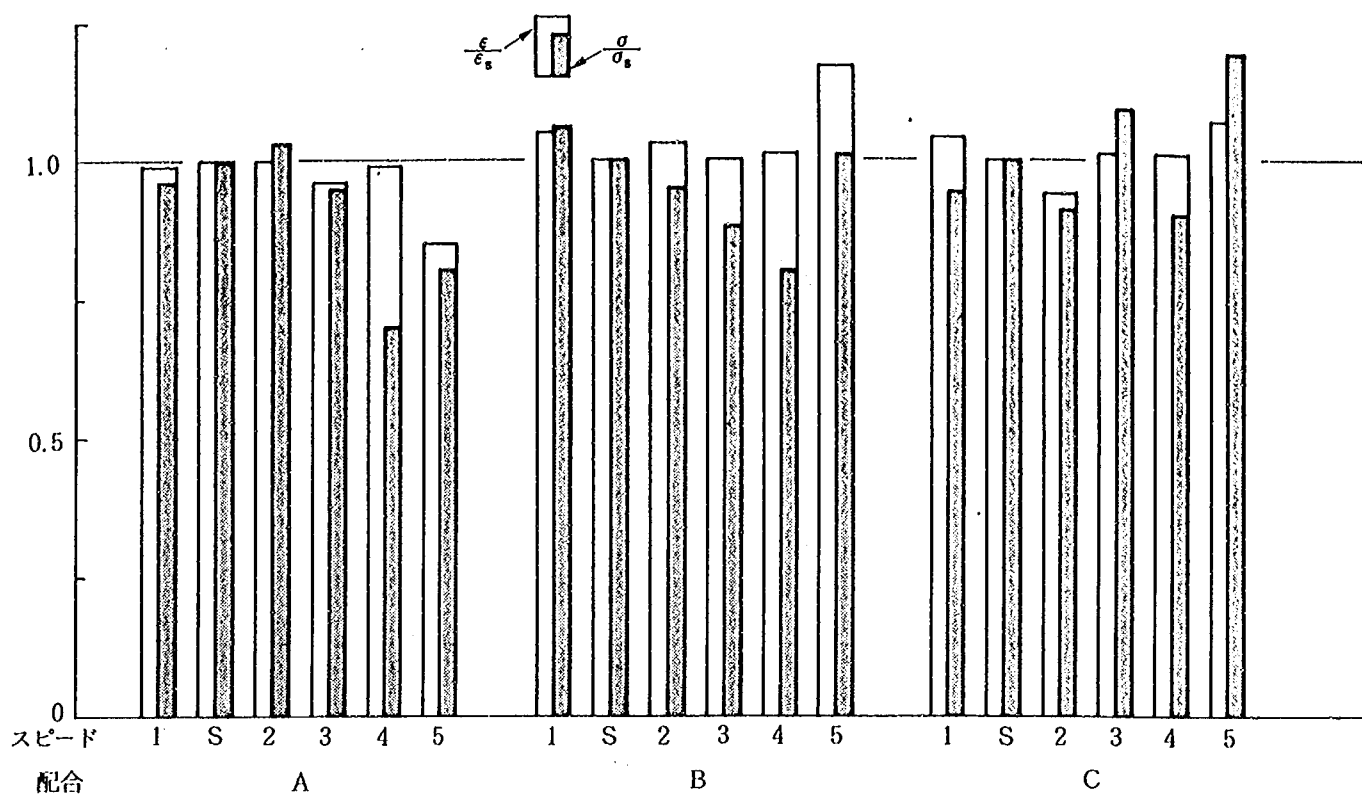


図-12 スピードSの曲げ強度，伸び能力を1.0としたときのそれぞれの比率

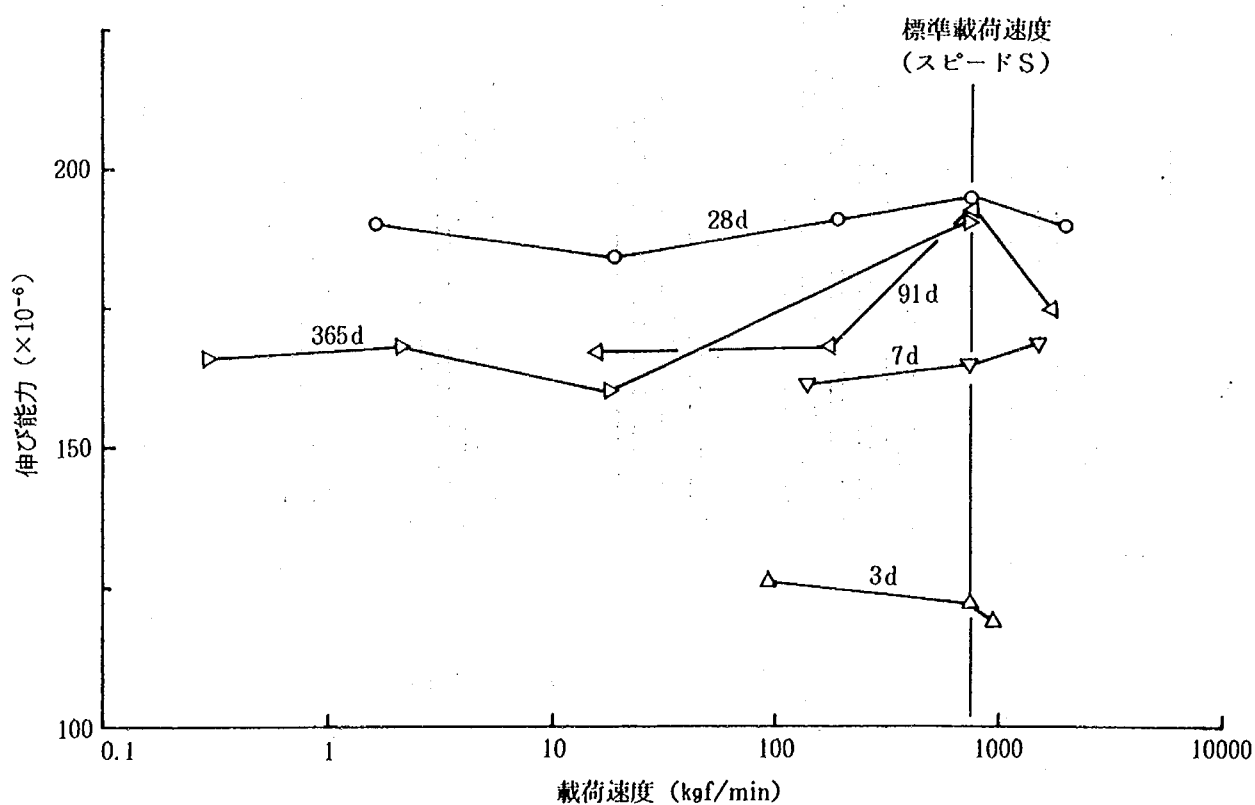


図-13 材令のちがいによる伸び能力

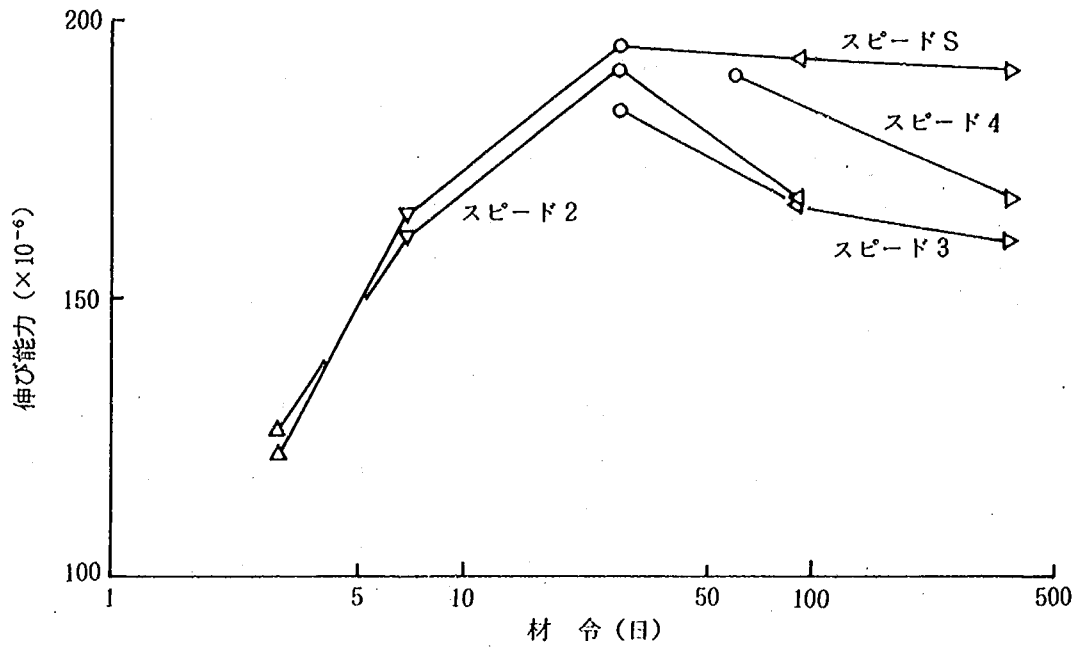


図-14 材令と伸び能力の関係

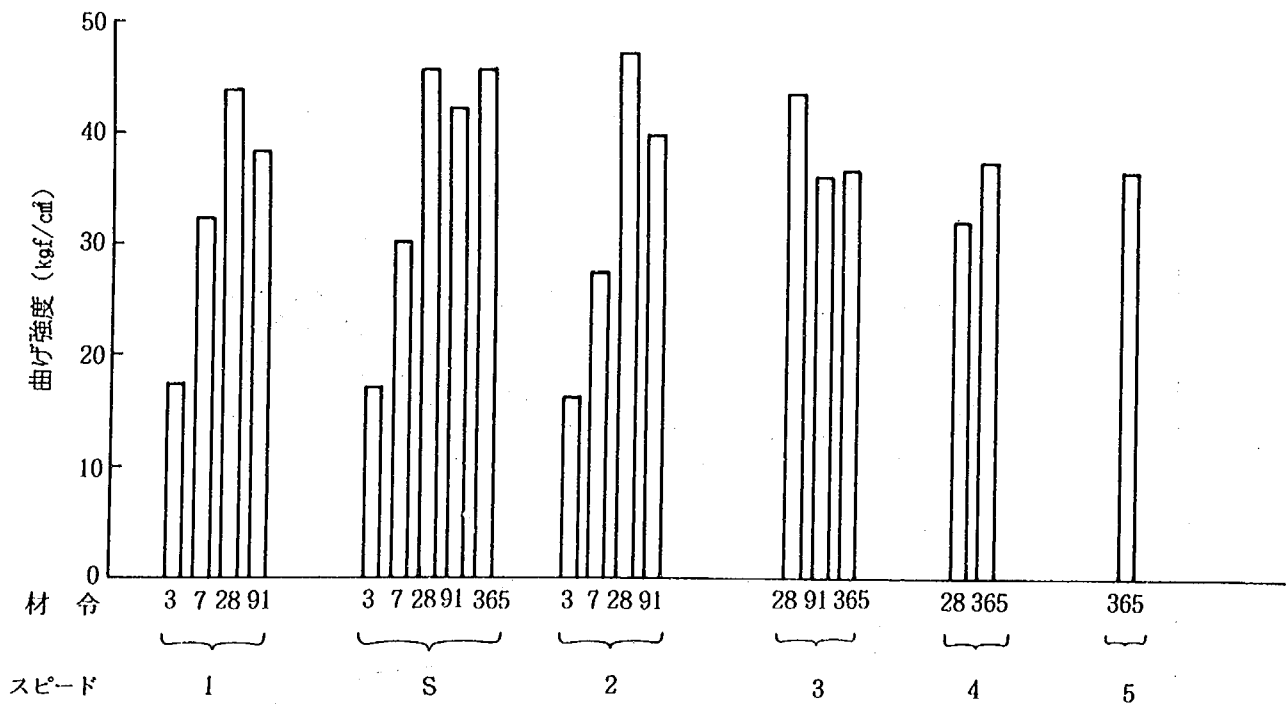


図-15 材令のちがいによる曲げ強度比較

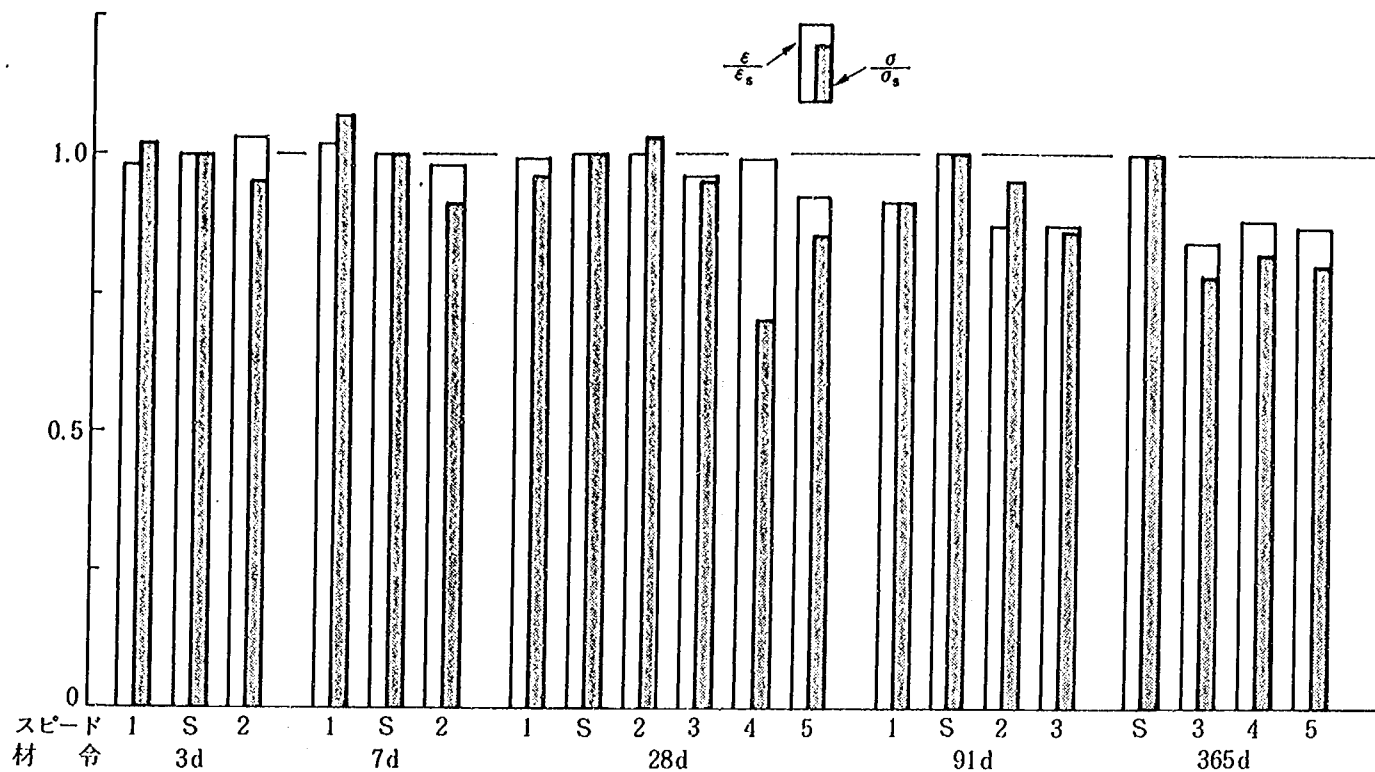


図-16 スピードSの曲げ強度，伸び能力を1.0としたときのそれぞれの比率

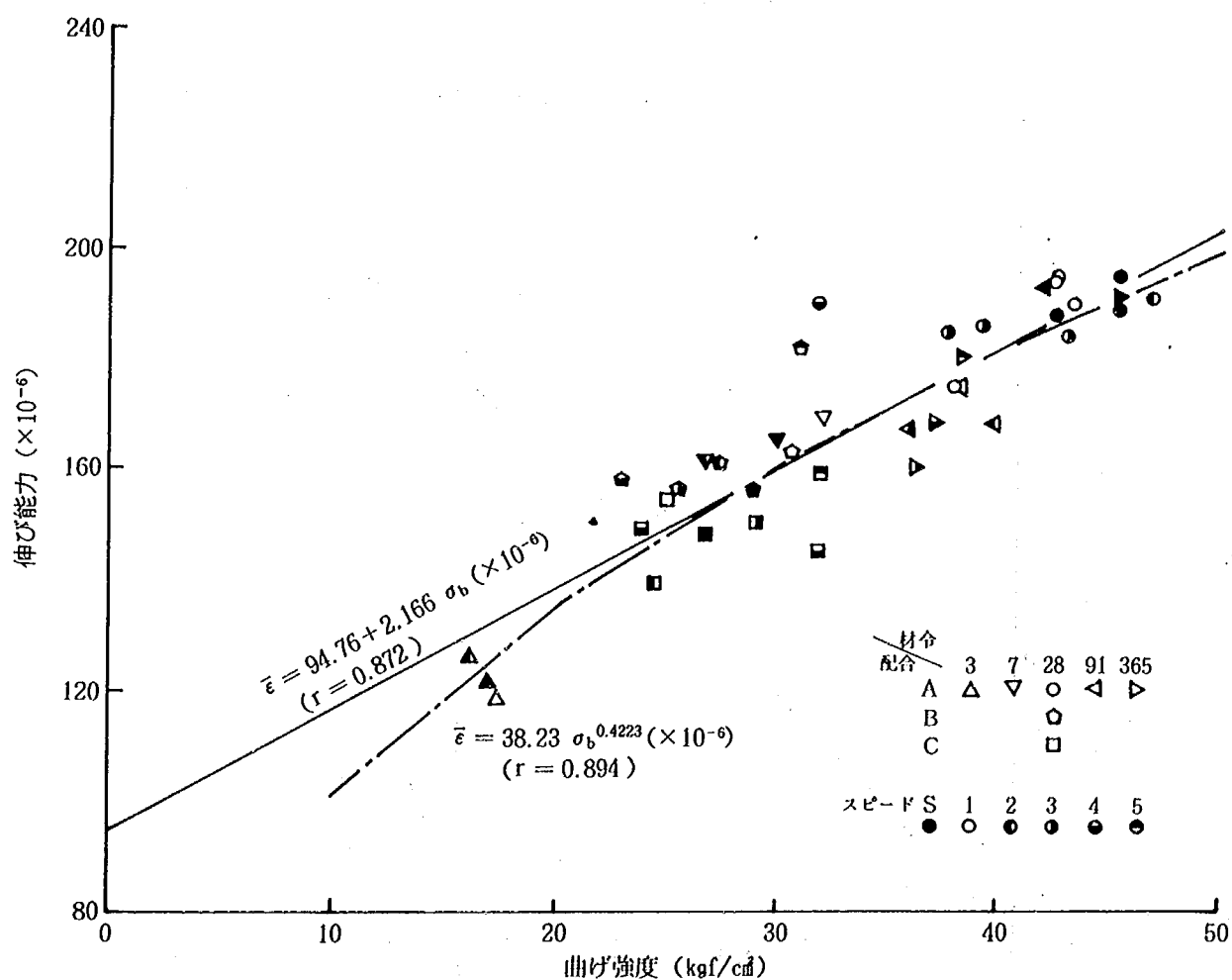


図-17 曲げ強度と伸び能力の関係

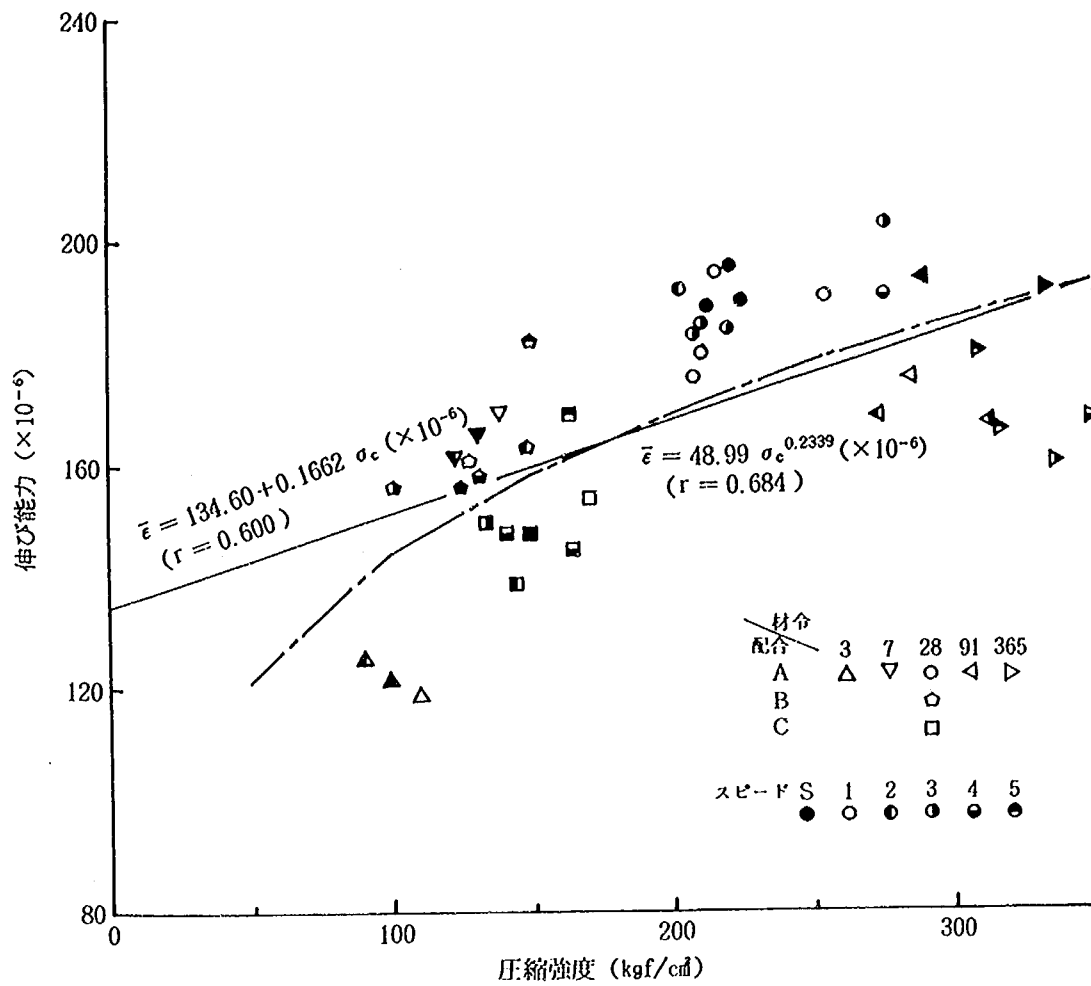


図-18 圧縮強度と伸び能力の関係

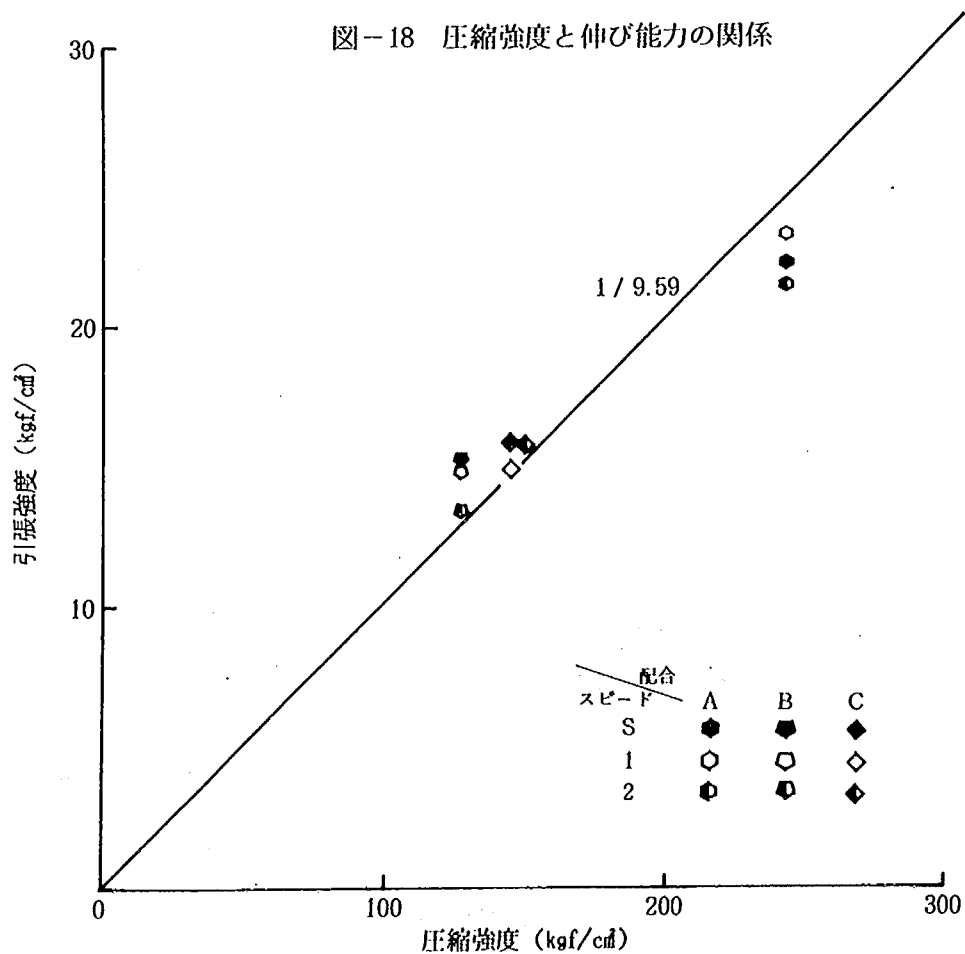


図-19 圧縮強度と引張強度の関係

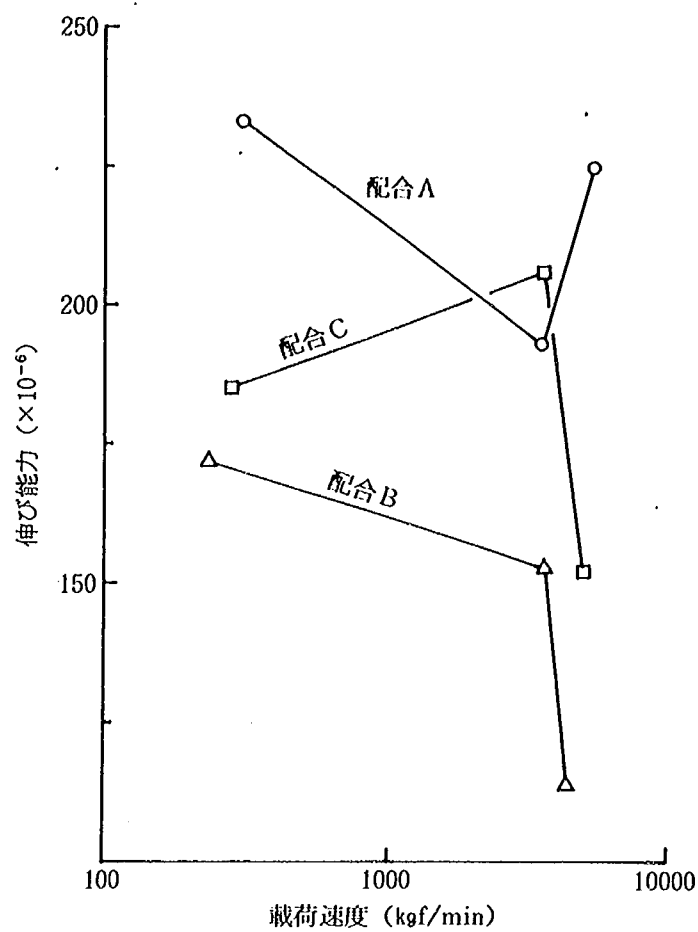


図-20 載荷速度と伸び能力の関係

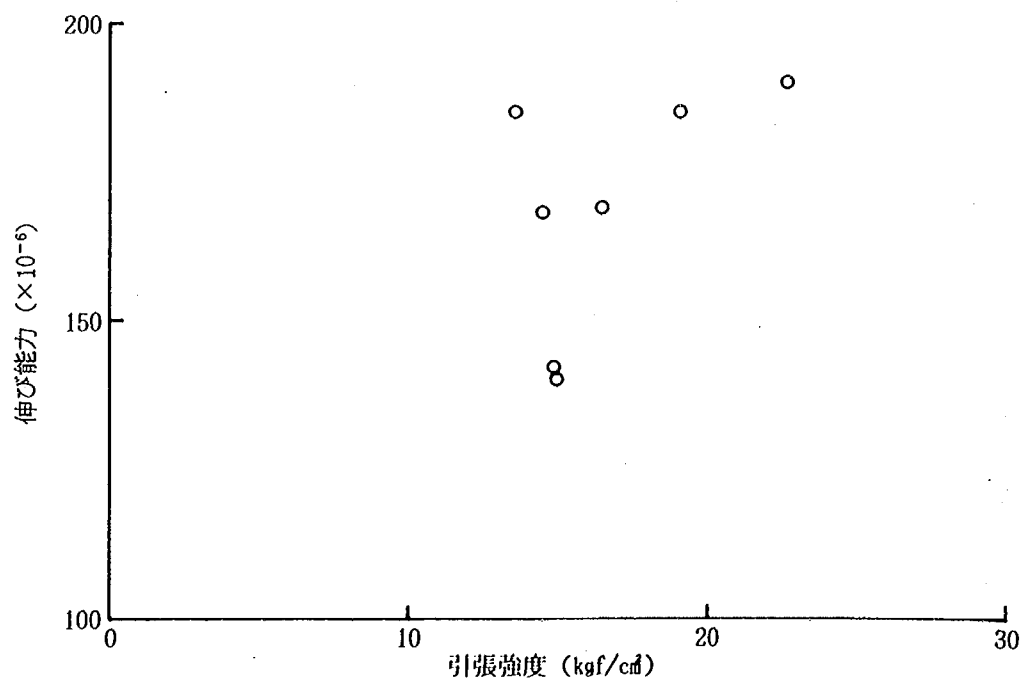


図-21 引張強度と伸び能力の関係

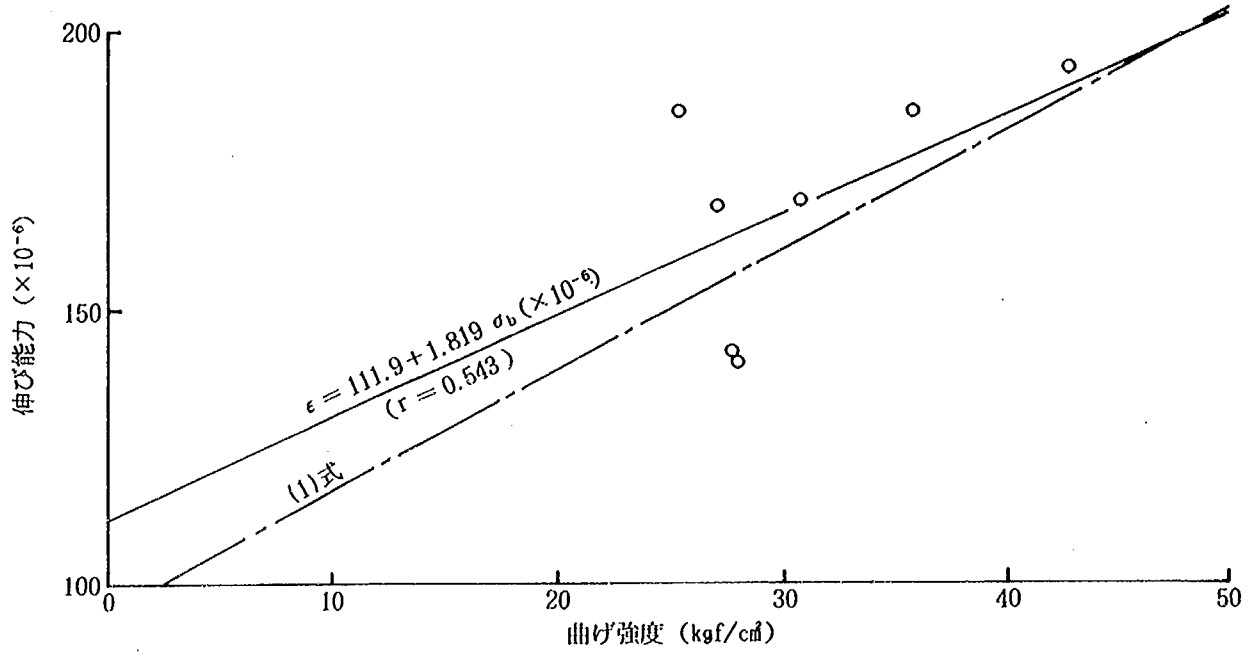


図-22 曲げ試験と割裂試験による伸び能力の比較

6. ま と め

コンクリートの緩速載荷による伸び能力を求めるため、3種類の配合の異なるコンクリートについて各材令ごとに載荷速度を変えた曲げおよび割裂試験を行った。今回の試験では、載荷速度を標準載荷の1/3000倍程度（破壊までに10日程度かかる）緩速の載荷を行った。この実験よりわかったことを以下に記す。なお、割裂試験はばらつきが大きかったため、ここでは含めない。

①コンクリートが若材令、貧配合で低強度（実験では σ_{28} が200 kg/cm²）、低ヤング率のとき、緩速載荷では標準載荷よりも伸び能力の増加がいく分か（20%程度）期待できそうである（図-12、図-16）。

②材令28日以降では、コンクリートのヤング率が高くなり、緩速載荷により曲げ強度は低下するため伸び能力はむしろ低下する。しかし、伸び能力と曲げ強度の比はほぼ一定となっており、伸び能力は曲げ強度との関係が強いといえる。

③以上の結果より、今回の実験の範囲内では、伸び能力は緩速速度による増加を期待せず、むしろ曲げ強度との関係で求めるのがよい。曲げ強度と伸び能力の関係を指数曲線によって求めると（2）式となり高い相関関係にある。

④曲げ試験全数（107個）の曲げ強度（ σ_b ）と伸び能力（ ϵ ）から指数曲線の回帰式を求め、95%信頼限界（下限値）を求めると次式となった（図-23）。

$$\text{回 帰 式} \quad \epsilon = 37.3 \sigma_b^{0.428} \quad (\times 10^{-6})$$

$$r = 0.872$$

95%信頼限界

$$\epsilon_{0.95} = 32.7 \sigma_b^{0.428} \quad (\times 10^{-6})$$

設計にあたっては通常圧縮強度が用いられるため、圧縮強度と伸び能力の関係についても求めると次のとおりであった（図-24）。

$$\text{回 帰 式} \quad \epsilon = 52.3 \sigma_c^{0.221} \quad (\times 10^{-6})$$

$$r = 0.608$$

95%信頼限界

$$\epsilon_{0.95} = 42.1 \sigma_c^{0.221} \quad (\times 10^{-6})$$

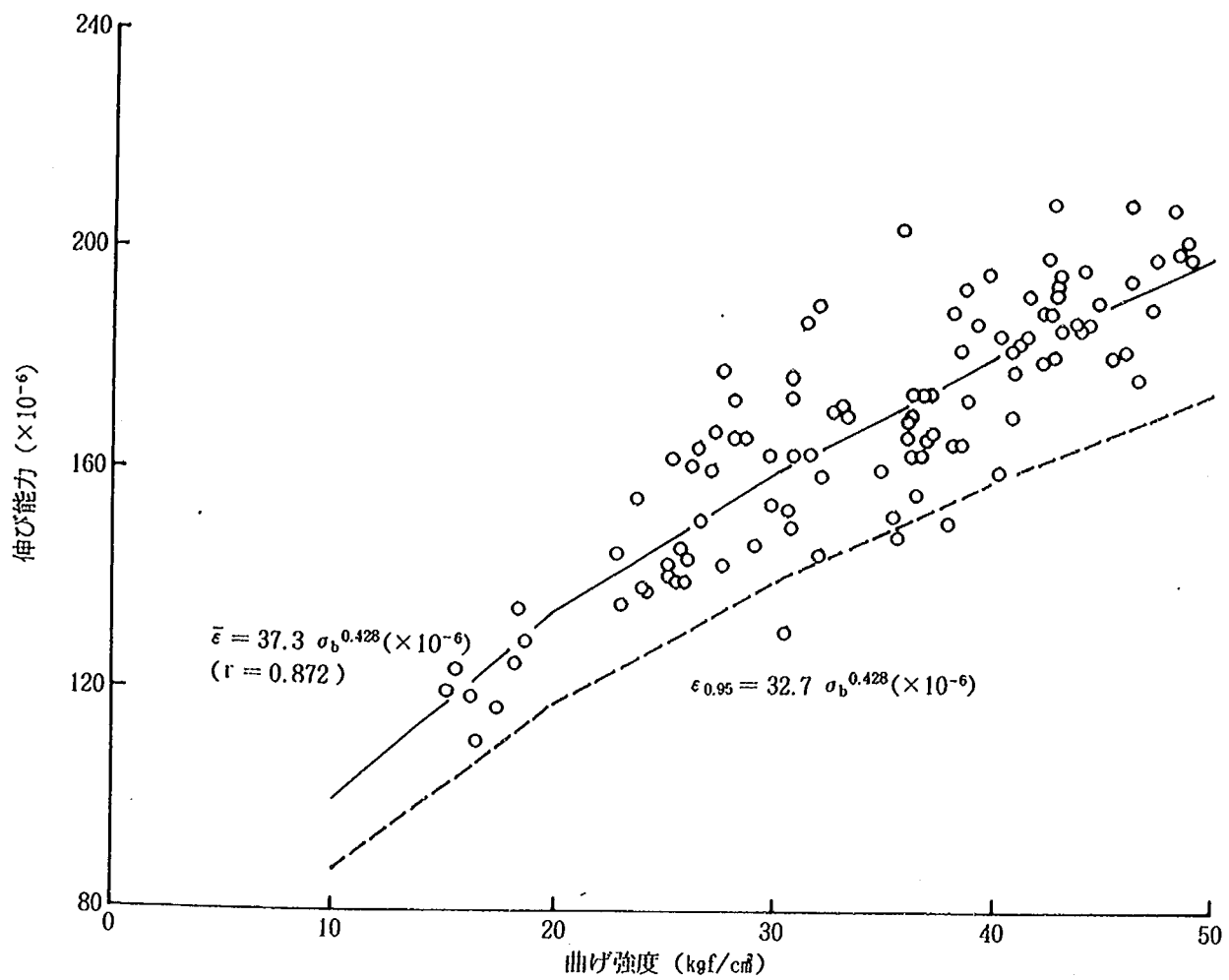


図-23 曲げ強度と伸び能力の関係

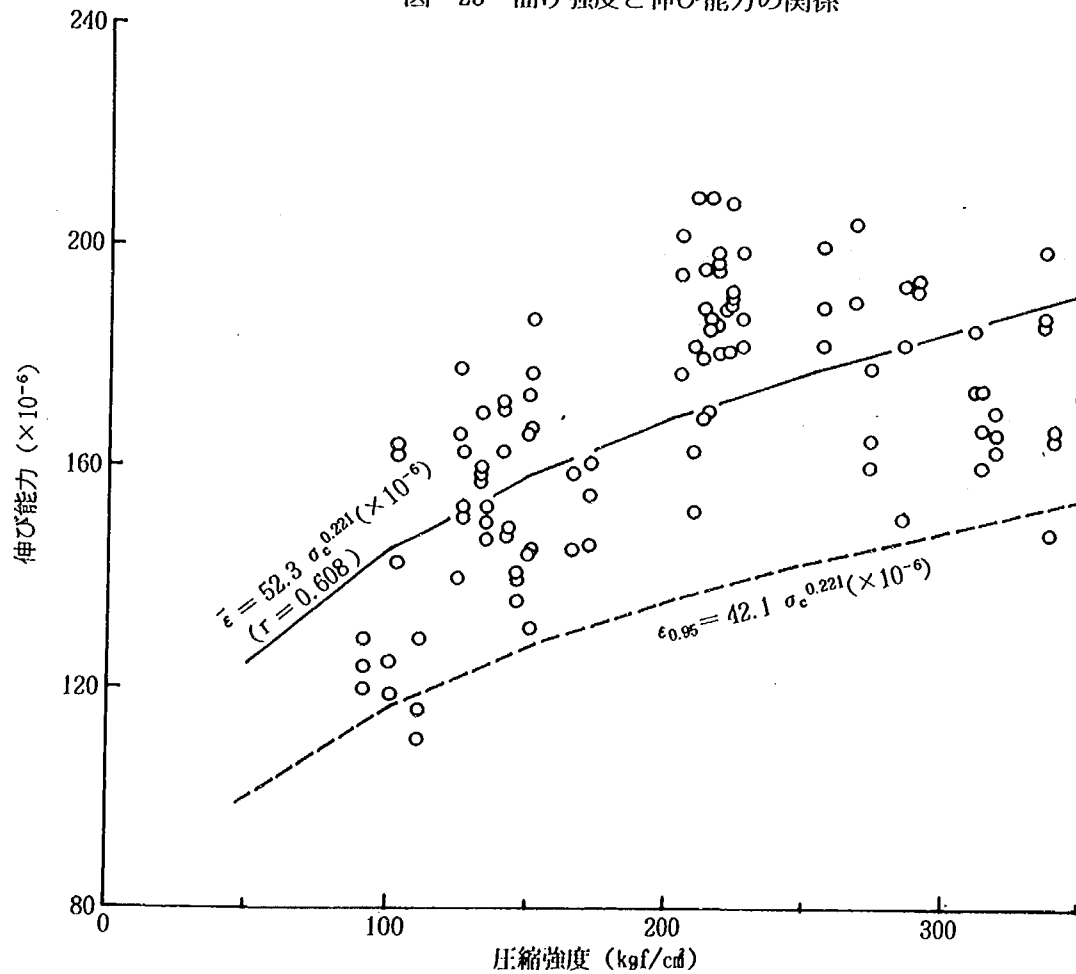


図-24 圧縮強度と伸び能力の関係

7. あ と が き

最近ダム建設は合理化施工が注目されており、RCD工法の実績も多くなっている。RCD工法によるダム建設では、パイプクーリングが困難なため二次的な温度ひびわれ防止対策が重要である。そのためにプレクーリングとともにコンクリートの伸び能力への依存も大きくなっており、コンクリートの伸び能力特性の把握が重視されている。

そこで宮ヶ瀬ダム骨材を使用した場合についてコンクリートの緩速曲げ載荷を行った。コンクリートにはクリープがあるため、緩速載荷による伸び能力は通常の載荷試験（曲げ試験や引張試験）で得られる引張ひずみより大きくなることが予想された。しかし、今回の載荷速度（伸び能力に達するのに最大10日程度）はクリープによる伸び能力の増加は明らかではなく、むしろ曲げあるいは圧縮強度との関係が高かった。それでも圧縮強度が 100kgf/cm^2 以上であれば伸び能力は 100×10^{-6} 以上期待できそうであり、 10°C 程度の温度応力はコンクリートの伸び能力で分担することができるものと考えられる。

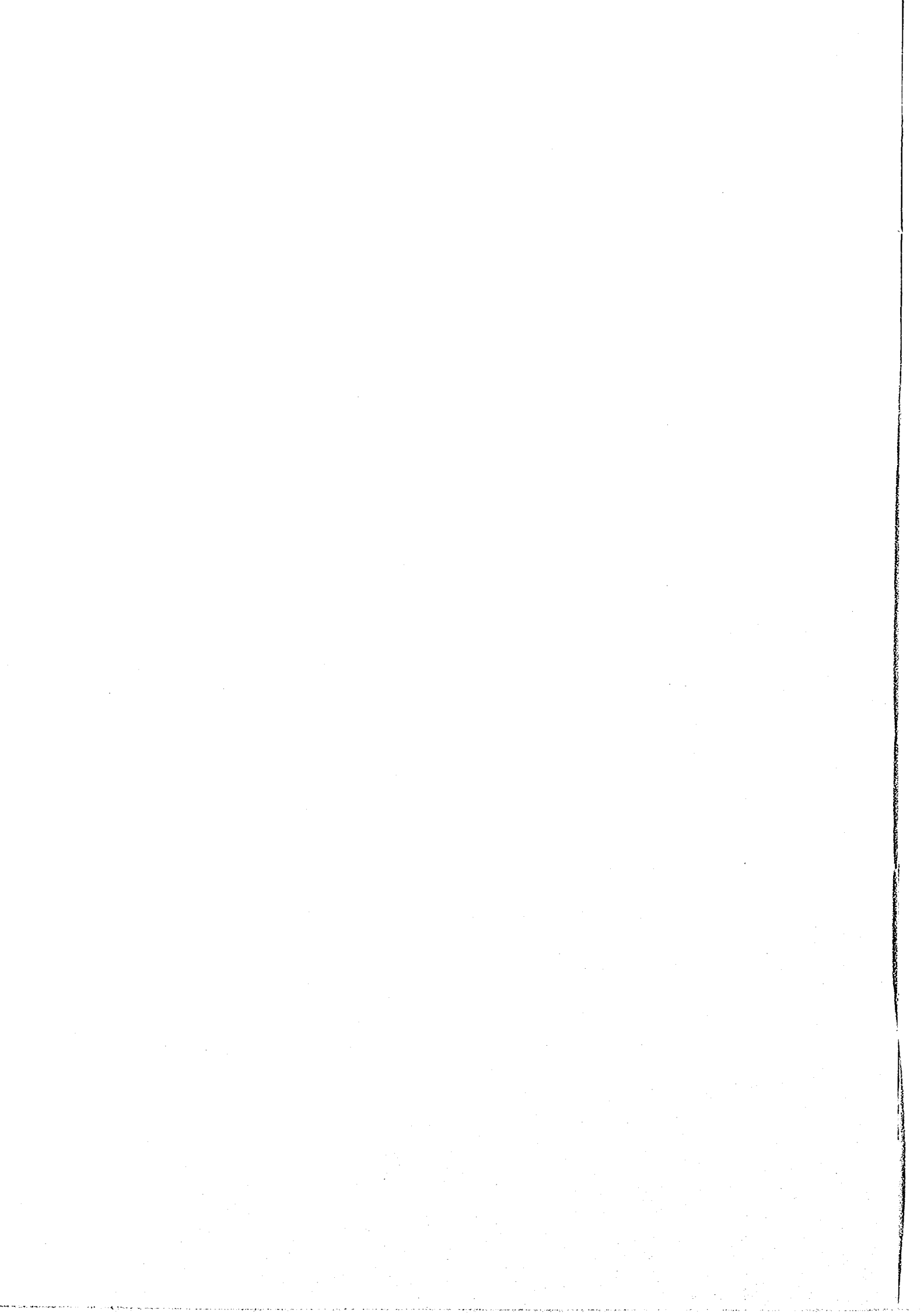
参 考 文 献

- 1) K. L. Rao : Extensibility and Cracking in Concrete, New Delhi 1951, Proc. 3
- 2) I. O. Oladopo : Cracking and Failure in Plain Concrete Beams, Magazine of Concrete Research, Vol. 16, No. 47, 1964
- 3) C. D. Johnston : Strength and Deformation of Concrete in Uniaxial Tension and Compression, Magazine of Concrete Research, Vol. 22, No. 70, 1970
- 4) C. D. Johnston : Deformation of Concrete and Its Constituent Materials in Uniaxial Tension, Highway Research Record, 1970
- 5) G. B. Welch : Tensile Strains in Unreinforced Concrete Beams, Magazine of Concrete Research, Vol. 18, No. 54, 1966
- 6) D. L. Houghton : Determining Tensile Strain Capacity of Mass Concrete, ACI Journal, Vol. 73, No. 12, 1976
- 7) ACI Committee 224 : Control of Cracking in Concrete Structures, ACI Journal, Vol. 69, No. 12, 1972
- 8) V. V. Stolnikov : Factors Influencing Crack Resistance of Concrete for Large Dams, Communication by Soviet National Committee to 10th Congress on Large Dams, Montreal, 1970
- 9) M. F. Kaplan : Strains and Stresses of Concrete at Initiation of Cracking and Near Failure, ACI Journal, Vol. 60, No. 7, 1963
- 10) 国際大ダム会議材料委員会 : 大ダム用コンクリートの伸び能力におよぼす各種要因の影響, 大ダム No. 84, 1978, 6

- 11) Fredrik Vogt : Temperature Straining in Thick Concrete Dam, 1st Congress Des Grands Barrages Stockholm-1933
- 12) 小林茂敏, 丹野 弘, 石井良美 : 宮ヶ瀬ダムコンクリート用骨材に関する試験 土木研究所資料 第2331号, 1986.3
- 13) 土木学会 : コンクリート標準示方書・設計編, 1986.10

付 録

1. 振動テーブルの能力
2. 乾燥防止試験
3. 試験結果データ一覧
 - 3.1 曲げ試験
 - 3.2 割裂試験



付録 1. 振動テーブルの能力

配合 C（スランプ 0 cm，硬練りコンクリート）供試体作製時において，成形には，2 種類の振動締固め機を用いた。各振動締固め機の振動測定方法及び測定結果は，以下のとおりである。

a) 測定方法

各振動締固め機において付表－1 に示す内容の振動測定を実施した。

case 4. 6. 3. は，供試体作製と同じ条件で振動測定を行った。

b) 測定方法

測定は水平 2 成分，上下 1 成分の 3 成分の測定を行った。測定の方角を付図－1 に示す。

c) 使用計測器

測定に用いた計測器は以下のとおりである。

- ・ ピックアップ ： PV－83
- ・ 加速度計アンプ ： VM－16
- ・ データレコーダー ： R－71
- ・ モニター ： SS－5410 シンクロスコープ

また，計測システムのブロックタイアグラムを付図－2 に示す。

これらの計測器は測定対象物の振動周波数範囲を充分カバーするものである。

d) 解析方法

データレコーダーによって記録された振動は A/D コンバーターによって A/D 変換を行い，コンピューターによって解析を行った。使用 NDG S/140 システムである。A/D 変換のインターバルは 2 W sec とし，4096 データをそれぞれサンプリングした。このデータをプロッターにより波形図として出力し，その際最大値，実効値を計算した。また，各ケースの 1 成分についてフーリエ解析を行いフーリエスペクトル図として出力した。これにより振動周波数を分析した。

e) 測定，解析結果

スペクトル図より振動の実効値（RMS），主振動成分の周波数を読みとり付表－2, 3 に示した。

付表-1 測定ケース一覧表

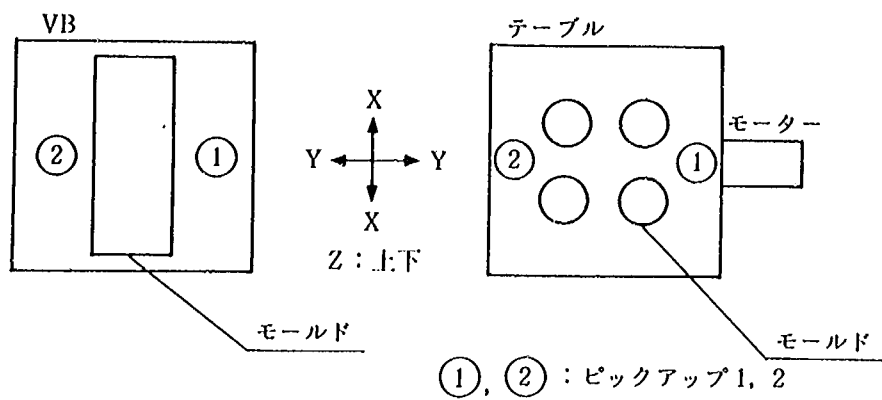
CASE	内 容
1	VBの測定 型枠のみ (15×15×53cm)
4	" コンクリートの充填 (")
5	" 型枠のみ (φ15×30cm)
6	" コンクリートの充填 (")
2	テーブル振動台の測定 型枠のみ (φ10×20cm)
3	" コンクリートの充填 (")

付表-2 VBの振動測定結果

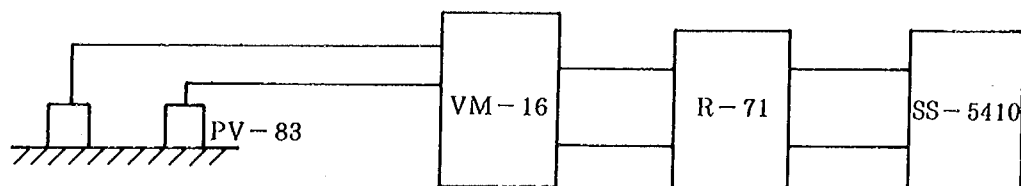
CASE	振幅実効値 (RMS) G						主振動成分 (Hz)
	X1	X2	Y1	Y2	Z1	Z2	
1	0.73	0.74	0.05	0.04	2.09	1.76	25.0
4	0.91	0.96	0.07	0.04	0.82	0.29	25.0
5	1.06	1.08	0.14	0.15	2.85	2.65	25.0
6	1.04	1.04	0.09	0.09	3.07	2.93	25.0

付表-3 テーブル振動機の振動測定結果

CASE	振幅実効値 (RMS) G						主振動成分 (Hz)
	X1	X2	Y1	Y2	Z1	Z2	
2	1.29	1.44	0.75	0.64	1.57	1.55	100.0
3	1.59	1.82	0.85	0.61	1.56	1.59	99.9



付図-1 測定方向



付図-2 ブロックダイヤグラム

付録 2. 乾燥防止試験

コンクリートの伸び能力を求める試験では、乾燥収縮が大きな影響をおよぼす。そこで、乾燥を防ぐためコンクリート表面にワックス（樹脂入りのパラフィン）を塗布することを考えた。この方法でどの程度乾燥を防ぐことができるか試験した。

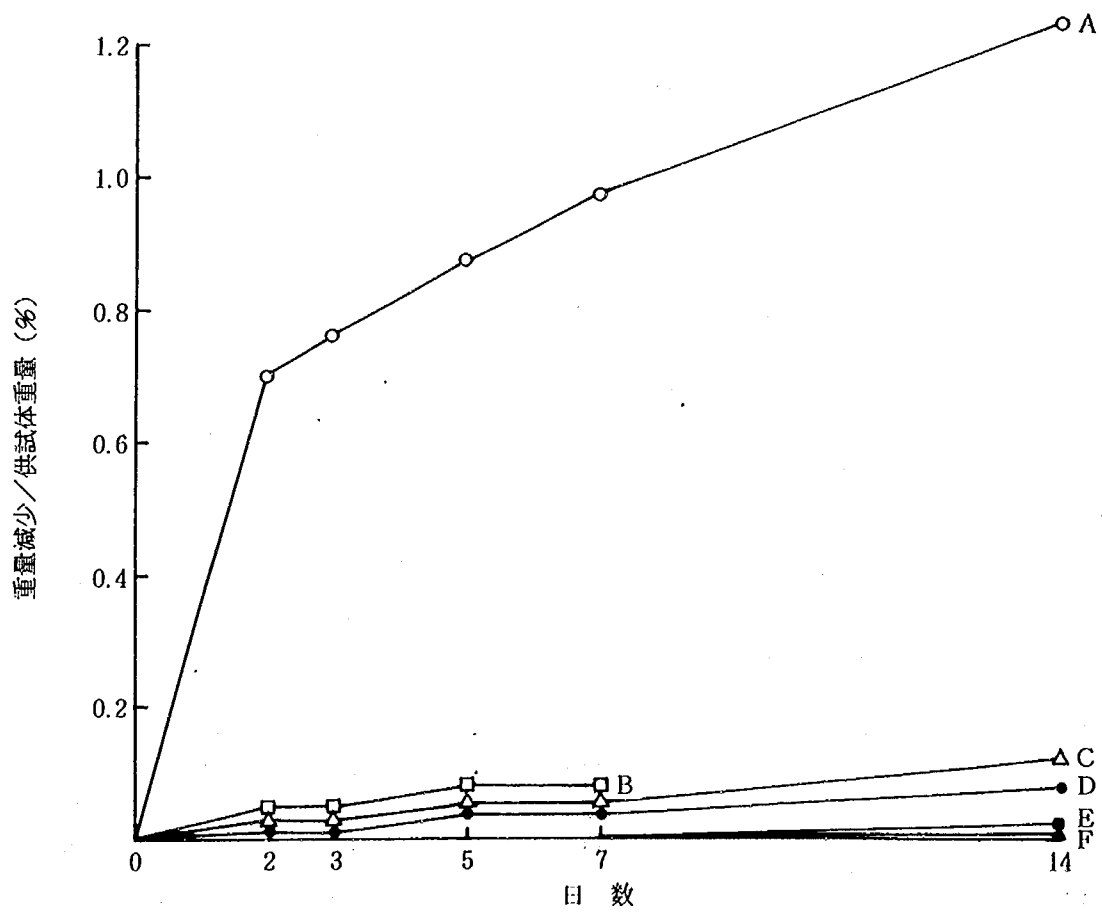
試験には、気中に放置した $\phi 10 \times 20 \text{ cm}$ の供試体を使用した。この供試体を 1 週間水中に浸漬し吸水させた。吸水後ただちに水をふきとりワックスを塗布して曲げ試験を行う実験室（室温 20°C 、湿度約 60% RH）に放置し、重量減少を測定した。ワックス塗布量は付表 - 4 のとおり厚さを変えた。使用したワックスは、ひずみゲージを貼付した上に防水のためコーティングに用いるもので、防水性の高いものである。

試験の結果は付図 - 3 のとおりである。ワックスを塗布しなかった A は初期に表面から乾燥するため急激に重量が減少しており、その後の重量減少もかなり大きい。一方、ワックスを塗布した供試体の重量減少はわずかであり、しかも塗布量の大きいものほど重量減少は小さく、乾燥を防いでいることがわかる。

実際に効果があるのは表面積と塗布量の関係と考えられる。E、F 程度の塗布量は単位面積当り約 0.1 g/cm^2 であった。これより曲げ供試体の塗布量を 1 本当り 400 g 程度とした。

付表-4 ワックス塗布量

供試体	ワックス塗布量／供試体重量 (%)	備 考
A	0	ワックス塗布せず
B	1.30	
C	1.48	
D	1.65	
E	1.88	
F	1.89	



付図-3 重量減少率

付録3 試験結果データ一覧

3.1 曲げ試験

供 試 体 番 号				圧縮強度 (kgf/cm ²)	曲 げ 試 験				
配 合	材 令	載 荷 ス ピー ド	番 号		供試体形状 b×d (cm)	最大荷重 (kg)	曲げ強度 (kgf/cm ²)	伸び能力 (×10 ⁻⁶)	載荷スピード (kg/min)
A	3	S	1	100	15.09×15.14	1401	18.2	125	750
			2		15.12×15.17	1248	16.1	119	750
			平均				17.1	122	750
A	3	1	1	110	15.07×15.09	1325	17.4	117	833
			2		15.13×15.00	1406	18.6	129	976
			3		15.04×15.02	1232	16.4	111	1030
A	3	2	平均				17.5	119	946
			1	91	14.98×14.97	1373	18.4	135	102
			2		15.08×15.07	1151	15.1	120	96
A	7	S	3		15.10×15.05	1175	15.5	124	87
			平均				16.3	126	95
A	7	1	1	130	14.99×14.98	2484	33.3	170	750
			2		15.08×15.09	2068	27.1	160	750
			平均				30.2	165	750
A	7	2	1	140	15.02×15.05	2338	30.9	163	1620
			2		14.99×14.99	2476	33.1	172	1450
			3		14.96×14.95	2431	32.7	171	1470
A	7	S	平均				32.2	169	1510
			1	124	14.94×15.08	1959	25.9	140	145
			2		15.10×15.14	2132	27.7	178	133
A	28	S	3		15.05×15.06	2177	28.7	166	140
			平均				27.4	161	139
A	28	S	1	222	15.01×14.95	3324	44.6	191	750
			2		15.08×14.96	3199	42.7	192	750
			3		15.10×14.98	3546	47.1	190	750
A	28	S	4		15.12×14.96	3663	48.1	208	750
			平均				45.6	195	750
A	28	S	1	226	15.02×15.01	3280	43.6	187	750
			2		14.96×15.07	3465	45.9	182	750
			3		14.98×14.95	3518	47.3	199	750
A	28	S	平均				45.6	189	750

供 試 体 番 号				圧縮強度 (kgf/cm ²)	曲 げ 試 験				
配 合	材 令	載 令	ス ピ ー ド 番 号		供試体形状 b×d (cm)	最大荷重 (kg)	曲げ強度 (kgf/cm ²)	伸び能力 (×10 ⁻⁶)	載荷スピード (kg/min)
A	28	1	1	255	15.10×15.01	3211	42.5	189	1980
			2		15.05×14.95	3611	48.3	200	2020
			3		15.10×15.05	3090	40.7	182	1910
			平均				43.8	190	1970
A	28	2	1	204	15.02×15.06	3490	46.1	195	206
			2		15.03×14.97	3477	46.5	177	181
			3		15.04×14.98	3655	48.7	202	180
			平均				47.1	191	189
A	28	3	1	221	14.97×15.05	3179	42.2	189	19.2
			2		15.00×14.97	3183	42.6	181	19.0
			3		14.98×14.95	3372	45.3	181	19.0
			平均				43.4	184	19.1
A	54	3	1	266	15.01×15.04	2690	35.7	204	16.3
A	60	4	1	266	15.06×14.97	2399	32.0	190	1.65
A	91	S	1	289	14.91×15.06	3115	41.5	192	750
			2		14.98×14.99	3204	42.8	194	750
			平均				42.1	193	750
A	91	1	1	284	14.98×14.99	3445	37.8	151	1680
			2		14.97×14.99	3503	38.5	193	1740
			3		15.01×15.00	3508	38.4	182	1680
			平均				38.2	175	1700
A	91	2	1	272	15.00×15.11	3054	40.1	160	169
			2		15.04×15.06	3091	40.8	178	175
			3		14.98×15.08	2921	38.6	165	167
			平均				39.8	168	170
A	91	3	1	313	15.01×15.00	2783	37.1	167	16.3
			2		15.04×14.99	2613	34.8	160	15.4
			3		15.16×15.08	2771	36.2	174	16.1
			平均				36.0	167	15.9
A	365	S	1	335	15.01×15.06	3691	48.8	199	750
			2		14.98×15.02	3288	43.8	186	750
			3		15.03×15.05	3341	44.2	187	750
			平均				45.6	191	750

供 試 体 番 号				圧縮強度 (kgf/cm ²)	曲 げ 試 験				
配 合	材 令	載 荷 ス ピ ード	番 号		供試体形状 b×d (cm)	最大荷重 (kg)	曲げ強度 (kgf/cm ²)	伸び能力 (×10 ⁻⁶)	載荷スピード (kg/min)
A	365	3	1	338	15.01×14.99	2850	38.0	165	19.0
			2		15.10×15.08	2749	36.0	166	17.0
			3		14.97×15.11	2700	35.5	148	19.4
			平均				36.5	160	18.5
A	365	4	1	350	14.98×15.10	2937	38.7	173	2.31
			2		14.95×14.96	2718	36.6	156	1.99
			3		14.97×15.04	2754	36.6	174	2.21
			平均				37.3	168	2.17
A	365	5	1	318	14.93×15.06	2732	36.2	170	0.365
			2		14.98×14.96	2746	36.9	166	0.325
			3		15.03×15.00	2717	36.2	163	0.310
			平均				36.4	166	0.333
A	301	5	1	310	14.96×15.01	3012	40.2	185	0.357
			2		15.01×15.08	2809	37.0	174	0.310
			平均				38.6	180	0.333
A	28	1	1	209	14.98×15.04	3207	42.6	209	1910
			2		15.00×15.07	2674	35.3	152	1410
			3		15.02×15.13	2799	36.6	163	1660
			平均				38.2	175	1660
A	28	1	1	212	15.04×14.98	3154	42.1	180	1980
A	28	3	1	212	14.98×14.96	2948	39.6	196	28.5
			2		14.97×14.97	2686	36.0	169	30.9
			3		15.02×14.98	2843	38.0	189	31.5
			平均				37.9	185	30.3
A	28	3	1	209	14.97×15.04	3094	41.1	183	28.6
A	28	S	1	214	15.00×15.00	2932	39.1	187	750
			2		15.05×14.96	3049	40.7	170	750
			3		14.99×15.04	3126	41.5	185	750
			4		15.04×15.01	3473	46.1	209	750
			平均				42.8	188	750
A	28	1	1	217	14.99×15.01	3300	44.0	197	1990
			2		15.01×15.02	3191	42.4	199	2250
			3		15.04×15.00	3231	43.0	186	3690
			4		14.97×15.08	3243	42.9	196	4520
			平均				42.8	194	3110

供 試 体 番 号				圧縮強度 (kgf/cm ²)	曲 げ 試 験				
配 合	材 令	載 荷 ス ピー ド	番 号		供試体形状 b×d (cm)	最大荷重 (kg)	曲げ強度 (kgf/cm ²)	伸び能力 (×10 ⁻⁶)	載荷スピード (kg/min)
B	28	S	1	125	15.00×15.05	2310	30.6	153	750
			2		14.97×15.11	2261	29.8	163	750
			3		15.00×15.01	2003	26.7	151	750
			平均				29.0	156	750
B	28	1	1	149	14.89×15.07	2246	29.9	154	1600
			2		14.89×15.07	2387	31.8	163	1450
			3		14.94×15.00	2302	30.8	173	1450
			平均				30.8	163	1500
B	28	2	1	125	14.96×15.05	2132	28.3	173	147
			2		14.94×15.05	2120	28.2	166	136
			3		14.92×15.03	1947	26.0	144	138
			平均				27.5	161	140
B	28	3	1	102	14.99×14.95	1975	26.5	164	13.2
			2		14.96×14.98	1874	25.1	143	14.1
			3		14.95×15.04	1902	25.3	162	12.6
			平均				25.6	156	13.3
B	55	4	1	132	14.91×14.95	1797	24.3	159	1.18
			2		14.92×15.07	1660	22.0	158	1.20
			平均				23.1	158	1.19
B	306	5	1	150	14.92×15.11	2334	30.8	177	0.365
			2		14.98×15.05	2375	31.5	187	0.341
			平均				31.1	182	0.353
C	28	S	1	150	15.18×14.93	1712	22.8	145	750
			2		15.01×14.99	2044	27.3	167	750
			3		15.04×14.98	2286	30.5	131	750
			平均				26.9	148	750
C	28	1	1	171	15.12×14.99	1793	23.7	155	1330
			2		15.25×14.95	1943	25.7	146	1350
			3		15.13×14.97	1971	26.2	161	1400
			平均				25.2	154	1360
C	28	2	1	145	15.05×15.00	1733	23.0	136	131
			2		14.94×14.97	1906	25.6	140	132
			3		15.02×15.01	1898	25.2	141	140
			平均				24.6	139	134

供 試 体 番 号				圧縮強度 (kgf/cm ²)	曲 げ 試 験				
配 合	材 令	載 荷 ス ピー ド	番 号		供試体形状 b×d (cm)	最大荷重 (kg)	曲げ強度 (kgf/cm ²)	伸び能力 (×10 ⁻⁶)	載荷スピード (kg/min)
C	28	3	1	134	15.02×14.97	2306	30.8	150	17.5
			2		15.05×14.97	2181	29.1	147	15.9
			3		15.13×14.95	2076	27.6	153	14.3
			平均				29.2	150	15.9
C	44	4	1	142	15.02×14.90	1781	24.0	149	1.39
			2		14.99×14.99	1809	24.2	148	1.42
			平均				24.1	148	1.40
C	333	4	1	165	15.14×15.01	2423	32.0	145	8.25
C	310	5	1	165	15.05×14.96	2401	32.1	159	0.385

3.2 割裂試験

供試体番号				圧縮強度 (kgf/cm ²)	割裂試験				
配合	材令	載荷 スピード	番号		供試体形状 d×ℓ (cm)	最大荷重 (kg)	引張強度 (kgf/cm ²)	伸び能力 (×10 ⁻⁶)	載荷スピード (kg/min)
A	28	S	1	244	15.10×29.90	16094	22.7	190*	3600
			2		15.02×29.99	14216	20.1	156	3600
			3		15.01×30.13	17164	24.2	233	3600
			平均				22.3	193	3600
A	28	1	1	244	15.05×30.03	17265	24.3	229	5430
			2		15.06×30.00	15610	22.0	226	5600
			3		15.03×30.05	16680	23.5	220	5620
			平均				23.3	225	5550
A	28	2	1	244	15.00×30.01	16135	22.8	278	316
			2		14.98×29.92	13408	19.0	185*	331
			3		14.96×30.04	15933	22.6	238	322
			平均				21.5	233	323
B	28	S	1	128	14.99×29.99	10723	15.2	134	3600
			2		14.99×30.08	11288	15.9	187	3600
			3		15.00×30.09	10581	14.9	140*	3600
			平均				15.3	153	3600
B	28	1	1	128	15.02×29.97	9996	14.1	137	4190
			2		15.02×30.03	11369	16.0	110	4360
			3		15.03×29.94	10177	14.4	96	4580
			平均				14.8	114	4380
B	28	2	1	128	14.99×29.99	9128	12.9	124	260
			2		15.02×30.03	9592	13.5	185*	240
			3		15.01×30.00	9774	13.8	207	229
			平均				13.4	172	243
C	28	S	1	146	15.00×30.09	11591	16.3	167	3600
			2		15.09×29.96	11672	16.4	210	3600
			3		15.01×30.02	10601	15.0	242	3600
			平均				15.9	206	3600
C	28	1	1	146	15.00×29.99	10198	14.4	168*	5070
			2		15.02×30.00	11106	15.7	146	4870
			3		14.97×29.98	10440	14.8	142*	5160
			平均				15.0	152	5030
C	28	2	1	146	15.01×29.98	11147	15.8	177	286
			2		14.93×29.94	11510	16.4	169*	300
			3		14.98×29.95	10763	15.3	211	287
			平均				15.8	185	291

宮ヶ瀬ダムコンクリート力学特性
試験報告書 (1)コンクリートの伸び能力

ISSN 0386-5878
土研資料第2537号
1987年12月
地質化学部コンクリート研究室

コンクリート研究室：小林茂敏、森濱和正、丹野 弘

要 旨

宮ヶ瀬ダムでは、RCD工法による合理化施工が考えられている。このダムは、堤高155mでこれまでRCD工法で建設されたダムよりかなり高いため、温度ひびわれの発生防止の検討が一層重要となっている。

RCD工法ではパイプクーリングが実施できないため、ひびわれ防止にコンクリートの伸び能力への依存が大きくなる。そのため本調査では、コンクリートの伸び能力を実験により検討したものである。実験はコンクリートの配合、材令、載荷速度を変えた曲げ試験を行った。その結果、伸び能力は曲げ強度あるいは圧縮強度との関係が高く、載荷速度(超低速)の影響は小さいことがわかった。

キーワード：貧配合硬練りコンクリート、伸び能力、曲げ試験、緩速載荷

郵便はがき

305-□□

を四十
いはつ
て切
下手

建設省土木研究所

コンクリート研究室

茨城県つくば市大字旭一番地

No. _____

配布先住所

配布先氏名

○

土木研究所資料第 2537 号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名

印

○