

ISSN 0386—5878

土木研究所資料第2914号

土木研究所資料

ダムコンクリートの直接引張強度 についての実験的検討

平成2年12月

建設省土木研究所
ダム部ダム構造研究室

Copyright © (1990) 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、土木研究所長の承認を得ずしてこれを行ってはならない。

ダムコンクリートの直接引張強度 についての実験的検討

ダム構造研究室 室長 永山 功
研究員 渡辺 和夫
尾畑 伸之

要 旨

近年、動的解析による耐震設計、RCD工法における温度規制など、コンクリートダムの設計、施工の合理化の要請に伴って、ダムコンクリートの引張強度を適正に評価する必要性が生じてきている。

本報告書は、直接引張試験装置を用いてコンクリートの直接引張強度を測定し、コンクリートの配合、一軸圧縮強度、弾性係数、割裂強度、荷重載荷速度などと直接引張強度の関係についてとりまとめたものである。

キーワード：コンクリート，引張強度，配合，圧縮強度，弾性係数，載荷速度

ま え が き

現在、重力式コンクリートダム設計においては、基本的に、ダム堤体内に引張応力が発生することを認めておらず、また堤内構造物周辺に局部的に発生する引張応力については、鉄筋によって補強することになっている。一方、アーチ式コンクリートダムの場合には、その堤体内に多少の引張応力が発生することを認めているが、大きな引張応力が生じ、万が一にも引張ひび割れが生じるような場合には、応力の再配分によってダム堤体の二次的な安定性が確保されることを確認するようになっている。

このように、コンクリートダム設計においては、コンクリートの引張強度が設計上大きな問題となることはなかったが、近年、動的解析を用いたコンクリートダムの耐震設計、RCD工法によるコンクリートダムにおける温度ひび割れ防止のための温度応力解析など、コンクリート内に発生する引張応力とコンクリートの引張強度の関係を取り扱わなければならない場合が増えてきている。このため、ダム用コンクリートの引張強度の特性を正確に把握することが重要な課題になってきている。

このような状況から、ダム構造研究室ではダム用コンクリートの引張強度に関する研究を進めているが、今回、直接引張試験装置を用いてダム用コンクリートの引張強度の特性について検討を加えた。検討を加えた主な項目は、

- ① コンクリートの配合が引張強度の大きさにどのような影響を及ぼすか。
 - ② 引張荷重の載荷速度が引張強度の大きさにどのような影響を及ぼすか。
 - ③ コンクリートの圧縮強度、弾性係数、引張強度の間にはどのような関係があるか。
- などの項目であり、また、コンクリートダムの施工を考慮して、
- ④ ブリージングなどによってコンクリートの引張強度に異方性が生じるか。
 - ⑤ 打継ぎ目処理の方法によってコンクリートの引張強度にどのような差が生じるか。

などの点についても検討を加えた。本報告書は、これらの結果についてとりまとめたものである。

目 次

まえがき

1. 試験方法および装置の概要	1
1.1 試験方法の概要	1
1.2 試験機の概要	3
2. 予備試験	6
2.1 接着剤の性質	6
2.2 コンクリート供試体を用いた予備試験	6
2.2.1 予備試験	6
2.2.2 供試体高さの検討	8
2.3 石膏供試体を用いた予備試験	10
3. コンクリートの直接引張試験	11
3.1 試験の目的	11
3.2 コンクリートの配合が直接引張強度および弾性係数に与える影響	11
3.2.1 試験条件	11
3.2.2 試験結果	12
3.3 荷重載荷速度が直接引張強度および弾性係数に与える影響	35
3.3.1 試験条件	35
3.3.2 試験結果	35
3.4 荷重載荷方向が直接引張強度および弾性係数に与える影響	41
3.4.1 試験条件	41
3.4.2 試験結果	42
3.5 打継目の直接引張強度	45
3.5.1 試験条件	45
3.5.2 試験結果	46
4. まとめ	50

1. 試験方法および装置の概要

1.1 試験方法の概要

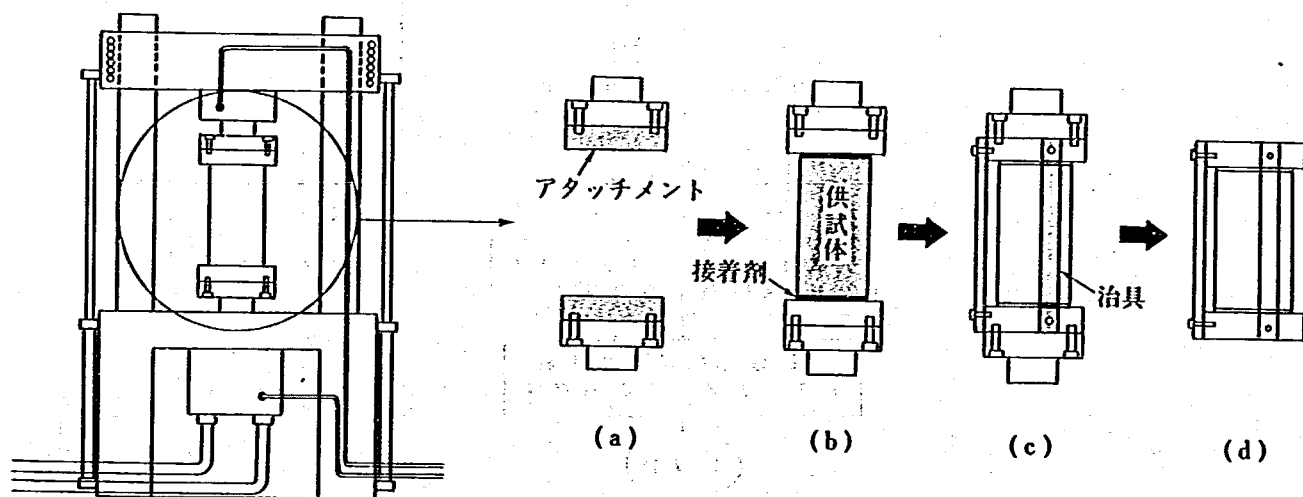
コンクリートの引張強度を正しく求めることは非常に困難であり、現在でも確立された試験方法はない。一般的には、J I Sに規定されている引張試験方法（割裂試験）のように間接的に引張強度を求める方法が利用されているが、厳密な引張強度を求めるには直接引張試験が必要である。

直接引張試験法としては、従来よりさまざまな方法が提案されてきているが、本検討においては、圧縮試験用の円柱供試体（標準供試体：直径15cm，高さ30cm）をエポキシ系接着剤でアタッチメントに接着し、これを引張試験機にボルト締めによって取り付けて引張荷重を載荷させる方法を考案した。この試験方法の特徴は、次のとおりである。

- ① 特別な型枠を必要とせず、一般的な型枠で供試体の作製ができる。
- ② 供試体中にフック等を埋設する必要がないため、均質な供試体を作製でき、またその作製も容易である。
- ③ 通常の万能試験機で試験が可能である。
- ④ ボーリング・コア等を用いた試験も可能である。

試験の手順は、次のとおりである。

- ① 試験機にアタッチメントを取り付け、接着剤を塗布する。（図－1（a）参照）
- ② 試験機に供試体をセットし、わずかに圧縮荷重を加えながらアタッチメントに供試体を接着する。（図－1（b）参照）
- ③ 上下のアタッチメント間を治具で固定する。（図－1（c）参照）
- ④ 接着剤がある程度硬化した後（気温20℃で約40分）、試験機からアタッチメントをはずす。（図－1（d）参照）



図－1 試験方法の概念図

- ⑤ 複数の供試体を接着する場合は①～④を繰り返す。
 - ⑥ 接着剤が完全に硬化した後（通常は24時間），供試体を試験機にセットし治具を取りはずす。
 - ⑦ ひずみを計測する場合には，ひずみゲージを貼り付ける。
 - ⑧ 試験を実施し，供試体を引張破壊させる。
 - ⑨ 試験後の供試体を試験機から取りはずし，乾燥機（設定温度：約200℃）の中に投入して接着剤を溶かし，供試体をアタッチメントから取りはずす。
- 以上に示した試験のフローを図-2に示す。

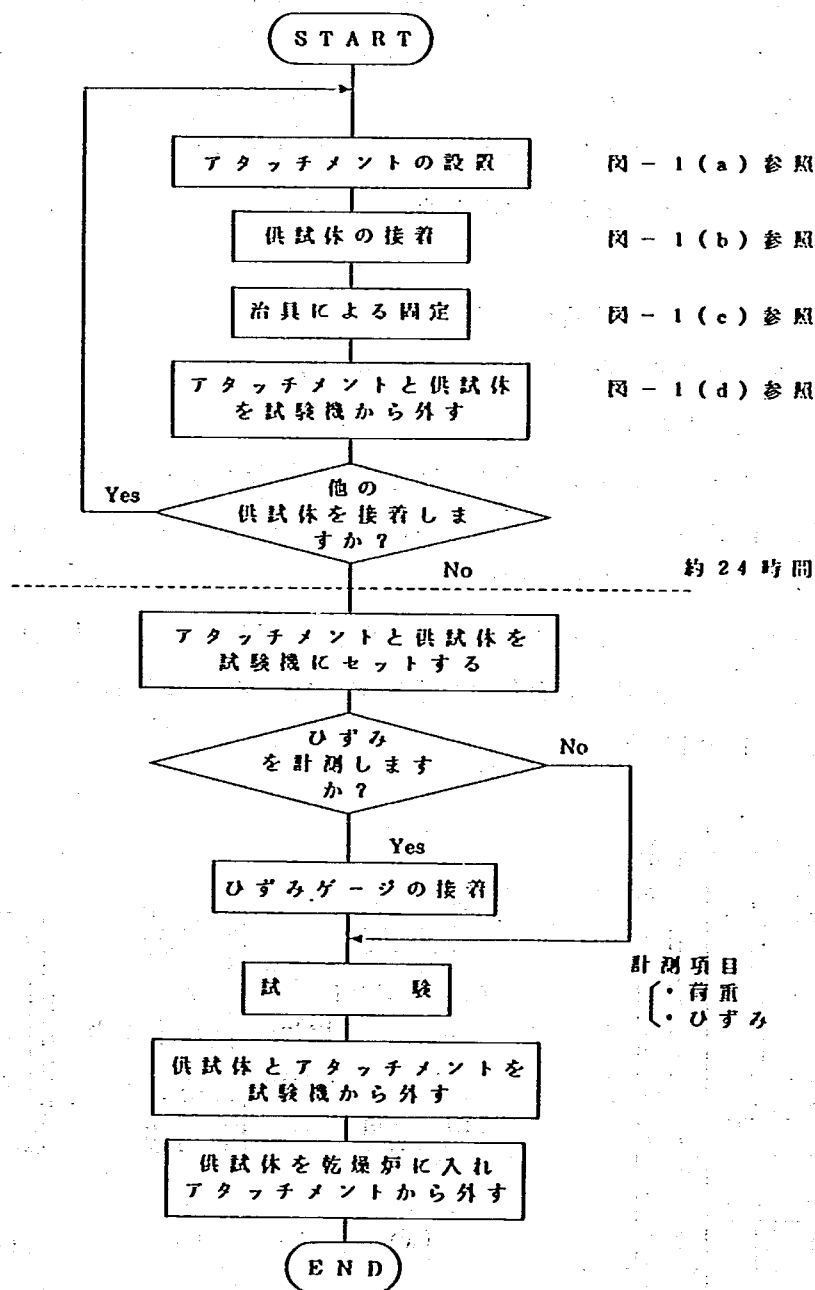


図-2 直接引張試験のフローチャート

1.2 試験機の概要

表-1にダム構造研究室が保有する引張強度試験装置の諸元を、写真-1に装置の外観を示す。この装置は、電気式油圧サーボ方式により荷重制御、変位制御の選択が可能であり、圧縮荷重および引張荷重の載荷機能を有している。なお、どちらの制御状態においても、矩形波、三角波および正弦波による動的加振を行うことができるようになっている。

試験にあたっては、図-3に示すようなシステムを構築し、データの収録を行った。動ひずみ測定器は、各チャンネルで独立しており、それぞれのチャンネルにA/D変換器を内蔵している。このため、全チャンネル同時にサンプリングすることが可能となっている（表-2に動ひずみ測定器の仕様を示す）。なお、システムの制御およびデータの収集はパーソナル・コンピュータを用いて行うことができる。

表-1 動的引張強度試験装置の諸元

項 目	機 能
最 大 荷 重	$\pm 40\text{tf}$ (載荷盤直径20cm)
最 大 変 位	$\pm 10\text{mm}$
加 振 波 形	正弦波・三角波・矩形波 (0.01~25Hz)
最 大 速 度	4cm/sec
制 御 方 式	電気油圧サーボ方式
荷 重 計	$\pm 45\text{tf}$ (ひずみ式)
変 位 計	$\pm 12.5\text{mm}$ (差動トランス式)
荷重変換部	$\pm 10\text{v}/\pm 40\text{tf}$ (モニター出力)
変位変換部	$\pm 10\text{v}/\pm 10\text{mm}$ (モニター出力)
載荷盤の構造	剛結 (球座ではない)

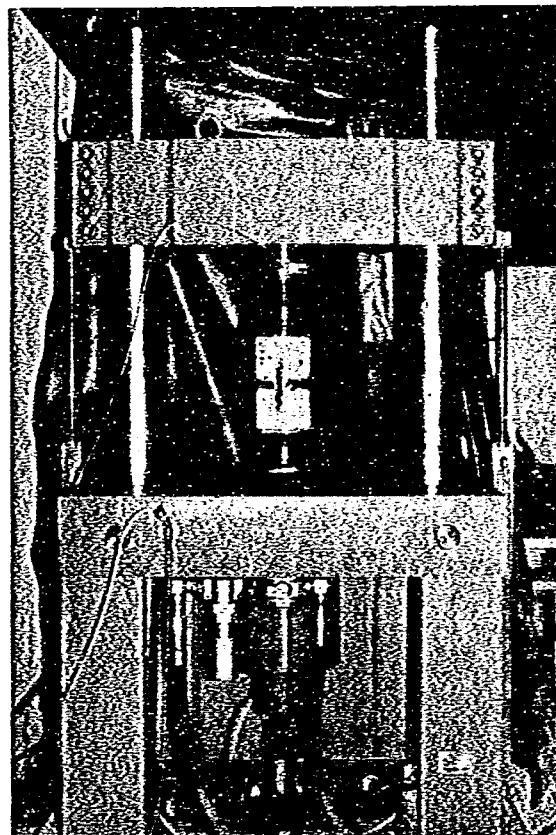
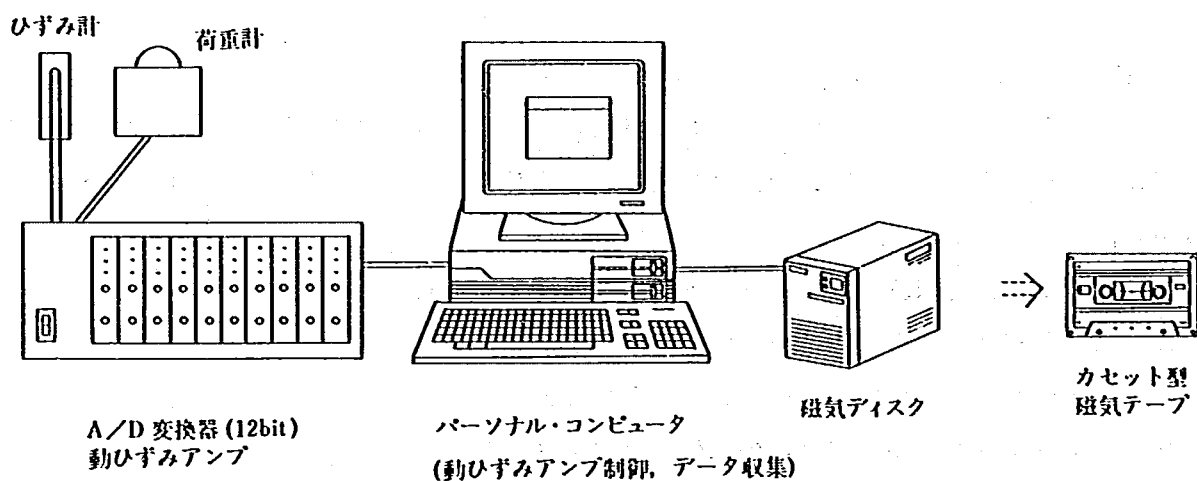


写真-1 試験装置の外観

データ収録



データ後処理

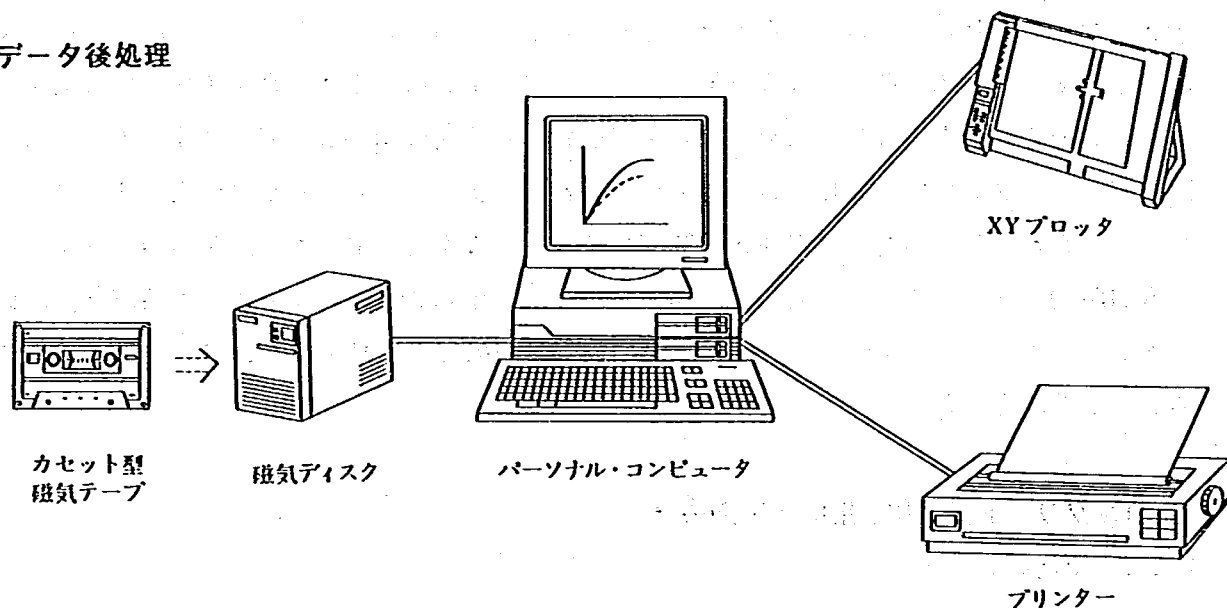


図-3 計測システムの構成図

表-2 動ひずみ計測器の仕様諸元

項 目	機 能
構成チャンネル数	10チャンネル
変 換 部 機 能	A/DおよびD/A変換が可能 分解能 12bit データメモリ 16kワード/チャンネル
サンプリング速度	最小0.5msec, 最大100msec (1 msec~100msecまで1 msec単位で設定可能) 全チャンネル同時サンプリング
付 属	ACカップリング機能付, トリガー機能付
そ の 他	パーソナルコンピュータからI/F (GP-IB) を介して制御・データ収集を行う

2. 予 備 試 験

2.1 接着剤の性質

今回考案した試験方法（以降、直接引張試験という）においては、供試体とアタッチメントを接着する接着剤の特性が試験の良否を左右する非常に重要な要素となる。その必要条件を挙げると、

- ① 接着剤の接着強度がコンクリートの引張強度よりも高いこと。
- ② 必要な強度が得られるまでの硬化時間が短いこと。
- ③ 作業性が良く、気象条件の影響が少ないこと。
- ④ アタッチメントから容易に供試体を除去できること。

このうち、①の条件については、直接引張試験が成立するうえで不可欠なものであり、②、③および④の条件は試験の工程を大きく左右するものである。したがって、①の条件を確実に満足し、②、③、④の条件の優れたものとして、エポキシ系の2液混合タイプの接着剤を選定した。この接着剤を実験室で試験した結果、一軸引張強度は約90kgf/cm²、弾性係数は約34,000 kgf/cm²、ポアソン比は約0.42という結果が得られた。また、この接着剤の硬化時間は気温に大きく左右され、気温が高いほど硬化時間が早くなる性質を有しているが、冬季の低温下においても24時間程度放置すれば強度的に問題がないことが確認された。なお、この接着剤は、供試体とアタッチメントを乾燥炉に入れ、高温（180℃～200℃）状態にすれば容易に融解除去できることが確認された。

2.2 コンクリート供試体を用いた予備試験

2.2.1 予備試験

前述したとおり接着剤の性質が確認され、試験の実施が可能となったので、実際にコンクリート供試体を作製して予備試験を行った。供試体は標準供試体（直径15cm、高さ30cm）を用いることとし、作製方法はJISに準じた。作製した供試体の配合を表-3に示す。また、供試体作製時にはキャッピングを行わないものとし、試験直前にハンディタイプのグラインダで表面のレイタンスおよび浮石を除去した。

試験の結果、コンクリート供試体と接着剤が剝離することはなく、接着剤の付着性に関し

表-3 コンクリートの配合（予備試験）

Gmax (mm)	W/C (%)	s / a (%)	単 位 量 (kg/m³)					A E (%)	スランブ (cm)	空 気 量 (%)
			W	C	S	G				
						5~20mm	20~40mm			
40	55	45	174	314	744	726	315	0.025	4.0±1	4.0±1

ては問題がないと判断された。しかし、予備試験においては、供試体はすべて写真-2に示すように供試体の上部または下部の端面付近より破壊した。これは、供試体の上部付近にはブリージングによってレイタンスが集中すること、供試体の下部付近には粗骨材が集中しやすいことなどから、その部分の強度が供試体の中央部付近のそれと異なるためと考えられた。そこで、この部分を取り除いて試験を行えばこの問題は解消できると考え、供試体の上下端部をそれぞれ3cmずつ切断し、試験を行うこととした。この場合の供試体の破断状況の一例を写真-3に、試験結果を表-4に示す。供試体の両端部を切断除去することによって、供試体のほぼ中央部付近から破断する例が数多く見られるようになった。

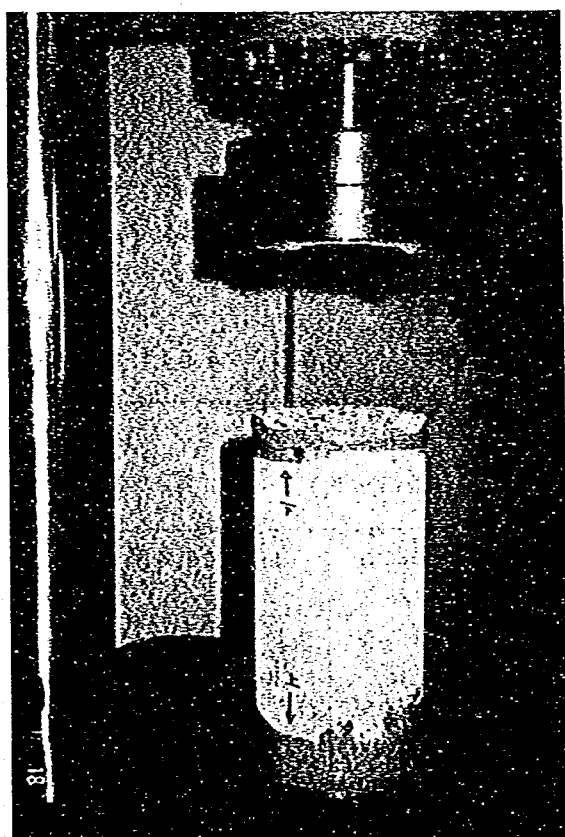


写真-2 端部から破断（H=30cm）

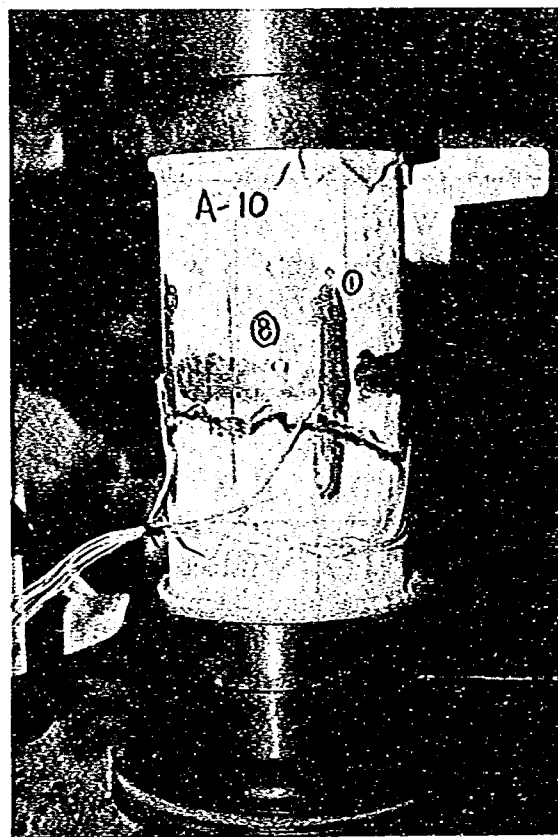


写真-3 中央部から破断（H=24cm）

表-4 H=24cmのコンクリート供試体の試験結果

バッチ	直接引張強度 (kgf/cm ²)	破断位置	バッチ	直接引張強度 (kgf/cm ²)	破断位置
A	21.3	中 央	B	16.6	上端から 約H/3
A	25.9	〃	B	26.5	中 央
A	24.7	〃	B	31.2	上端から 約H/8
A	25.5	上端から 約H/4	B	27.9	中 央

(注) 荷重載荷速度 2.0 kgf/cm²/sec

2.2.2 供試体高さの検討

供試体の両端部を切断除去した場合、供試体の直径：高さの比が変化し、その影響によって求められる直接引張強度が変化することが考えられた。そこで、先に述べたような方法で作製した高さ24cmの供試体と、このような供試体を中央で2つに切断した高さ12cmの供試体を作製し、これを用いて直接引張試験を行った。この時用いたコンクリートの配合を表-5に示す。

試験結果を表-6に、各供試体の直接引張強度の頻度分布を図-4(a)～図-4(c)に示す。この試験結果より、供試体の高さによって直接引張強度の平均値および標準偏差に有為な差は認められず、この範囲において、供試体の高さは直接引張強度に大きな影響を与えないものと判断した。

表-5 コンクリートの配合

Gmax (mm)	W/C (%)	s / a (%)	単 位 量 (kg/m³)					A E (%)	スランプ (cm)	空 気 量 (%)
			W	C	S	G				
						5~20mm	20~40mm			
40	60	38	145	242	721	770	452	0.018	4.0±1	4.0±1

表-6 供試体高さと直接引張強度 (予備試験)

供試体寸法 供試体番号	直径15cm×高さ24cm		直径15cm×高さ12cm (供試体上半分)		直径15cm×高さ12cm (供試体下半分)	
	直接引張強度 (kgf/cm ²)	材 令 (日)	直接引張強度 (kgf/cm ²)	材 令 (日)	直接引張強度 (kgf/cm ²)	材 令 (日)
1	13.48	142	13.30	141	10.05	141
2	22.40	144	22.38	143	15.05	143
3	8.55	144	13.97	143	11.69	143
4	9.41	144	18.32	145	21.51	145
5	25.74	145	24.91	146	19.14	146
6	17.80	145	18.49	146	27.08	146
7	13.52	146	32.54	147	11.07	147
8	11.07	146	9.73	147	6.25	147
9	22.73	147	23.52	148	9.73	148
10	8.57	147	24.48	148	21.48	148
11	9.18	148	16.37	149	19.09	149
12	21.85	149	21.79	150	7.80	150
13	28.07	151	19.28	152	30.56	152
14	21.97	151	7.72	152	20.16	152
15	19.26	152	26.60	153	16.63	153
平均 値	16.91		19.56		16.49	
標準偏差	6.51		6.43		6.88	

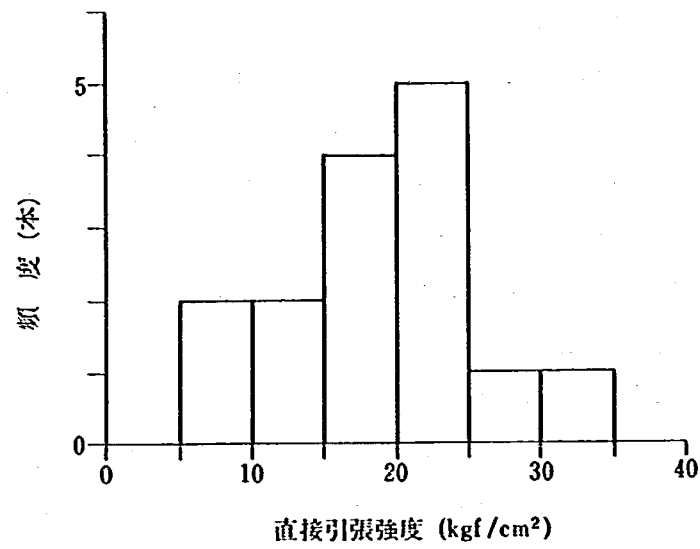


図-4 (a) 供試体高さ と直接引張強度 (H=12cm, 上半分)

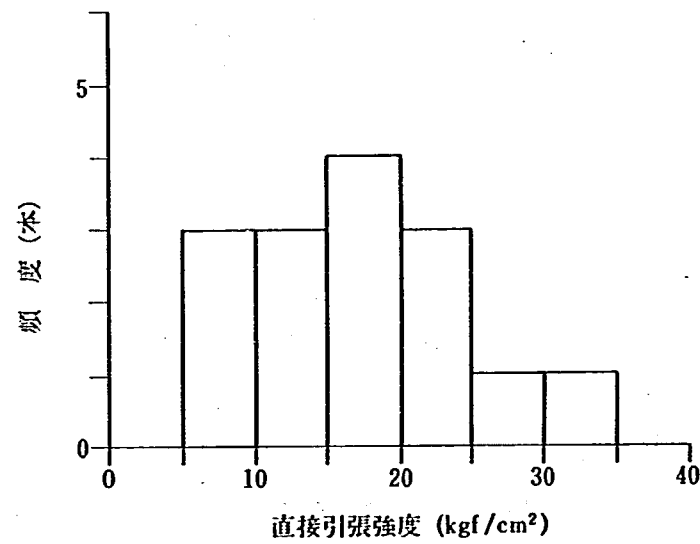


図-4 (b) 供試体高さ と直接引張強度 (H=12cm, 下半分)

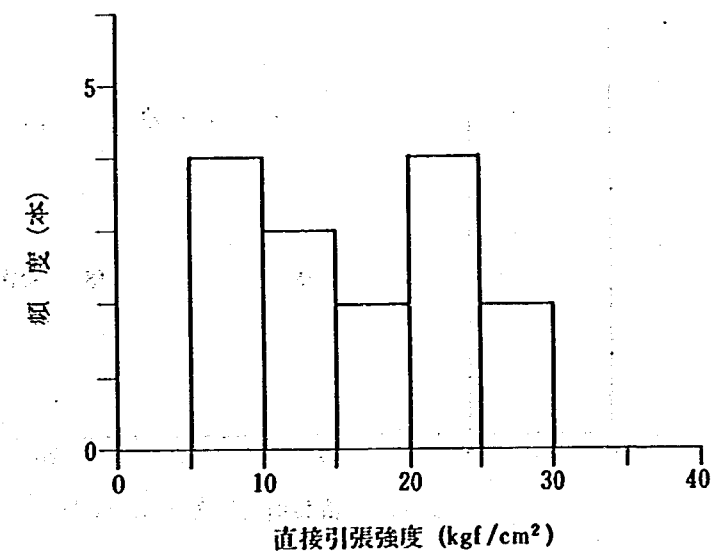


図-4 (c) 供試体高さ と直接引張強度 (H=24cm)

2.3 石膏供試体を用いた予備試験

前述したとおり、供試体の上下端面を切断除去すれば、供試体が端部で破断される例が少なくなることが確認された。しかし、供試体を切断する場合、切断後の上下端面に切断前の供試体と同程度の平行度を保つことは非常に困難であると考えられた。このため、端面の平行度に着目した比較試験を実施した。この試験では、意識的に供試体の端面の平行度を変化させるため、供試体の切断が容易な石膏を材料として選定した。石膏供試体の配合は、重量比で石膏：水＝1：0.63とし、供試体作製後、その重量がほぼ一定となるまで40℃に保たれた乾燥炉で乾燥した。この期間は約1カ月であった。

供試体の端面の平行度の状態は、①非常に平行度が高い場合と②平行度が悪い場合の2ケースを設定した。それぞれの平行度の程度は、次のとおりである。

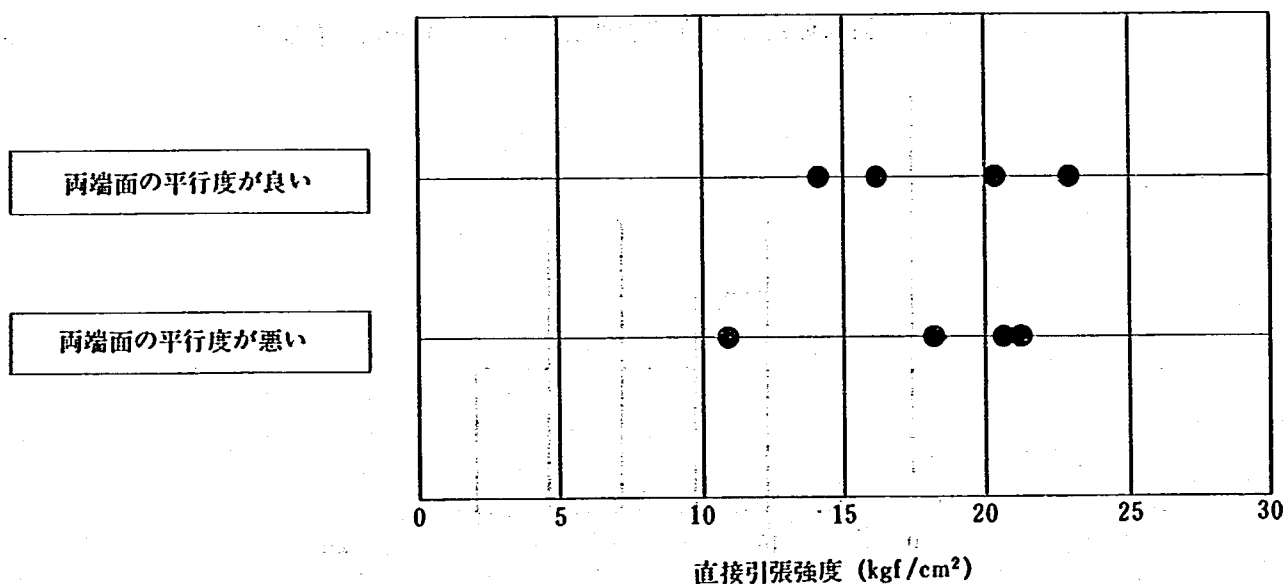
① 非常に平行度が高い場合

載荷盤の間に供試体を設置し、小さな圧縮荷重を載荷したとき、供試体の円周上に貼り付けたひずみゲージの軸方向ひずみ（4カ所）が平均して発生するように端面を整形した状態。

② 平行度が悪い場合

載荷盤の間に供試体を設置し、載荷盤が供試体の端面に接した時点で載荷盤と供試体端面の片側に2～3mm程度の隙間ができる状態。

試験結果を、図－5に示す。供試体の直接引張強度は、平行度の良い場合で14kgf/cm²～23kgf/cm²、平行度の悪い場合で11kgf/cm²～21kgf/cm²となっており、平行度の悪い場合の方が若干低い値を示しているが、強度のばらつきを考慮すると有為な差があるとはいえない。また、今回作製した供試体の端面の平行度は極端に悪いものであることを考えると、実用的な範囲では供試体の端面の平行度の影響は無視できるものと考えられる。



図－5 上下端面の平行度と直接引張強度

3. コンクリートの直接引張試験

3.1 試験の目的

本試験では、次の点に着目した直接引張試験を行うこととした。

- ① コンクリートの配合が直接引張強度および弾性係数に与える影響
- ② 荷重載荷速度が直接引張強度および弾性係数に与える影響
- ③ 荷重載荷方向が直接引張強度および弾性係数に与える影響
- ④ 水平打継目部の直接引張強度

3.2 コンクリートの配合が直接引張強度および弾性係数に与える影響

3.2.1 試験条件

試験に用いたコンクリートの配合を表-7に示す。ここで、A配合はアーチ式コンクリートダムの配合を参考にした配合（40mmオーバーをウェットスクリーニングした配合に相当する配合）であり、G配合は重力式コンクリートダムの配合を参考にして決定した配合（同上）である。

それぞれの配合を用いて作製した供試体に対して、荷重載荷速度を5速度（ $0.067\text{kgf/cm}^2/\text{sec}$ （JISに規定されている割裂試験の荷重載荷速度から換算して求めた荷重載荷速度）、 $2.0\text{kgf/cm}^2/\text{sec}$ （JISに規定されている圧縮強度試験の荷重載荷速度）、 $20.0\text{kgf/cm}^2/\text{sec}$ 、 $200.0\text{kgf/cm}^2/\text{sec}$ 、 $600.0\text{kgf/cm}^2/\text{sec}$ ）に設定し、同一の荷重載荷速度について各12本（1配合につき合計60本）の試験を行った。

現在のシステムで1日に実施できる直接引張試験の数量が4～5本（主に、接着剤の強度発現に要する時間が必要）であるため、1配合の試験を終了するまでに約0.5カ月の時間を要することとなる。したがって、強度増加の割合が大きい若材令を試験日の材令に選択すると、試験期間中に供試体の強度が増加し、試験値の信頼性を損なう恐れがある。そこで、材令による強度増加の割合が小さくなる材令において試験を実施するのが良いと考え、概ね160日から200日の間に試験を行った。なお、試験に際して一軸圧縮強度試験により材令と強

表-7 直接引張試験の配合

配 合	Gmax (mm)	W/C (%)	s / a (%)	単 位 量 (kg/m³)					A E (%)	スランプ (cm)	空 気 量 (%)
				W	C	S	G				
							5~20mm	20~40mm			
A配合	40	45	37	156	347	675	738	433	0.045	4.0±1	4.0±1
G配合	40	60	40	157	262	760	719	315	0.025	4.0±1	4.0±1

度の関係を確認したところ、160日～200日の間の一軸圧縮強度の増加量は、平均で、A配合が -3.3kgf/cm^2 、G配合が 8.5kgf/cm^2 であり、有為な差がないことが確認された。

供試体は、JISに規定されている強度試験用供試体の作製方法と同様に作製し、約90日間水中養生した後、予備試験での検討結果をふまえて、コンクリート・カッターを用いて上下端面を30mm切断した。また、試験を行う7日前に供試体を水中から取り出し、室内自然乾燥状態とした。なお、60本の供試体を1回の練り混ぜで作製することは困難であるため、1バッチで21本の供試体（直接引張強度試験用：5荷重載荷速度 $\times$ 3本=15本、一軸圧縮強度試験用：3本、割裂強度試験用：3本）を打設し、試験結果の検討時にバッチ間の影響についても検討を加えることとした。

なお、一軸圧縮強度試験時および直接引張強度試験時には、供試体円周上に軸方向（荷重載荷方向）4枚、円周方向（荷重載荷直交方向）に4枚ひずみゲージ（ゲージ長：60mm）を貼り付けてひずみを計測するものとした。また、載荷荷重の大きさは荷重計によって測定した。

3.2.2 試験結果

表－8(a)～(b)に各種の強度試験結果の一覧表、図－6(a)～(b)に一軸圧縮強度の頻度分布、図－7(a)～(b)に割裂強度の頻度分布を示す。図より、一軸圧縮強度の分布範囲はA配合の方が広く、G配合の方が狭いが、変動係数で比較すると、A配合の0.043に対して

表－8(a) 直接引張試験、一軸圧縮試験、割裂試験の結果（A配合）

試験項目 バッチ	直接引張強度 (kgf/cm ²)					一軸圧縮 強 度 (kgf/cm ²)	割裂強度 (kgf/cm ²)
	荷 重 載 荷 速 度 (kgf/cm ² /sec)						
	0.067	2.0	20.0	200.0	600.0		
1 (a)	29.22	30.63	19.28	15.75	30.38	453.75	39.04
	25.80	11.97	20.89	22.11	28.68	497.39	37.40
	7.61	25.80		22.34		465.04	30.28
バッチ平均	20.88	22.80	20.09	20.07	29.53	472.06	35.57
2 (a)	21.87	26.86	21.64	31.72	34.54	439.18	31.64
	24.54	21.94	18.55	38.87	28.11		37.54
	27.91	16.86	25.76	18.51	35.98	446.61	33.92
バッチ平均	24.77	21.89	21.98	29.70	32.88	442.90	34.37
3 (b)	25.41	26.08	30.23	34.81	24.66	466.69	32.38
	27.46	27.85	34.76	37.26	36.11	453.93	31.78
	9.48	29.68	27.42	31.42	29.46	451.29	31.19
バッチ平均	20.78	27.87	30.80	34.50	30.08	457.30	31.78
4 (b)	12.18	15.22	31.46	32.30	30.84	440.80	30.84
	19.06	17.74	37.09	35.04	12.82	418.78	27.97
	21.97	15.85	37.70	35.27	22.79	446.98	34.66
バッチ平均	17.74	16.27	35.42	34.20	22.15	435.52	31.16
平 均 値	21.04	22.21	27.71	29.62	28.58	452.77	33.22
標 準 偏 差	7.11	6.13	6.74	7.48	6.42	18.82	3.21
変 動 係 数	0.3531	0.2883	0.2552	0.2639	0.2357	0.0436	0.1010

表-8(b) 直接引張試験, 一軸圧縮試験, 割裂試験の結果 (G配合)

試験項目 バッチ	直接引張強度 (kgf/cm ²)					一軸圧縮 強度 (kgf/cm ²)	割裂強度 (kgf/cm ²)
	荷重載荷速度 (kgf/cm ² /sec)						
	0.067	2.0	20.0	200.0	600.0		
1 (a)	21.14	27.14	29.41	33.82	28.66	284.06	30.74
	25.65	18.83	11.94	33.43	30.46	289.99	25.92
	20.65	21.02	20.39	30.97		306.07	27.88
バッチ平均	22.48	22.33	20.58	32.74	29.56	293.37	28.18
2 (a)	17.72	17.79	27.44	32.10	29.64	278.62	29.90
	20.14	26.42	12.40	31.72	30.77	288.19	29.41
	27.62	24.39	27.62	36.62	32.83	303.15	24.93
バッチ平均	21.83	22.87	22.49	33.48	31.08	289.99	28.08
3 (b)	11.50	30.27	32.37	28.69	22.82	271.46	27.06
	17.36	24.06	25.42	30.47	9.97	283.69	30.11
	26.85	18.66	29.74	18.45	28.70	280.87	25.54
バッチ平均	18.57	24.33	29.18	25.87	20.50	278.67	27.57
4 (b)	21.33	13.73	28.25	22.80	33.43	279.18	27.13
	7.59	23.39	28.37	27.09	26.36	309.18	27.21
	22.06	23.99	11.46	30.39	28.48	299.93	31.06
バッチ平均	16.99	20.37	22.69	26.76	29.42	296.10	28.47
平均 値	19.97	22.47	23.73	29.71	27.47	289.53	28.07
標準 偏差	5.65	4.43	7.34	4.77	6.19	11.72	2.02
変動 係数	0.2955	0.2006	0.3228	0.1678	0.2365	0.0423	0.0751

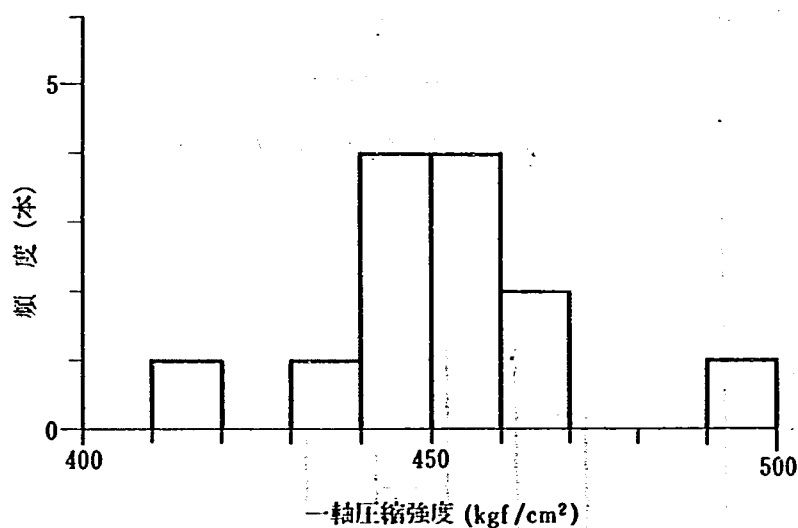


図-6(a) 一軸圧縮強度の頻度分布 (A配合)

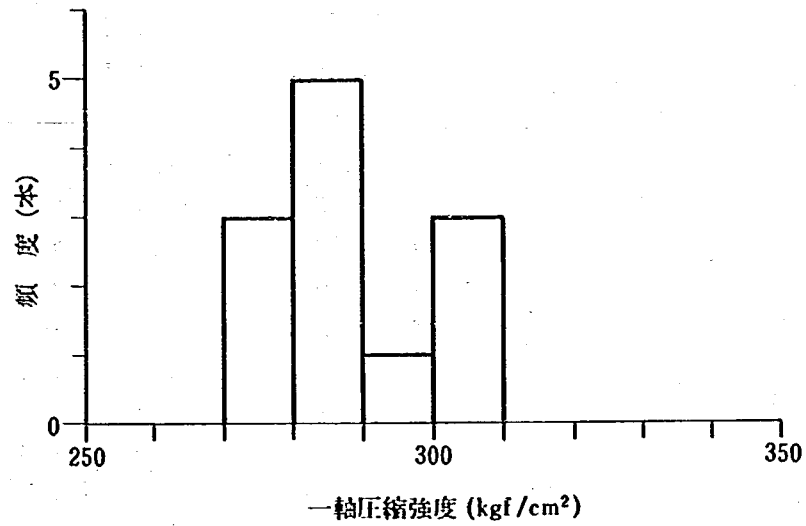


図-6 (b) 一軸圧縮強度の頻度分布 (G 配合)

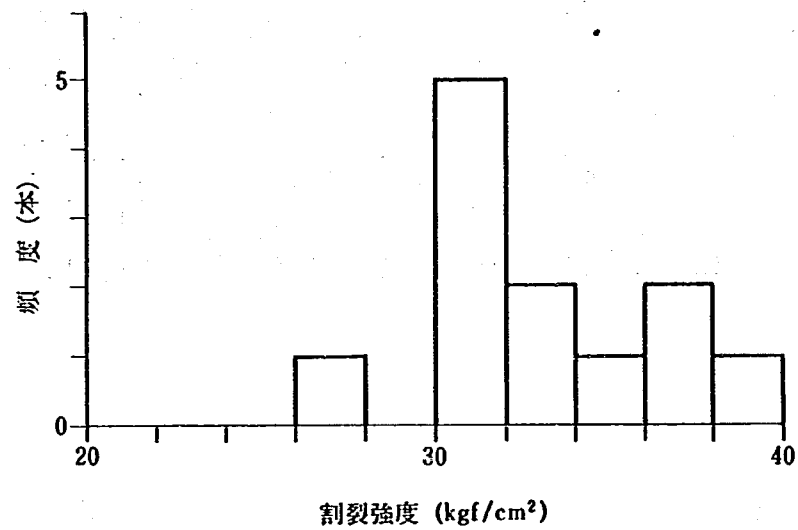


図-7 (a) 割裂強度の頻度分布 (A 配合)

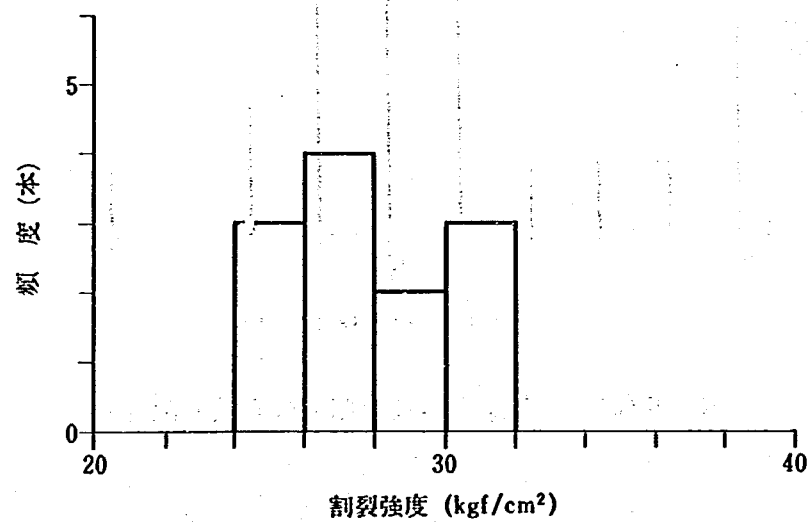


図-7 (b) 割裂強度の頻度分布 (G 配合)

G配合は0.042とほとんど差がなく、バラツキの程度は同程度といえる。また、割裂強度については、A配合の変動係数が0.101に対してG配合の変動係数は0.075と若干の差がみられるが、これも有為な差とはいえない。

図-8(a)~(b)に直接引張強度の頻度分布、図-9(a)~(b)にその破断位置の頻度分布、図-10(a)~(b)に破断位置と直接引張強度の関係を示す。図-8より、A配合、G配合のどちらの配合においても直接引張強度の分布はほぼ同様であり、最頻値はいずれも25kgf/cm²以上30kgf/cm²未満となっている。また、直接引張強度の変動係数はA配合で6.13~7.48、G配合で4.43~7.34と割裂強度の変動係数に比べて大きな値となっている。次に、破断位置に関しては、図-9より、G配合の場合には上端より2/5~3/5(中央の1/5)の範囲で破断しているものが最も多いが、A配合の場合には上部より1/5~2/5で破断しているものが最も多くなっている。しかし、図-10より、破断位置と直接引張強度の間には相関関係は認められず、どの位置で破断しても直接引張強度には大きな影響を及ぼさないものと考えられる。

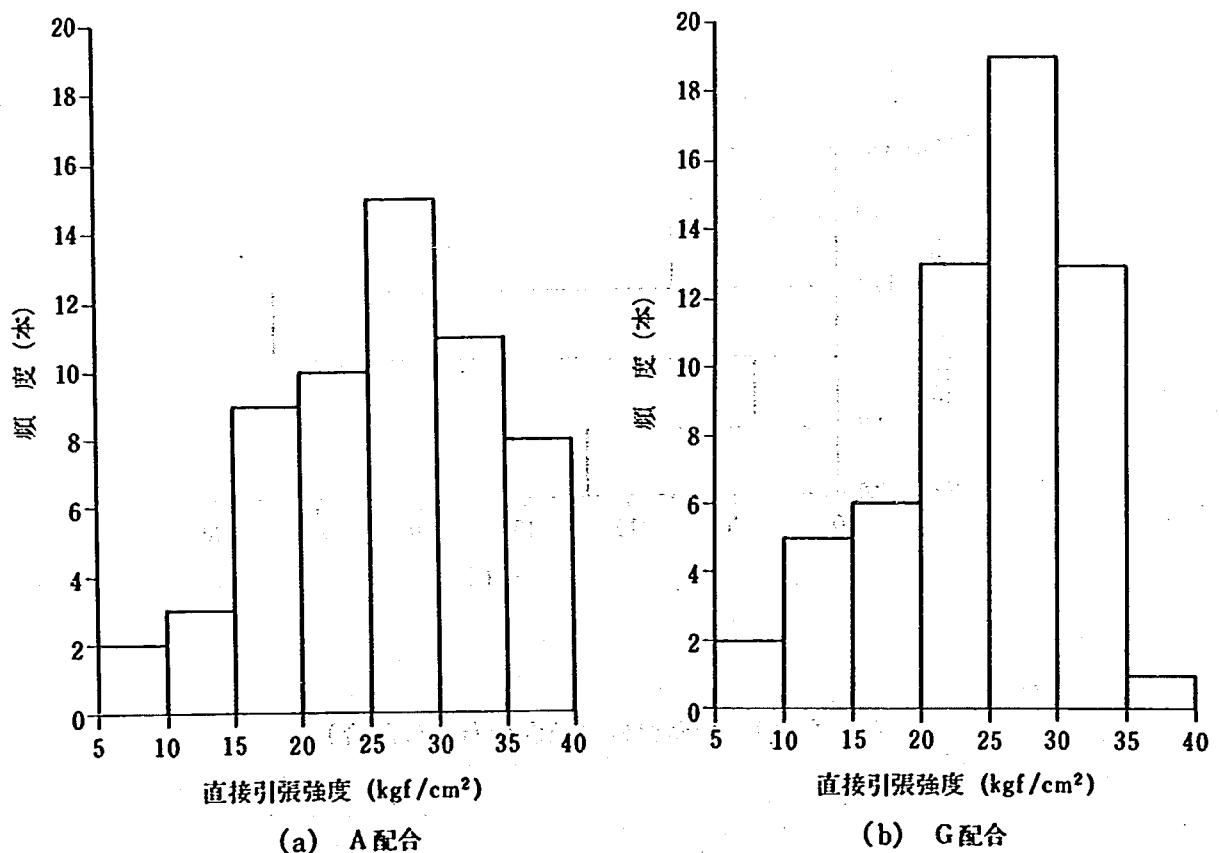
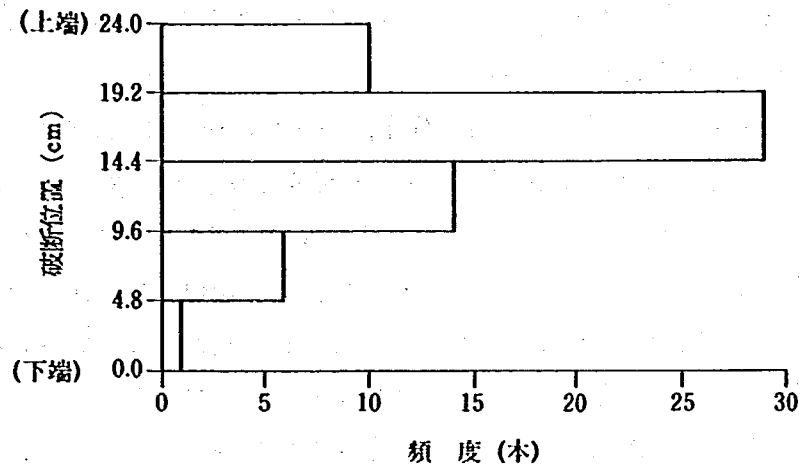
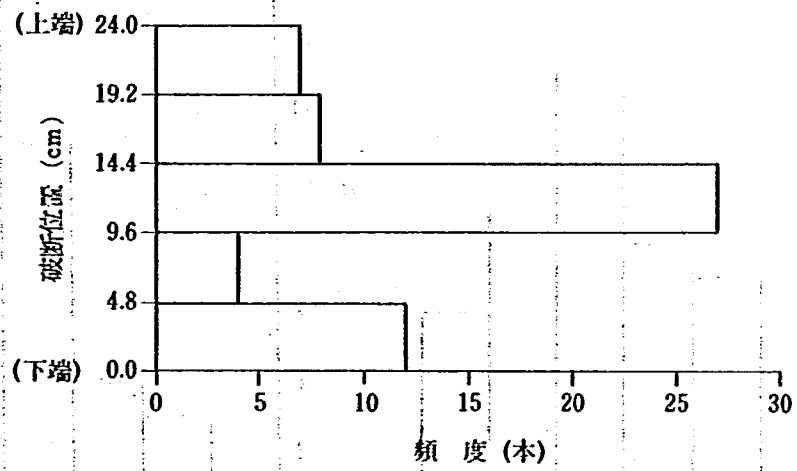


図-8 直接引張強度の頻度分布 (全データ)



図－9 (a) 破断位置の頻度分布 (A 配合)



図－9 (b) 破断位置の頻度分布 (G 配合)

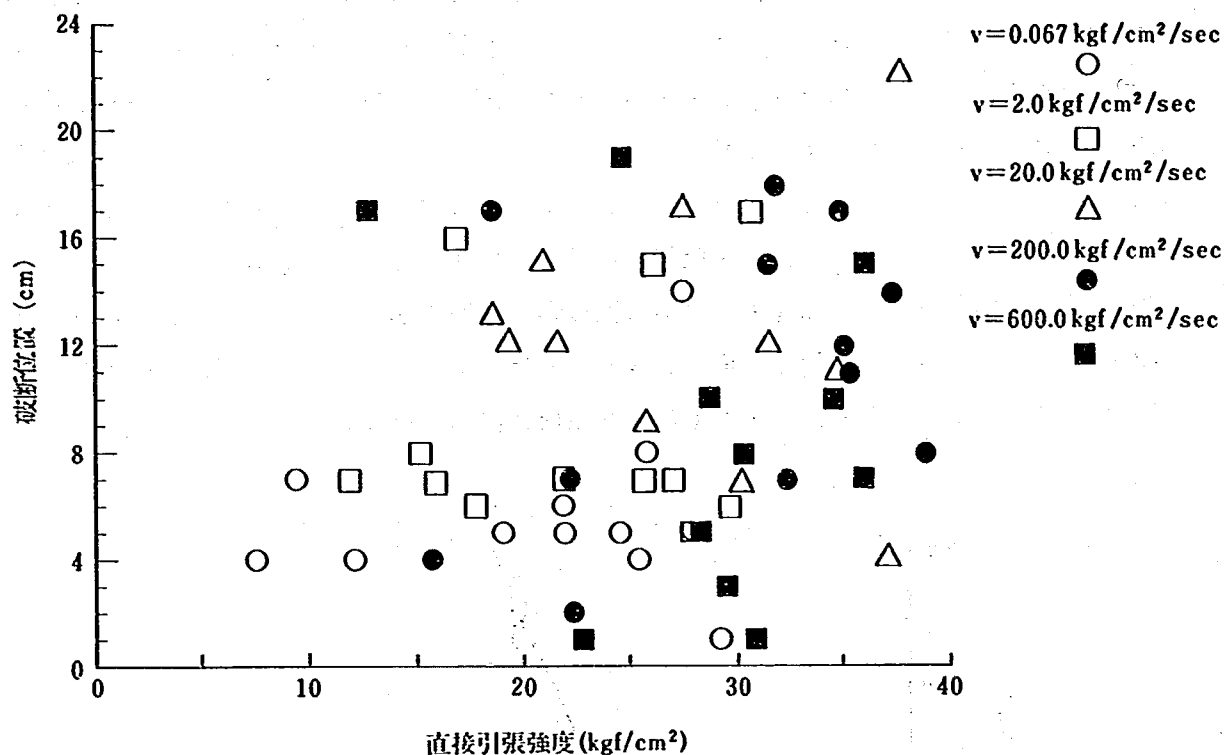


図-10(a) 破断位置と直接引張強度 (A 配合)

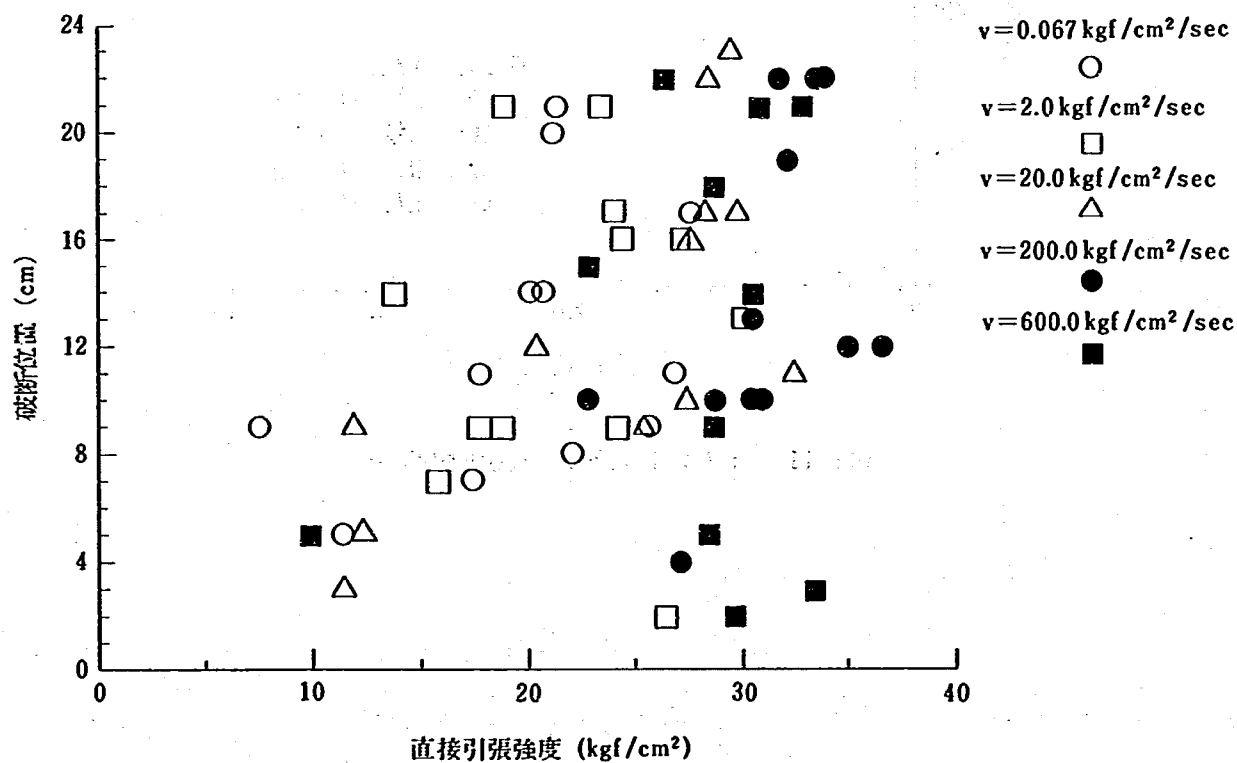


図-10(b) 破断位置と直接引張強度 (G 配合)

次に、図-11にセメント水比と一軸圧縮強度の関係を、図-12にセメント水比と割裂強度の関係を示す。ここで、図中の各点は同一バッチで作製した3本の供試体の強度の平均値であり、○印はG配合、□印はA配合である。また、図中の直線はそれぞれの配合の強度の平均値（3本×4バッチ=12本）を結んだ線である。図より、一軸圧縮強度および割裂強度ともに、セメント水比が大きくなる（単位セメント量が大きくなる）と強度が増大し、その量は一軸圧縮強度の場合で1.57倍、割裂強度の場合で1.18倍となっている。

次に、図-13にセメント水比と直接引張強度の関係図を示す。図より、全体的にはセメント水比が大きくなると直接引張強度は大きくなる傾向にあると思われるが、割裂強度に比べデータのバラツキが大きく、必ずしも明確な傾向は現れていない。

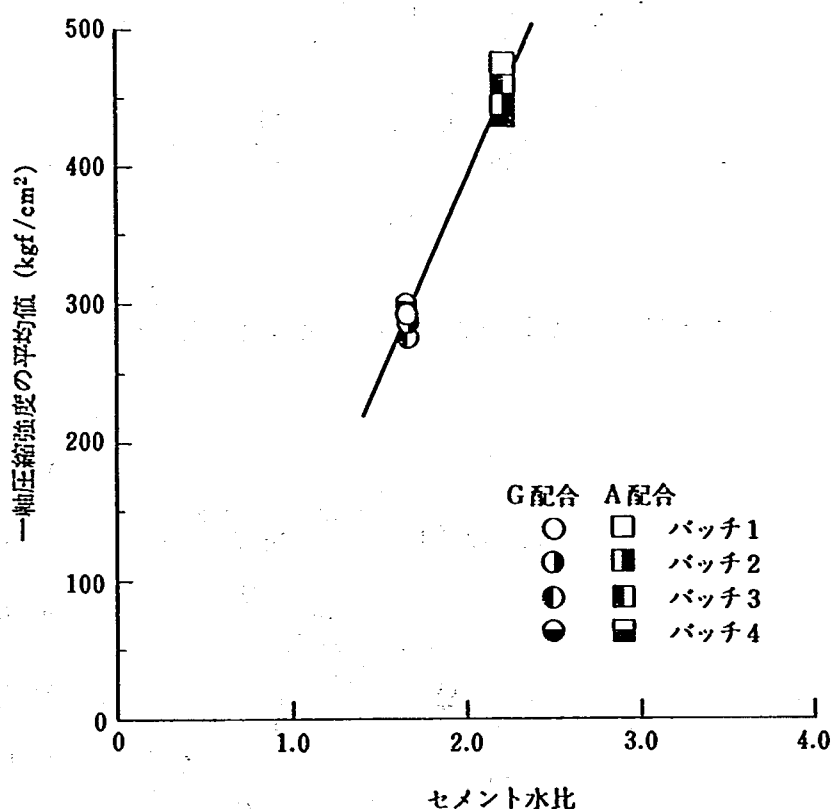


図-11 セメント水比と一軸圧縮強度

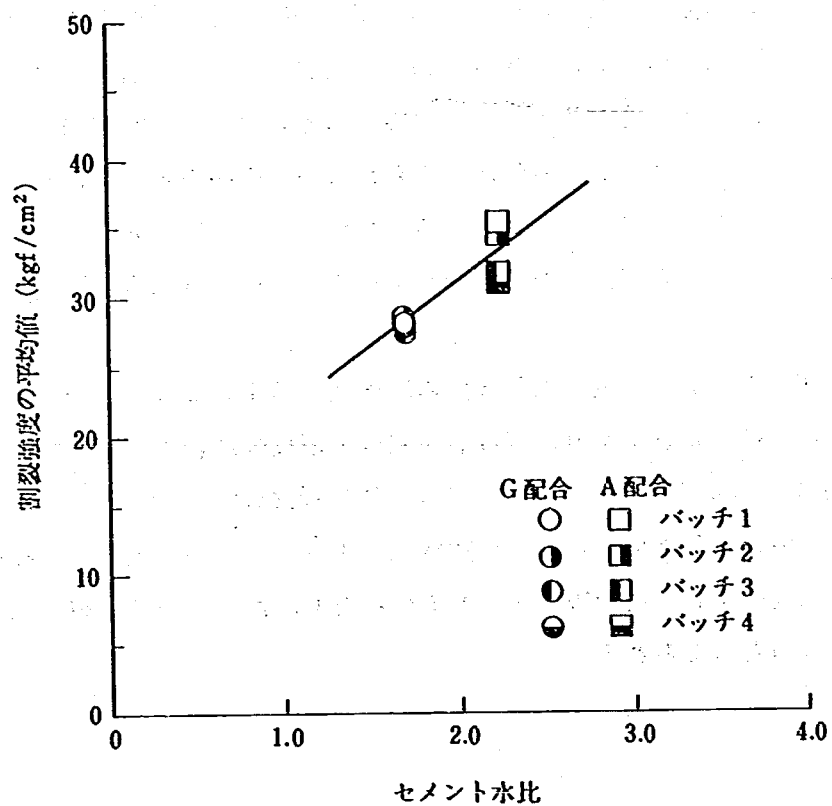


図-12 セメント水比と割裂強度

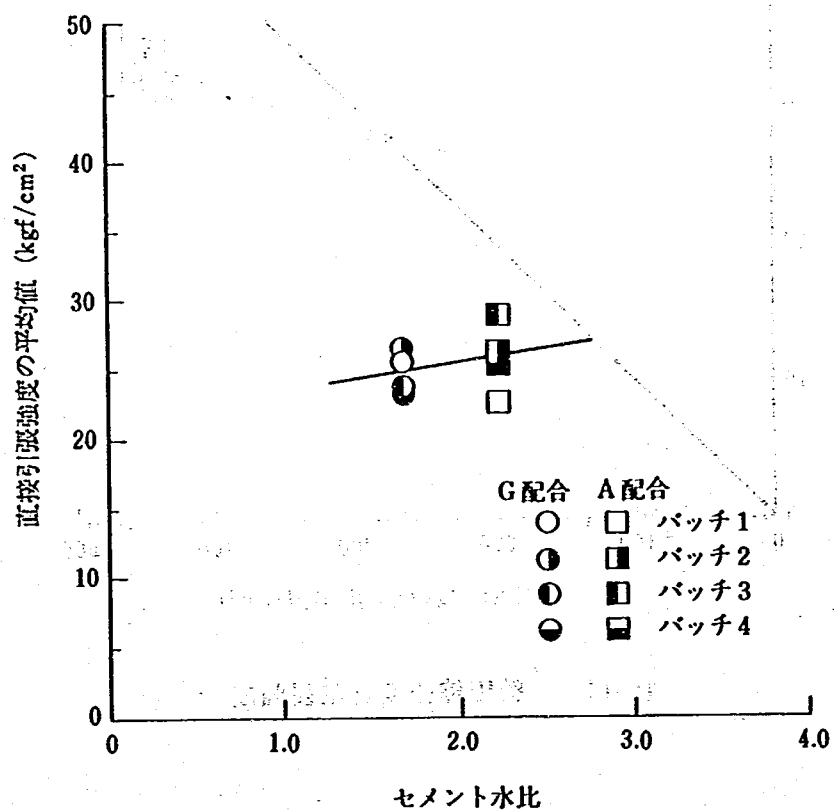


図-13 セメント水比と直接引張強度

図-14に一軸圧縮強度と割裂強度の関係図、図-15に一軸圧縮強度と直接引張強度の関係図を示す。ここで、図中の直線は一軸圧縮強度：割裂強度（直接引張強度）が10：1となる線であり、また破線は各配合の平均値を結ぶ線である。図より、割裂強度は一軸圧縮強度が増加すると、それに応じて増加する傾向がみられるが、直接引張強度は一軸圧縮強度が増加してもほとんど変化していないように見える。なお、割裂強度においても、図中の破線は原点を通る直線となっておらず、一般に言われているように圧縮強度と引張強度の比が一定の割合となることはない。

次に、図-16に直接引張強度と割裂強度の関係図を示す。ここで、図中の直線は全データの平均値と原点を結んだ線であり、直接引張強度と割裂強度の値が同じであれば1：1（ $\theta = 45^\circ$ ）の傾きをもつ線となる。図より、この直線の勾配は1：0.82（ $\theta = 39.35^\circ$ ）となり、直接引張強度の方が割裂強度に比べて約20%程度小さい。この原因は、直接引張強度は供試体の中で最も強度の小さい所で破壊が生じるのに対し、割裂試験では破壊面が規制されていることによるものと考えられる。

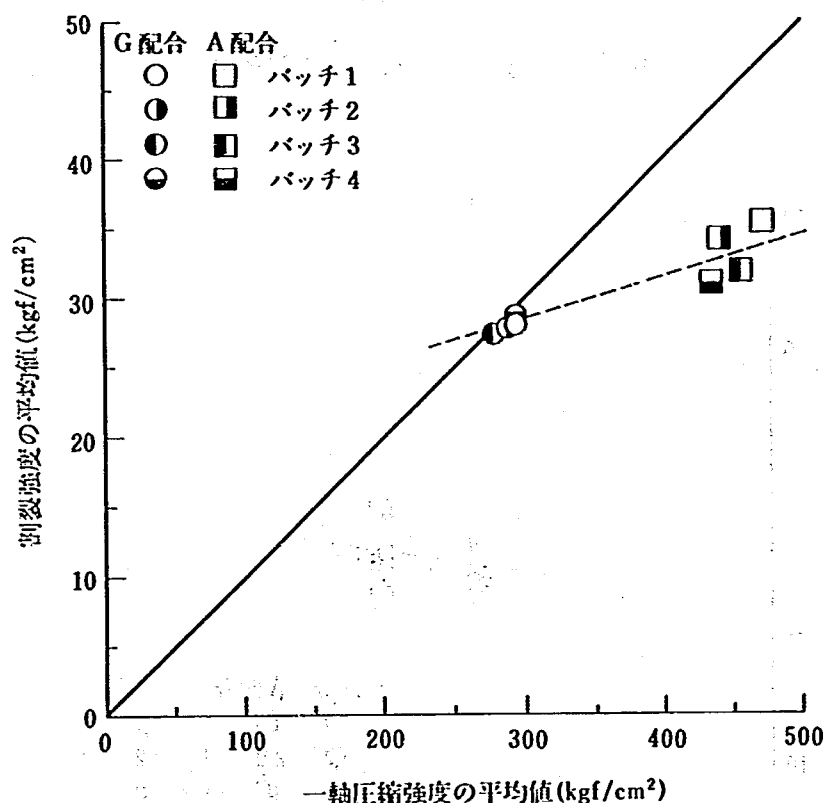


図-14 一軸圧縮強度と割裂強度

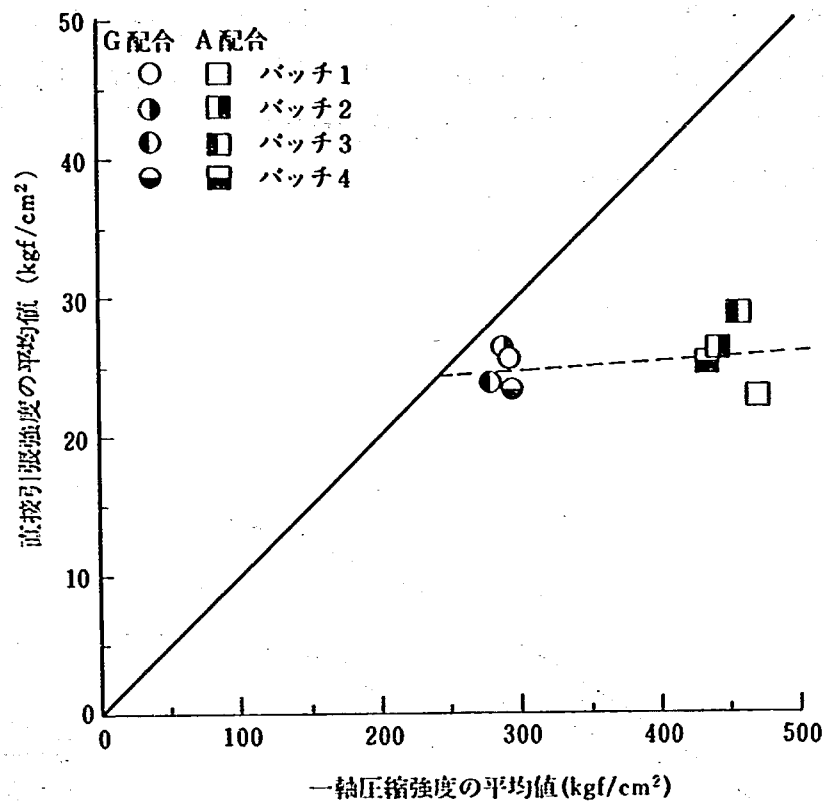


図-15 一軸圧縮強度と直接引張強度

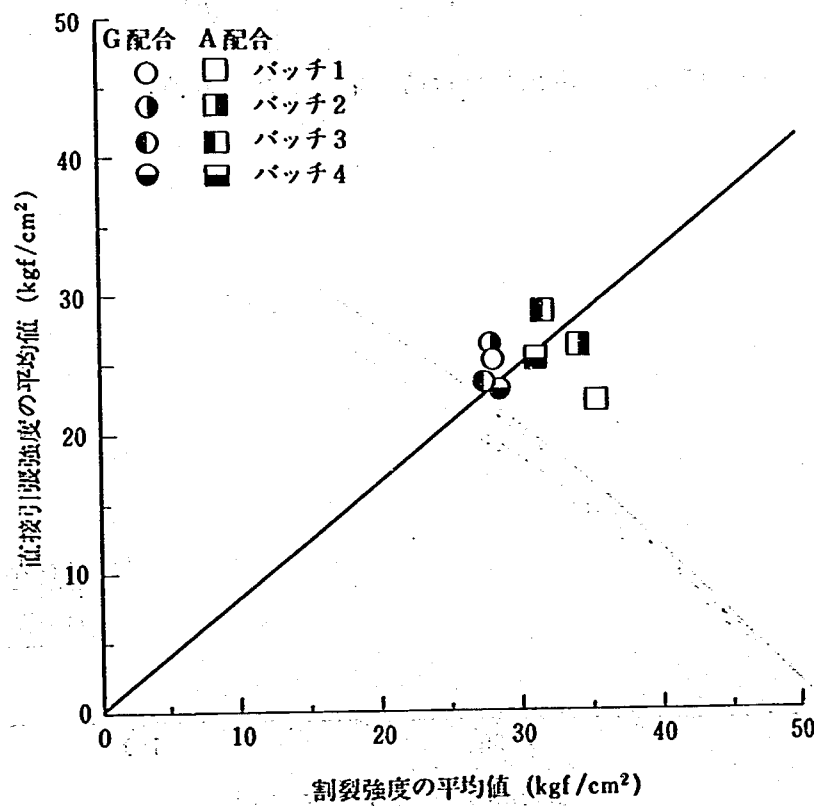


図-16 直接引張強度と割裂強度

次に、破壊時のひずみおよび弾性係数について検討する。図-17(a)に一軸圧縮試験時における代表的な応力-ひずみ曲線を、図-17(b)に直接引張試験時における代表的な応力-ひずみ曲線を示す。また、ここで用いる弾性係数は図-18に示すように、破壊強度の25%の応力時に生じるひずみから算出した。

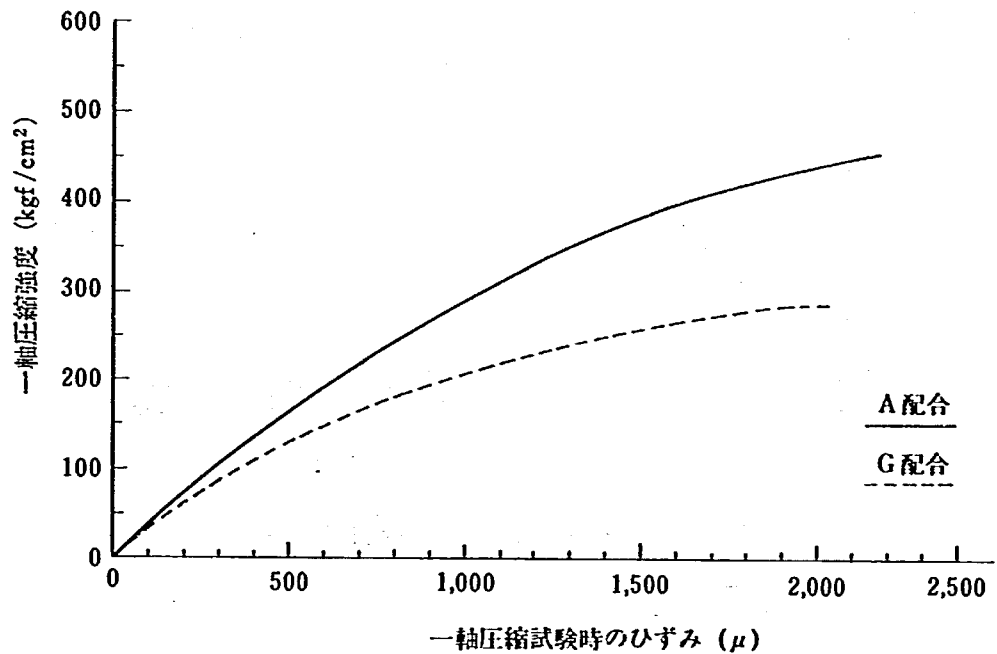


図-17(a) 一軸圧縮試験時の応力-ひずみ曲線

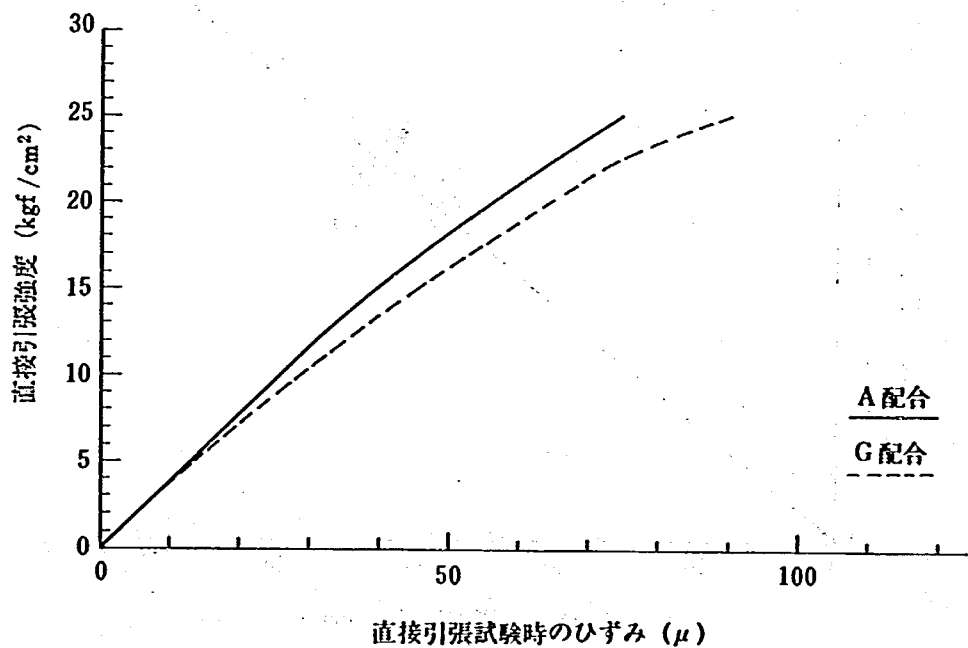


図-17(b) 直接引張試験時の応力-ひずみ曲線

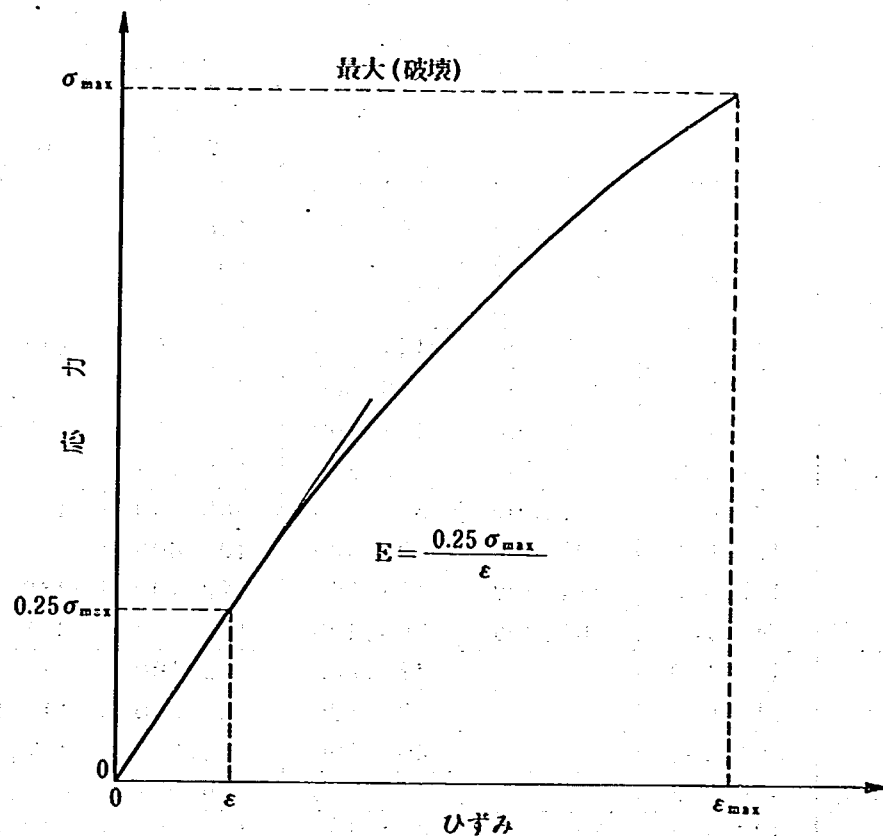


図-18 弾性係数の定義

表-9(a)~(b)に弾性係数の一覧表、図-19にセメント水比と一軸圧縮試験時における弾性係数の関係図、図-20にセメント水比と直接引張試験時における弾性係数の関係図を示す。図より、直接引張試験時における弾性係数のバラツキは一軸圧縮試験時における弾性係数のバラツキと同程度になっており、引張強度のバラツキに比べると小さなバラツキになっている。また、弾性係数の大きさはセメント水比が大きくなるとそれにしたがって大きくなっている。これは、セメント水比が変化しても明確な変化が見られない直接引張強度の場合とは異なった傾向である。

表-9(a) 直接引張試験時, 一軸圧縮試験時の弾性係数 (A配合)

試験項目 バッチ	直接引張試験時弾性係数 (kgf/cm ²)					一軸圧縮試験 時弾性係数 (kgf/cm ²)
	荷重載荷速度 (kgf/cm ² /sec)					
	0.067	2.0	20.0	200.0	600.0	
1 (a)	513,000	397,000	434,000	383,200	375,000	341,000
	465,700	400,000	445,100	416,200	395,800	385,000
	493,000	385,400		406,500		377,000
バッチ平均	490,567	394,133	439,550	401,967	385,400	367,667
2 (a)	430,200	357,400	441,000	412,200	373,600	356,000
	375,000	369,600	386,300	404,400	374,500	
	387,100	412,700	441,400	431,800	385,500	354,000
バッチ平均	397,433	379,900	422,900	416,133	377,867	355,000
3 (b)	400,000	393,200	387,500	388,300	412,100	371,000
	475,800	398,800	392,600	407,400	375,500	350,000
	447,600	411,900	418,100	422,100	386,500	345,000
バッチ平均	441,133	401,300	399,400	405,933	391,367	355,333
4 (b)	485,100		419,700	409,100	418,900	340,000
	410,000		389,800	407,500	415,000	366,000
	391,400		405,000	413,300	437,000	338,000
バッチ平均	428,833		404,833	409,967	423,633	348,000
平均 値	439,492	391,778	414,591	408,500	395,400	356,636
標準 偏 差	44,861	17,331	22,333	12,568	20,992	15,281
変 動 係 数	0.1048	0.0469	0.0589	0.0335	0.0462	0.0435

表-9(b) 直接引張試験時, 一軸圧縮試験時の弾性係数 (G配合)

試験項目 バッチ	直接引張試験時弾性係数 (kgf/cm ²)					一軸圧縮試験 時弾性係数 (kgf/cm ²)
	荷重載荷速度 (kgf/cm ² /sec)					
	0.067	2.0	20.0	200.0	600.0	
1 (a)	367,500	395,600	447,000	343,300	387,300	292,000
	335,600	397,500	392,900	393,600	380,300	339,000
	406,300		348,300	371,000		325,000
バッチ平均	369,800	396,550	396,067	369,300	383,800	318,667
2 (a)	371,100	392,600	396,400	402,600	339,400	258,000
	345,700	359,400	386,900	381,100	398,100	319,000
	305,700	354,200	396,600	451,400	394,200	281,000
バッチ平均	340,833	368,733	393,300	411,700	397,233	286,000
3 (b)	353,900	355,200	369,100	386,500	340,300	318,000
	384,000	365,800	363,600	369,000	334,900	302,000
	352,700	331,900	364,400	409,100	407,900	288,000
バッチ平均	363,533	350,967	365,700	388,200	361,033	302,667
4 (b)	331,600	373,900	364,200	386,700	387,400	298,000
	372,000	409,100	370,500	360,600	351,600	284,000
	341,500	417,100	374,500	345,300	349,500	293,000
バッチ平均	348,367	400,033	369,733	364,200	362,833	291,667
平均 値	355,633	377,482	381,200	383,350	375,536	299,750
標準 偏 差	25,498	25,440	24,557	28,466	25,082	21,362
変 動 係 数	0.0749	0.0707	0.0673	0.0776	0.0700	0.0744

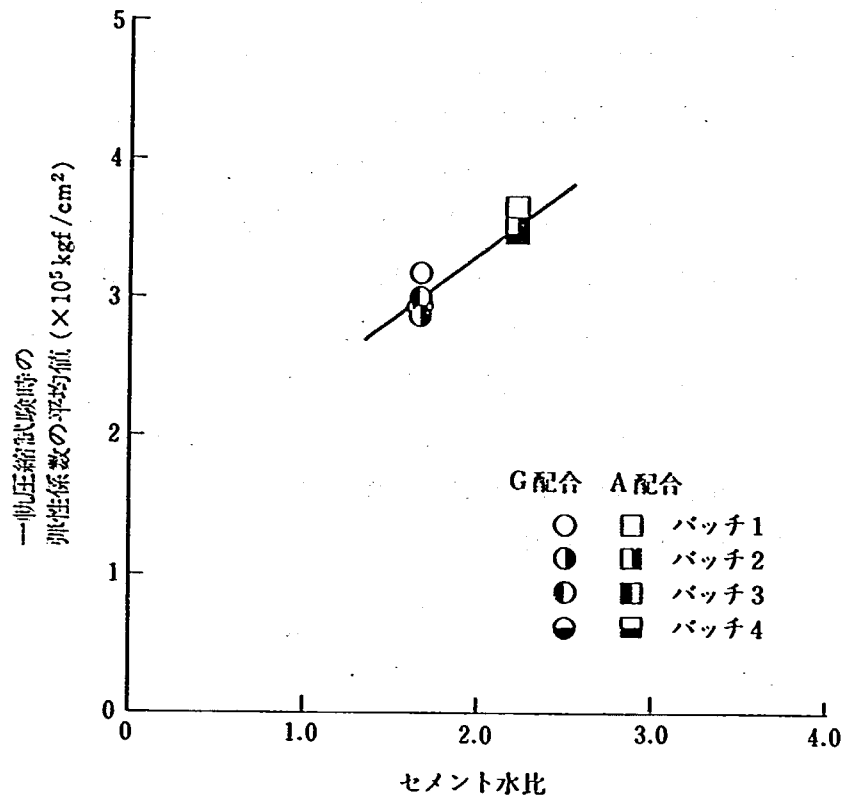


図-19 セメント水比と一軸圧縮試験時における弾性係数

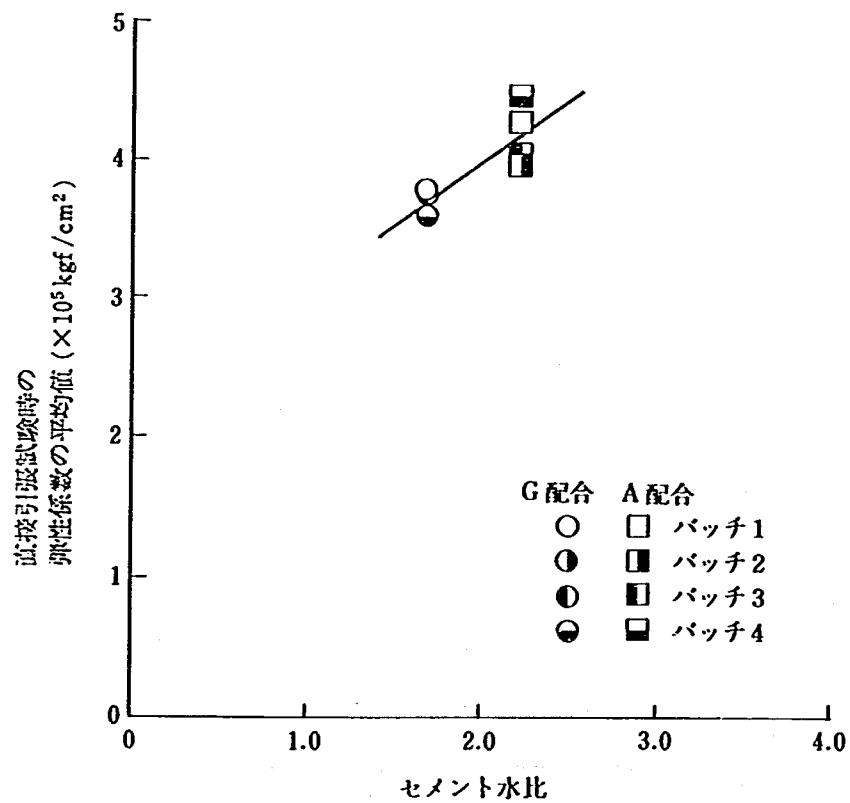


図-20 セメント水比と直接引張試験時における弾性係数

図-21に直接引張試験時の弾性係数と一軸圧縮試験時における弾性係数の関係図を示す。ここで、図中の直線は両者の弾性係数が等しくなる線である。図より、データは図中の直線より上にあり、直接引張試験時における弾性係数の方が圧縮試験時における弾性係数より大きな値となっている。しかし、これは弾性係数を算出する際に用いたひずみのレベルが、圧縮試験では約 $200\mu\sim 300\mu$ であるのに対し、直接引張試験では約 $10\mu\sim 20\mu$ となっており、両者のひずみレベルが異なっているためと考えられる。そこで、圧縮試験時における弾性係数を比較的小さなひずみ ($50\mu\sim 100\mu$) から算出し直し、また直接引張試験時における弾性係数も同等なひずみレベルから算出し直したものが表-10(a)~(b)であり、また、その結果をプロットしたものが図-22である。図より、修正した圧縮試験時における弾性係数と引張試験時における弾性係数は、ほぼ同程度の値となることがわかる。なお、このような弾性係数を以下、修正弾性係数と呼ぶことにする。

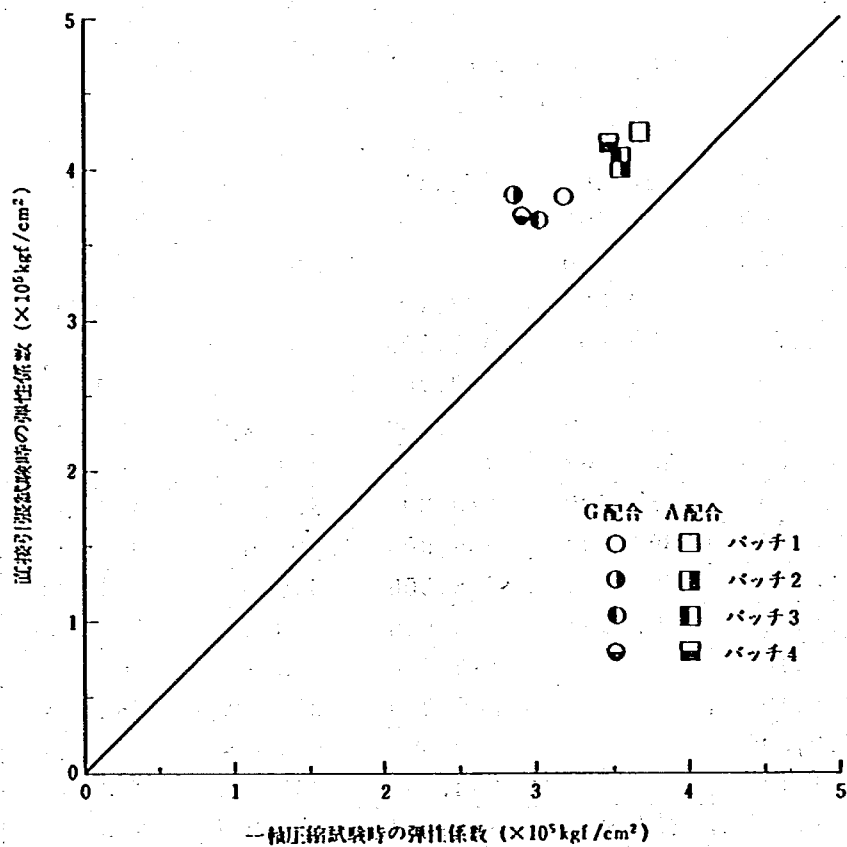


図-21 直接引張試験時の弾性係数と一軸圧縮試験時の弾性係数

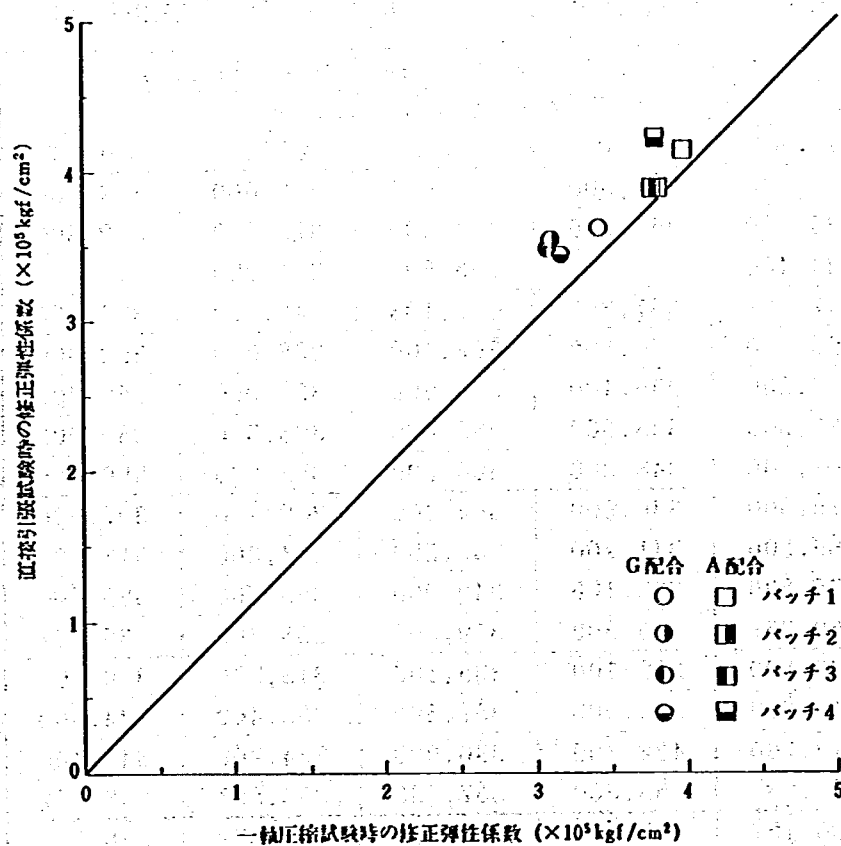


図-22 直接引張試験時の修正弾性係数と一軸圧縮試験時の修正弾性係数

表-10(a) 直接引張試験時、一軸圧縮試験時の修正弾性係数 (A配合)

試験項目 パッチ	直接引張試験時修正弾性係数 (kgf/cm ²)					一軸圧縮試験時 修正弾性係数 (kgf/cm ²)
	荷重載荷速度 (kgf/cm ² /sec)					
	0.067	2.0	20.0	200.0	600.0	
1 (a)	422,900	457,400	390,400	389,700	360,000	390,500
	424,600	413,500	465,800	416,700	380,400	335,000
	493,000	360,900		399,200		467,900
パッチ平均	446,833	410,600	428,100	401,867	370,200	397,800
2 (a)	433,700	339,400	410,900	392,300	369,600	400,100
	342,100	365,000	382,700	393,300	359,400	
	390,700	444,200	416,800	418,700	362,200	354,000
パッチ平均	388,833	382,867	403,467	401,433	363,733	377,050
3 (b)	369,600	384,500	370,200	381,300	404,400	400,100
	396,800	394,300	359,000	408,600	349,600	371,300
	428,200	395,000	398,500	410,700	374,300	371,300
パッチ平均	398,200	391,267	375,900	400,200	376,100	380,900
4 (b)	489,100		412,400	398,800	407,200	362,900
	454,100		369,300	387,600	453,400	360,600
	410,200		399,600	394,300	479,100	413,300
パッチ平均	451,133		393,767	393,567	446,567	378,933
平均 値	421,250	394,911	397,782	399,267	390,873	384,273
標準 偏 差	42,460	36,395	28,181	11,398	39,828	34,475
変 動 係 数	0.1098	0.0978	0.0783	0.0310	0.0822	0.0963

表-10(b) 直接引張試験時、一軸圧縮試験時の修正弾性係数 (G配合)

試験項目 パッチ	直接引張試験時修正弾性係数 (kgf/cm ²)					一軸圧縮試験時 修正弾性係数 (kgf/cm ²)
	荷重載荷速度 (kgf/cm ² /sec)					
	0.067	2.0	20.0	200.0	600.0	
1 (a)	371,200	368,600	450,600	322,000	389,200	359,500
	336,800	354,000	414,200	375,600	352,300	353,900
	334,400		296,600	341,900		310,200
パッチ平均	347,467	361,300	387,133	346,500	370,750	341,200
2 (a)	296,600	376,500	368,400	368,000	393,000	289,600
	299,500	335,100	328,900	354,000	359,200	351,700
	325,500	333,300	383,600	398,800	389,000	288,900
パッチ平均	307,200	348,300	360,300	373,600	380,400	310,067
3 (b)	375,500	336,600	364,400	369,100	307,500	295,900
	369,800	341,200	363,500	344,300	318,000	338,000
	335,800	298,100	349,900	393,000	385,400	290,300
パッチ平均	360,367	325,300	359,267	368,800	336,967	308,067
4 (b)	330,500	268,100	335,100	313,500	370,100	326,300
	310,200	375,000	357,500	353,400	334,500	285,900
	312,200	432,700	380,000	334,700	341,400	334,000
パッチ平均	317,633	358,600	357,533	333,867	348,667	315,400
平均 値	333,167	347,200	366,058	355,692	358,145	318,683
標準 偏 差	25,990	41,122	38,166	25,268	28,712	27,182
変 動 係 数	0.0815	0.1242	0.1089	0.0742	0.0841	0.0891

次に、図-23(a)に一軸圧縮試験時における圧縮強度と弾性係数の関係図、図-23(b)に一軸圧縮試験時における圧縮強度と修正弾性係数の関係図、図-24(a)に直接引張試験時における引張強度と弾性係数の関係図、図-24(b)に直接引張試験時における引張強度と修正弾性係数の関係図を示す。図より、一軸圧縮強度と弾性係数の間には相関関係が見られ、強度が大きくなるほど弾性係数も大きくなっている。しかし、直接引張試験においてはこのような相関関係は認められず、直接引張強度は弾性係数にほとんど影響されないものと考えられる。

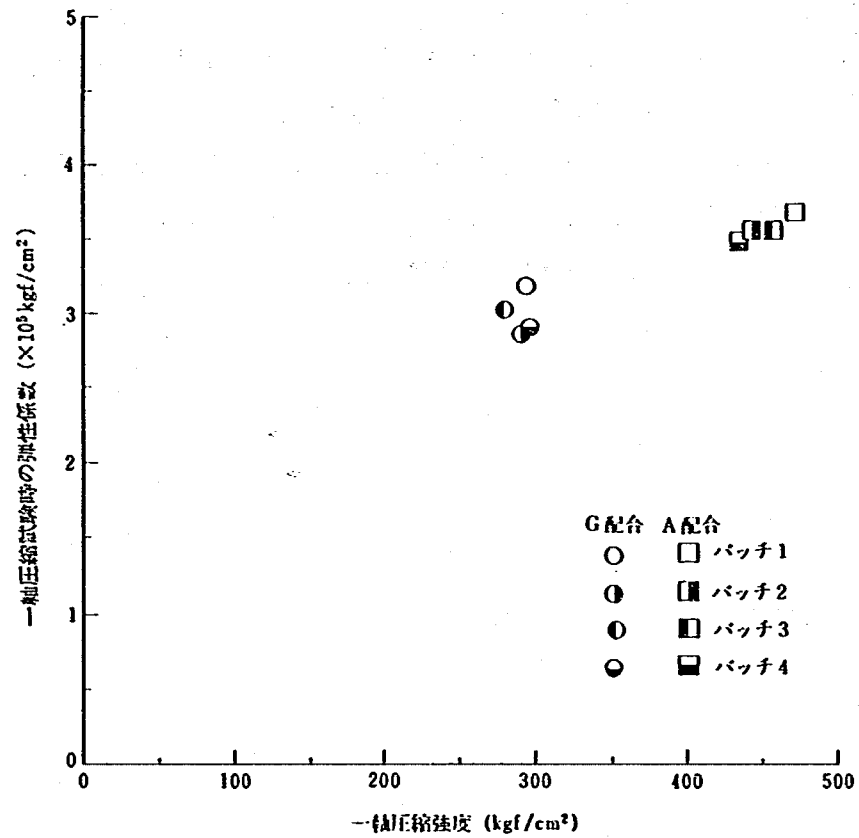


図-23(a) 一軸圧縮試験時における一軸圧縮強度と弾性係数

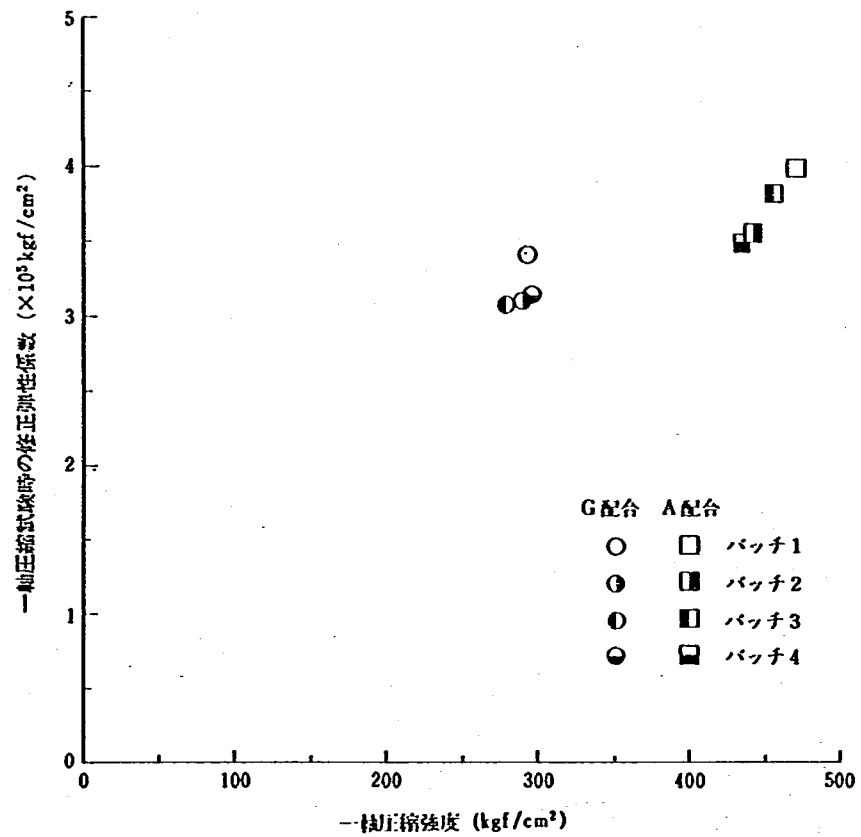


図-23(b) 一軸圧縮試験における一軸圧縮強度と修正弾性係数

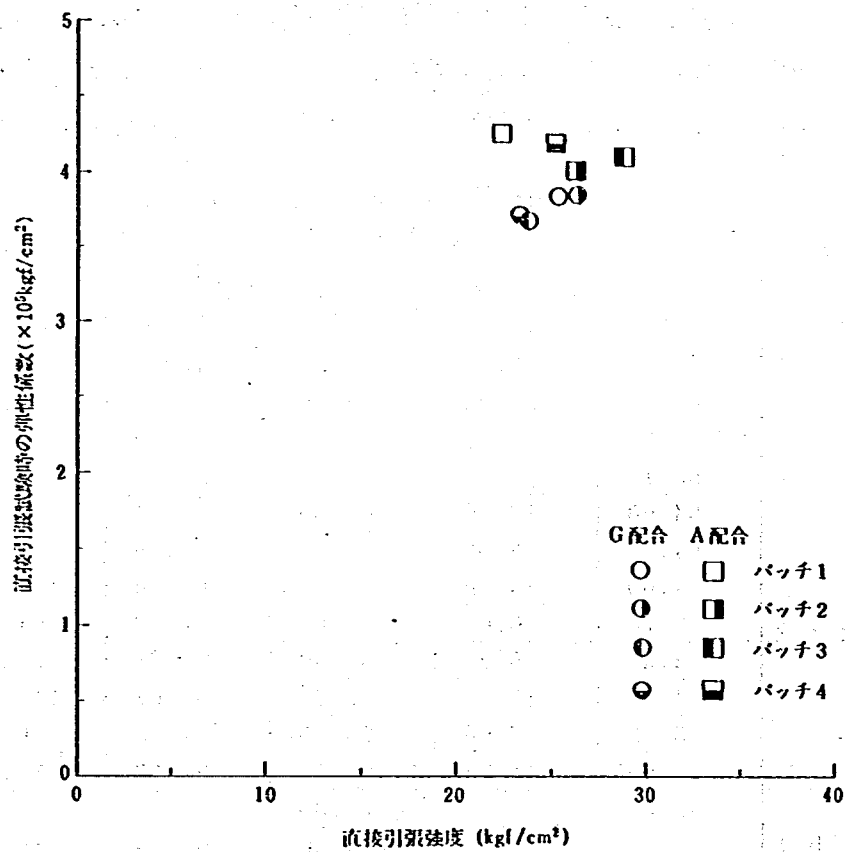


図-24(a) 直接引張試験時における直接引張強度と弾性係数

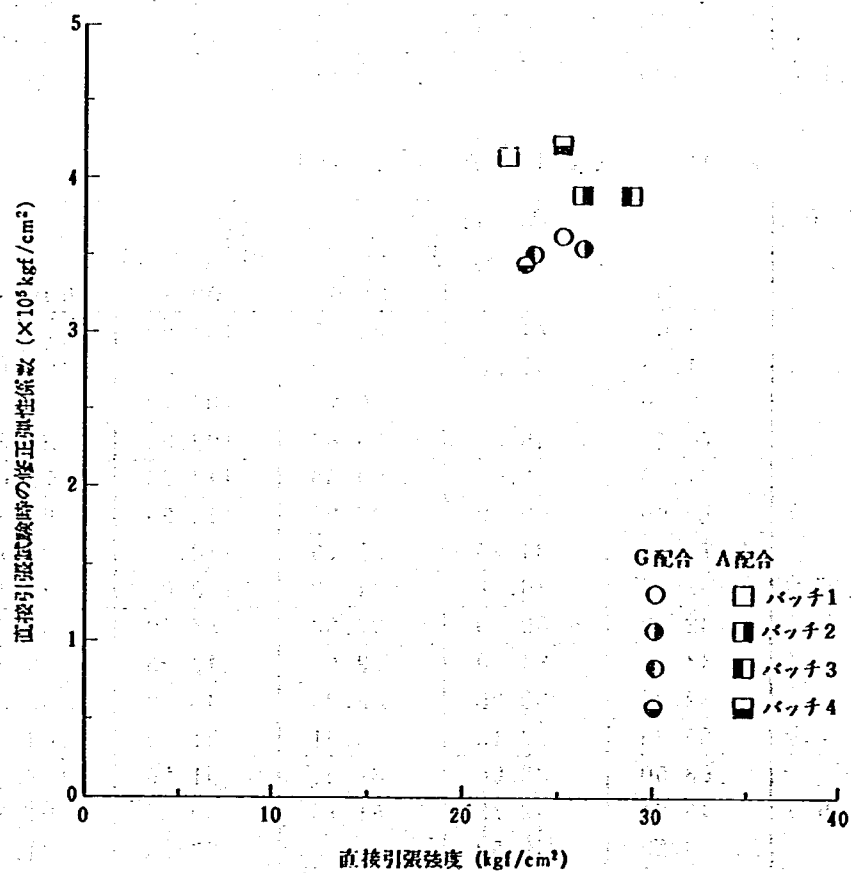


図-24(b) 直接引張試験時における直接引張強度と修正弾性係数

表-11(a)~(b)に直接引張試験時における破壊ひずみを、図-25(a)~(b)に直接引張強度と破壊ひずみの関係図、図-26に破壊ひずみとセメント水比の関係図を示す。図より、両配合とも破壊ひずみの大きいものほど引張強度が大きくなる傾向にあり、よい相関を示している。

表-11(a) 直接引張試験時の破壊ひずみ (A配合)

試験項目 パッチ	破 壊 ひ ず み (μ)				
	荷 重 載 荷 速 度 (kgf/cm ² /sec)				
	0.067	2.0	20.0	200.0	600.0
1 (a)	80.25	62.00	73.50	47.00	89.75
	64.25	22.00	43.50	55.50	74.00
	21.00	89.25		58.00	
パッチ平均	55.17	57.75	58.50	53.50	81.88
2 (a)	54.00	87.00	67.50	91.75	107.30
	64.33	58.50	57.70	94.25	84.00
	91.00	34.50	55.00	61.00	114.50
パッチ平均	69.78	60.00	60.07	82.33	101.93
3 (b)	62.25	75.25	88.50	96.75	57.75
	64.00	83.60	97.75	99.67	113.33
	13.40	78.00	75.25	77.75	90.50
パッチ平均	46.55	78.95	87.17	91.39	87.19
4 (b)	36.50		77.00	81.00	78.50
	34.25		105.30	97.75	48.50
	48.00		94.50	94.50	75.30
パッチ平均	39.58		92.27	91.08	67.43
平均 値	54.83	62.94	96.57	73.13	83.86
標準 偏差	33.24	24.71	25.66	23.62	32.41

表-11(b) 直接引張試験時の破壊ひずみ (G配合)

試験項目 パッチ	破 壊 ひ ず み (μ)				
	荷 重 載 荷 速 度 (kgf/cm ² /sec)				
	0.067	2.0	20.0	200.0	600.0
1 (a)	68.00	74.50	64.75	107.50	72.75
	81.75	62.50	34.00	95.50	92.00
	62.00		68.25	107.50	
パッチ平均	70.58	68.50	55.67	103.50	82.38
2 (a)	81.50	55.00	90.50	114.75	78.00
	89.00	90.00	47.25	114.25	94.75
	79.25	84.75	85.75	110.25	91.75
パッチ平均	83.25	76.58	74.50	113.08	88.17
3 (b)	42.50	89.70	97.00	84.50	85.50
	44.30	84.70	72.67	113.25	26.25
	82.25	63.00	86.25	46.20	82.50
パッチ平均	56.35	79.13	85.31	81.32	64.75
4 (b)	68.50	38.00	87.25	51.50	103.25
	46.25	62.75	81.75	89.25	91.50
	88.50	59.30	28.25	89.75	84.00
パッチ平均	67.75	53.35	65.75	76.83	92.92
平均 値	69.48	69.47	70.31	93.68	82.02
標準 偏差	31.80	22.13	35.90	23.92	22.39

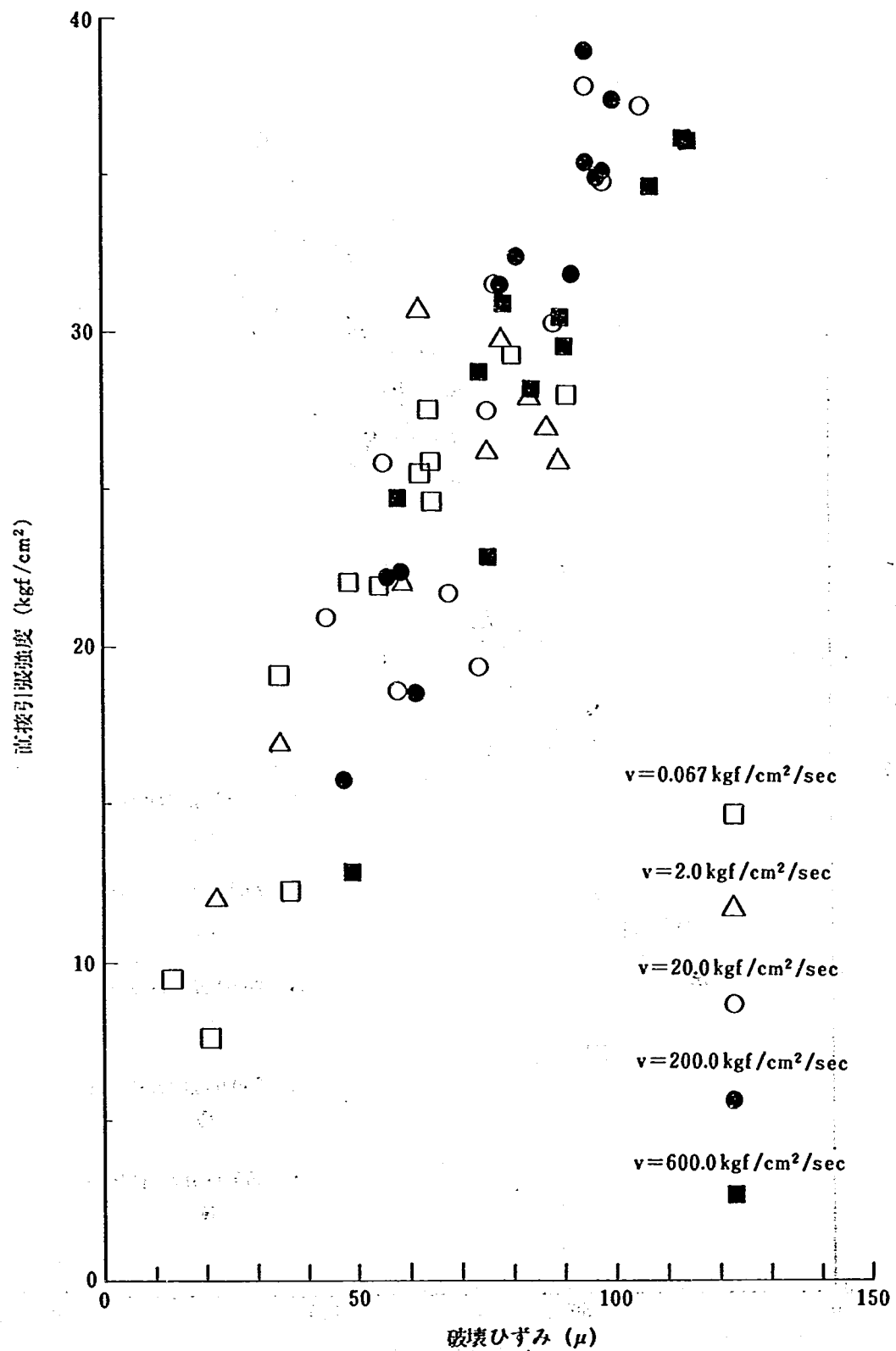


図-25(a) 直接引張強度と破壊ひずみ (A配合)

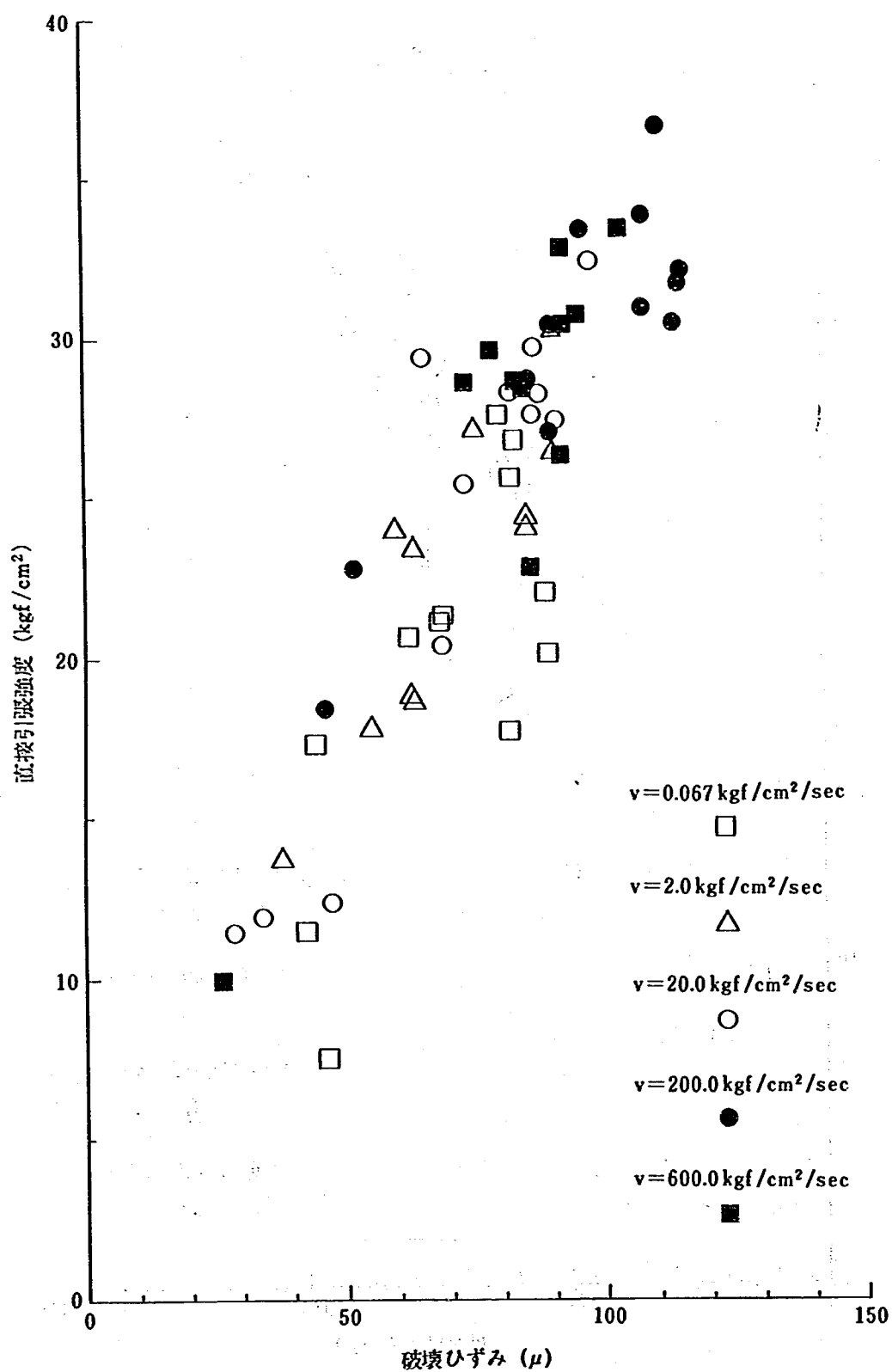


図-25(b) 直接引張強度と破壊ひずみ (G配合)

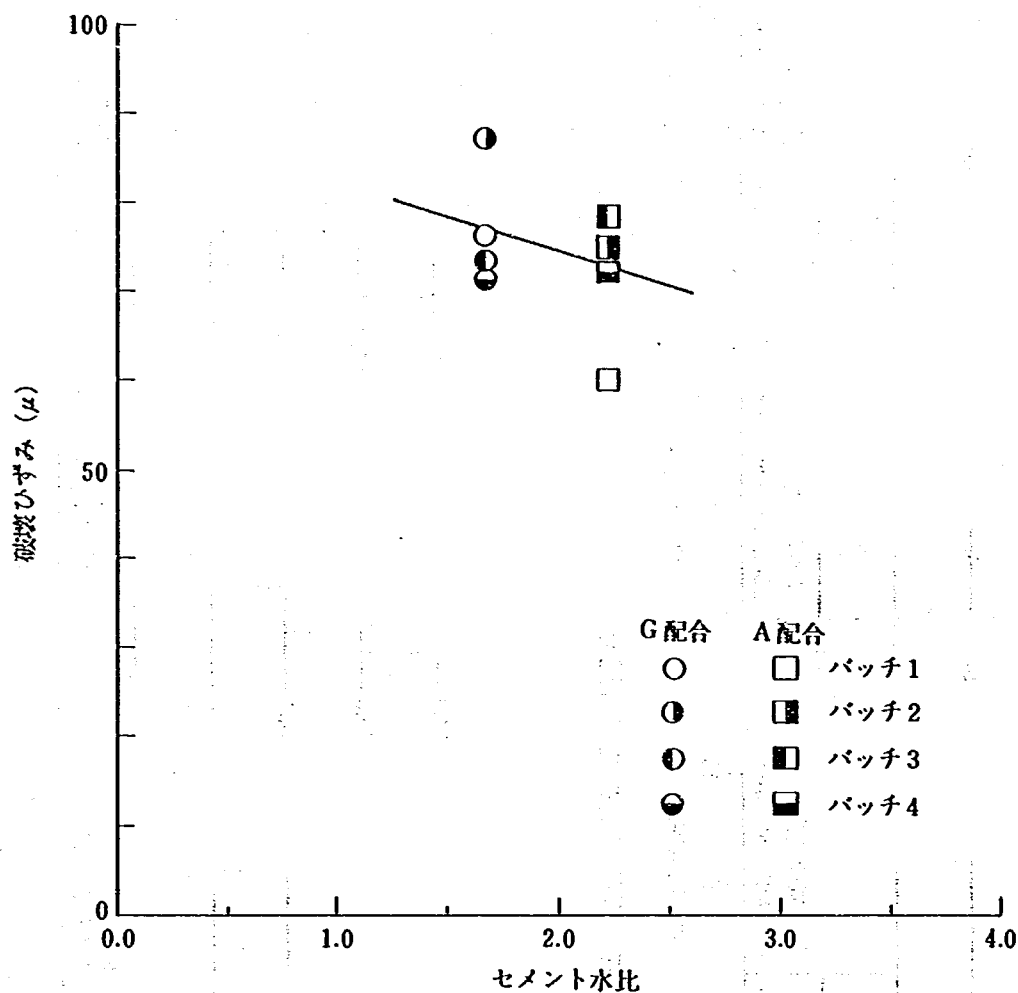


図-26 破壊ひずみとセメント水比

3.3 荷重載荷速度が直接引張強度および弾性係数に与える影響

3.3.1 試験条件

一般に荷重載荷速度が速くなるほどコンクリートの強度は増加するといわれている。そこで、ここでは直接引張試験時の荷重載荷速度と引張強度および弾性係数の関係について検討を加えた。なお、荷重載荷速度は $0.067\text{kgf/cm}^2/\text{sec}$ 、 $2.0\text{kgf/cm}^2/\text{sec}$ 、 $20.0\text{kgf/cm}^2/\text{sec}$ 、 $200.0\text{kgf/cm}^2/\text{sec}$ および $600.0\text{kgf/cm}^2/\text{sec}$ の5速度とした。

3.3.2 試験結果

図-27(a)~(b)に各配合における荷重載荷速度別の破断位置の頻度分布を示す。図より、荷重載荷速度 $0.067\text{kgf/cm}^2/\text{sec}$ ~ $20.0\text{kgf/cm}^2/\text{sec}$ においては破断位置が供試体の中央付近に多く分布しているが、 $200.0\text{kgf/cm}^2/\text{sec}$ ~ $600.0\text{kgf/cm}^2/\text{sec}$ と速くなるにつれて破断位置は供試体全体に分布している。しかし、この理由については原因が不明であり、試験方法に起因するものであるのか、あるいは供試体の破壊機構に起因するものであるのかさらに調査する必要があると考えられる。

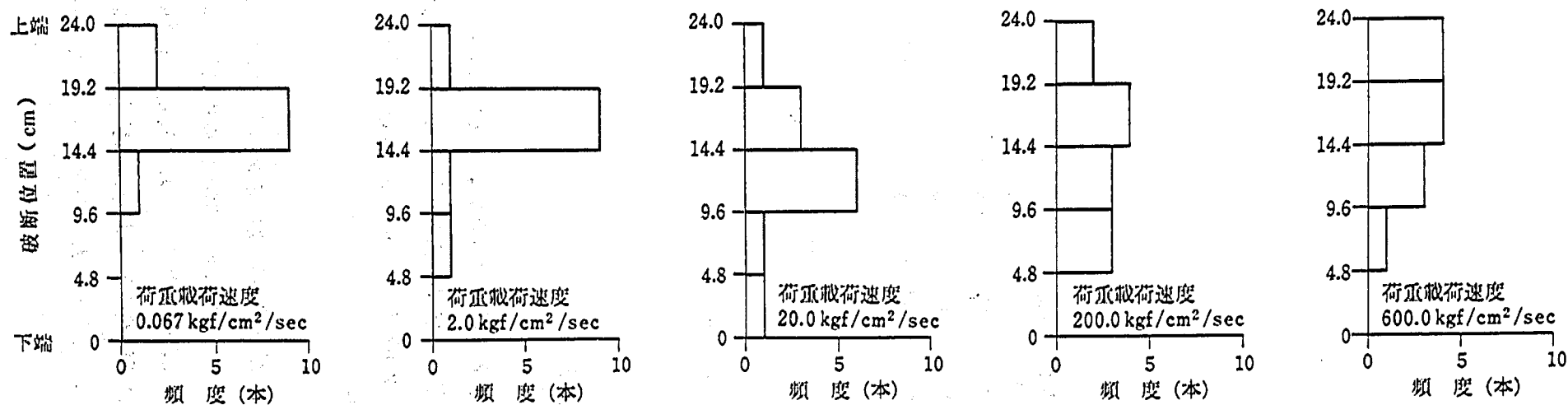


図-27(a) 荷重載荷速度と直接引張強度 (A配合)

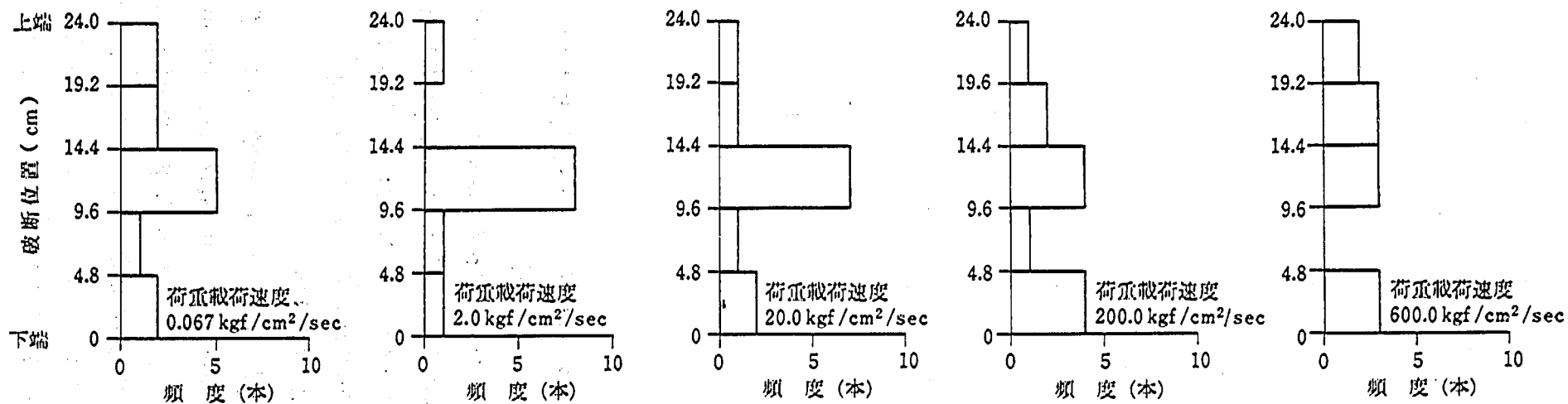


図-27(b) 荷重載荷速度と直接引張強度 (G配合)

図-28(a)～(b)に各配合における荷重載荷速度と直接引張強度の関係を示す。図より、荷重載荷速度が600.0kgf/cm²/secの場合だけは若干低い値を示しているが、全体的に荷重載荷速度が速くなると直接引張強度は大きくなる傾向にある。ただし、荷重載荷速度0.067kgf/cm²/secでの直接引張強度の平均値はG配合で19.97kgf/cm²、A配合で21.04kgf/cm²、200.0kgf/cm²/secでの直接引張強度の平均値はG配合で29.71kgf/cm²、A配合で29.62kgf/cm²とその増分量はそれぞれ約10kgf/cm²、約8.5kgf/cm²であるのに対し、同一荷重載荷速度内での強度のバラツキはG配合で16～23kgf/cm²、A配合で18～23kgf/cm²となっており、バラツキの影響の方がより大きい結果となっている。

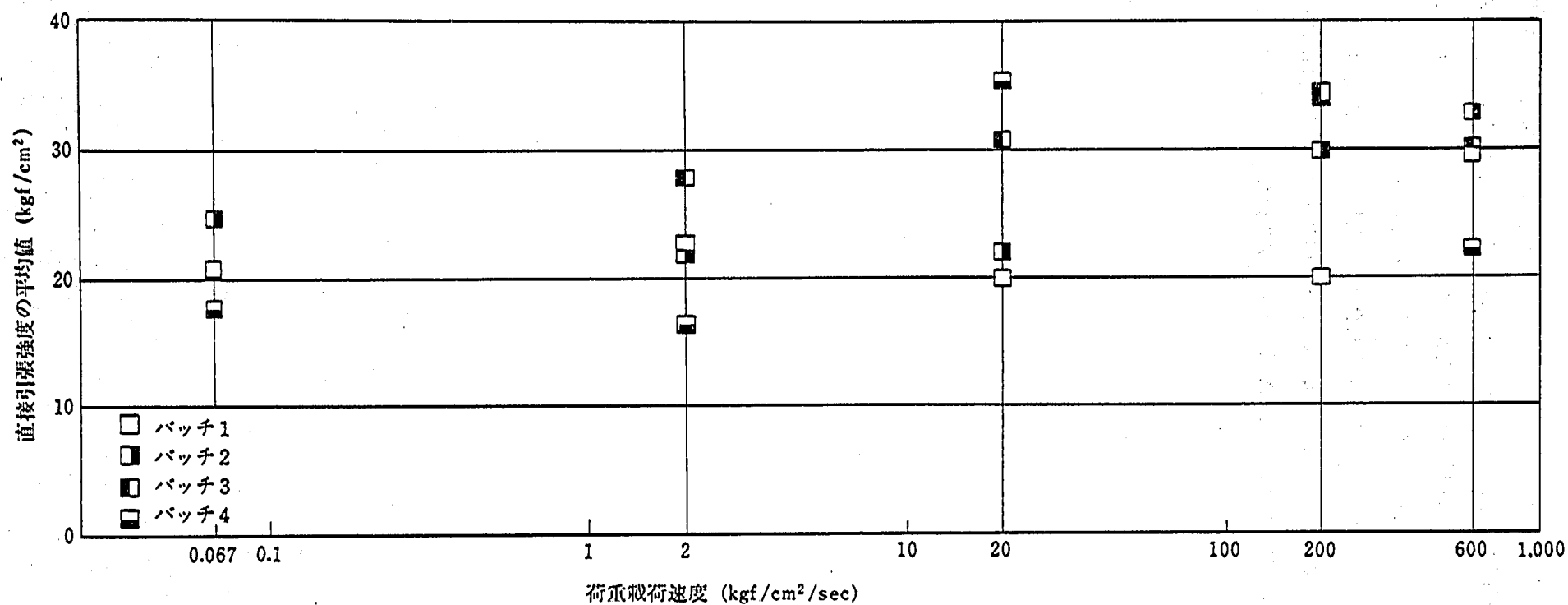


図-28(a) 荷重載荷速度と直接引張強度 (A配合)

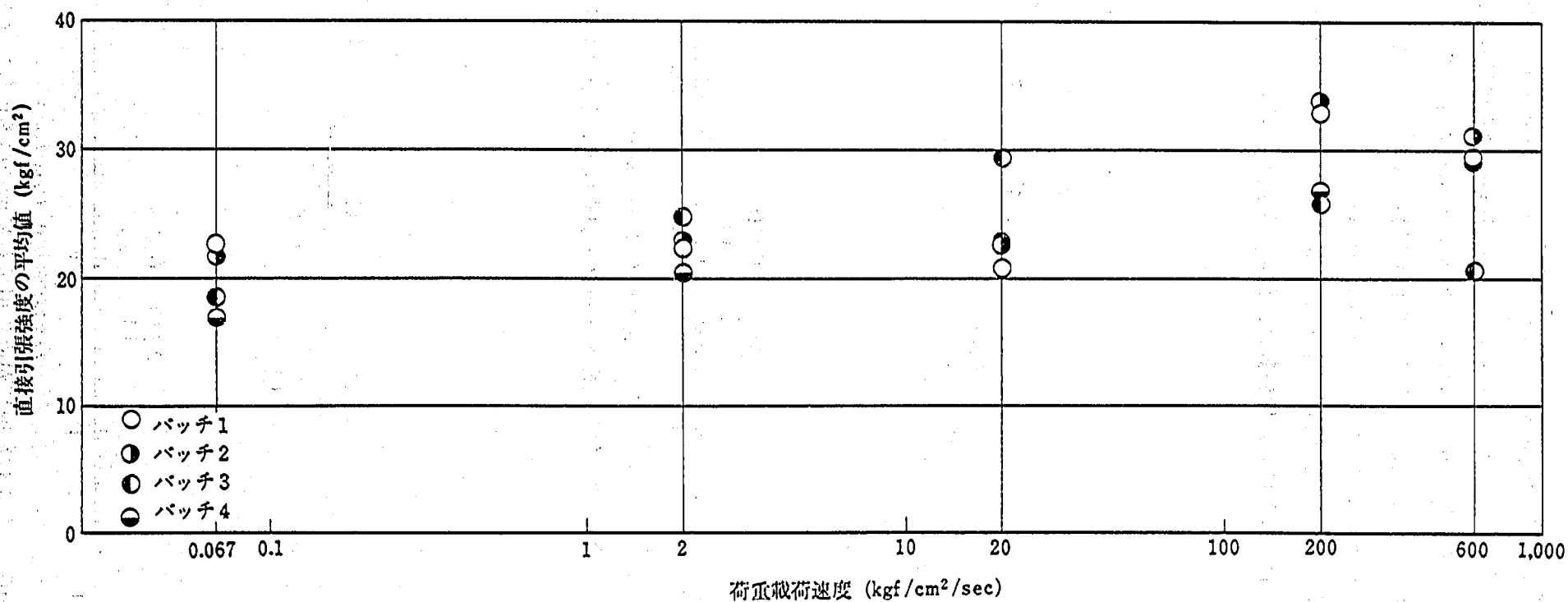


図-28(b) 荷重載荷速度と直接引張強度 (G 配合)

図-29は荷重載荷速度 $0.067\text{kgf/cm}^2/\text{sec}$ における直接引張強度を基準にした場合の直接引張強度の比率を示したものである。なお、ここでは図-28とは異なり、各配合の平均引張強度のみを示してある。図より、荷重載荷速度 $200.0\text{kgf/cm}^2/\text{sec}$ の場合、荷重載荷速度 $0.067\text{kgf/cm}^2/\text{sec}$ の場合に比べて直接引張強度は約40%増加している。また、この試験結果からは、配合によってこの比率は変化しているとはいえない。

次に弾性係数について図-29と同様にして整理したものが図-30(a)~(b)である。図より、直接引張試験時における弾性係数は、荷重載荷速度を変えてもほとんど変化しないといえる。

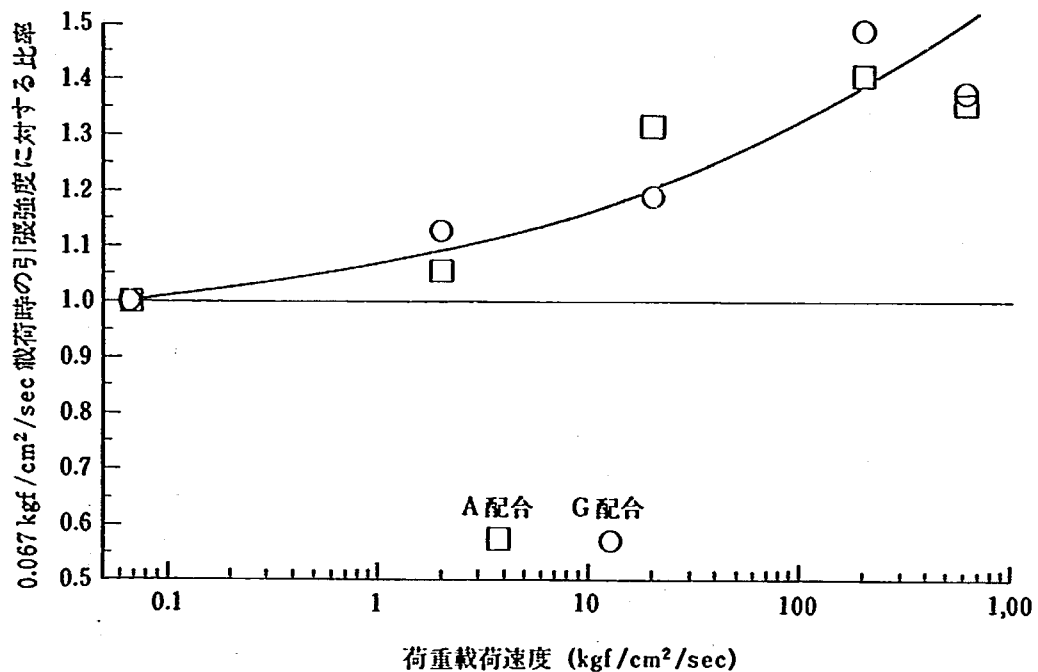


図-29 荷重載荷速度が直接引張強度に与える影響

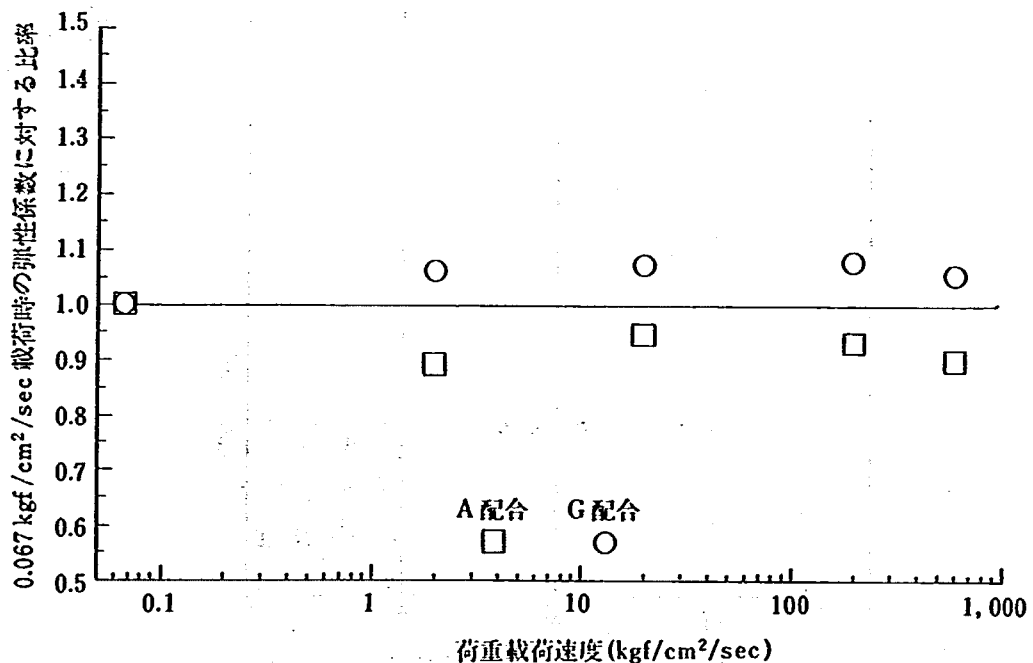


図-30(a) 荷重載荷速度が直接引張試験時の弾性係数に与える影響

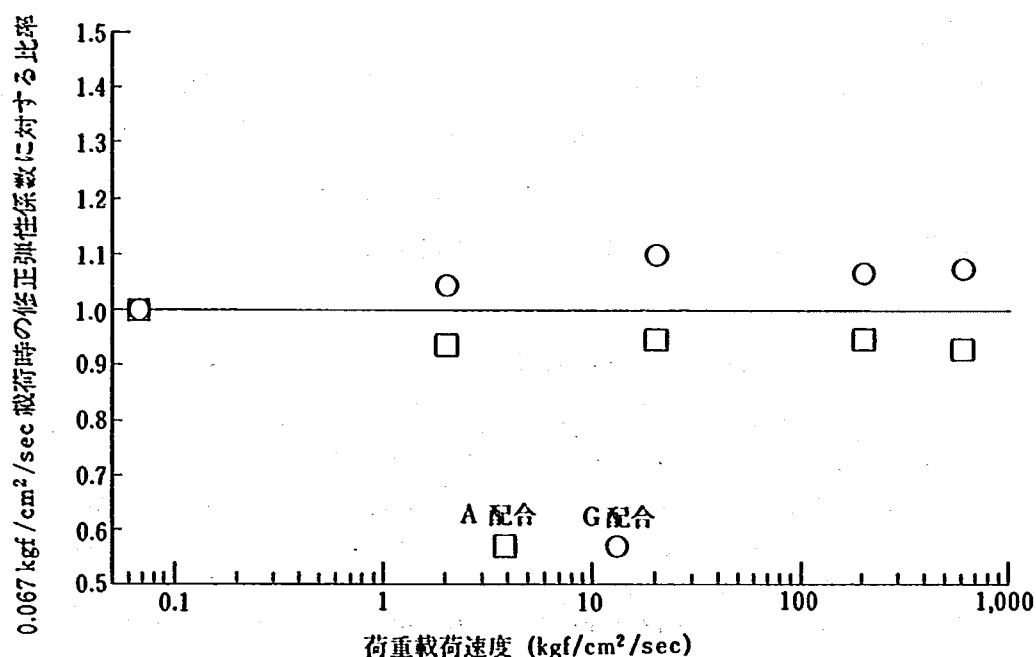


図-30(b) 荷重載荷速度が直接引張試験時の修正弾性係数に与える影響

3.4 荷重載荷方向が引張強度および弾性係数に与える影響

3.4.1 試験条件

直接引張強度が割裂強度に比べて若干小さくなる傾向には、大別して2つの要因が考えられる。1つは、前述したとおり、割裂強度では破壊面を規定しているため平均的な強度が得られるのに対して、直接引張試験では供試体の最も強度の低い位置で破壊することであり、もう1つは、割裂試験と直接引張試験では破壊面の方向が異なることである。すなわち、直接引張試験では標準供試体の打設方向（供試体作製時の鉛直方向）に引張力を作用させることから、粗骨材下面に集まるブリージング等の影響を受けやすく、その結果、引張強度が小さくなり、また、強度のバラツキが大きくなることが予想される。そこで、立方体の供試体を作製し、供試体の荷重載荷方向による影響の検討を行った。

試験に用いた配合を表-12に示す。試験に使用する供試体は、縦15cm×横15cm×高さ15cmの立方体であり、荷重載荷方向を決定した後、接着する面の端部をそれぞれ約15mmずつ切断し、高さ12cmの直方体とした。荷重載荷方向は打設方向と打設方向に直交する方向の2ケースとし、各ケースについて7本ずつ試験を行った。なお、荷重載荷速度は0.067kgf/cm²/secとし、試験材令は概ね220日とした。また、試験時には供試体表面に鉛直方向および水平方向のひずみゲージ（ゲージ長：60mm）を貼り付け、試験時のひずみを測定した。

表-12 コンクリートの配合

Gmax (mm)	W/C (%)	s / a (%)	単 位 量 (kg/m³)					A E (%)	スランブ (cm)	空気量 (%)
			W	C	S	G				
						5~20mm	20~40mm			
40	60	38	145	242	721	770	452	0.018	4.0±1	4.0±1

3.4.2 試験結果

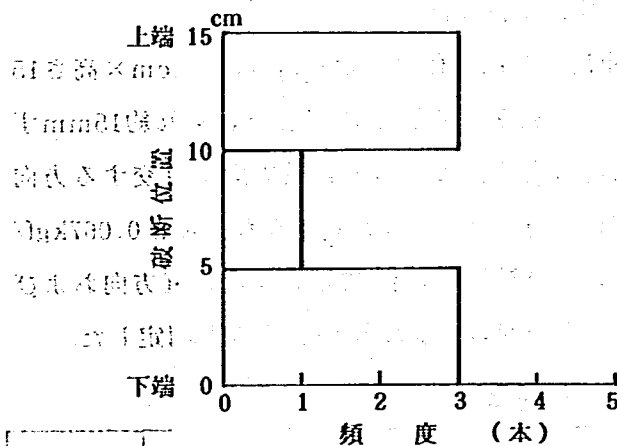
表-13に試験結果の一覧表、図-31に破断位置の分布を示す。図より、打設方向に荷重を載荷した場合の方が、打設方向に直交する方向に荷重を載荷した場合に比べて端面付近で破壊している供試体が多くなっているが、供試体の個数が少ないことを考えると、その原因が荷重の載荷方向に関係しているのかどうかを断定することは難しい。

表-13 載荷方向と直接引張強度、弾性係数および破壊ひずみ

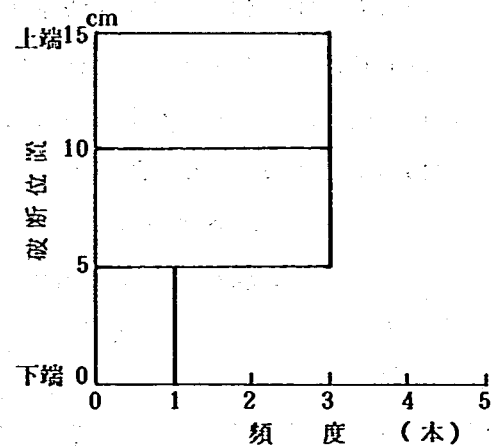
荷重載荷方向	直接引張強度 (kgf/cm ²)	弾 性 係 数 (kgf/cm ²)	修正弾性係数 (kgf/cm ²)	破壊ひずみ (μ)	破 断 位 置	材 令 (日)
打 設 方 向	23.68	323,300	286,800	94.00	上から1/3	221
	22.00	352,000	354,000	66.50	下から1/3	221
	26.62	326,700	319,000	82.50	上から1/3	222
	21.61	353,900	296,900	75.30	下から1/3	222
	25.44	400,000	358,200	75.00	中央1/3	223
	25.32	401,400	350,700	71.75	上から1/3	223
	25.08	304,200	292,300	92.00	下から1/3	223
平 均 値	24.25	351,643	322,557	79.58	—	—
打 設 方 向 に 直 交 す る 方 向	20.18	330,300	339,300	72.25	中央1/3	221
	29.33	326,900	313,900	91.75	上から1/3	221
	28.65	354,700	349,100	85.00	下から1/3	222
	22.15	273,200	268,400	72.75	中央1/3	222
	21.28	260,000	301,000	71.50	上から1/3	222
	28.80	349,000	341,600	84.25	下から1/3	223
	29.82	368,100	345,900	88.00	中央1/3	223
平 均 値	25.74	323,171	322,743	80.79	—	—

中央試験機

試験機



(a) 打設方向に載荷した時



(b) 打設方向に直交する方向に載荷した時

図-31 破断位置の頻度分布

図-32に荷重の載荷方向と直接引張強度の関係を示す。それぞれの平均値で比較すると、打設直交方向に荷重を載荷した場合の方が打設方向に荷重を載荷した場合に比べて約1.5kgf/cm²程度大きくなっているが、データのバラツキが大きく、両者に有為な差があるとはいえない。

次に、図-33(a)に荷重の載荷方向と弾性係数の関係、図-33(b)に荷重の載荷方向と修正弾性係数の関係を示す。図より、弾性係数は打設方向に荷重を載荷した場合の方が大きい、修正弾性係数の平均値で比較するとほとんど同じとなる。

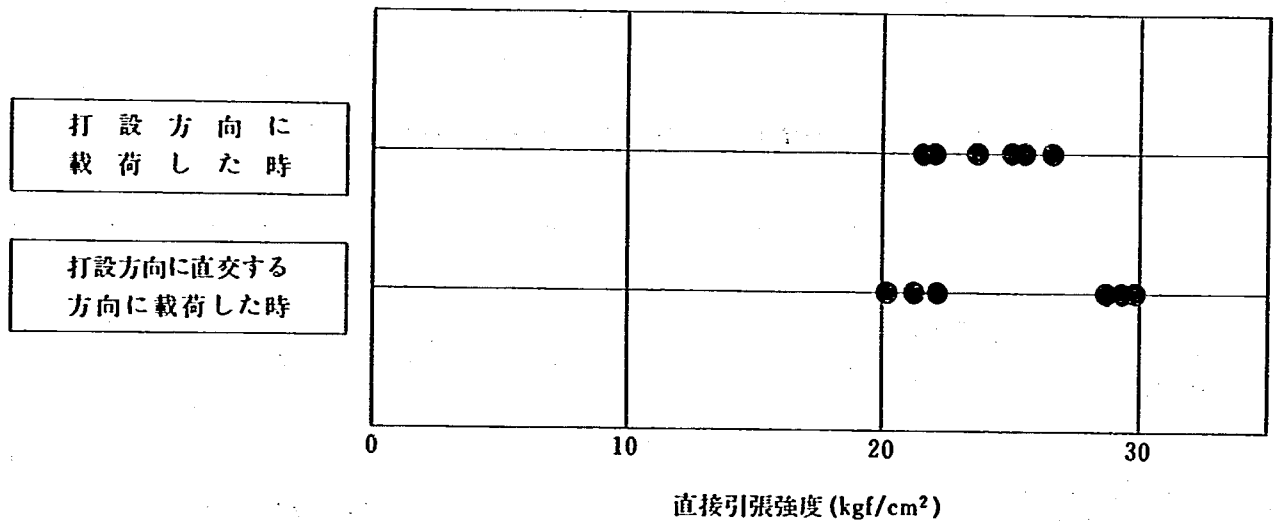


図-32 荷重載荷方向と直接引張強度

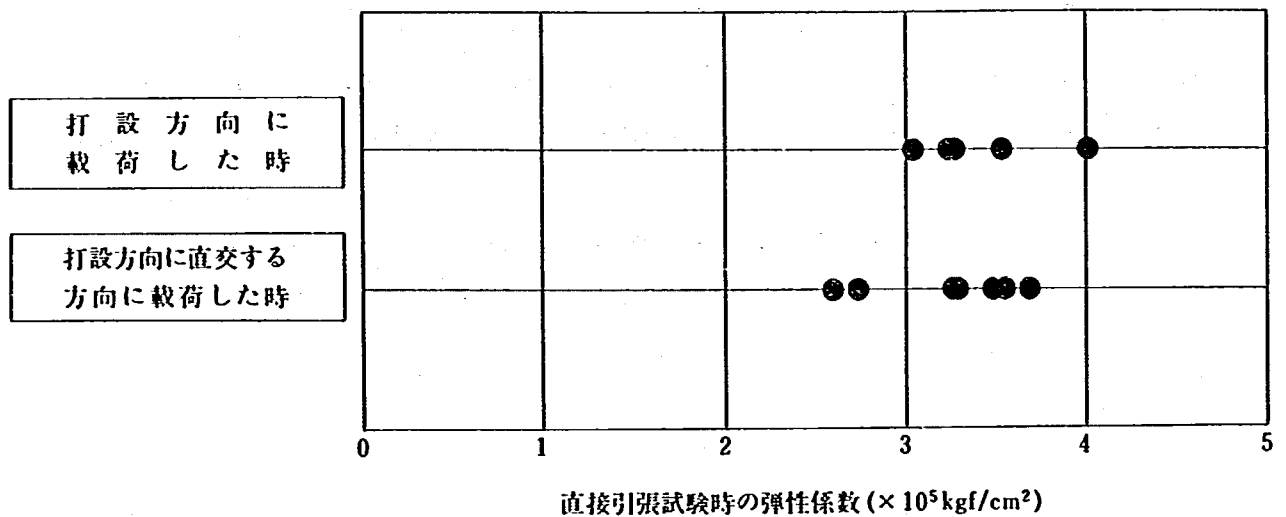


図-33(a) 荷重載荷方向と直接引張試験時の弾性係数

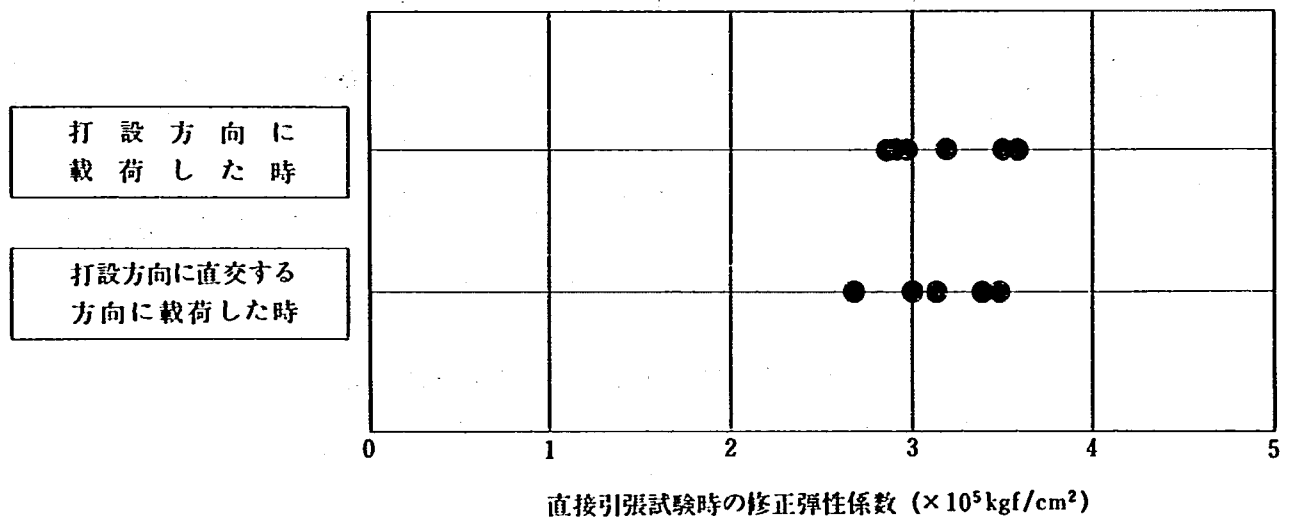


図-33(b) 荷重載荷方向と直接引張試験時の修正弾性係数

図-34に荷重の載荷方向と破壊ひずみの関係図を示す。図より、破壊ひずみも修正弾性係数と同様に荷重の載荷方向によって有為な差は認められない。したがって、これらの状況を総合的に判断すると、この試験の条件下において直接引張強度、弾性係数、破壊ひずみに有為な差は認められず、荷重載荷方向による影響はほとんどないものと考えられる。

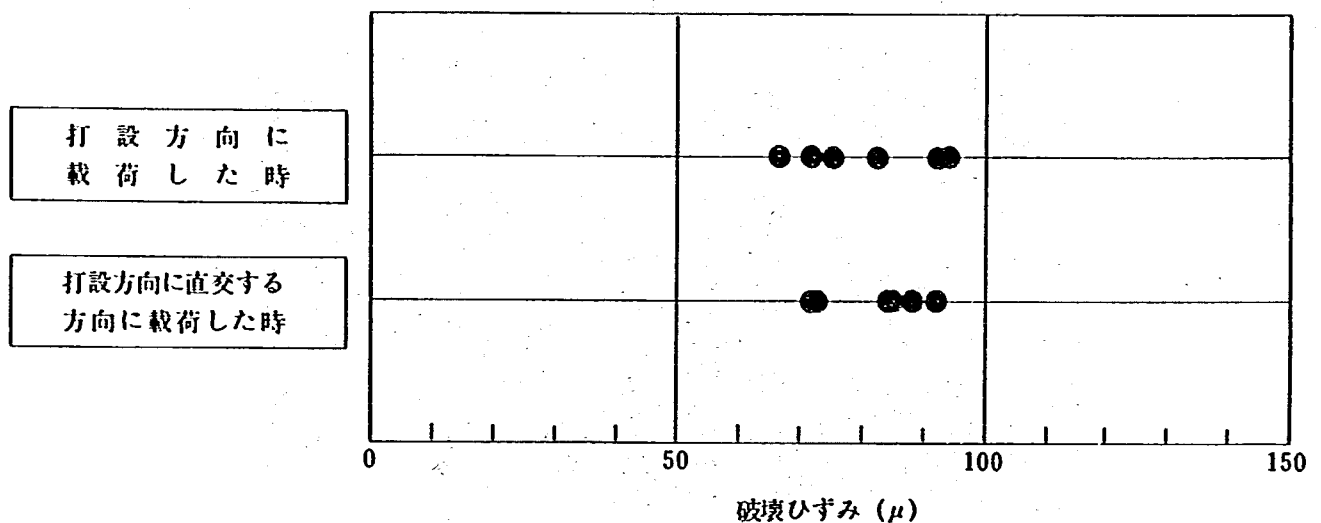


図-34 荷重載荷方向と破壊ひずみ

3.5 打継目の直接引張強度

3.5.1 試験条件

コンクリートは、打継目の数をできるだけ少なくし一体として打設することが原則であるが、コンクリートの温度上昇を抑制するという温度規制上の条件、施工設備の関係から定まる施工能力上の条件から、水平打継目を設けずに堤体を施工することは不可能であり、水平打継目の強度がダムの構造設計上の重要な要素となる。そこで、室内において水平打継目の処理方法を変えて試験を行い、水平打継目の処理方法と引張強度の関係について調査した。

試験に用いたコンクリートの配合を表-14、敷モルタルの配合を表-15に示す。供試体は、直径19cm×高さ19cmの分割式円柱型枠（写真-4参照）を用いて作製した。すなわち、コ

表-14 コンクリートの配合

Gmax (mm)	W/C (%)	s / a (%)	単 位 量 (kg/m³)					A E (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)
			W	C	S	G				
						5~20mm	20~40mm			
40	60	38	145	242	721	770	452	0.018	4.0±1	4.0±1

表-15 敷モルタルの配合

Gmax (mm)	W/C (%)	s / a (%)	単 位 量 (kg/m³)					A E (%)	モルタル ・フロー (cm)	空 気 量 (%)
			W	C	S	G				
						5~20mm	20~40mm			
5	50	100	266	532	1349	—	—	—	15.0±1	4.0±1



写真-4 分割式円柱型枠

ソクリートを分割式型枠の1/2の高さ (9.5cm)まで打設し、24時間湿潤養生した時点で水平打継目の処理を行い、残りの半分を打設した。水平打継目の処理方法は以下に示す3種類とし、比較のため打継目を設けない供試体（以後、一般部という）も同時に作製した。

- ① 先行コンクリートの打設面には何も処理をせず、敷モルタルを厚さ1cmで敷きならして後行コンクリートを打設する。（以後、「敷きモルタルのみ」という）
- ② 先行コンクリートの打設面を水道水で洗い（ブラシ等は使用しない）、敷きモルタルを厚さ1cmで敷きならして後行コンクリートを打設する。（以後、「水洗い+敷きモルタル」という）
- ③ ワイヤブラシを用いて先行コンクリートの打設面のレイタンスを除去し、打設面を水道水で洗浄した後、敷きモルタルを厚さ1cmで敷きならして後行コンクリートを打設する。（以後、「完全処理」という）

また、供試体は水中養生後、上下端面を15mmつつ切断し、所定の試験日の7日前まで水中養生した。なお、試験時の荷重載荷速度は $0.067\text{kgf/cm}^2/\text{sec}$ とした。

3.5.2 試験結果

試験結果を表-15、図-35に示す。図より、「敷きモルタルのみ」と「水洗い+敷きモルタル」の場合には平均引張強度がそれぞれ 3.86kgf/cm^2 、 2.33kgf/cm^2 と小さく、この処理方法では引張強度は期待できない。また、「完全処理」を行った場合の試験結果は、他の場合に比べて強度のバラツキが大きく、最大値では一般部と同程度の引張強度を有するが、最小値では「敷きモルタルのみ」、あるいは「水洗い+敷きモルタル」と同程度になっている。試験後の供試体の破断状況を観察した結果、写真-5に示すように、「敷きモルタルのみ」、あるいは「水洗い+敷きモルタル」のみの場合、供試体の破壊は先行コンクリートと敷きモルタルの付着面で起こっている。しかし、「完全処理」を行った供試体は打継目付近で破壊

表-16 一般部と打継目部の直接引張強度

打継目の処理方法	供試体番号	供試体寸法 (cm)	直接引張強度 (kgf/cm ²)	破断範囲	材令 (日)	平均直接引張強度 (kgf/cm ²)
一般部	8-1-1	φ19.00×16.04	17.92	上から1/3	216	20.75
	8-2-1	φ18.99×16.01	23.11	" "	216	
	8-3-2	φ18.99×16.10	22.84	下から1/3	216	
	8-4-1	φ19.01×16.00	19.11	上から1/3	216	
	11-2-1	φ19.01×16.09	17.97	" "	230	21.68
	11-14-1	φ18.99×16.10	22.28	中央 1/3	230	
	11-9-1	φ19.02×16.11	21.52	" "	230	
	11-3-1	φ18.98×16.12	24.94	上から1/3	230	
完全処理	11-20-1	φ19.01×16.07	12.47	打継目	229	10.95
	11-19-1	φ19.03×16.13	2.87	"	229	
	11-12-1	φ19.01×16.12	11.12	"	229	
	11-10-1	φ19.02×16.06	17.93	"	229	
	11-4-1	φ18.99×16.09	17.69	"	229	
	11-1-1	φ19.00×16.03	3.60	"	229	
水洗い + 敷モルタル	11-11-1	φ19.00×15.89	2.02	打継目	217	2.33
	11-16-1	φ19.01×16.10	2.91	"	217	
	11-8-1	φ19.02×16.15	2.48	"	217	
	11-7-1	φ19.00×16.12	2.43	"	217	
	11-15-1	φ19.00×16.22	1.84	"	217	
敷きモルタルのみ	11-18-1	φ19.00×16.13	4.81	打継目	216	3.86
	11-13-1	φ19.02×16.09	6.05	"	216	
	11-17-1	φ19.00×16.12	2.45	"	216	
	11-6-1	φ19.02×16.20	2.69	"	216	
	11-5-1	φ19.00×15.96	3.28	"	216	

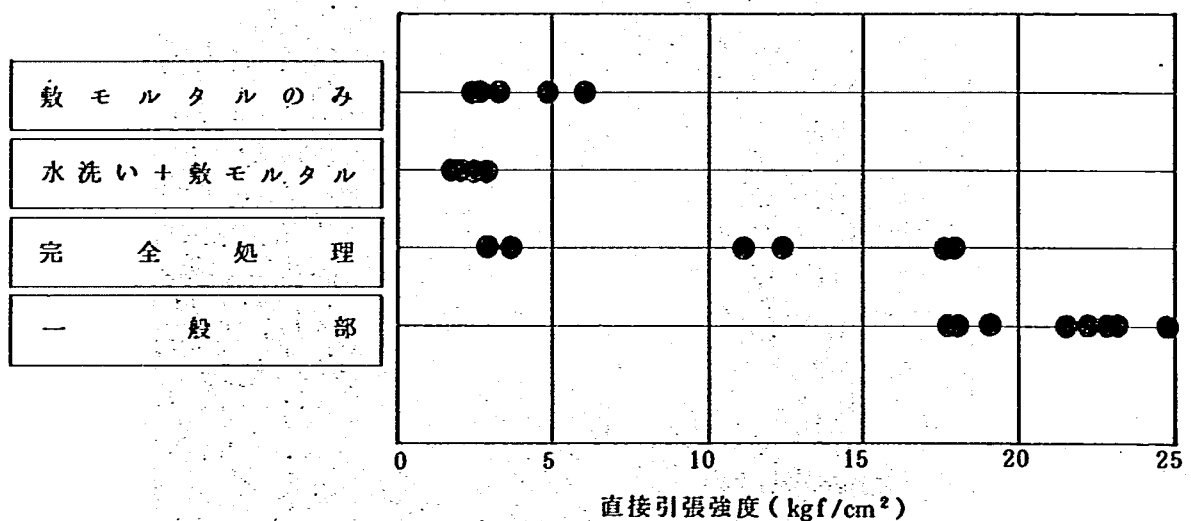


図-35 水平打継目処理方法と直接引張強度

するが、他の処理方法の場合と異なり先行コンクリートの上端部付近あるいは後行コンクリートの打継目付近で破壊が起こり、またその破壊形態は一般部の破壊形態に近い。

「完全処理」の供試体を詳しく観察すると、以下のとおりである。

○供試体番号 11-20-1 破壊強度 12.47kgf/cm²

先行コンクリートの上面で破壊。破断面には粗骨材が現れている。また、円周付近には型枠際でレイタンスが除去しきれなかったと思われる部分が見られる。

○供試体番号 11-19-1 破壊強度 2.87kgf/cm²

後行コンクリートの打継目面で破壊。破断面にモルタルしか現れておらず施工不良と思われる。

○供試体番号 11-12-1 破壊強度 11.12kgf/cm²

先行コンクリート上面付近で破壊。破断面には粗骨材がいくつか見られ、そのうちの1つは破断している。ただし、この骨材は破断面上で茶褐色を呈しており潜在的なクラッ

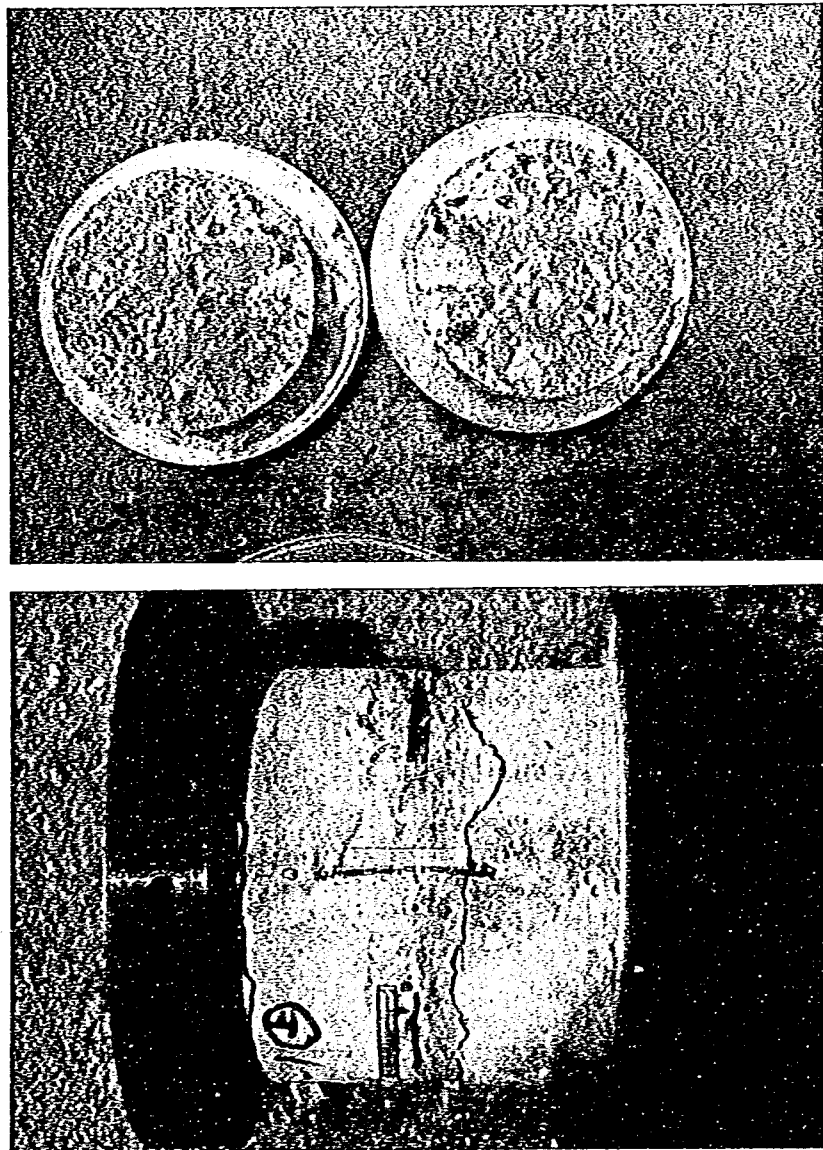


写真-5(a) 完全処理破断状況

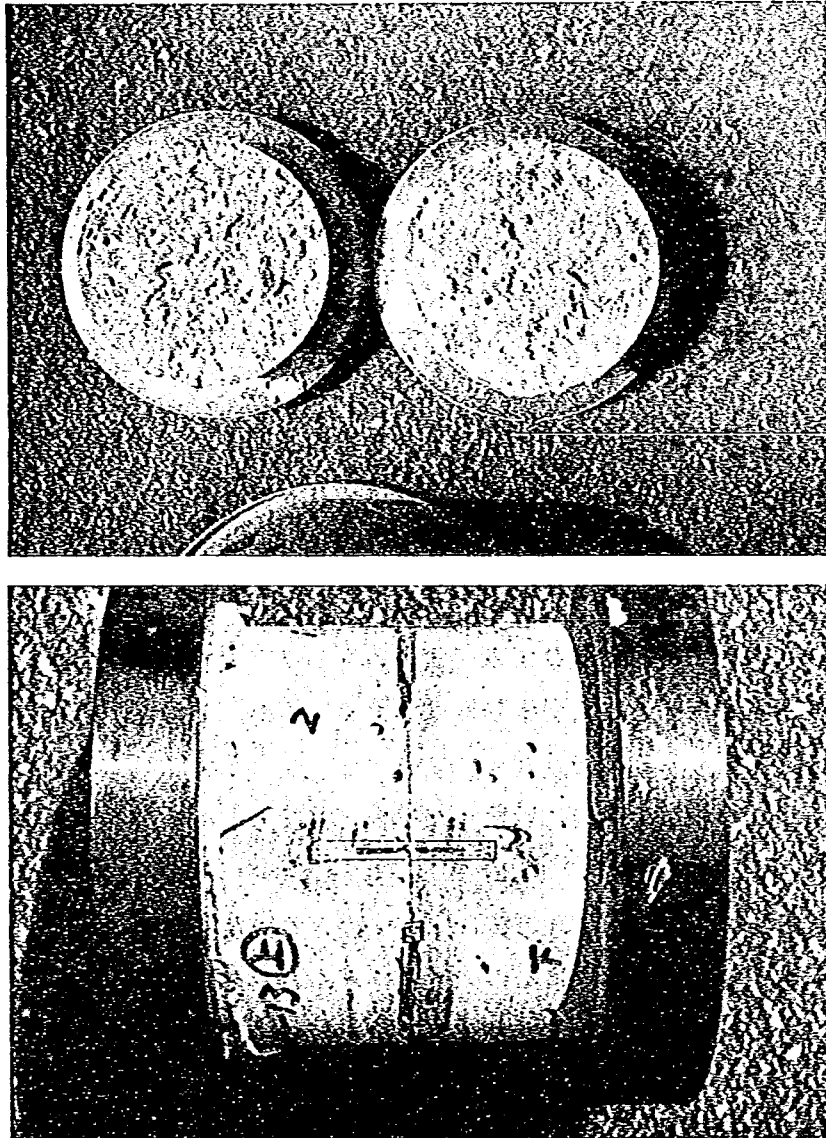


写真-5 (b) 敷きモルタルのみ破断状況

クが存在したものと考えられる。

○供試体番号 11-10-1 破壊強度 17.93kgf/cm²

先行コンクリート上面で破壊。円周付近に型枠際でレイタンスが除去しきれなかったと思われる部分があるが、供試体番号11-20-1のそれよりは少ない。

○供試体番号 11-4-1 破壊強度 17.69kgf/cm²

先行コンクリート上面付近で破壊。破断面は一般部と同様な破断形態を示している。

○供試体番号 11-1-1 破壊強度 3.6kgf/cm²

先行コンクリートの上面付近で破断。破断面には集中して粗骨材下面のブリージングにより剝離した形態を示している部分が存在している。

これらの観察結果を考慮すると、十分なグリーンカットを行い、打設面を洗浄して敷きモルタルを打設すれば水平打継目は構造上の弱面とはならず、一般部と同等の強度が期待できるものと考えられる。

4. ま と め

本検討からコンクリートの引張強度特性を整理するとつぎのとおりである。

- ① コンクリートの割裂引張強度は、一軸圧縮強度と同様にセメント水比が大きくなる（単位セメント量が多くなる）と増大する。ただし、割裂強度の増加の割合は一軸圧縮強度の増加の割合よりも小さい。
- ② 直接引張強度についても、セメント水比が大きくなると若干強度は大きくなる傾向があるが、その量はきわめて小さい。
- ③ 直接引張強度と割裂引張強度を比較すると、直接引張強度の方が割裂強度よりも小さい。
- ④ 直接引張試験時における弾性係数は、セメント水比が大きくなると高くなる。
- ⑤ 同程度のひずみが発生する応力下においては、圧縮状態でも引張状態でも弾性係数の値はほぼ同じである。
- ⑥ 直接引張試験においては、破壊ひずみが大きいものほど引張強度が大きくなる傾向にある。
- ⑦ 荷重載荷速度が速くなると直接引張強度は大きくなるが、その増加量は直接引張強度の変動係数を考慮すると必ずしも期待できない。
- ⑧ 直接引張強度は、打設直交方向に載荷した場合と打設方向に載荷した場合で有為な差があるとはいえない。
- ⑨ 打継目の引張強度は、打継目処理方法によって大きく異なり、「敷きモルタルのみ」、あるいは「水洗い＋敷きモルタル」ではその強度はほとんど期待できない。しかし、十分なグリーンカットを行い、打設面を洗浄して敷きモルタルを打設すれば、一般部と同程度の引張強度が期待できる。

ダムコンクリートの直接引張
強度についての実験的検討

ISSN0386-5878

土木研究所資料第2914

平成2年 (1990)

永山 功, 渡辺 和夫
尾畑 伸之

キーワード : コンクリート, 引張強度, 配合, 圧縮強度, 弾性係数, 載荷速度

要 旨 近年, 動的解析による耐震設計, RCD工法における温度規制など,
コンクリートダムの設計, 施工の合理化の要請に伴って, ダムコンクリートの引
張度を適正に評価する必要性が生じてきている。

本報告書は, 直接引張試験装置を用いてコンクリートの直接引張強度を測定し,
コンクリートの配合, 一軸圧縮強度, 弾性係数, 割裂強度, 荷重載荷速度などと
直接引張強度の関係についてとりまとめたものである。



郵便はがき

四十一円切
手をはって
下さい

3 0 5 - □ □

建設省土木研究所
ダム構造研究室
御中

茨城県つくば市大字旭一番地

No. _____

No. _____

配布先氏名

配布先住所



土木研究所資料第2914号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名

印