

V-8 フライアッシュを用いた貧配合転圧コンクリートの強度特性について

北海道電力 正員 鈴木和男

" 桃井哲次

北海道大学 正員 菅原照雄

1. まえがき

ローラコンパクトコンクリート（以下、RCCと呼ぶ）は、従来のコンクリートに比較して著しく水量を低減した超硬練りコンクリートをローラ転圧により施工するため、舗装工として使用する様な場合には、早期強度が得られ交通開放を早くできる、乾燥収縮が少ない、施工が容易であるなど、いくつかの優れた特質が考えられている。¹⁾しかし、フライアッシュをセメントの代替として大量に使用した場合のRCCについての研究はまだあまり行われていない。

本報告は、フライアッシュを大量（置換率で50～75%）に用いたRCCに関する研究のうち、最適細骨材率（以下、最適S/aと呼ぶ）、単位水量、セメント+フライアッシュの単位結合材量、およびフライアッシュ置換率などの配合条件を変えた場合の室内試験による強度特性について検討した結果をとりまとめたものであり、RCCによる路盤工や各種ヤードなど土木構造物設計上の参考資料として供するものである。

2. 試験内容

2.1 使用材料

セメントは、普通ポルトランドセメントを使用した。

フライアッシュは、表-1に示す様な1種類の国内炭と4種類の海外炭灰を原粉で使用した。

細骨材は、比重2.58～2.67、吸水率2.1～2.8%、および粗粒率2.50～2.93の山砂を使用した。

粗骨材は、比重2.66～2.83、吸水率0.8～2.1%、および粗粒率7.09～7.49の碎石を使用した。最大粒径は40mmとした。但し、試験配合（表-2）のうち⑤配合のみは最大粒径15.9mmとした。試験に用いた骨材の合成粒度は図-1に示すとおりである。

表-1 フライアッシュの化学成分および物理的性質

項目	フライアッシュ名	W ₁	T*	C	I	W ₂
水分(%)	—	—	0.05	0.23	0.28	0.15
強熱減量(%)	—	5.16	1.01	0.90	2.59	1.97
SiO ₂ (%)	—	61.6	61.1	59.2	54.0	—
比重	—	2.17	2.12	2.24	2.13	2.07
ブレン値(ml/g)	—	4,220	3,220	3,310	3,220	3,260
88μm残分(%)	—	5.9	0.6	3.3	4.2	—

* 国内炭フライアッシュを示す。

混和剤は、AE剤としてポゾリスⅧを主体に使用し、1部配合（⑥⑦配合）には、ダーレックスLW-3を使用した。

2.2 配合試験

配合試験は、「RCD工法技術指針（案）²⁾」を参考にVC（Vibrating Compaction）値、S/a、および単位水量との関係から以下の様に行った。

単位結合材量（以下、（C+F）の量と呼ぶ）の最適S/aは、既往資料^{2), 3)}や試験結果を参考に決めた単位水量と（C+F）の量を一定にし、S/aを数回変えたVC試験を行い、VC値の最低値から図-2の様に求めた。

単位水量は、（C+F）の量と最適S/aを一定にし、図-3の様に単位水量を数回変えたVC試験を行い、VC値が20秒に相当する値から求めた。しかし、条件によっては、VC値が20±10秒の範囲内で最適S/aや単位水量を求める場合も

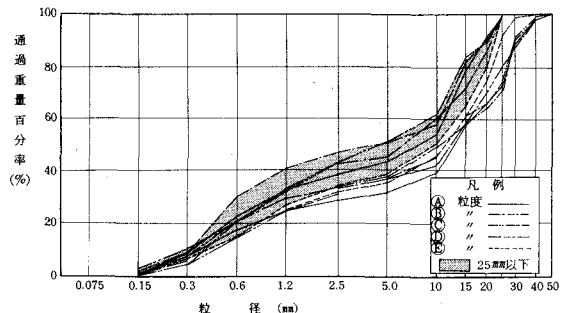


図-1 合成粒度曲線

ある。

以上の方法によって決めた各ケースの配合は表-2に示すとおりとなり、最適S/aは32~38%、単位水量は80~110 kg/m³程度となった。

2.3 供試体の作製方法

強度（圧縮、引張り、曲げ強度など）試験に用いた供試体は、表-2に示す配合を基に1バッチ（50ℓ）ごとに水量、セメント、フライアッシュ、骨材の計量を行い、混練り、VC試験、ウェットスクリーニング、VC試験機による振動締固めの順序で作製した。作製後の供試体は所定材令（7日、28日、91日、182日）まで水中養生（水温20℃）を行った。

なお、配合No.⑮~⑳の引張強度、疲労試験による変形係数測定用供試体は所定材令養生後コアタッカーで高さ8cmに成形した。供試体の作製本数は、各強度試験とも1配合1材令各3本とした。但し、疲労試験による変形係数測定用供試体は11~14本とした。

2.4 強度試験の方法

強度（圧縮、引張り、曲げ強度）、変形係数、静弾性係数および動弾性係数の試験方法は、表-3に示すとおりである。強度試験のうち、配合No.⑮~㉑の変形係数、引張強度試験以外は全て200 tonの万能試験機を用いた。

3. 試験結果と考察

3.1 ウェットスクリーニングによる影響

一連の強度試験は、諸種の事情により25mmでウェットスクリーニングした試料で供試体を作製（圧縮、引張強度試験、変形係数試験はφ10×20cm、およびφ10×8cmの円柱供試体、曲げ強度試験は15×15×53cmの角柱供試体）する事にしたが、強度試験結果を評価する上で、この影響の有無を検討する必要がある。このため配合No.⑮~㉑の4配合で、最大粒径40mmの全粒度コンクリート（φ15×30cmの円柱供試体使用）と25mmでウェットスクリーニングしたコンクリート（φ10×20cmの円柱供試体使用）の供試体を作製し、3材令（28日、91日、182日）の圧縮強度試験を行った。結果は、図-4に示す様に、ウェットスクリーニングによる供試体

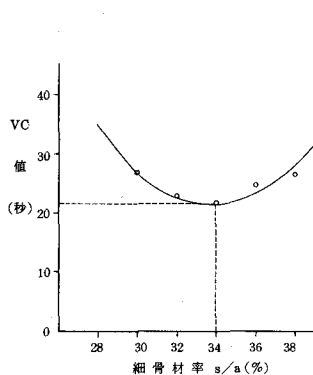


図-2 最適細骨材率の決定
(試験例、配合No.㉑)

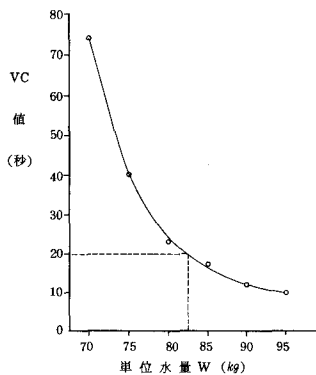


図-3 単位水量の決定
(試験例、配合No.㉑)

表-3 強度試験の方法

試験項目	試験方法
圧縮強度試験	JISA 1108 に準拠して行った。
引張強度試験	JISA 1113 に準拠して行った。但し、配合No.⑮~㉑は北大のインストロン1185型万能試験機で行った。
曲げ強度試験	JISA 1106 に準拠して行った。
変形係数	配合No.⑮~㉑について、インストロン型動的試験機による疲労試験 ⁷⁾ で測定した水平方向変位量と荷重の関係から線形部分の値を求めた。
静弾性係数	圧縮強度試験で測定した縦変と応力の関係から、破壊強度の1/3 応力時の割線弾性係数として求めた。
動弾性係数	JISA 1127 に準拠して行った。

表-2 配合一覧表

配合No.	合成分区分	フライアッシュ名	Fの質換率 (%) F/(C+F)	W/(C+F) (%)	セメント水比 C/W	細骨材率 s/a (%)	単位水量 (kg/m ³)	強度 (%)	備考
							W C F S G		
①	①	---	---	95	1.05	32	114 120 0 688 1,512	C×0.25	
②	②	W ₁	50	88.3	0.57	"	106 60 60 687 1,511	"	
③	③	"	70	85.8	0.35	"	103 36 84 687 1,510	"	
④	④	T	75	32.5	0.77	37	78 60 180 765 1,353	(C+F)×0.25	
⑤	⑤	"	50	104.2	0.48	38	125 60 60 769 1,299	"	
⑥	⑥	C	"	79.2	0.63	37	95 60 60 778 1,375	(C+F)×1.00	
⑦	⑦	"	75	37.5	0.67	90	60 180 728 1,289	"	
⑧	⑧	"	50	32	1.56	36	96 150 150 703 1,303	(C+F)×0.25	
⑨	⑨	"	"	33	1.52	"	99 150 150 714 1,323	---	
⑩	⑩	T*	"	32.7	1.53	"	98 150 150 699 1,295	(C+F)×0.25	
⑪	⑪	---	---	33	3.03	"	99 300 0 718 1,331	"	
⑫	⑫	---	---	67.3	1.49	"	101 150 0 774 1,435	"	
⑬	⑬	C	75	28.3	0.88	37	85 75 225 734 1,299	"	
⑭	⑭	"	62.5	"	1.32	"	86 112.5 187.5 739 1,307	"	
⑮	⑮	"	50	"	1.76	"	85 150 150 741 1,315	"	
⑯	⑯	"	66.7	35.4	0.94	"	85 80 160 760 1,345	"	
⑰	⑰	"	50	"	1.41	"	85 120 120 765 1,353	"	
⑱	⑱	"	75	32.5	0.77	"	78 60 180 765 1,352	"	
⑲	⑲	"	66.7	35.4	0.94	"	85 80 160 760 1,344	"	
⑳	㉑	"	50	"	1.41	"	85 120 120 765 1,354	"	
㉑	㉑	---	---	"	2.82	"	86 240 0 779 1,378	"	
㉒	㉒	I	75	38.8	0.65	"	93 60 180 804 1,364	"	
㉓	㉓	"	66.7	"	0.86	"	93 80 160 802 1,360	"	
㉔	㉔	W ₂	"	34.6	0.96	34	83 80 160 721 1,479	"	

W: 水、C: セメント、F: フライアッシュ、* 国内製フライアッシュを示す。
S: 細骨材、G: 粗骨材。

と全粒度の供試体とも圧縮強度が一致しており、ウェットスクリーニングによる強度への影響は見られなかった。

3.2 圧縮強度

一般にコンクリートの強度に最も大きな関係にあるのは、セメントペーストの水セメント比 W/C 、または、 C/W であると云われている。⁴⁾ そこで、 $(C+F)$ の量がそれぞれ、 120 kg/m^3 、 240 kg/m^3 、 300 kg/m^3 について、フライアッシュ置換率が0と50～75%の全圧縮強度試験データを材令(7日、28日、91日、182日)ごとの C/W と圧縮強度との関係で求めた。結果は図-5～8の実線で示したとおりである。この結果によると、 C/W と圧縮強度との間には、いずれの材令でも相関関係(相関係数は0.8以上)を示している。しかし、材令が7日から28日、91日、182日と経過するに伴って変動が目立ち、相関係数も0.96～0.79と徐々に小さくなる傾向が見られる。これは、フライアッシュを混入した結合材が材令経過に伴ってポズラン反応の影響を受けるため、無混入の回帰直線から逸脱したためと見られる。したがって、材令ごとの両者の関係を、フライアッシュを混入した場合としない場合とに分けて相関関係を検討した。結果は図-5～8の破線(フライアッシュ無混入)と一点破線(フライアッシュ混入、置換率50～75%)で示した様に、フライアッシュを混入した回帰直線はいずれの材令でも直線比例の良い相関性(相関係数は0.9以上)を示す様になり、無混入の場合とは相異した関係が認められる。

表-4は、これらの回帰直線から材令と C/W ごとの圧縮強度を求め、材令7日の圧縮強度を基準にそれぞれの強度発現率を求めた結果である。この結果、フライアッシュを混入したコンクリートは無混入の場合に比べ、 $C/W=1.0$ の場合、材令28日～182で7～47%、 $C/W=1.5$ の場合、17～40%、いずれも高い強度発現率を示している。一方、この傾向は短期材令(7日、28日)でも見られ、フライアッシュを混入した結合材は無混入の場合より高い強度発現率を示している(図-5・6)。これは、ポズラン反応以外の要因が必然的に存在する可能性を示すものである。

現在までの諸研究^{5,6)}を参考に推測すると、フライアッシュ混入によるワーカビリティ確保のために必要な単位水位置量の減、粒度改善(No.200通過材料の補給)などが考えられるが、今後さらに研究を進め明らかにしていく予定である。

なお、材令7日と28日の点線表示(図-5、6)による回帰直線は、セメント協会が行ったAE剤を使用しない一般コンクリートの試験結果⁴⁾を参考に示したものである。この関係は、フライアッシュを混入しない場合の C/W と圧縮強

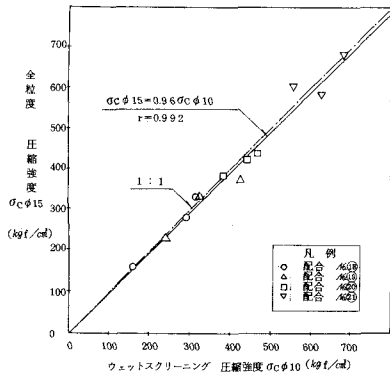


図-4 ウェットスクリーニングと全粒度による圧縮強度の関係

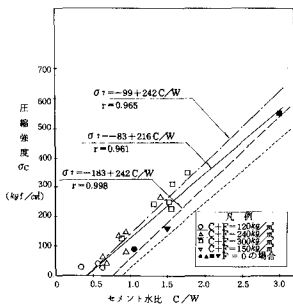


図-5 セメント水比 C/W と圧縮強度 σ_c との関係(材令7日)

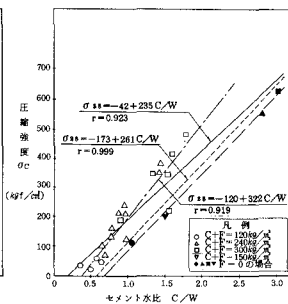


図-6 セメント水比 C/W と圧縮強度 σ_c との関係(材令28日)

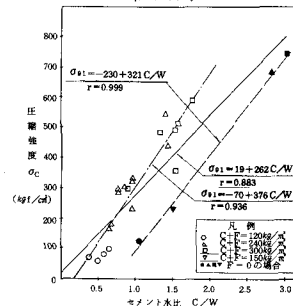


図-7 セメント水比 C/W と圧縮強度 σ_c との関係(材令91日)

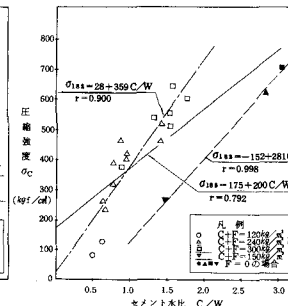


図-8 セメント水比 C/W と圧縮強度 σ_c との関係(材令182日)

度との関係に似た傾向を示している。

3.3 引張強度と曲げ強度

引張強度と曲げ強度は、圧縮強度との間に図-9、10に示す様な両対数上で直線比例の相関関係（相関係数0.93以上）が認められる。圧縮強度が $100 \text{ kg f/cm}^2 \sim 500 \text{ kg f/cm}^2$ の範囲で引張強度は、圧縮強度の $1/9 \sim 1/12$ 、曲げ強度は $1/6 \sim 1/9$ に相当し、一般コンクリートの関係⁴⁾（引張強度は圧縮強度の $1/10$ 、曲げ強度は $1/5 \sim 1/8$ 程度）とはほぼ同じ結果である。しかし、引張強度のうちインストロン1185型万能試験機による値は、JISA1113によって行った値より若干大きめに出る傾向が見られる。これはインストロンによる場合、試験法上で載荷盤の幅を狭くして破壊面を固定させる様に引張応力を生じさせることができるので、供試体内骨材の割裂率がJISの方法による場合より多くなった結果と考えられる。したがって、一連の引張強度試験をこの方法で行うとすると、圧縮強度に対する引張強度の割合はさらに高くなると考えられる。また疲労試験から求めた変形係数は、より実際の値と考えられる。

表-4 強度発現率

C/W	Fの置換率(%)	材令 7日		28日		91日		182日	
		強度・発現率		強度・発現率		強度・発現率		強度・発現率	
1.0	強度(kgf/cm ²)	140	60	205	85	310	90	385	130
	発現率	1.0	1.0	(1.07) 1.5	1.4	(1.47) 2.2	1.5	(1.27) 2.8	2.2
1.5	強度(kgf/cm ²)	265	180	360	220	490	250	565	270
	発現率	1.0	1.0	(1.17) 1.4	1.2	(1.29) 1.8	1.4	(1.40) 2.1	1.5

() 内はフライアッシュ無混入の強度発現率に対する比率。

JISの方法による場合より多くなった結果と考えられる。したがって、一連の引張強度試験をこの方法で行うとすると、圧縮強度に対する引張強度の割合はさらに高くなると考えられる。また疲労試験から求めた変形係数は、より実際の値と考えられる。

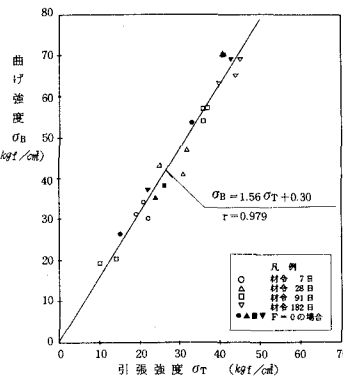


図-11 引張強度と曲げ強度との関係

一方、引張強度と曲げ強度との間にも図-11に示す

様にフライアッシュ混入の有無による相違は見られず、相関関係が認められ、曲げ強度は引張強度の約1.6倍に相当している。

3.4 変形係数、静弾性係数および動弾性係数

変形係数は引張強度、圧縮強度、静弾性係数および動弾性係数との間に図-12、13、14に示す様な相関関係（相関係数0.89以上）が認められる。この結果によると、変形係数は $20 \times 10^4 \sim 30 \times 10^4 \text{ kg f/cm}^2$ の範囲で静弾性係数の74~81%、動弾性係数の45~58%に対応しており、フライアッシュ混入の有無による関係の相違は見られない。

静弾性係数は、図-15に示す様に圧縮強度の対数と直線比例の関係にあり、フライアッシュ混入の有無による相違は見られない。

「コンクリート標準示方書」における不静定力または弾性変形の計算に用いるコンクリートの静弾性係数（標準）と設計基準強度との関係は表-5に示す様な関係になっており、この関係を図15の◎印で表示した結果、回帰直線にはほぼのっており、普通コンクリートの関係と一致

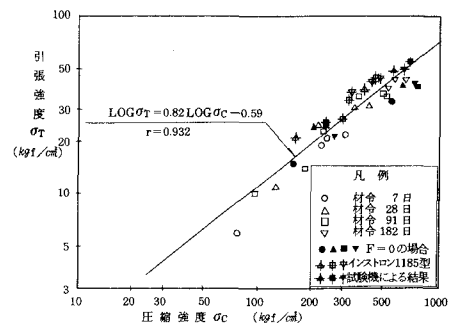


図-9 圧縮強度と引張強度との関係

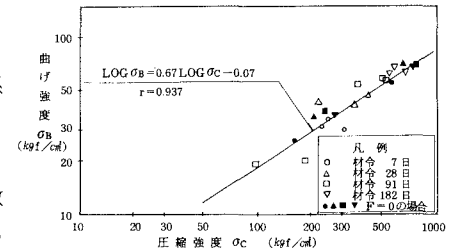


図-10 圧縮強度と曲げ強度との関係

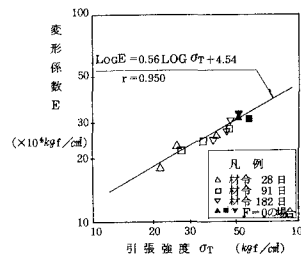


図-12 引張強度と変形係数との関係

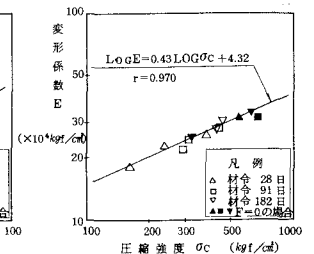


図-13 圧縮強度と変形係数との関係

している。

動弾性係数は、図-16に示す様に圧縮強度の対数と直線比例の関係にあるが、フライアッシュ混入の有無による関係の差が少し見られ、圧縮強度が 500 kg f/cm^2 以上になると、フライアッシュを混入しない動弾性係数の値がやや小さくなる傾向を示している。

静弾性係数と動弾性係数との間には、図-17に示す様な関係があり、動弾性係数は、静弾性係数が $1.0 \times 10^5 \sim 3.5 \times 10^5 \text{ kg f/cm}^2$ の範囲で、静弾性係数の $3.1 \sim 1.4$ 倍に相当している。

3.5 強度破壊歪

圧縮、引張強度などの現象を把握するには、一般に破壊強度から研究を進める方法と破壊歪から進める方法とがあると云われている。そこで配合Ⅷ(⑧～⑪)について行った圧裂法による引張強度試験、疲労抵抗性試験⁷⁾および圧縮強度試験に際して測定した破壊歪(但し、圧裂法による引張強度と疲労破壊歪については、横方向歪と応力の関係がほぼ直線変化をなし、かつ残留歪が僅少であったため、破壊時の応力を変形係数で除して求めた値である。)とこれら破壊強度との関係求めた。結果は図-18～20に示した様に、各強度(引張り、疲労抵抗引張応力、圧縮強度)に対する破壊時の歪は試験区分によって多少異なるが、材令や強度が変化してもほぼ一定の歪になっている。特に疲労破壊歪は平均値で $1.1 \sim 1.2 \times 10^{-4}$ で破線で示した $\pm 1\sigma$ (標準偏差)の中にはほぼ収まっており、フライアッシュ使用の有無などによる大きな変動は見られない。また、試験別に破壊歪の大きさを見ると、平均値で圧縮破壊歪が 2.1×10^{-3} 、圧裂引張破壊歪が 1.9×10^{-4} 、疲労破壊歪が 1.2×10^{-4} となり、圧縮破壊歪はこれらの中で一番大きい、一般コンクリートの最大応力歪(0.2%に近い値)⁴⁾とほぼ一致している。

4. まとめ

フライアッシュを用いたRCCの強度特性について要約すると次のとおりである。

- (1) 最大粒径が40mmのコンクリートと25mmでウェットスクリーニングした試料による圧縮強度試験の結果、両者の値は一致しており、ウェットスクリーニングによる強度への影響はほとんどない。
- (2) C/Wと圧縮強度との関係は、フライアッシュ混入の有無によって相違した関係になる。即ち、フライアッシュを混入した場合は、ポゾラン作用の影響を受け材令経過に伴って強度の発現率が高くなる。
- (3) 短期材令(7日、28日)でもフライアッシュを混入した結合材は、無混入の場合より高い強度発現率を示している。これは過去の研究などを参考に推測すると、ワーカビリティ確保のために必要な単位水量の減、粒度改善などが考えられる。
- (4) フライアッシュを混入しない場合のC/Wと圧縮強度の関係は、混和剤を使用しない一般コンクリー

表-5 設計用静弾性係数
(割線弾性係数)⁴⁾

設計基準強度 (kg f/cm^2)	(単位: 10^5 kg f/cm^2)			
	180	240	300	400
普通コンクリート	2.4	2.7	3.0	3.5

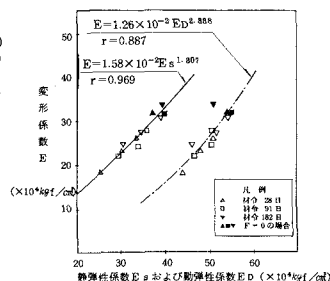


図-14 静弾性係数および動弾性係数と変形係数との関係

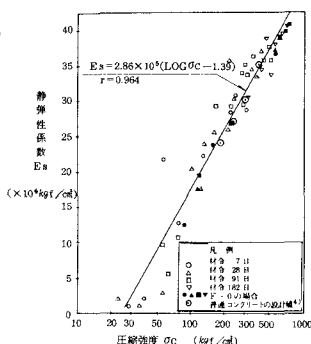


図-15 圧縮強度と静弾性係数との関係

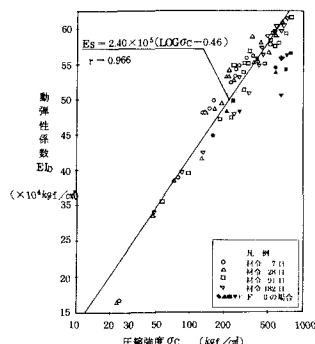


図-16 圧縮強度と動弾性係数との関係

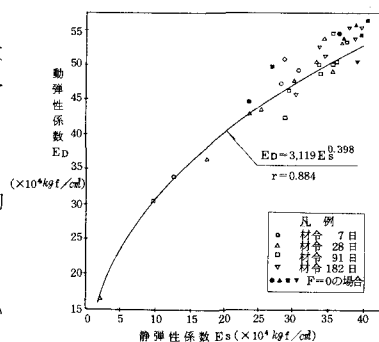


図-17 静弾性係数と動弾性係数との関係

トと似た関係にある。

- (5) 圧縮強度と引張強度、曲げ強度との関係は、フライアッシュ混入の有無によらず、一般コンクリートと似た関係にある。
- (6) 変形係数は引張強度、圧縮強度、静弾性係数および動弾性係数との間に相関関係が認められ、 $20 \times 10^4 \sim 30 \times 10^4 \text{ kg f/cm}^2$ の範囲で静弾性係数の74~81%、動弾性係数の45~58%に対応しており、フライアッシュ混入の有無による関係の相違は見られない。
- (7) 圧縮強度と静弾性係数、動弾性係数との間には、圧縮強度の対数と直線比例の関係にある。また、フライアッシュ混入の有無による関係の相違は見られず、一般コンクリートと似た関係にある。しかし、圧縮強度が 500 kg f/cm^2 以上に大きくなると、フライアッシュ無混入の動弾性係数は、やや小さくなる傾向を示す。
- (8) 各強度（引張り、圧縮強度、疲労抵抗引張応力）に対する破壊時の歪は試験区分によって多少異なるが、材令や強度が変化してもほぼ一定の歪になっており、圧縮破壊歪は一般コンクリートの破壊歪とはほぼ一致している。また、疲労破壊歪は変動が少なく、平均値で $1.1 \sim 1.2 \times 10^{-4}$ で $\pm 1 \sigma$ （標準偏差）の中にはほぼ収まっている。
- (9) 試験条件の範囲内で、各材令（7日、28日、91日、182日）のC/Wと圧縮強度との間には、高い相関関係のある事が解った。また、フライアッシュ混入の有無にかかわらず、圧縮強度と引張強度、曲げ強度、変形係数、静弾性係数および動弾性係数、とにもにおいても相関関係のある事が解った。

参考文献

- 1) 大槻他3名、「転圧コンクリート舗装の試験施工の一例」舗装、昭和63年4月。
- 2) (財)国土開発技術センター、「RCD工法技術指針(案)」昭和56年7月。
- 3) (財)国土開発技術センター、「RCD工法によるダム施工」昭和56年7月。
- 4) 土木学会編「土木工学ハンドブック、中巻、第17編、コンクリート」技報堂、昭和49年11月。
- 5) (財)石炭技術研究所他3社、「石炭灰利用技術振興補助事業試験研究成果報告書」石炭灰の有効利用に関する研究、(黒色灰の利用技術に関する試験)昭和61年3月。
- 6) (財)石炭技術研究所他3社、「石炭灰利用技術振興補助事業試験研究成果報告書」石炭灰の有効利用に関する研究、(黒色灰の利用技術に関する試験)昭和62年3月。
- 7) 鈴木他、「フライアッシュを用いた貧配合コンクリートの疲労抵抗性に関する研究」土木学会第43回年次学術講演概要集、昭和63年10月。

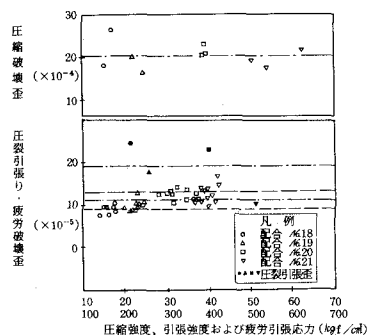


図-18 圧縮強度、圧裂引張強度および疲労引張応力と破壊歪の関係(材令28日)

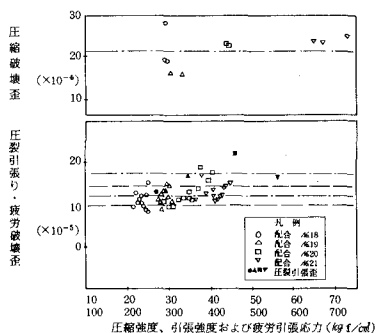


図-19 圧縮強度、圧裂引張強度および疲労引張応力と破壊歪の関係(材令91日)

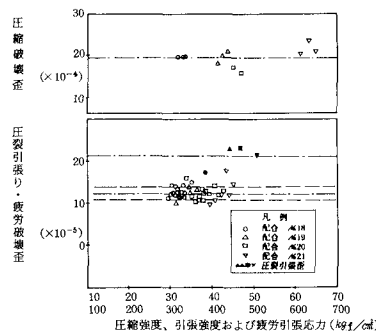


図-20 圧縮強度、圧裂引張強度および疲労引張応力と破壊歪の関係(材令182日)