

正会員 秋元泰輔 (首都高速道路公団第2建設部設計課)

1. はじめに………都市内における高架橋の橋脚は、場所的な制約から断面を大きくとることができず、鋼橋脚が採用される場合が多い。しかし、橋脚の維持管理、経済性、美観などの面からは、一般にコンクリート橋脚とするのがよい。したがって、従来使用されているコンクリートの設計基準強度が一般に300 kg/cm²以下であるのに対し、より高強度のコンクリートを用いて、橋脚の断面を小さくすることができ、コンクリート橋脚の採用範囲を広くすることが可能となるかを研究する必要がある。首都高速道路公団では昭和49年度より以下の手順で研究を行ない、その結果がまとまったので、主な図表およびそれぞれのまとめの概要について報告する。

2. 高強度コンクリートの使用状況の調査、文献収集およびそれらの整理・解析………実際に製造されている高強度コンクリートに関する資料を収集する目的で、コンクリート2次製品、セメント、混和剤、建設会社など12社に、設計基準強度400 kg/cm²～800 kg/cm²程度の高強度コンクリートの使用状況についてのアンケート調査を昭和49年度後期に行なった。若干古い資料で、十分な資料ではないが、整理した結果を簡単に述べると、①単位セメント量は350 kg/m³～600 kg/m³が用いられており、400 kg/m³～500 kg/m³に集中している②水セメント比は500 kg/cm²～700 kg/cm²の圧縮強度に対しては35～40%であり、700 kg/cm²をこえると34%以下となっている(図-3参照)③細骨材率は30～40%の範囲である④空気量は高性能減水剤を用いた場合0～1.5%である⑤500 kg/cm²以上の圧縮強度に対しては高性能減水剤が用いられている⑥資料で得られた力学的性質について単純平均した値を図-2に示す、ということである。文献集収し、検討して整理した結果の1部は以下の報告中に随時示す。

3. 高強度コンクリートを用いた場合の部材の比較設計………高強度コンクリートを用いた場合、部材断面をどの程度小さくできるかを、比較設計を行なって検討した。荷重条件は、地震時における軸方向力1,200 t、曲げモーメント5,600 t^mとし、許容応力度はコンクリートの曲げ圧縮を設計基準強度の1/2、鉄筋はSD40で3,150 kg/cm²とした。鉄筋コンクリートのヤング係数比nは、一般に用いられている15と実際のコンクリートのヤング係数の値を用いた7.5の2種類について検討した。結果を表-1に示す。同表より、nを15とするか7.5とするかでコンクリートの所要強度が大きく異なる。後述のように、nを15として設計した部材の圧縮応力度は載荷実験の結果、計算値の5割増し程度となり、地震時では設計基準強度の70%近い圧縮応力度となるが、この傾向は設計基準強度300 kg/cm²程度の部材にも認められるので300 kg/cm²程度の部材に問題がなければ、高強度についても問題がないわけである。なお、PC部材の場合は、破壊安全度の検討が必要であり、その結果部材断面縮小には効果が少ない。今後RC部材にも破壊安全度の検討が必要になるので、この傾向を調べるために、圧縮強度と終局耐力の関係を図-1に示す。同図より、鉄筋比の増加(図には省略したが、鉄筋の高強度化)ほどではないが、コンクリート強度を増加させると部材耐力も若干大きくなるのが認められ、つり合鉄筋比を大きくすることも考慮に入ると、高強度コンクリートを用いる効果があるのが認められ

表-1 最小断面の比較

構造断面	n	σ_{ck} (kg/cm ²)	断面寸法 (cm)	部材原 (cm)	鋼量 (cm ²)	プレストレス (t)
RC	中実	7.5	400	240×240	—	(37-D51) 750
		15	300	260×260	—	(32-D61) 649
	中空	7.5	600	240×240	35	(38-D51) 770
		15	400	240×240	35	(38-D51) 700
PRC	中実	7.5	600	245×245	—	304
	15	600	220×220	—	500	3500
PC	中実	—	600	275×275	—	8605
	中空	—	600	320×320	35	3965
鋼製	—	—	260×260	3.2	—	—

(注) PCの場合、 $\sigma_{ck}/2 = \sigma_{ca}$ とし、コンクリートの引張強度を40kg/cm²とした。

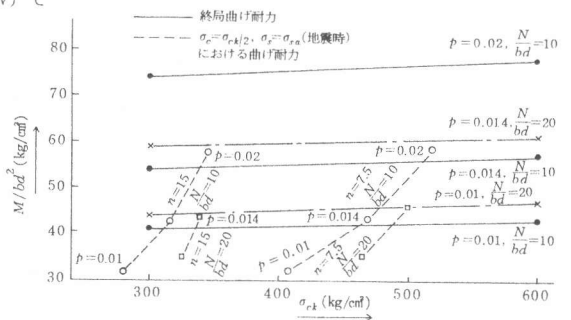


図-1 設計基準強度と曲げモーメントの関係

る。なお、nを7.5とし、高強度コンクリートを用いて断面を小さくし、鉄筋量を減じるのは部材耐力を小さくするので破壊安全度に対して問題がある。また、せん断力に対する設計についても断面が小さくなるので注意が必要である。 nを15とするとRC部材では400kg/cm²程度で、PRC部材にして600kg/cm²程度が高強化の限界と思われる。軸方向力の影響が大きい部材やSD40をこえる高強度鉄筋の使用によっては、より高強度コンクリートが要求されるようになると思われる。

4. 高強度コンクリートの配合、材料特性および施工特性 ……都市内における、一般のコンクリート橋脚の施工と同様に、レデーミクストコンクリートを用いて現場で高強度コンクリートを施工するにあたって、まず高強度コンクリートの配合試験を行なった(スランプ8cm, 単位セメント量400~600kg/m³)。結果を表-2に示す。同表より、600kg/cm²以上の高強度コンクリートには高性能減水剤を用いる必要があるのが認められる。圧縮強度と水セメント比、圧縮強度とヤング係数、圧縮強度と引張強度、などの関係を図-2および図-3に示す(載荷実験結果の資料は表-6および7に示す)。諸強度、ヤング係数はコンクリートの圧縮強度の増加にと

もない、従来用いられている値の延長上にあることが認められる。また、材令6カ月の乾燥収縮およびクリープの試験も行ない、高強度になるほ

表-2 コンクリートの配合試験結果

コンクリートの配合							まだ困まらないコンクリートの性質			圧縮強度 (kg/cm ²)		
単位セメント量 (kg/m ³)	混和剤の種類	W/C (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m ³)			混和剤の使用量 C/kg	スランプ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)	材令 (3供試体の平均値)	
				水	細骨材	粗骨材					7日	28日
400	P-5L	45.5	39.0	182	688	1094	0.25%	7.9	3.4	22.0	361	537
		48.5	41.0	194	711	1039	20cc	9.0	1.5	21.0	384	568
	NL	45.8	40.0	183	705	1074	30cc	8.3	1.5	21.0	457	655
		42.0	40.0	168	721	1097	40cc	8.1	1.4	21.0	479	640
	M	42.5	38.5	170	692	1122	1.2%	7.4	1.5	20.5	515	630
		39.2	40.0	157	732	1088	1.8%	7.0	1.6	21.0	604	804
500	P-5L	38.0	34.0	190	565	1114	0.25%	7.2	2.4	22.0	496	638
		40.0	35.0	200	573	1080	20cc	8.5	1.5	20.5	548	662
	NL	37.4	35.0	187	585	1102	30cc	8.1	1.9	20.0	623	728
		34.4	35.0	172	598	1128	40cc	7.8	1.5	20.0	746	769
	M	36.2	34.5	181	581	1121	1.2%	7.0	1.5	20.0	604	703
		33.6	36.0	168	619	1117	1.8%	7.0	1.3	22.0	680	830
600	P-5L	33.0	29.0	198	452	1124	0.25%	7.7	3.2	22.0	434	630
		35.2	31.0	211	473	1069	20cc	7.8	1.5	22.0	554	629
	NL	33.0	31.0	198	484	1093	30cc	7.4	1.4	21.0	664	731
		31.3	31.0	188	492	1111	40cc	7.0	1.6	21.5	695	697
	M	31.7	28.0	190	443	1156	1.2%	7.2	1.8	21.0	669	815
		29.7	32.0	178	500	1129	1.8%	7.0	1.6	21.0	765	922
27.7	32.0	166	526	1134	2.4%	7.5	1.6	21.0	695	937		

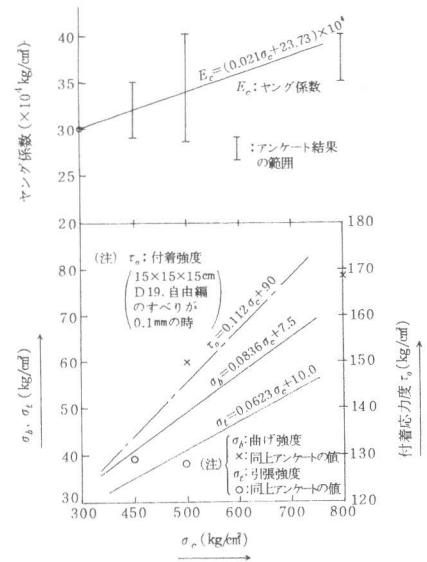


図-2 圧縮強度とヤング係数, 引張強度, 曲げ強度, 付着強度の関係

表-3 示方配合とレデーミクストコンクリートによる試験結果

呼び名	目標強度 (kg/cm ²)	減水剤	W/C (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m ³)					室内試験	現場試験				圧縮強度 (平均, kg/cm ²)			ヤング係数 (×10 ⁵ kg/cm ²)	
					セメント	水	砂	砂利	減水剤		スランプ (cm)	練り混ぜ直後	60分運搬後	温度 (°C)	スランプ (cm)	温度 (°C)	練り混ぜ直後	60分運搬後	練り混ぜ直後
N400	400	P-5L	48.0	40.5	367	176	732	1092	0.918	9.5	10.8	12.0	7.0 (-3.8)	13.0 (+1.0)	301	411	446	3.21	3.24
N500	500	P-5L	45.0	38.5	407	183	676	1097	1.018	6.5	9.0	11.2	7.2 (-2.0)	12.5 (+1.3)	354	483	477	3.31	3.70
M500	500	M-150	49.8	41.5	327	163	778	1113	3.924	7.0	10.8	11.0	6.1 (-4.7)	11.0 (±0)	212	353	365	3.09	2.96
N600	600	P-5L	38.0	34.0	500	190	565	1114	1.250	10.0	7.2	14.0	4.0 (-3.2)	15.5 (+1.5)	462	598	535	3.62	3.50
P600	600	NL-4000	42.0	36.0	476	200	596	1076	10.76	10.0	11.4	14.8	8.5 (-2.9)	15.5 (+0.7)	447	513	536	4.78	4.16
M600	600	M-150	40.6	37.5	426	173	663	1121	5.112	8.6	7.5	13.5	1.7 (-5.8)	19.0 (+5.5)	426	608	654	3.81	3.84
M700	700	M-150	34.3	35.0	539	185	575	1085	6.468	7.5	12.0	15.5	3.0 (-9.0)	16.0 (+0.5)	548	636	641	3.78	3.64
M800	800	M-150	33.7	38.0	460	155	687	1115	11.04	9.0	15.0	16.5	4.7 (-10.3)	16.5 (+1.5)	500	583	648	3.62	3.68

(注) セメント: A社普通ポルトランドセメント; 粗骨材: 砕石, 硬質砂岩; 粗骨材: 粗粒度(山梨県長野産山砂), 粗粒度(利根川産)

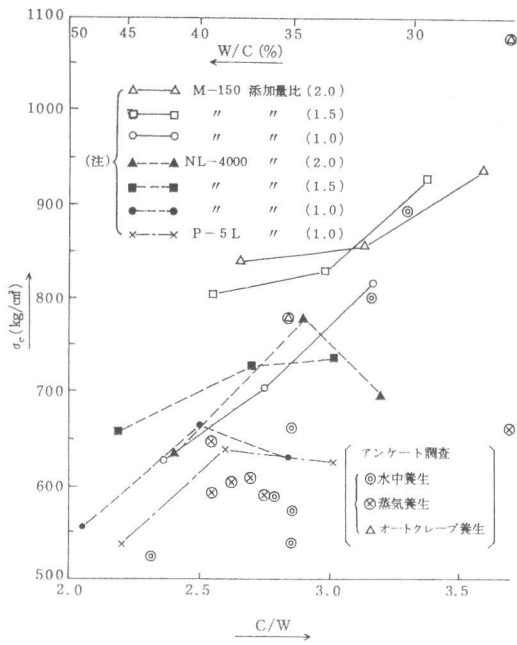


図-3 セメント水比 (c/w) と圧縮強度 (σ_c) の関係

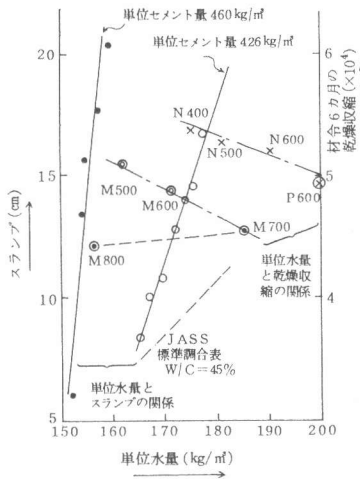


図-5 単位水量とスラブの関係および単位水量と材合6カ月の乾燥収縮の関係

と乾燥収縮が小さくなること

(図-5 参照), クリープは載荷応力比を45%程度で行なった結果から従来のコンクリートと同程度であること(資料省略)が認められた。配合試験により, 実際にレードミキストコンクリート工場で練り混ぜ, 運搬車を用いて練り混ぜ後のコンクリートの品質を調べるための試験に用いる示方配合および試験結果を表-3に示す。同表より, 高性能減水剤を用いたコンクリートのスラブロスが大きく(減水剤の種類にもよるが), しかも高強度になるほど(減水剤使用量が多いほど)その傾向が強いこと, およびレードミキストコンクリートを用いると圧縮強度が650 kg/cm²程度で頭打ちになっていることが認められる。引き続き圧縮強度600 kg/cm²および800 kg/cm²の高強度コンクリートの品質の安定性を調べるための試験を行ない, その結果を図-4に示す。高性能減水剤とセメントの種類に相性があることが認められる。

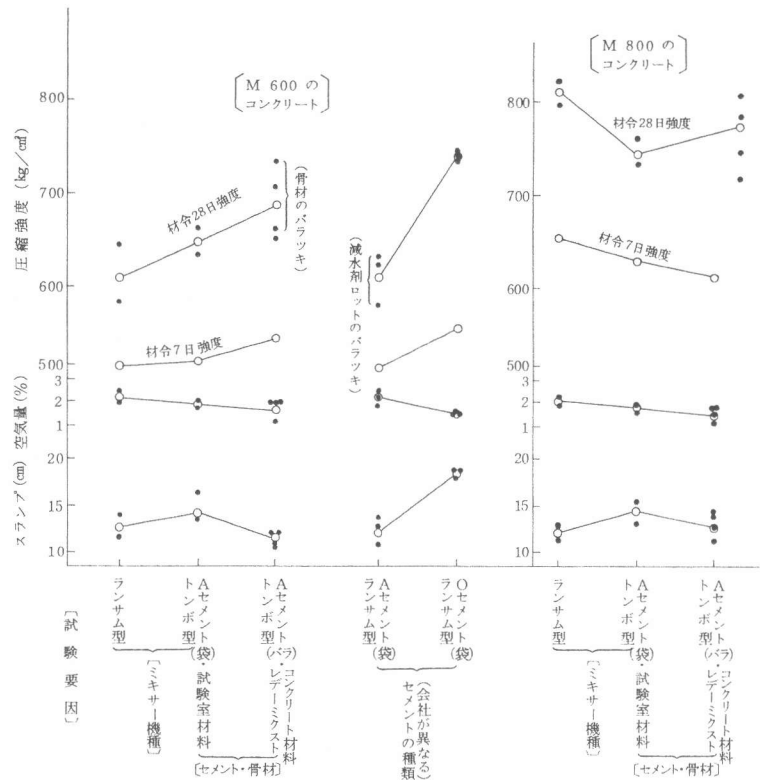


図-4 強度安定性試験結果

表-4 減水剤の添加方法とコンクリートの施工性

コンクリートの重	M-150の添加方法	練り混ぜ直後			遅れ添加直後			荷卸し(60分後)時			圧縮強度 (kg/cm ²) (3供試体の平均)					
		スラブ厚 (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)	スラブ厚 (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)	スラブ厚 (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)	材合7日	材合28日				
M600	1	1	—	—	14.0	2.0	22.5	—	—	—	5.0	1.6	23.0	505	641	
	1	1/2	1/2	—	3.4	1.4	23.0	20.5	1.4	23.0	9.0	1.4	23.0	465	600	
	1	1/2	—	1/2	—	5.7	2.0	22.5	21.6	1.6	22.5	17.0	1.5	22.5	488	612
	1	1/2	—	—	1/2	—	4.0	1.9	23.0	—	—	16.3	1.0	23.0	482	583
	1	1/2	1/4	—	1/4	4.0	1.8	23.0	9.0	1.5	23.0	12.4	1.6	22.5	488	617
	1+C×0.3%	1	—	—	C×0.3%	11.5	2.5	23.5	—	—	—	11.1	1.8	23.0	497	653
	1	1/3	—	—	2/3	2.1	1.4	22.5	—	—	—	14.0	1.3	22.5	507	656
	1	2/3	1/3	—	—	6.6	1.9	22.0	18.7	2.1	22.0	8.2	1.9	22.0	457	598
M800	1	1/2	—	—	1/2	0.7	1.8	24.0	—	—	—	20.3	2.5	24.0	647	838
	1	3/4	—	—	1/4	4.8	1.5	24.0	—	—	—	10.6	1.4	24.0	681	837
	1	3/4	1/4	—	—	4.9	2.1	23.0	13.9	2.1	23.0	6.7	2.0	23.0	695	820

(注) 試験の条件: 20°Cの恒温実験室, セメント製品 (Aセメント)

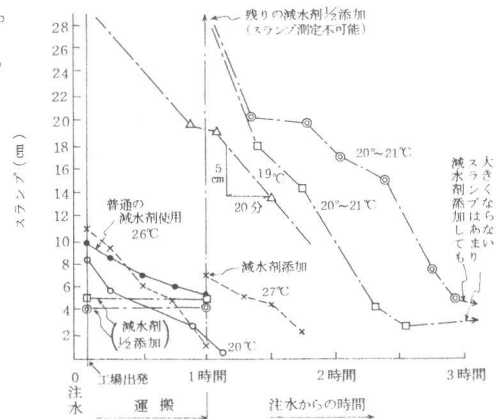


図-6 レードミキスト運搬車を使用したコンクリートのスラブロス

また、単位水量とスランブの関係を図-5に示す。単位水量の管理が従来のコンクリート以上にきびしく行なう必要があることが認められる。高性能減水剤を使用した場合のスランブロスが大きい(低温時に特に大きい)のに対し、遅れ添加の影響を調べたのが表-4である。同表より、ミキサーで練り混ぜられる最低スランブに必要な減水剤をまず入れ、現場で残りの減水剤を入れて遅れ添加を行ない、スランブ調整して施工する必要があることが認められる。添加方法による強度への影響は明確に認められなかった。後述の載荷実験桁の施工にあたってからも同様な傾向が認められ、スランブ調整が現場で必要なことがわかる(図-6参照)。図-6より練り混ぜ後1時間たつとスランブロスも大きく施工性が悪くなり、遅れ添加をしても練り混ぜ後2時間以内にはコンクリート打込み完了にするのがよいと思われる。なお、施工にあたりワーカブルなスランブは10~15cm程度であった。

5. 高強度コンクリートを用いた部材の載荷実験……………高強度コンクリートを用いたRC部材の設計に関する諸資料を得るために載荷実験を行なった。供試体の形状寸法・載荷方法および実験結果を表-5に示す。同表より、圧縮強度600 kg/cm²のコンクリートを用いた部材は、鉄筋コンクリートのヤング係数を6~7とすると計算値とよく一致すること、たわみ性状は圧縮強度400 kg/cm²と600 kg/cm²の部材間では差が認められなかったこと、最大ひびわれ幅は従来のコンクリートの場合より若干小さ目であること、終局耐力は従来使用されている方法で算定できること、などが考察される。なお、圧縮強度600 kg/cm²のコンクリートの応力-ひずみ曲線はひずみが0.3%で最高応力度になり、終局ひずみは0.4%で、最高応力度の90%程度の応力度となる形状を示した。

本研究は、東京都立大学の村田教授の御指導のもとに、オリエンタルコンサルタンツ、日本コンサルタンツの方々の御協力を得て行なったものである。(参考文献) 土木学会年次学術講演会第31回, 第32回; 首都高速道路公団「技限」第8号, 第9号, 第10号

表-5 載荷実験結果

供試体	A	B	①	②	③ ^{注1)}	④	⑤	
断面形状								
供試体形状	420×500×4200	300×500×4200			460×460×5000		460×460×3800	
載荷位置								
コンクリート強度(kg/cm ²)	400				600			
軸方向鉄筋径		D19 D51	D51			D35		
全軸方向鉄筋比(%)	3.02	3.99	6.59			8.53		
主引張鉄筋比(%)	2.35		3.30			2.66		
主圧縮鉄筋比(%)	0.67	0.70	3.30			2.66		
スターラップ比(%)	曲げ区間	0.24	0.34			0.22		
	せん断区間	0.86	1.20	1.32		1.57	0.28	
軸方向力(kg/cm ²)	0	0	0	0	20 ^{注2)}	0	0	
δ_u/δ_y ^{注3)}	2.7	3.0	4.2以上	2.3	2.4	3.2	—	
曲げひびわれ発生荷重(t)	測定値	9	9	10	7.5	12.5	10	5
	計算値 ^{注4)}	12.1	10.9	5.9	7.2	11.3	6.8	10.8
最大曲げひびわれ幅(mm)	測定値 ^{注5)}	0.22	0.19	0.23	0.16	0.17	0.20	0.17
	計算値 ^{注6)}	0.32	0.27	0.27	0.21	0.21	0.21	0.21
斜めひびわれ発生荷重(t)	測定値	37	34	38	60	85	600	60
	計算値 ^{注7)}	33.7	42.1	47.0	58.4	67.2	51.6	65.6
終局荷重(t)	測定値	78	77	81	112	114	73	135 ^{注9)}
	計算値 ^{注7)}	83	82	81	107	114	71	101
逆算ヤング係数比 ^{注10)}	コンクリート	8.4	6.5	6.7	6.2	6.1	6.6	5.5
	圧縮鉄筋	10.5	—	6.7	6.2	6.4	6.3	8.2
	引張鉄筋	15.0	11.6	5.3	7.5	7.3	—	7.5

(注) 1) ③の供試体は処女載荷により一度引張主鉄筋を降伏させた後反対載荷を行ない耐力を確認する。

2) 載荷時供試体に実際に作用した軸方向力は16 kg/cm²であった。

3) δ_u : 上縁コンクリート圧縮時のたわみ,
 δ_y : 主鉄筋降伏時のたわみ

4) 鉄筋, 軸方向力考慮: $\sigma_{ct} = 37 \text{ kg/cm}^2$ (Ⓐ), 47 kg/cm^2 (Ⓑ), 29 kg/cm^2 (①~⑤)

5) 引張主鉄筋応力度 $\sigma_s = 2,000 \text{ kg/cm}^2$ 時(測定値)

6), 7) ACI Code 318-71

8) コンクリートの応力度ひずみ図: 放物線

コンクリートの終局ひずみ: 3500×10^{-6}

鉄筋降伏強度: 3900 kg/cm^2 ,

$\sigma_c = \begin{cases} 460 \text{ kg/cm}^2 \text{ (Ⓐ)} \\ 660 \text{ kg/cm}^2 \text{ (Ⓑ)} \\ 600 \text{ kg/cm}^2 \text{ (①~⑤)} \end{cases}$

9) せん断破壊

10) 材料試験によるn値は6.6

表-6 鉄筋の引張試験の結果 (3本の平均)

径	降伏強度	引張強度	ヤング係数
D51	kg/cm ² 3900	kg/cm ² 5900	kg/cm ² 1.9×10^6
D35	3900	5830	1.88×10^6

表-7 コンクリートの強度 (3供試体の平均) (kg/cm²)

供試体	材合(日)	圧縮強度		引張強度	曲げ強度	ヤング係数(×10 ¹⁰)	
		標準養生	現場養生			標準養生	現場養生
Ⓐ	28	458	463	424	32.2	62.8	0.292
	31*	488	441	(材合180日)	38.7	—	0.322
	28	664	636	—	46.8	—	0.328
Ⓑ	45*	—	—	718	48.2	64.0	0.296
	—	—	—	(材合180日)	—	—	—
①~⑤	28	615	460	460	—	—	0.358
	—	—	—	(材合180日)	—	—	—
	68~82*	661	541	541	28.8	32.9	0.287
供試体	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—

*載荷実験時