

コンクリートの圧縮強度と引張強度の確 率分布と寸法効果に関する研究 (第2報)

小池 狭千朗・加藤 善之助

Study on Probability Distribution and Size Effect of Compressive and Tensile Strength of Concrete (II)

Sachio KOIKE and Zennosuke KATO

This study examined the probability distribution and size effect of compressive strength of three kinds of concrete cylinders and five kinds of concrete prisms and direct tensile strength of three kinds of concrete prisms by lazy tongs grips method and splitting tensile strength of three kinds of concrete cylinders, using four kinds of concrete mix proportions each having different maximum sizes of aggregates (sieve dimensions=10, 15, 20 and 25 mm) as inclusion, and provided data to simulate occurrence of the probability distribution of concrete strength used. Direct tensile test technique was used for specimens with enlarged ends to which load was applied purely by friction using four kinds of lazy tongs grips.

1. The experimental value of strength shows a probability distribution quite close to the straight line when plotted either on Weibull probability papers or on normal ones.

2. Compressive strengths of prism and cylinder specimens show the maximum values at $S=10.0$ cm, and decreases gradually when size specimens larger in the range where S is larger than 10 cm.

3. The value of coefficient of variation CV of concrete strength increases greatly with decrease in S in the range where prism width S is 4.46-7.25 and cylinder diameters S (D) is 7.5-10.0.

4. The value of CV of prism and cylinder strength increases greatly with decrease in D/d in the range where D/d is less than 4. The size of model specimen D and size of aggregate d should be used in the range where D/d is larger than 4.5 in the tests of concrete models.

1. まえがき

鉄筋コンクリート部材の曲げ強度やせん断強度などのばらつきと寸法効果を、モンテカルロ・シミュレーション^{1,2)}で求めるためには、部材を構成する材料の一つであるコンクリートの力学特性の確率統計性質と寸法効果に関する資料の蓄積が非常に重要であるが、今のところ、有用なデータに欠けているのが現状である^{3,4)}。

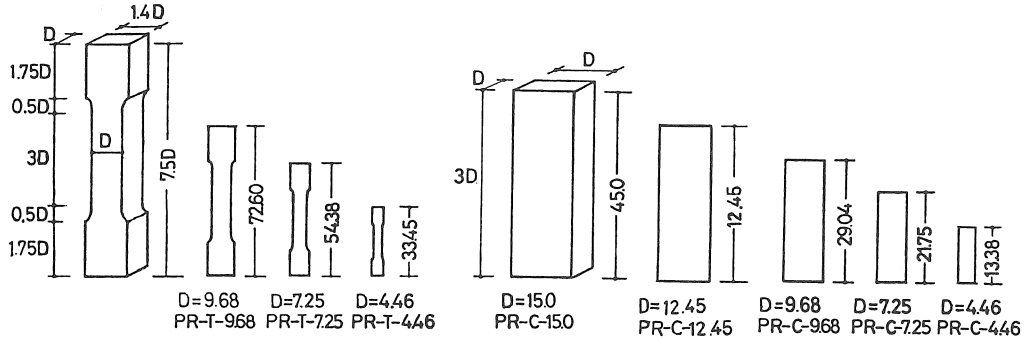
一般に、コンクリートの強度とその変動係数は、供試体の寸法とコンクリート中の骨材の寸法によって大きな影響を受けることが知られており⁵⁻⁷⁾、圧縮強度の確率分布はワイブル分布がよく合うという報告もある⁸⁻¹¹⁾。一方、谷川¹²⁾は、必ずしもワイブル分布を示すとは限らないことを示した。筆者ら²⁾は、最大粒径15mmの多粒径骨材からなるコンクリートと鉄筋コンクリートはりの強度

の確率分布と寸法効果について報告し、骨材粒径と供試体寸法の相違が強度のばらつきと寸法効果に大きな影響を与えることを示した。

本研究は、1)モンテカルロ・シミュレーションにおいて、コンクリート強度を擬似乱数として生起させるための強度の確率分布と寸法効果に関する基礎資料を得るため、2)コンクリートを使ってモデル実験を行う場合、供試体の寸法 D と使用コンクリート中の骨材の最大粒径 d との比 D/d の実用下限値としては、どの程度の値が適当か、3)どの範囲の D/d 比に対して、強度の確率論、強度の寸法効果という概念を適用できるのか、4)材料の確率統計性質にかかわる材料定数 β と変動係数 CV におよぼす供試体寸法と骨材粒径の影響を知るために、10~25mmの骨材最大粒径を持つ4種類のコンクリートの圧縮強度と引張強度を、供試体寸法をかえた角柱とシ

表一 実験の概要

Kind of concrete	W/c	Prism specimen				cylinder specimen				prism specimen		Cubic specimen	
		Compressive test		Direct tensile test		Compressive test		Splitting tensile test		Test of modulus of rupture		Compressive test	
		Size (cm)	No. of spec.	Size (cm)	No. of spec.	Size (cm)	No. of spec.	Size (cm)	No. of spec.	Size (cm)	No. of spec.	Size (cm)	No. of spec.
10Ag. series	60	4.46 × 4.46 × 13.4	15	4.46 × 4.46 × 13.4	30	φ7.5 × 15	25	φ7.5 × 15	25	10 × 10 × 40	5	10 × 10 × 10	10
15Ag. series		7.25 × 7.25 × 21.8		7.25 × 7.25 × 21.8		φ10 × 20		φ10 × 20		15 × 15 × 53		15 × 15 × 15	
20Ag. series		9.68 × 9.68 × 29.0		9.68 × 9.68 × 29.0		φ15 × 30		φ15 × 30					
25Ag. series		12.45 × 12.45 × 37.4											
		15.0 × 15.0 × 45.0											



図一 角柱供試体の寸法

リンダー供試体を用いて、実験的に調べたものである。一方、強度の確率分布や寸法効果などについて論じる場合、機械的誤差が入らないように工夫することが要求される。コンクリートのような材料を使って実験を実施する場合、誤差を入れないようにするのは極めて困難であり、実験回数を増して機械的誤差の影響を平均化し、その母集団を推定する必要がある。現在、2回の同一実験が終了した段階である。前報¹³⁾で、1回目の実験の結果を報告したが、本報は、2回目の実験が終了したので、これをまとめたものである。今回の実験では、機械的誤差の混入を減らすため細心の注意をはらって実験を行った。強度の寸法効果、 β 、CVなどの値についても、機械的誤差が混入していると考えられるが、ある程度の誤差を含んだ上での考察でも、実用上、有用なデータが得られたものと考え報告する。

2. 実験計画および方法

2.1 供試体

実験は、前回の実験と同一調合のコンクリートで行った。前報の実験を実験Ⅰ、今回行った実験を実験Ⅱとする。表一に実験Ⅱの概要を示す。実験Ⅱでは、打込みコンクリートの量を減らすため、実験Ⅰで行った一辺15.0cmの直接引張りの供試体の製作をとり止め、代りに一辺が12.45cmの角柱圧縮供試体を新たに加えた。角

柱供試体の幅D(またはS)は、鉄筋コンクリートはりの引張側に、2本の主筋(丸鋼または異形鉄筋)を配筋した場合に、はりの引張鉄筋比 P_t が1.40%($d=0.9h$)となるように、はりの断面幅bと高さ $h(=2b)$ を決めた際のはりの幅bに対応することを想定したもので、2-φ6を引張鉄筋にもつかりでは、 $b(=S)=4.46\text{cm}$ 、2-D10はりでは、7.25cm、2-D13はりでは、12.45cmおよび2-D19はりでは、 $b=15.0\text{cm}$ となる。Dが4.46cmの供試体はモデル供試体である。図一に直接引張試験用(記号PR-T)と圧縮試験用(PR-C)の角柱供試体の形状・寸法を示す。角柱引張供試体は両端部が張出し、中央の平行部分の高さHと幅Dの比、 H/D が3.0の無筋コンクリートである。角柱圧縮試験用の供試体は $H/D=3.0$ である。シリンダー圧縮用(CY-C)および割裂試験用(CY-SP)には、直径 $\phi=7.5, 10$ および15cm、 $H/D=2.0$ のシリンダーを使用した。供試体の総数は、約1,300体である。

2.2 コンクリート

コンクリートには、矢作川産の砂と天竜川産の砂利を使用した。使用コンクリートはモデル実験も想定し、最大粒径10mmの骨材からなる10Ag.seriesから、順に、15Ag. 20Ag. および25Ag.seriesの4種類とし、全てのコンクリートで水セメント比を60%と一定とした。表二にコンクリートの調合表を示し、表三に使用した骨材

表一 2 コンクリートの調査表（実験II）

Kind of concrete	Size of gravel (mm)	Water (kg/m ³)	Cement (kg/m ³)	Sand (kg/m ³)	Gravel (kg/m ³)	s / a (°/vl)	Design		Measured	
							Air(°/vl)	Slump(cm)	Air(°/vl)	Slump(cm)
10Ag.series	10~2.5	230	383	659	1015	40	1.0	15	1.25	14.2
15Ag.series	15~5	220	367	708	1004	42	1.0	15	0.66	16.0
20Ag.series	20~5	210	350	759	996	44	1.0	15	0.75	15.4
25Ag.series	25~5	210	350	739	996	44	1.0	15	1.80	14.3

表一 3 使用骨材の物理的性質

Kind of concrete	Kind of aggregate	Aggregate Size (mm)	Specific gravity	Water absorption 24hrs.(%)	Fineness modulus
10Ag.series	river gravel	10~2.5	2.65	0.99	5.57
	river sand	1.2~	2.58	1.56	2.75
15Ag.series	river gravel	15~5	2.65	0.93	6.25
	river sand	2.5~	2.58	1.56	2.95
20Ag.series	river gravel	20~5	2.66	0.90	6.57
	river sand	2.5~	2.58	1.56	2.95
25Ag.series	river gravel	20~5	2.66	0.90	7.00
	river sand	2.5~	2.57	1.80	2.98

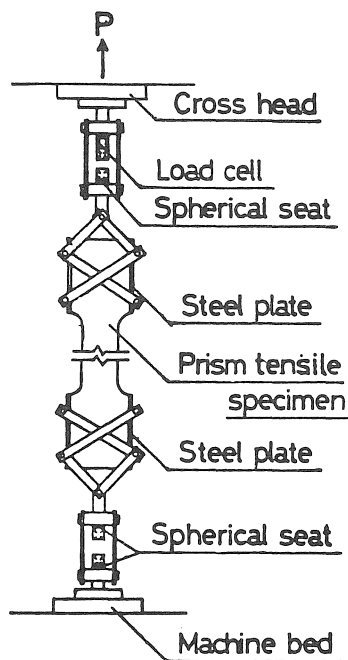
の物理的性質を示す。D=4.46cmの角柱供試体にd=25mmの骨材を入れた供試体(D/d=1.78)もみられる。このように極端なD/dの値の実験を含めたのは、このような供試体では、大きな骨材が確定的に、一次的に強度に影響を与えるために、強度の確率論とか寸法効果という概念を論じることができないのかどうかを知るためである。角柱供試体では加圧面に当る部分に平滑な鉄板を用いて、横方向にコンクリートを打込み、シリンダー供試体では縦方向に打込んだ。供試体は材令4週まで室温20±2℃、湿度80%の養生室で養生し、その後、実験室内に一週間置いた後、試験に供した。

2. 3 実験方法

圧縮試験には供試体寸法と同じ寸法の載荷板を使用し、間に球座を介して試験を実施した。角柱供試体の直接引張試験用には、寸法の異なる多量の供試体の実験を行う必要から、lazy tongs grips法¹⁴⁾を用いて、純粋摩擦のみで材軸方向に引張荷重を作用させる方法を用いた。図一2にその概要を示す。

3. 実験結果および考察

表一4に供試体の実測寸法と強度の平均値、およびそれらの統計処理結果の一例を示す。Mは平均値、SDは標準偏差、CVは変動係数(%), rは相関係数を示す。βの値はワイブル確率紙上で求めた直線の勾配a (slope)から、β=a-1の式によって求めたもので、一般には材料定数とも言われている。μおよびσは正規および対数正規確率紙上において、実験データから最小二乗法で求めた直線の中央値および標準偏差の値である。



図一 2 直接引張試験装置

3. 1 強度の確率分布

図一3に実験IIの強度を正規確率紙およびワイブル確率紙上にプロットした結果を示す。図中に示す直線は最小二乗法で求めたもので、その相関係数rの値と直線式を表一4に示す。図一3中の破壊確率Pは、 $P=n/(N+1)$, n:小さい方からn番目の強度, N:供試体総数……から求めた。図の縦軸 $LN \cdot (-LN(1-P))$ は非破壊確率(1-P)の二重対数 $\ln(-\ln(1-P))$ を示す。材料が完全弾性破壊モードを示す場合、強度の確率分布はワイブル分布を示すはずであり^{8,9,10,11)}, 非破壊確率の二重対数 $\ln(-\ln(1-P))$ と強度の対数 $\ln(F)$ との関係は直線式で表示される。今回の結果によれば、実験値の分布は極めてよい直線性を示し、相関係数はほとんどの供試体で、いずれも0.95以上を示した。実験値の上下限近くで、直線からやや離れるものが見られるが、ワイブル分布と仮定して擬似乱数を発生させれば、強度の下限近くでは、計算値の方が実験値より低い値を与えるため、安全側となる。ワイブル分布, 正規分布, 対数正規分布などのよ

表一 4 実験結果と統計処理結果

Kind of concrete	Notation of specimen	No. of specimen	Size of specimen		Range of strength (kg/cm ²)	Prism compr. strength			Weibull dist.			Normal dist.			Log-normal dist.			
			Width (cm)	Depth (cm)		M (kg/cm ²)	SD (kg/cm ²)	CV (%)	r	LN(-LN(1-P))	Slope	β	r	μ	σ	r	μ	σ
10 Ag. series	10-PR-C-4.465	14	4.571	4.475	235~290	257	18.8	7.33	0.914	13.26X-74.08	13.26	12.26	-0.951	257	23.3	-0.955	5.55	0.089
	10-PR-C-7.245	15	7.399	7.222	225~284	259	18.1	6.99	0.986	14.64X-81.88	14.64	13.64	-0.974	259	21.7	-0.971	5.22	0.086
	10-PR-C-9.675	14	9.731	9.680	259~294	278	10.2	3.68	0.958	27.30X-154.11	27.30	26.30	-0.962	278	12.5	-0.965	5.63	0.045
	10-PR-C-12.45	15	12.526	12.437	226~289	262	17.5	6.69	0.995	15.46X-86.56	15.46	14.46	-0.989	262	20.7	-0.985	5.57	0.081
	10-PR-C-15.00	14	15.129	15.091	243~272	258	9.2	3.58	0.977	28.66X-159.68	28.66	27.66	-0.983	258	11.1	-0.986	5.55	0.043
15 Ag. series	15-PR-C-4.465	15	4.480	4.610	205~310	247	28.7	11.64	0.939	8.78X-48.84	8.78	7.78	-0.952	247	35.3	-0.966	5.50	0.137
	15-PR-C-7.245	15	7.358	7.227	226~287	264	17.5	6.63	0.984	15.26X-85.56	15.26	14.26	-0.960	264	21.3	-0.955	5.58	0.083
	15-PR-C-9.675	14	9.761	9.686	229~291	262	16.1	6.15	0.979	16.41X-91.85	16.41	15.41	-0.965	262	19.7	-0.962	5.57	0.077
	15-PR-C-12.45	15	12.573	12.456	240~285	264	11.3	4.30	0.987	24.12X-135.01	24.12	23.12	-0.983	264	13.5	-0.987	5.58	0.051
	15-PR-C-15.00	15	15.090	15.034	227~265	241	10.5	4.35	0.934	23.00X-126.75	23.00	22.00	-0.963	242	12.8	-0.969	5.49	0.052
20 Ag. series	20-PR-C-4.465	15	4.594	4.492	182~267	213	22.5	10.55	0.931	9.64X-52.13	9.64	8.64	-0.955	213	27.5	-0.968	5.36	0.123
	20-PR-C-7.245	14	7.364	7.251	201~264	238	19.3	8.10	0.975	12.50X-68.90	12.50	11.50	-0.976	238	23.2	-0.976	5.47	0.099
	20-PR-C-9.675	15	9.760	9.701	207~272	248	16.7	6.74	0.981	14.95X-82.91	14.95	13.95	-0.969	248	20.2	-0.959	5.51	0.085
	20-PR-C-12.45	15	12.568	12.454	211~268	243	15.7	6.47	0.986	15.93X-88.01	15.93	14.93	-0.984	243	18.7	-0.982	5.49	0.078
	20-PR-C-15.00	15	15.130	15.063	192~247	216	15.4	7.12	0.957	14.38X-77.75	14.38	13.38	-0.975	216	18.4	-0.981	5.37	0.084
25 Ag. series	25-PR-C-4.465	15	4.634	4.522	141~239	187	28.2	15.00	0.970	6.57X-34.83	6.57	5.57	-0.969	188	34.0	-0.960	5.23	0.190
	25-PR-C-7.245	14	7.368	7.252	173~231	205	17.3	8.42	0.987	12.03X-64.52	12.03	11.03	-0.983	205	20.7	-0.978	5.32	0.103
	25-PR-C-9.675	15	9.762	9.692	213~257	241	11.8	4.91	0.983	20.85X-114.85	20.85	19.85	-0.975	241	14.2	-0.970	5.48	0.060
	25-PR-C-12.45	15	12.504	12.458	209~265	235	15.9	6.77	0.983	15.25X-83.74	15.25	14.25	-0.987	235	18.8	-0.987	5.46	0.081
	25-PR-C-15.00	15	15.162	15.012	193~246	226	14.5	6.43	0.988	15.92X-86.77	15.92	14.92	-0.979	226	17.4	-0.973	5.42	0.079

Kind of concrete	Notation of specimen	No. of specimen	Size of specimen		Range of strength (kg/cm ²)	Cylinder Compr. strength			Weibull dist.			Normal dist.			Log-normal dist.			
			Dia ϕ (cm)	Length (cm)		M (kg/cm ²)	SD (kg/cm ²)	CV (%)	r	LN(-LN(1-P))	Slope	β	r	μ	σ	r	μ	σ
10 Ag. series	10-CY-C-7.5	25	7.506	15.130	229-292	257	16.4	6.38	0.947	16.79X-93.64	16.79	15.79	-0.978	257	18.8	-0.984	5.55	0.072
	10-CY-C-10.0	23	10.002	20.093	274~341	316	18.0	5.70	0.991	19.04X-110.09	19.04	18.04	-0.990	317	20.6	-0.988	5.76	0.066
	10-CY-C-15.0	21	14.984	30.077	266~326	308	15.6	5.05	0.977	20.63X-118.75	20.63	19.63	-0.944	308	18.7	-0.937	5.73	0.063
15 Ag. series	15-CY-C-7.5	25	7.528	15.086	202~295	240	23.5	9.77	0.959	11.12X-61.42	11.12	10.12	-0.981	241	26.9	-0.989	5.48	0.109
	15-CY-C-10.0	25	9.994	20.105	251~320	283	19.4	6.85	0.964	15.78X-89.59	15.78	14.78	-0.988	283	22.0	-0.991	5.64	0.077
	15-CY-C-15.0	24	14.947	30.077	245~311	274	15.7	5.73	0.966	18.85X-106.28	18.85	17.85	-0.983	274	17.9	-0.987	5.61	0.065
20 Ag. series	20-CY-C-7.5	25	7.499	15.080	192~279	235	21.5	9.17	0.962	11.77X-64.74	11.77	10.77	-0.976	235	24.8	-0.980	5.46	0.105
	20-CY-C-10.0	25	9.992	20.116	223~305	261	20.5	7.86	0.976	13.89X-77.81	13.89	12.89	-0.990	262	23.3	-0.993	5.56	0.089
	20-CY-C-15.0	24	14.990	30.104	220~283	254	14.5	5.72	0.985	18.95X-105.42	18.95	17.95	-0.984	254	16.7	-0.983	5.54	0.066
25 Ag. series	25-CY-C-7.5	27	7.504	15.080	183~279	229	26.8	11.72	0.971	9.23X-50.61	9.23	8.23	-0.985	229	30.4	-0.985	5.43	0.134
	25-CY-C-10.0	29	10.010	20.118	197~293	245	23.0	9.39	0.970	11.70X-64.84	11.70	10.70	-0.985	245	26.0	-0.989	5.50	0.105
	25-CY-C-15.0	27	15.031	30.135	211~282	263	15.3	5.80	0.956	17.56X-98.35	17.56	16.56	-0.923	263	18.5	-0.905	5.72	0.075

Kind of concrete	Notation of specimen	No. of specimen	Size of specimen		Range of strength (kg/cm ²)	Prism tensile strength			Weibull dist.			Normal dist.			Log-normal dist.			
			Width (cm)	Depth (cm)		M (kg/cm ²)	SD (kg/cm ²)	CV (%)	r	LN(-LN(1-P))	Slope	β	r	μ	σ	r	μ	σ
10 Ag. series	10-PR-T-4.46	26	4.627	4.412	16~26	20.7	2.46	11.87	0.976	9.16X-28.23	9.16	8.16	-0.991	20.7	2.78	-0.992	3.02	0.135
	10-PR-T-7.25	28	7.368	7.166	16~27	22.4	2.32	10.36	0.983	10.19X-32.17	10.19	9.19	-0.967	22.4	2.68	-0.956	3.11	0.127
	10-PR-T-9.68	30	9.864	9.436	17~25	20.9	1.75	8.34	0.969	13.22X-40.68	13.22	12.22	-0.989	21.0	1.96	-0.993	3.04	0.093
15 Ag. series	15-PR-T-4.46	28	4.641	4.427	13~28	20.5	3.59	17.52	0.969	6.27X-19.38	6.27	5.27	-0.981	20.5	4.08	-0.989	3.01	0.196
	15-PR-T-7.25	28	7.463	7.135	17~28	21.5	2.78	12.85	0.976	8.42X-26.37	8.42	7.42	-0.988	21.7	3.15	-0.986	3.07	0.148
	15-PR-T-9.68	28	9.942	9.519	14~22	18.5	1.24	6.73	0.966	15.61X-46.04	15.61	14.61	-0.945	18.5	1.47	-0.935	2.92	0.083
20 Ag. series	20-PR-T-4.46	27	4.643	4.412	11~26	17.7	3.63	20.53	0.980	5.31X-15.67	5.31	4.31	-0.986	17.7	4.12	-0.991	2.86	0.234
	20-PR-T-7.25	29	7.423	7.156	15~26	21.8	2.24	10.30	0.974	10.16X-31.77	10.16	9.16	-0.969	21.8	2.58	-0.951	3.08	0.127
	20-PR-T-9.68	29	9.926	9.457	16~22	19.3	1.51	7.84	0.989	14.10X-42.23	14.10	13.10	-0.995	19.3	1.69	-0.993	2.96	0.089
25 Ag. series	25-PR-T-4.46	21	4.587	4.442	13~28	18.6	3.62	19.42	0.939	5.60X-16.80	5.60	4.60	-0.950	18.7	4.33	-0.976	2.91	0.214
	25-PR-T-7.25	29	7.479	7.237	11~21	16.5	2.47	15.04	0.993	7.21X-20.64	7.21	6.21	-0.995	16.5	2.77	-0.989	2.79	0.175
	25-PR-T-9.68	29	9.912	9.537	13~20	16.7	1.45	8.72	0.993	12.58X-35.87	12.58	11.58	-0.992	16.7	1.63	-0.987	2.87	0.101

Kind of concrete	Notation of specimen	No. of specimen	Size of specimen		Range of strength (kg/cm ²)	Cylinder spirit. strength			Weibull dist.			Normal dist.			Log-normal dist.			
			Dia ϕ (cm)	Length (cm)		M (kg/cm ²)	SD (kg/cm ²)	CV (%)	r	LN(-LN(1-P))	Slope	β	r	μ	σ	r	μ	σ
10 Ag. series	10-CY-SP-7.50	25	7.496	15.091	22~33	26.3	2.63	10.00	0.938	10.78X-35.72	10.78	9.78	-0.959	26.3	3.08	-0.974	3.26	0.112
	10-CY-SP-10.0	25	9.969	20.081	16~19	23.6	3.45	14.61	0.990	7.34X-23.64	7.34	6.34	-0.992	23.6	3.91	-0.988	3.15	0.171
	10-CY-SP-15.0	25	15.027	30.067	19~27	22.8	1.69	7.42	0.958	14.52X-45.87	14.54	13.52	-0.980	22.8	1.94	-0.985	3.12	0.084
15 Ag. series	15-CY-SP-7.50	25	7.505	15.108	21~30	25.6	2.21	8.62	0.956	12.42X-40.78	12.42	11.42	-0.976	25.6	2.55	-0.980	3.24	0.098
	15-CY-SP-10.0	25	10.001	20.073	20~35	25.7	4.12	16.04	0.936	6.73X-22.29	6.73	5.73	-0.960	25.8	4.83	-0.975	3.24	0.179
	15-CY-SP-15.0	25	14.980	30.124	19~30	24.1	2.49	10.32	0.968	10.55X-34.06	10.55	9.55	-0.983	24.2	2.88	-0.989	3.18	0.116
20 Ag. series	20-CY-SP-7.50	25	7.503	15.094														

く知られた確率分布で強度の確率分布を代表させると、ややもすれば上下限近くでは実際の分布とはずれるため、この領域の強度分布を重視する場合には新たな確率分布を求める必要がある。目下、データを蓄積中であり、今後より信頼性のある確率分布を求める予定である。

3. 2 強度の寸法効果

図-4にコンクリートの各種強度(F)と供試体寸法(S) (SはDと同じ)との関係を示す。圧縮強度は角柱、シリンダー供試体ともに供試体寸法Sが約10cmのとき最大値を示し、Sが10cmより大きくなるにつれて、徐々に強度が減少して行く。一方、Sが10cmより小さくなるにつれて、耐力は、やはり減少して行くが、骨材粒径の大きなコンクリートほど、大きな骨材が確定的に、一次的に強度に影響を与えるためか、強度の減少率が大きい。コンクリート中の骨材の粒径の小さなコンクリートほど、大きな強度を示した。この傾向は直接引張強度試験および割裂引張強度試験における強度でも同じである。図-4下段のPR-TおよびPR-SPシリーズの供試体の結果に示すごとく、コンクリートの引張強度は、直接引張試験による角柱供試体では、供試体寸法Sが7.25cmの場合、割裂引張試験によるシリンダー供試体ではSがφ10cmの場合に、強度のピークに達し、これらの供試体

寸法よりも寸法が大きくなるにつれて、漸次、強度は減少する傾向を示している。この傾向は実験I¹³⁾の場合においても同様であった。コンクリートの直接引張強度および割裂引張強度は、ともに、供試体寸法および骨材粒径の相違によって、大きな影響を受けることを、実験Iおよび実験IIは示した。一般に、圧縮強度、引張強度ともに、骨材粒径の大きなコンクリートシリーズほど低い強度を示した。

図-5は強度とD/dとの関係を示したものである。角柱供試体の圧縮強度は、D/dが約4以上の範囲では強度の上昇はあまり見られず、どのD/dに対しても、ほぼ同じような強度を示している。D/dの値が逆に4より小さくなると角柱圧縮強度は急激に強度低下を示す。この傾向は、同じくコンクリートを横打ちで製作した角柱引張供試体でも同じ傾向を示しているが、シリンダー供試体では、圧縮、割裂両供試体ともD/d=3のものでも、強度の急激な低下は見られない。

3. 3 材料定数βと変動係数CV

図-6にβとSとの関係を示す。一部のデータにばらつきが見られるものの、圧縮強度では供試体寸法Sの値が大きくなるとともに、βの値は大きくなる傾向を示し、小さな骨材のものほど大きなβの値を示した。図-7に

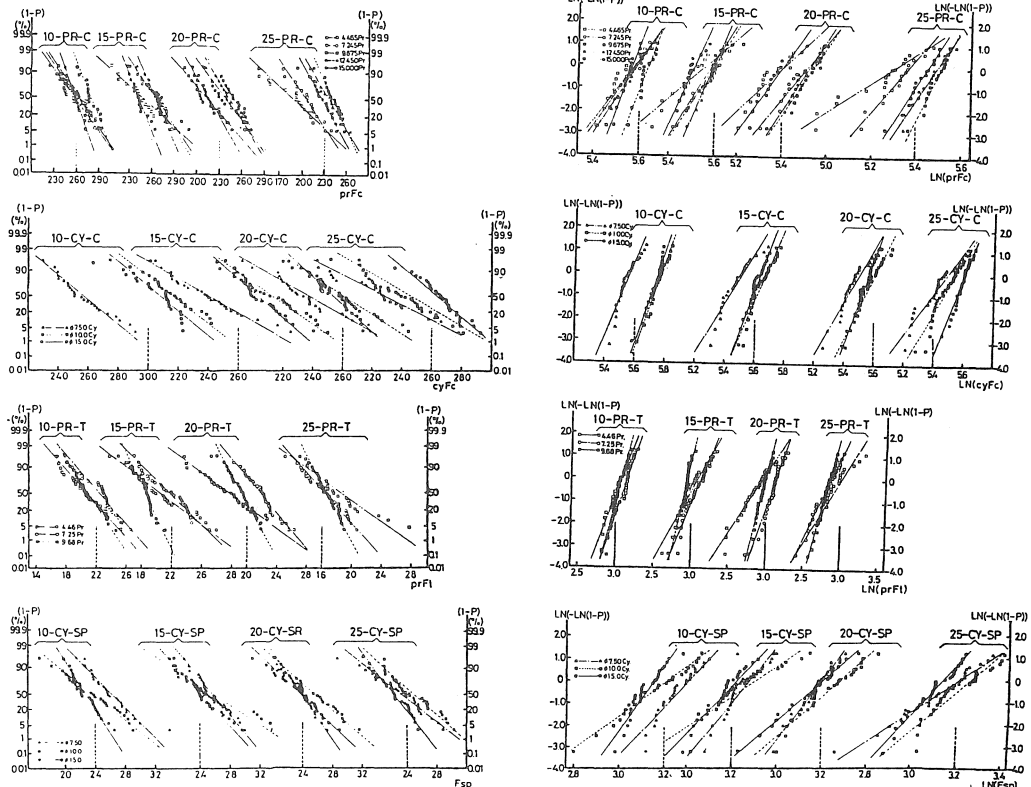


図-3 強度の正規確率紙とワイブル確率紙へのプロット

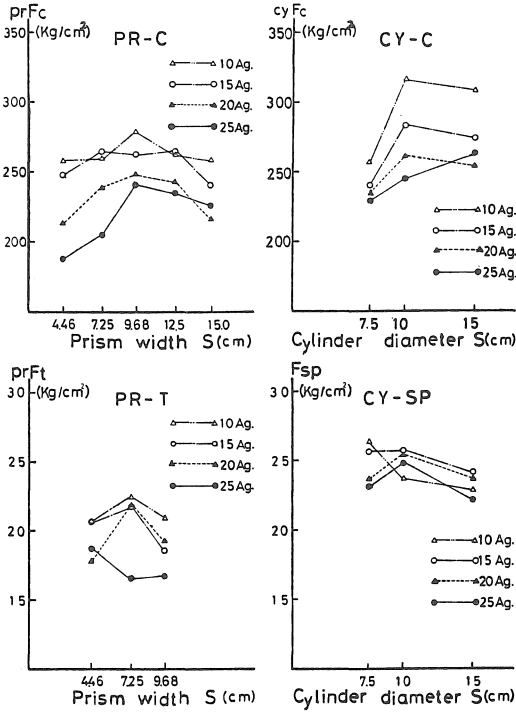


図-4 強度と供試体寸法 S との関係

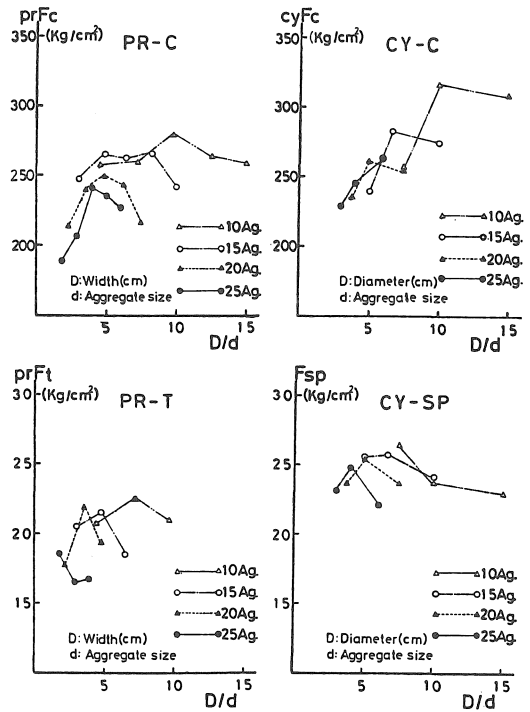


図-5 強度と D/d との関係

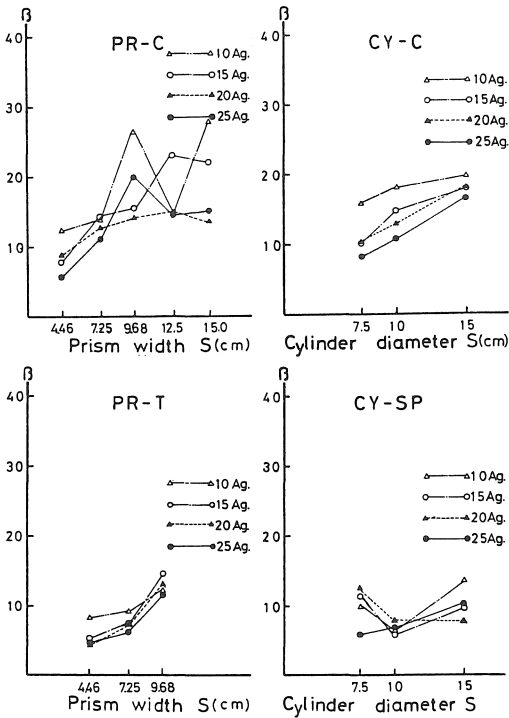


図-6 β と s との関係

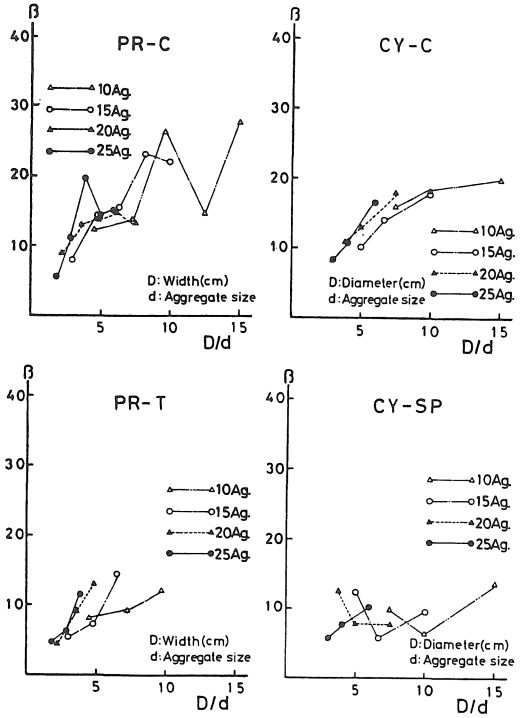


図-7 β と D/d との関係

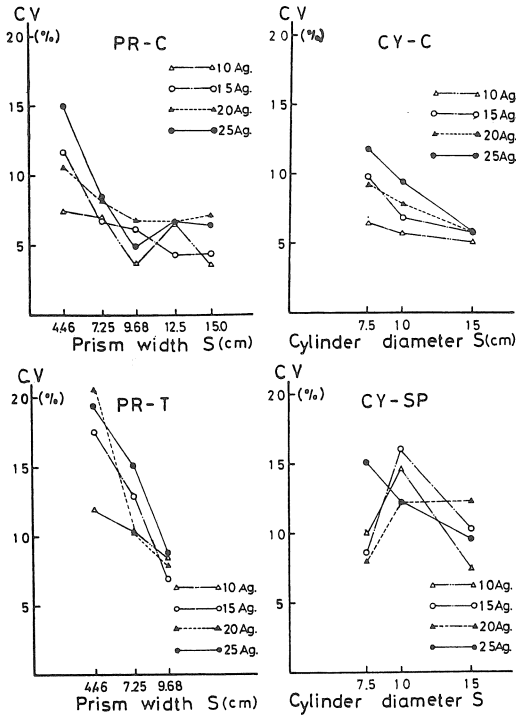


図-8 変動係数CVとSとの関係

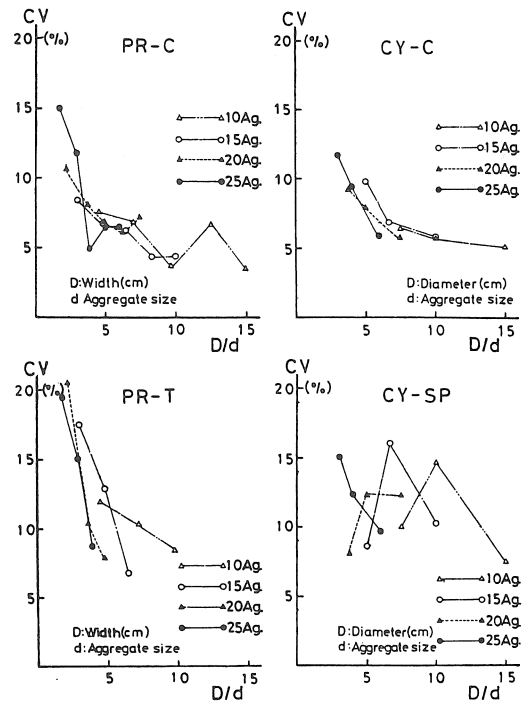


図-9 CVとD/dとの関係

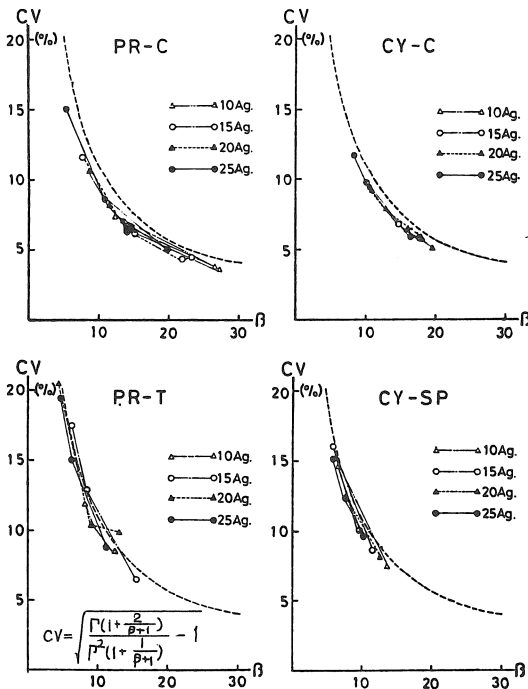


図-10 CVとβとの関係

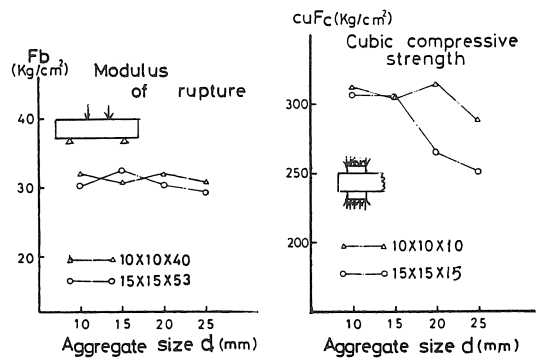


図-11 コンクリートの曲げ強度と立方体強度

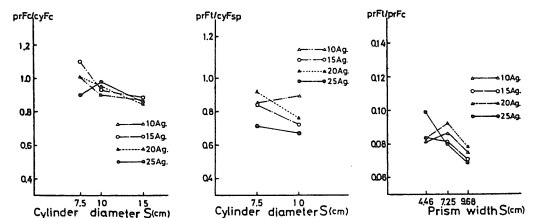


図-12 各種の強度の強度比

表一 5 曲げ実験用鉄筋コンクリート単純ばりの概要

beam seriss	Main reinforcement			Cross section			Shear span 3h(cm)	Bending span 3h(cm)	Span 9h(cm)	Beam length 12h(cm)	Stirrup		Scale ratio
	diameter (mm)	cross sec. area(cm ²)	b (cm)	h (cm)	d (cm)	Dia. (mm)					spacing (cm)		
BC-I	2-φ6	5.65	0.249	4.47	8.93	8.04	26.79	26.79	80.37	107.16	φ2.6	1.59	0.462
BC-III	2-D10	9.16	0.662	7.25	14.49	13.04	43.47	43.47	130.41	173.88	φ4.5	2.93	0.749
BC-IV	2-D13	12.25	1.179	12.45	24.90	22.41	74.70	74.70	224.10	298.80	φ5.5	3.27	1

β と D/d との関係を示す。D/d の値が 4 よりも小さくなる と β はかなり小さな値を示し、強度のばらつきが大きくなることを示している。一方、D/d > 4 の範囲では、CY-SP 供試体を除いて、D/d の増加とともに、β の値はほぼ増加する傾向を示している。

図一 8 に強度の変動係数 CV と供試体寸法 S との関係を示す。角柱圧縮供試体の方がシリンダー供試体のそれよりも低い CV の値を示す。PR-C 供試体では、S = 4.46cm の 25Ag., 20Ag. および 15Ag. シリーズで、CY-C 供試体では、S = 7.5cm の 25Ag. シリーズで、CV の値が 10% を越えている。一方、引張供試体は、圧縮供試体よりも一般的に 4 ~ 5% ほど大きな変動係数を示した。特に、PR-T 供試体では、S = 4.46cm の全供試体で、CY-SP 供試体では、S = 7.5cm の 10Ag. および 15Ag. シリーズの供試体が 15% を越える CV の値を示した。本来、10Ag. と 15Ag. シリーズよりも 25Ag. と 20Ag. シリーズの方が 15% を越える可能性が高いはずである。機械的誤差が含まれているために、そのような逆の現象を示し、結果が逆の方向にばらついたものと考えられる。

図一 9 に CV と D/d との関係を示す。PR-C および CY-C 供試体では、D/d > 4 の範囲で CV の値は 10% を下回っている。横打ち角柱圧縮供試体のモデル実験では、D/d > 4 の範囲で骨材寸法と供試体寸法を選べば、変動係数はあまり大きくなく、実験に好都合である。縦打ち圧縮シリンダーの実験では、S = 7.5cm, 25Ag. シリーズの供試体を除き、他の供試体はいずれも CV の値が角柱供試体のそれとほぼ同じ傾向を示した。したがって、シリンダー供試体の場合においても、D/d > 4 の範囲がモデル実験の実用範囲であると考えられる。PR-T 供試体では、D/d > 4 の範囲では、CV の値が急激に増加するため、D/d > 4 の範囲が実用範囲と考えられる

一般的に、D/d < 4 の範囲では強度の変動係数 CV の値が急激に増加していることを実験は示している。しかしながら、この範囲の D/d でも 4 に近いものでは比較的小さな CV の値を示す場合もある。単一粒径骨材からなるコンクリートとは異なり、多粒径骨材からなるコンクリートでは、仮に D/d が極端に小さくなくても、大きな骨材の存在がそのコンクリートの強度を確定的に、一次的に決めてしまうとは限らず、D/d が小さなもので

表一 6 使用鉄筋の物理的性質

		yield str. σ _{sy}	ultimate str. σ _{su}	elongation	
					mm
φ6	M	5.65	4,020	4,750	27.4
	VA	0.00689	15,900	20,200	6.13
	SD	0.0830	126	142	2.48
	CV	1.47	3.14	2.99	9.05
D10	M	9.18	4,140	6,020	23.6
	VA	0.00537	4,400	24,900	2.15
	SD	0.0733	66.4	158	1.47
	CV	0.799	1.60	2.63	6.23
D13	M	12.25	3,779	5,515	24.9
	VA	0.0039	1,627	1,237	1.66
	SD	0.0627	4,034	35	1.29
	CV	0.51	107	0.64	5.17

も、確率論を適用できる場合もあるのではないかと考えるが、現段階では確定できず、今後の課題である。

図一 10 に CV と β の関係を示す。図中の点線は永松が報告した式によるものである。一般的に、実験値は理論値よりもやや大きな CV の値を示している。

図一 11 は 10×10×40cm および 15×15×53cm 曲げ供試体の曲げ強度の値 F_b およびこの曲げ試験後の供試体による立方体供試体の圧縮強度の値_{cu}F_c とコンクリート中の骨材粒径との関係を寸法別に示す。図一 12 に_{pr}F_c/_{cy}F_c と S, _{pr}F_t/_{cy}F_{sp} と S および_{pr}F_t/_{pr}F_c と S との関係を示す。_{pr}F_c と_{pr}F_t は、角柱供試体の圧縮強度および直接引張強度を示す。_{cy}F_c と_{cy}F_{sp} はシリンダー供試体の圧縮強度および割裂引張強度を示す。これらの図は S = 7.25cm, 9.68cm および 15.0cm の角柱供試体と φ = 7.5cm, 10.0cm および 15.0cm のシリンダー供試体とを対応させて、便宜的に求めたものである。_{pr}F_c/_{cy}F_c の値は、供試体寸法が大きくなるにつれて、漸次、1.0 から 0.85 程度に減少する傾向を示している。_{pr}F_t/_{cy}F_{sp} の値も同様、供試体寸法が大きくなると、小さくなる傾向を示しており、しかもそれらの値が 0.9 から 0.7 ~ 0.8 に減じている。

3. 4 擬似乱数の発生と RC ばりの終局強度のシミュレーション

図一 13 および表一 5 に、実験およびシミュレーションに使用した RC 単純ばりによる曲げ供試体の概要および寸法を示す。表一 6 に実験およびシミュレーションに用いた鉄筋の物理的性質を示す。実験に用いたコンクリート角柱圧縮供試体の寸法 D×D×3D の値は、はりの幅 b

表一七 コンクリート角柱の圧縮強度の実験値と擬似乱数の統計処理結果

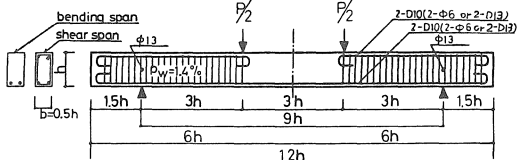
Kind of concrete	Notation of specimen	Prism Compre. strength			Weibull dist.				Normal dist.			Log-normal dist.			
		M (kg/cm ²)	SD (kg/cm ²)	CV (%)	r	LN(-LN(1-P))	Slope	β	r	μ	σ	r	μ	σ	
15 Ag. series	15-PR-C-4.465	A	236	14.7	6.23	0.943	15.42X- 84.76	15.42	14.42	-0.908	237	18.9	-0.901	5.46	0.084
		B	236	14.6	6.21	1.000	20.12X-110.43	20.12	19.12	-0.988	236	15.2	-0.981	5.46	0.067
		C	236	15.3	6.49	0.977	19.31X-106.05	19.31	18.31	-0.997	236	15.2	-0.997	5.46	0.067
	15-PR-C-7.245	A	224	13.0	5.79	0.933	17.34X- 94.34	17.34	16.34	-0.943	224	16.1	-0.953	5.41	0.070
		B	224	12.9	5.76	0.993	23.65X-117.74	23.65	19.07	-0.981	224	13.5	-0.971	5.41	0.063
		C	224	13.2	5.88	0.976	21.34X-116.04	21.34	20.34	-0.997	224	13.6	-1.000	5.41	0.060
	15-PR-C-9.675	A	210	10.1	4.83	0.978	21.30X-114.37	21.30	20.30	-0.977	210	12.1	-0.978	5.34	0.058
		B	210	10.4	4.95	1.000	25.50X-136.91	24.50	24.50	-0.984	210	10.8	-1.000	5.35	0.053
		C	210	10.5	4.99	0.988	25.54X-137.09	25.54	24.54	-0.998	210	10.7	-0.999	5.35	0.051

A : measured
 B : simulation (concrete: weibull dist.)
 C : simulation (concrete: normal dist.)

表一八 RC単純ばりの終局曲げ強度の実験値とシミュレーション結果の比較

Kind of concrete	Beam series	Ultimate load of beam			Weibull dist.				Normal dist.			Log-normal dist.			
		M (t)	SD (t)	CV (%)	r	LN(-LN(1-P))	Slope	β	r	μ	σ	r	μ	σ	
15 Ag. series	I	A	1.17	0.027	2.29	0.90	40.12X- 6.63	40.12	39.1	-0.92	1.17	0.035	-0.93	0.15	0.029
		B	1.14	0.041	3.57	0.98	35.60X- 5.17	35.60	34.6	-1.00	1.14	0.042	-1.00	0.13	0.037
		C	1.14	0.041	3.56	1.00	35.37X- 5.13	35.37	34.4	-1.00	1.14	0.042	-1.00	0.13	0.036
	III	A	3.00	0.053	1.78	1.00	57.71X- 63.77	57.71	56.7	-0.99	3.00	0.066	-1.00	1.10	0.021
		B	2.87	0.074	2.59	1.00	53.60X- 57.05	53.60	52.6	-0.99	2.87	0.071	-1.00	1.05	0.025
		C	2.87	0.073	2.53	0.98	53.70X- 57.19	53.70	52.7	-1.00	2.87	0.070	-1.00	1.05	0.024
	IV	A	4.86	0.093	1.91	0.90	48.27X- 76.83	48.27	47.3	-0.93	4.86	0.121	-0.94	1.58	0.024
		B	5.04	0.108	2.41	1.00	67.26X-109.36	67.26	66.3	-1.00	5.04	0.100	-1.00	1.62	0.020
		C	5.04	0.105	2.09	0.99	68.71X-111.68	68.71	67.7	-1.00	5.04	0.097	-1.00	1.62	0.019

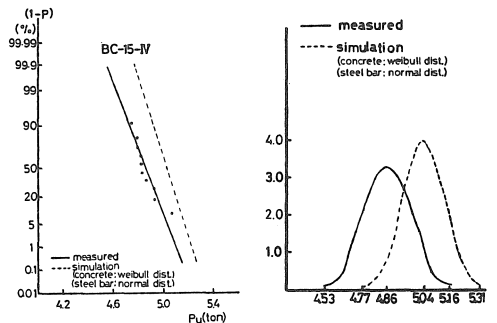
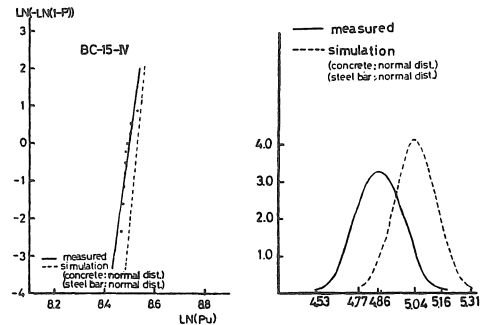
A : measured
 B : simulation (concrete : weibull dist. steel bar : normal dist.)
 C : simulation (concrete : normal dist. steel bar : normal dist.)



図一三 鉄筋コンクリートはりの配筋図

を $b=D$ とした場合の D の値を用いた。

表一四は、別に実験を行った水セメント比70%のコンクリート角柱圧縮供試体の入力値と発生した擬似乱数を統計処理した結果である。Aは実験値で、擬似乱数は、このAの覧のM:平均値およびSD:標準偏差を用いて発生させたものである。Bはコンクリート強度の確率分布をワイブル分布と仮定したもので、Cは正規分布と仮定して発生させた擬似乱数の統計処理結果である。表一八は表一七に示すコンクリートと同時に打込んだ前述のRC単純ばりの終局曲げ強度時の荷重 P_u とシミュレーション結果を比較したものである。Aは実験結果の統計



図一四 RC単純ばりの終局曲げ強度の実験値とシミュレーション結果の比較

処理結果を示す。Bはコンクリート強度の確率分布をワイブル分布、鉄筋のそれを正規分布と見なしてシミュレーションを行ったもので、Cはコンクリートと鉄筋の分布を、ともに、正規分布と見なしてシミュレーションを行った結果を統計処理したものである。BおよびCともに、実験値のばらつきをよく再現している。図-14は、15Ag.シリーズのはり (a_t : 2-D13; BC-15-IVはり)の終局耐力 P_u の実験値とシミュレーション結果をワイブル確率紙および正規確率紙上で比較したものである。実験値と計算値は、平均値 M で約3.5%、変動係数 CV の値で約2.5%の差が認められるだけであり、その確率分布は実験値をよく再現しているものとする。

4. むすび

コンクリート強度に大きな影響を及ぼす供試体寸法と骨材粒径をかねて各種の強度試験を実施した結果、次のような結論を得た。

- (1) 強度の確率分布は、強度の上下限を除けばワイブル分布、正規分布および対数正規分布と極めてよく似た分布を示す。強度の上下限近くの分布を重視する場合は、新たな確率分布を求める必要がある。
- (2) コンクリートの圧縮強度は S が10cm のとき最大値を示し、 $S > 10$ の範囲では S の増加と共に強度が徐々に低下しているが、 $S < 10$ の範囲では、 S の減少とともに強度が急激に低下しており、しかも骨材の粒径の小さなコンクリートほど、大きな圧縮強度と引張強度を示した。
- (3) コンクリートを横打ちで製作した角柱供試体では、圧縮強度、引張強度ともに、 $D/d < 4$ の範囲では急激な強度低下を示しており、実用範囲は $D/d > 4$ と考えられる。
- (4) 強度の変動係数は供試体寸法が大きくなるにつれて、その低下率がゆるやかになり、供試体寸法が15cm 近くになると、ほぼ一定値に落ちつく。
- (5) 角柱圧縮強度の変動係数の方がシリンダーのそれよりも低い値を示した。 CV の値は供試体寸法が極端に小さく、骨材粒径の大きな供試体では10%を越えるものもみられる。一方、引張供試体は、圧縮供試体よりも4~5%ほど大きな変動係数を示した。
- (6) 角柱圧縮供試体、シリンダー圧縮供試体ともに、 $D/d > 4$ となるようにモデル実験の供試体の寸法と骨材寸法を選べば、変動係数はあまり小さくなく、実験に都合がよい。
- (7) 多粒径骨材からなるコンクリートでは、例え極端な D/d をもつコンクリートでも、モルタルと異なり、 D/d

の大きなコンクリートと似た確率分布をするものも見られるため、この範囲の D/d をもつ供試体に確率論を適用できるかどうか、今回の結果だけでは、判断できないので、今後の研究に待ちたい。

参考文献

- 1) Sher Ali Mirza and James G. MacGregor : ACI Journal, Proceedings, Vol.76, No.47, Nov. 1979, pp.1159-1177.
- 2) S. Koike : Proceeding of the Twenty-third Japan Congress on Materials Research, Mar. 1980, pp. 255-262.
- 3) Sher Ali Mirza, James G. MacGregor : Proceedings, ASCE, Vol.105, No. ST5, May 1979, pp. 921-937.
- 4) Sher Ali Mirza, Michael Hatzinikolas and James G. MacGregor : Proceedings, ASCE, Vol.105, No. ST6, June 1979, pp.1021-1037.
- 5) A. M. Neville : Magazine of Concrete Research, Aug. 1956, pp.101-110.
- 6) C. V. S. Kameswara Rao and R. N. Swamy : Cement and Concrete Research, Vol.4, 1974, pp. 669-681.
- 7) Gajanan M. Sabnis and Saeed M. Mirza : Proceedings, ASCE, Vol.105, No. ST6, June 1979, pp. 1007-1020.
- 8) S. Nagamatsu : Review of 30th General Meeting of Cement Association of Japan, Vol.30, May 1976, pp.411-414.
- 9) M. Hori : Method and Testing Machines, Bulletin Rilem No.11, June 1961, pp.73-81.
- 10) T. Yokobori : (Zairyo Kyodo Gaku, Second Edition) Iwanami-Zensho, Japan (1974).
- 11) H. Mihashi : Thesis for a doctorate, Tohoku University, Japan (1976).
- 12) Y. Tanigawa, K. Yamada and Y. Yokoyama : Proceedings of the Twentieth Japan Congress on Materials Science, Japan, Kyoto, Japan 1977.
- 13) S. Koike and Z. Kato : Bulletin of Aichi Institute of Technology, Vol.16, Part B, March 1981, pp. 203-213.
- 14) C. D. Johnston and E. H. Sidwell : Magazine of Concrete Research, Vol.20, No.65, Dec. 1968, pp. 221-228.

(受理 昭和57年1月16日)