

九州電力(株) 正員 田代信雄 正員 石俊文

1. まえがき

Cダムは、アーチ式コンフリーダムでコンクリート量390,000 m^3 、昭和28年6月よりコンクリート打設を開始し、昭和30年5月に打設を終了した。Cダムは我国最初の本格的なアーチダムで、コンクリートの設計強度は最大433 kg/cm^2 に達し、その材料選定、配合設計、品質管理などの面で我国のマスコンクリートの発展に大きく貢献した。建設後17年間十二分にその機能を発揮してきたが、その現状を更に確実に把握し、中庸熱ポルトランドセメントを用いるマスコンクリートの配合設計、耐久性等の他の資料として役立たせるため、現地非破壊試験、ホーリングコア供試体の諸試験などを行なったのでその一部を報告する。

2. 堤体コンクリートの材料および配合

2.1 セメント Cダム用セメントは中庸熱ポルトランドセメントで、日本セメント(株)佐伯工場製、小野田セメント(株)津久見工場製および宇部セメント(株)宇部工場製を時期別に用いた。そのうち日本セメント(株)佐伯工場製品の品質を示すと表1のとおりである。

表1 セメントの化学成分・諸係数・鉱物組成

項目	gloss	insol	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Total	水硬率	流動係数	凝縮率	鉄率	石灰飽和度	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	C ₂ SO ₄
平均値	0.86	0.33	23.46	4.34	4.04	63.66	1.51	1.28	99.48	197	5.40	2.80	1.08	0.85	42.2	35.3	4.7	12.3	2.2

2.2 粗骨材

表2 セメントの物理試験結果

粗骨材は原石 圧縮強度1.866	項目	比重	粉末度 ブレン88μ残量	凝結 水量始発終結	水和熱 $\frac{\text{Cal}}{\text{g}}$ 7日28日 (材料+水)	安定度 7日28日	フロー	圧縮強度(kg/cm^2) 3日7日28日	曲げ強度(kg/cm^2) 3日7日28日							
	平均値	3.20	3.265	2.1	245	2-213-29	54.6	71.2	0.05	244	84	141	284	23.5	35.1	57.4

~2,691 kg/m^3 を持つ硬

砂岩の碎石を用いた

表3 コンクリートの示方配合

最大寸法150 mm, 比重2.68, 吸水率 0.47, 空隙率32. 9%, 単位容積重量 1812 kg/m³である	配合 種別	粗骨材 の最大 寸法 (mm)	スラン の範囲 (cm)	空気量 の範囲 (%)	水セメ ント比 W/C (%)	細骨 材率 S/a (%)	単 位 量 (kg/m³)										混和剤 プロパ グス
							水	セメント	細骨材	粗 骨 材 G							
										150- 80mm	80- 40mm	40- 20mm	20- 5mm				
A	150	5±1	4.2±0.5	51.5	5.2	121	235	514	463	463	308	308	0082				
B	150	5±1	4.2±0.5	57.1	25.2	120	210	519	467	467	312	312	0074				
C	150	5±1	4.2±0.5	65.8	27.9	125	190	574	404	492	298	298	0067				

2.3 細骨材 細骨材は20~5mm碎石と5mm以下の碎石をロードミルで破砕して製造した。比重2.68、吸水率1.06、空隙率33.6、泥土量3.7、単位容積重量1,782 kg/m^3 、FM2.76である。

2.4 コンクリートの配合および打設位置

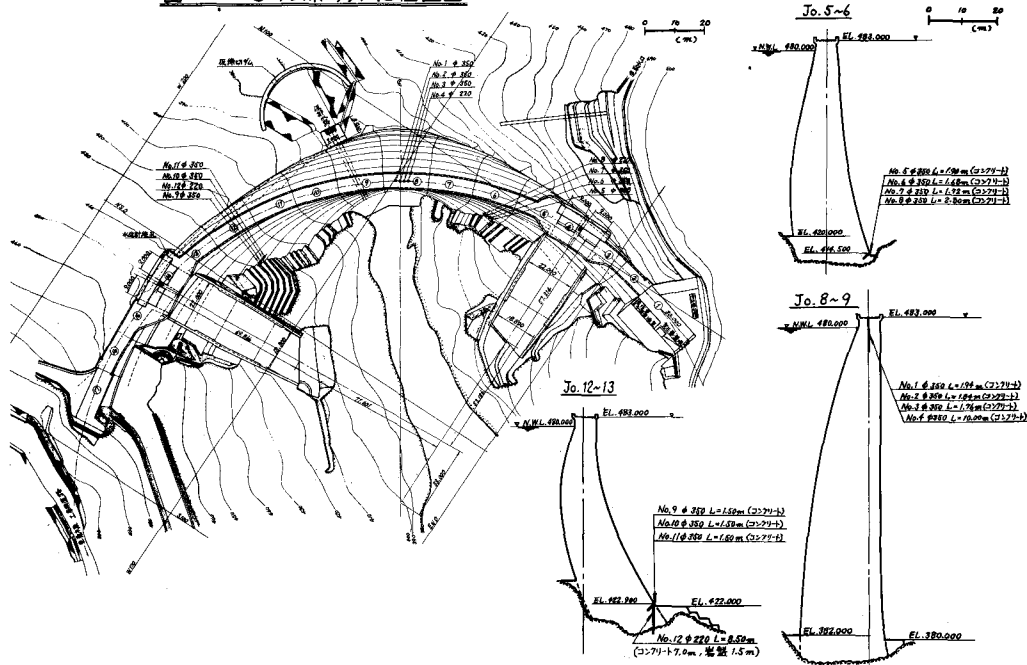
Cダムのコンクリートの配合を表3に示す。A配合は堤体外部と岩着部分に、B配合は応力50~35 kg/cm^2 の部分に、C配合は応力35 kg/cm^2 以下の部分に打設された。

3. 初期材令におけるコンクリートの諸性質

Cダム施工時のコンフリーダム品質管理試験結果を表5に示す。

4. 現地非破壊試験とマスコンクリートの耐久性

図 C ダムボーリング孔位置図



今後長期間にわたるダムの安全管理面の資料とし、またコア供試体の非破壊試験との関連を得るため、堤体下流面（A配合部分）で超音波伝播速度（ $V_L \cdot \text{km/s}$ ）を測定した。その結果は、4.69~5.09 km/s で、この値から従来とられている超音波伝播速度によるコンクリートの品質判断の基準に従って判断すると、「優」あるいは「良」の部にはいるものである。Cダムは天端EL.483.00mで九州地方においては非常に厳しい気象条件にあるが、肉眼によるコンクリート表面の観察結果もとくに劣化のみえる部分もなく、中性化深さも著しく浅いことが確かめられている。これらの結果からCダム・コンクリートは建設後17年間、耐久性は少しも損なわれることなく現在に至っているといえる。

5. コア供試体による諸検討

5.1 Cダムコンクリートのボーリング位置、コア供試体の成型ならびに試験結果

Cダムコンクリートのボーリング位置は図1に示すとおりで、天端および下流面で行なった。採取したコアの直径は33cmおよび20cmであるが、本報告では33cm供試体について述べる。コア供試体は石材店で研磨仕上げし、エポキシ樹脂でキャッピングし、東京大学（2,000トン大型構造物試験機使用）および電力中央研究所（500トン耐圧試験機）で試験した。試験結果を表4に示す。

5.2 圧縮強度および初期材令からの圧縮強度の伸び率

コア供試体の圧縮強度は、高さ直径比（ H/b ）および直径の差によって変化することが知られている。Cダムコア供試体は、 ϕ 33cm、 H/b は、0.97~2.0の範囲にある。個々のコア供試体の実測圧縮強度はまず $H/b = 2.0$ の供試体強度に補正し、つぎに ϕ 15×H 30cmの供試体強度に修正した。こうした修正には文献1)に示されている値を使用した。このようにして得られた材令17年におけるCダムコンクリートの圧縮強度および材令91日の圧縮強度に対する伸び率は、A配合：64.4%、

159%、配合B：549%～150%、配合C：431%～133%という値が得られた。文献2),3)では、低熱型中熱ホルトランドセメントを用いたAダムコンクリートの材令30年での伸び率163～205%、普通ホルトランドセメントに30%フライアッシュを混和したBダムコンクリートの材令10年での伸び率は144%と報告されている。これらの値と本研究における各配合の伸び率を対比させて考えると、Bダムで用いられたフライアッシュの影響を考慮すると、長期材令においてある材令の範囲内では σ_{91} に対する伸び率と材令との間には、或程度直線的な関係がみられるようである。

長期間マス養生状態におかれたコンクリートの強度については、従来研究例が少なく、僅かに米国で、Bureau of ReclamationがShasta Dam, Friant Damなどで材令半年～10年のコンクリートについて調査し、材令28日からの強度の伸び率が、材令10年で135%程度の例を報告しているに過ぎない。これらの研究結果および

表 4 Cダムコア供試体(φ33cm)試験結果

試体番号	配合	単位容積重		高さ (H)(cm)	H/D	単位容積重 (kg/m ³)	超音波 伝播速度 (km/s)	圧縮強度		弾性係数 $E_s \times 10^5$ (kg/cm ²)	ポアソン 比
		kg/m ³	%					実測 (kg/cm ²)	28日 推定 (kg/cm ²)		
5-II	A	247	52.0	66.23	2.01	2,470	4.98	487	487	—	—
6-II	"	"	"	66.30	2.00	2,437	5.14	589	589	3.33	0.19
7-II	"	"	"	66.28	2.00	2,466	4.95	639	639	3.65	0.20
9-II	"	"	"	66.15	2.00	2,488	5.07	654	654	3.72	0.19
10-II	"	"	"	66.30	2.00	2,487	4.93	528	528	3.86	0.28
11-II	"	"	"	66.30	2.00	2,492	5.06	579	579	—	—
全平均						2,473	5.02	579	579	3.64	0.22
9-III	B	210	57.5	66.15	2.00	2,482	4.99	454	454	3.20	0.18
平均						2,482	4.99	—	454	3.20	0.18
5-III	B	210	57.5	45.33	1.37	2,431	5.11	576	545	3.16	0.19
6-III	"	"	"	50.24	1.52	2,418	5.13	496	478	3.08	0.21
7-III	"	"	"	50.25	1.52	2,428	5.03	559	539	—	—
10-III	"	"	"	56.37	1.70	2,493	4.99	551	541	3.74	0.14
11-III	"	"	"	33.17	0.01	2,458	4.82	456	398	3.52	0.17
平均						2,446	5.02	528	500	3.63	0.16
全平均						2,452	5.01	515	493	3.34	0.18
1-I	C	193	63.5	66.23	2.01	2,454	4.98	351	351	3.62	0.27
1-II	"	"	"	66.45	1.98	2,466	4.96	338	338	2.62	0.13
2-II	"	"	"	66.51	2.01	2,464	4.90	331	331	2.72	0.16
2-III	"	"	"	66.26	2.01	2,457	4.88	420	420	3.41	0.23
3-II	"	"	"	66.33	2.00	2,454	4.93	306	306	2.77	0.22
平均						2,459	4.93	349	349	3.03	0.20
3-I	C	193	63.5	32.04	0.97	2,463	4.86	583	501	3.12	0.12
3-III	C	193	63.5	35.91	1.09	2,475	4.96	467	417	2.32	0.20
平均						2,469	4.91	525	459	2.72	0.16
全平均						2,462	4.92	399	387	2.94	0.19

5.3 ダムの安全性

Cダムコンクリートは、配合設計のときの安全率は5であった。いま、例えばCダムから採取したコア供試体の平均圧縮強度と標準偏差とから、保証率95%で堤体コンクリートの圧縮強度を求め、これと設計応力度との比を現在のダムコンクリートの安全率(N_n)と考えると、 N_n は表6に示すように、A, B, C配合について、いずれも9.0となり、施工時の安全率を大きく上回る値となっている。

また、Cダムの設計に用いたコンクリートの単位容積重量は2.30であるが、コア供試体の単位容積重量は246～247で設計値より7～8%も大きい値である。更に、Cダムではボーリング孔NO.12に孔壁探映装置を挿入して、コンクリートの打継目とくにコンクリートと基礎岩盤との密着の状態を調査したが、いずれも良好な状態であることが確認さ

表 5 圧縮強度の修正値と伸び率

項目	配合 A			配合 B			配合 C		
	品質管理 試験(φ30cm)	品質管理 供試体 試験(φ33cm)	品質管理 供試体 試験(φ30cm)	品質管理 供試体 試験(φ33cm)	品質管理 供試体 試験(φ30cm)	品質管理 供試体 試験(φ33cm)	品質管理 供試体 試験(φ30cm)	品質管理 供試体 試験(φ33cm)	品質管理 供試体 試験(φ30cm)
材令	28日	91日	17年	28日	91日	17年	28日	91日	17年
個数	414	414	6	139	139	6	279	279	7
実測圧縮強度	295	406	579	245	364	515	218	325	399
修正圧縮強度	295	406	644	245	364	549	218	325	431
σ_{91} と σ_{28} の比率	100	138	218	100	149	224	100	149	198
σ_{91} と σ_{17} の比率	73	100	159	67	100	150	67	100	133

表 6 ダムの安全性の一検討

配合 番号	設計 圧力 σ_c (kg/cm^2)	施工時に供したコンクリートの諸係数					コア供試体の値					又、 σ_c から求められる保証 率95%の圧縮強度 $\times$ 試験体の平均値を70%現在 の安全率 $\times$ σ_c	設計単位重 量 (kg/m^3)	コア供試体の 平均単位重量 (kg/m^3)	コンクリートの 容積重量の差 率(%)		
		安全率	設計強度係 数 (kg/cm^2)	弾性係 数 (%)	保証率 係数 (%)	配合 強度 (kg/cm^2)	材令 (年)	圧縮強度 (kg/cm^2)	弾性係 数 (%)	容積重量 (kg/cm^3)							
A	60	5	300	13	99	1,443	433	17	644	65	10	107	537	9.0	2.30	2,473	1.08
B	50	5	250	13	99	1,443	361	17	549	61	11	100	449	9.0	2.30	2,467	1.07
C	35	5	175	13	99	1,443	253	17	431	71	16	117	314	9.0	2.30	2,464	1.07

れている。これらのことからCダ
ムは建設後17年の現在も十分な
安全性を持つものであると認めら
れる。

5.4 コンクリート各部分のひ ずみと弾性的性質

コンクリートは典型的な複合材
料であり、とくにコア供試体の表
面には粗骨材が露出しているので、
コンクリートの各構成材料のひず
みの差異を観察するのに適してい
ると考えられる。コア供試体の各
部に、図3の凡例および図2に示
す位置のひずみをはりつけひずみ
ゲージで測定した。その結果は、
図3のように、圧縮ひずみでは粗
骨材の下面(Dグループ)が、引
張ひずみでは粗骨材の左右面のい

図 2 ひずみゲージはりつけ位置展開図(供試体Cダム NO.-1-II)

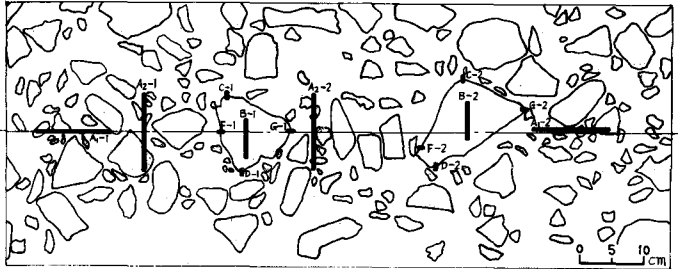
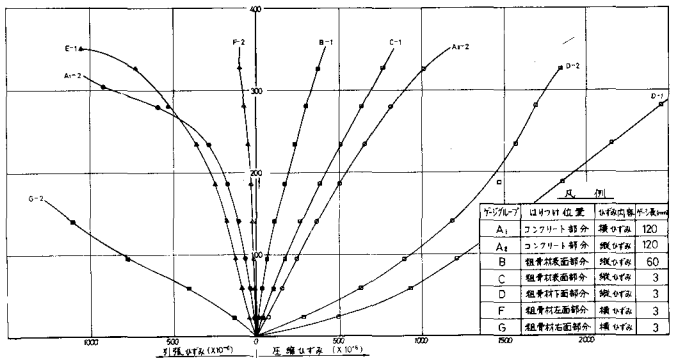


図 3 コア供試体の応力-ひずみ曲線 (Cダム NO.-1-II)



ずれか卓越していると認められる。このことからコンクリートの破壊機構に関連して、粗骨材周辺の
応力集中と micro Crack の発生について更に検討がなされる必要があると考えられる。

静弾性係数は圧縮強度の1/3の点で、圧縮応力とコンクリート部分のひずみの平均値の比で求めた。
また、ポアソン比も圧縮強度の1/3の点でコンクリート部分の横ひずみと縦ひずみとの比から求めた。
それらの値を表4に示すが、その値は長期材令を経たコンクリートとして特徴的な値ではない。

6. ひずみ

本研究の範囲内では、Cダムコンクリートは材令17年においても優秀な品質を持ち続けており、現
在の安全率は建設時点よりも相当大きいと判断され、ダムコンクリートの配合設計上、初期および長
期材令にあける安全率や配合強度などに一層の検討がなされるべきであろうと考えられる。

おわりに、本研究を進めるに当たり終始御指導戴きました東京大学国分正胤教授、九州大学徳光善治
助教授、日本セメント(株) 山崎寛司工博、電力中央研究所永倉正工博、同所河原友純主査研究員、実
験・資料整理をお願いした当社土木研究室杉田英明君ならびに関係各位に心から感謝の意を表します。

参考文献 1) Bureau of Reclamation: Concrete Manual

2) 田代・大橋・長石: マスコンクリートの材令30年試験について、昭和44年度土木学会西部支部研究発表論文集

3) 田代・大橋・長石: ファイバを用いたマスコンクリートの材令40年試験について、土木学会第26回年次学術講演集第5部

4) 九州電力(株) 土木部: アーチダム上堰塞ダムの設計と施工、九電