報告　小河内ダム大型コンクリート供試体の材齢 50 年までの強度試験

小林　茂敏[*1]・柴田　辰正[*2]・矢ケ崎憲治[*3]

要旨：小河内ダムは，東京都が 1938 年から水道用水確保のために建設した高さ 149m の大規模な重力式コンクリートダムである。ダム建設時に直径 450mm，高さ 900mm の大型コンクリート供試体が長期の強度試験用に製作された。ダム完成後はこれらの供試体は，本体内部に保管（気中）され，材齢 1 年経過以後は 10 年毎に圧縮強度試験が実施されてきた。コンクリートは最大骨材寸法 150mm，単位結合材量が 175kg/m^3，水結合材比が約 60%のフライアッシュ混合ダム用コンクリートであり，本報告では材齢 50 年までの試験結果を示す。試験結果では，材齢 10 年までは圧縮強度が増加傾向にあったが，以後は強度の増加は停止している。

キーワード：ダムコンクリート，圧縮強度，長期材齢，大型供試体，材齢 50 年，フライアッシュ，経年観測

1．はじめに

小河内ダムは東京都が水道用水確保のために西多摩郡奥多摩町に 1938 年から建設を開始し，戦争により建設は一時中断したが，戦後の 1957 年（昭和 32 年）に竣工した高さ 149m の，水道用として建設当時としては世界最大級の重力式コンクリートダムである。ダムにより貯水された水は都民の水道水の重要な水源として 50 年後の現在も重要な役割を果たしている。

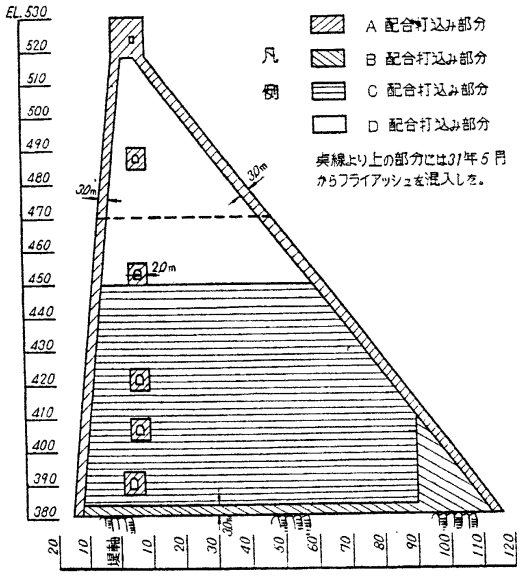
ダムの建設時に小河内貯水池建設者によって長期材齢のコンクリートの観測用にダム用の材料と内部コンクリートの配合を用いて，直径 450mm×高さ 900mm の大型コンクリート供試体が製作された。その数は 28 本で，製造期間は昭和 32 年 4 月から 6 月末までの間であった。ダム完成後はこれらの供試体は本体内部に保管（気中）され，材齢 1 年経過以後は 10 年毎に強度試験が実施されてきた。

2008 年には材齢 50 年の試験を終了したが，ダムの寿命や残っている供試体数を考えると，強度試験は今後も継続実施されるとしても，次回はかなり先のことになると思われる。材齢 50 年までの結果としても，ほぼ同一配合のコンクリートを強度試験により経年観測を続けたという調査は世界でもほとんど例がなく，学術的な見地からも貴重な情報であると思われるので，現在までの試験結果をここに報告することとした。

2．コンクリート供試体の配合と使用材料の特性

2.1 配合

今回，材齢 50 年で試験を行ったコンクリート供試体の配合は東京都水道局小河内貯水池管理事務所資料によれば**表－1** のとおりである。また，東京都水道局が発行した工事誌 [1] には供試体製造時の内部コンクリートの部位と配合が記録されている。それによれば，**図－1** に示すように供試体のコンクリートはダムの打込み位置の標高 470m（ダム天端から約 60m の下部）より上部に使用された内部コンクリート（D_5配合）の配合に相当する。その位置ではダムの高さがあまり高くないため，計算上での発生応力度は主応力度でも 2 N/mm^2 以下である。ダムは許容応力度法で設計され，安全率は 5，設計基準強度は 14.4 N/mm^2 とされている。したがってコンク



図－1 小河内ダム配合別打込み基準 [1]

*1 財団法人土木研究センター　参与　工博　(正会員)
*2 同　上　主任研究員　(正会員)
*3 東京都水道局小河内貯水池管理事務所

表－1　供試体コンクリートの配合

供試体番号	製造年月日	水セメント比 (%)	粗骨材最大寸法 (mm)	配合（単位量kg/m^3）				
				水	セメント	フライアッシュ	細骨材	粗骨材
LS1-2	S32.4.30	57-64	150	100-112	135	40	610	1520
LS2-2	S32.5.9							
LS7-1	S32.6.20							

リートの配合は大きな強度を得るよりも，マスコンクリートの発熱量低減，ワーカビリティーの改善，経済性等を考慮して定められたようである。結合材にはセメント以外にフライアッシュが 40kg/m^3 混合されている。

ダム用コンクリートであるため粗骨材の最大寸法が 150mm と大きく，供試体の直径は骨材寸法の 3 倍以上となるように，直径 450mm，高さ 900mm の巨大な供試体が製造されている。

同誌にはこのダムに使用した材料の種類や物理的性質も記録されているので，これを参考に供試体に使用された材料の種類や物理的性質などを記述する。

2.2 セメント

小河内ダムのセメントには発熱特性や生産能力などを勘案して日本セメント社製のアサノマスコンセメント（現 JIS 規格の中庸熱ポルトランドセメントに相当）が使用されたので本供試体のコンクリートのセメントもこれと同一と考えられる。記録が残るセメントの物理試験結果で，荷卸し地点で採取された試料数の最も多いセメントの試験結果の一部を**表－2** に示す。

当時は JIS の中庸熱セメントの規格がまだ制定されていなかったので，米国のタイプⅡセメントなどを参考に発注者が仕様規格を作って管理したものと考えられる。

2.3 フライアッシュ

フライアッシュも当時のわが国では品質規格は無く，火力発電所の副産物であるので「ある程度の品質変動は許容する」として**表－3** のような仕様規格が定められた。

密度（比重），粉末度，強熱減量，湿分の試験がロット毎に行われ，また，所要水量比，圧縮強さ比，シリカ，マグネシヤ，無水硫酸については納入毎に代表試料について試験が行われた。**表－3** の試験結果には得られた試験値の範囲を示す。

本供試体は現場の材料を使用して製作されたものであるので，使用されたフライアッシュの品質もこれらの試験データの範囲にあるものと思われる。

表－2　セメントの品質規格値と試験結果（ダム建設当時の試験値）

種類			仕様規格	荷卸し地点採取の試験値
単位体積密度　(g/cm^3)			－	3.20
比表面積（cm^2/g）			3000以上	3167
軟練モルタル	フロー（mm）		－	251
	圧縮強度（kgf/cm^2）	3日	50以上	95
		7日	100以上	
		28日	230以上	406
強熱減量（%）			2.5以下	0.48
不溶解残査（%）			0.7以下	0.29
可溶性珪酸（%）			23以上	24.25
磐土（%）			5.5以下	4.33
苦土（%）			3.0以下	0.79
硫酸（%）			2.0以下	1.15
鉱物組成（%）		C_3S	50以下	36.0
		C_2S	30以上	42.4
		C_3A	7.5以下	4.1
水和熱　(cal/g)		7日	70以下	56.7
		28日	80以下	77.3

表—3　フライアッシュの仕様規格と管理試験の試験値の範囲

		規格	試験結果の範囲
比重		2.00 以上	2.16－2.24
粉末度	比表面積ｃｍ²／ｇ	3000 以上	3540－3920
	44μ篩い残分％	25 以下	3.8－19.2
所要水量比　％		100 以下	95-100
圧縮強さ比　％	7 日	100 以上	117-137
	28 日	100 以上	112-128
強熱減量％		5 以下	1.89-3.32
湿分％		1 以下	0.15-0.28
シリカ　％		40 以上	52.46-55.66
マグネシヤ％		３以下	1.68-2.64
無水硫酸％		2 以下	0.42-1.01

2.4 混和剤

AE コンクリートとするために，供試体製作に使用された D_5 配合コンクリートは AE 剤としてビンゾールの 20%希釈液を 330ml/ m^3 使用している。

2.5 粗骨材

粗骨材には現地で採取された砂岩から製造された砕石が使用されている。記録によればその組成は亜角礫状の石英，チャート，斜長石，生長石からなり，それらを骨材にした場合の物理的性質は以下のとおりとなっている。

(1)密　度　　2.63～2.66　g/cm^3

(2)吸水量　　0.75～1.47　%

(3)単位体積質量　1562～1593　kg/m^3

(4)安定性試験損失質量　7.04　%

(5)すりへり試験

JIS A 1120 (1954) に規定されていたドバル試験機による試験が行われている。すりへり減量は 2 回の平均値で 77.3%であったと記されている。

(6)アルカリ骨材の反応性

本ダムのコンクリート打設が始まったのは 1950 年代（昭和 20 年代）であるが，驚くべきことに骨材のアルカリ骨材反応性についての検討を行っている。資料には米国開発局の考え方を参考にしたと記されているが，判定は化学法を使用している。全国各地を含め，17 種類の岩石について試験を行い，「小河内ダムで使用される骨材は Sc/Rc が 1.0 以下でアルカリに対して安定であると考えられる。」と述べられている。

2.6 細骨材

細骨材は，当初は多摩川中流で採取できる砂が使用された。また，砕砂の製造設備が完成した昭和 29 年からは砕砂と川砂が混合使用された。したがって，供試体コンクリートの細骨材には川砂，砕砂の混合物が使用されている。

川砂の品質試験データは採取場所によって異なるが，次のような値が記録されている。

(1)構成岩の種類

中世層の砂岩および粘板岩，珪質岩等が主たる鉱物

(2)吸水率　　1.8～2.0　%

(3)単位体積質量　1710～1720　kg/m^3

(4)砕砂の F.M.の平均値　3.01

３．供試体の圧縮強度試験

3.1 保管供試体の搬出

供試体は小河内ダム堤体内の B3 監査廊に図－2 に示すような状態で保管されていたので，これを手動式運搬

図－2　圧縮強度試験用供試体の堤体内保管状況

図－3　供試体の試験地点への移送状況

機械を使用して堤体内に設置してあるエレベータの位置まで移動し，次いで堤体に備え付けのエレベータを利用して堤体外に搬出した。供試体数は 3 本で，これらを任意に選出して搬出した。

供試体は重量測定や試験準備（キャッピング等）が可能な試験室まで移送し，実験準備が整った状態にして載荷試験が可能な大型圧縮試験機がある試験所までさらに移動した。

3.2 重量寸法の測定およびキャッピング

供試体は直径 450mm であるので，試験のためのキャッピングは，以下の手順により慎重に行った。

(1)実験室内に垂直に静置する。

(2)供試体上面のレイタンス等の汚れを除去する。

(3)φ450×100mm のキャッピング用型枠を，キャッピング面が水平になるよう供試体に設置する。

(4)キャッピング面を水で清掃し，湿潤状態とする。

(5)早強ポルトランドセメントでセメントペーストを練る。

(6)キャッピング面にセメントペーストを盛る。

(7)コテにより，平滑に均す。

(8)アクリル板を載せて，型枠まで水平に押し付ける。

(9)そのままの状態で 5～6 時間，湿らせたウエス等で湿潤養生を行う。

(10)24 時間後に設置したアクリル板および型枠を外す。

(11)試験直前まで湿らせたウエスで湿潤養生を行う。

図－4 にキャッピング作業の状況を示す。

図－4　セメントペーストキャッピングの状況

3.3 圧縮試験機

供試体の直径が 450mm であるため，供試体の断面積は 159,000mm^2 ある。供試体の圧縮強度が 40N/mm^2 以上となっても試験が可能であるように 6MN 以上の試験機を探した結果，独立行政法人土木研究所にある 30MN（3000tf）大型構造部材万能試験機が使用可能であったためこれを使用した。試験では，圧縮強度の測定以外に静弾性係数も測定するため，供試体表面にひずみゲージを貼り付け，データロガーTDS- 303（東京測器研究所社製）を用いて計測を行った。ひずみゲージは PL-120（東京測器研究所社製）を使用して行った。

3.4 圧縮強度試験および静弾性係数の測定

試験方法は以下の試験方法に従った。

(1)圧縮強度：JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」

(2)静弾性係数：JIS A 1149「コンクリートの静弾性係数試験方法」

静弾性係数は供試体に貼り付けたひずみゲージにより縦ひずみおよび横ひずみを計測し，次式により静弾性係数およびポアソン比を求めた。

・静弾性係数　(E_c)

$$E_c = \frac{S_1 - S_2}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} \times 10^{-3}$$

E_c ：各供試体の静弾性係数　(kN/mm^2)
S_1 ：最大荷重の1/3に相当する応力　(N/mm^2)
S_2 ：縦ひずみ50×10^{-6}のときの応力　(N/mm^2)
ε_1 ：応力S_1によって生じる縦ひずみ
ε_2 ：50×10^{-6}

・ポアソン比　(v)

$$v = \frac{\varepsilon t}{\varepsilon l}$$

v ：ポアソン比
εt ：横ひずみ
εl ：縦ひずみ

図－5 に圧縮強度試験の状況写真を示す。

なお，圧縮試験後の供試体を使用して，材齢 50 年のコンクリートの中性化深さも測定した。

図－5　圧縮強度試験の状況

表－4　材齢 50 年における圧縮強度試験の結果

供試体番号 (No.)	材齢 (年)	供試体直径 (mm)	供試体高さ (mm)	断面積 (mm^2)	最大荷重 (kN)	圧縮強度 (N/mm^2)	圧縮強度 (kgf/cm^2)	静弾性係数 (kN/mm^2)	ポアソン比
LS1-2	50	450	900	159000	2790	17.5	180	25.1	0.240
LS2-2	50	450	900	159000	3410	21.4	219	20.5	0.295
LS7-1	50	450	900	159000	3190	20.1	205	20.6	0.229
平均値	-	-	-	-	-	**19.7**	**201**	**22.1**	**0.255**

４．試験結果

試験により得られた各供試体の圧縮強度と静弾性係数の結果を**表－4** に示す。

圧縮強度の平均値は 19.7N/mm^2（201kgf/cm^2）で，3 体の試験値の変動率は 10%程度であった。静弾性係数の平均値は 22.1kN/mm^2 で 3 体の試験値の変動率も 10%程度であった。ポアソン比の 3 体の平均値は 0.255 であった。

なお，試験終了後の供試体を使用して中性化深さを測定した。供試体の平均的な中性化深さは 36mm 程度であった。**図－6** に中性化深さの測定状況を示す。

図－6　強度試験後の中性化深さ測定状況

５．過去の試験結果との比較

今回材齢 50 年で圧縮強度試験を実施したが，同時期に，同様な材料と配合で作製された供試体は，材齢 1，10，20，30，40 の各年に圧縮強度試験が実施されている。それらの結果を併せた試験結果を**表－5** に示す。

圧縮強度の最大値は材齢 10 年目に現れ，50 年目の現在はその時より強度が低下しているが，材齢 1 年の圧縮強度と比較すると 1.28 倍，設計基準強度 14.4N/mm^2（147kgf/cm^2）の 1.37 倍の強度となっている。

６．試験結果の考察

小河内ダム以外に，材齢 30 年までの長期材齢の試験結果を得ている例[3)]が文献に示されているので，それらの結果を併せて材齢と強度の関係を **図－7** に示す。

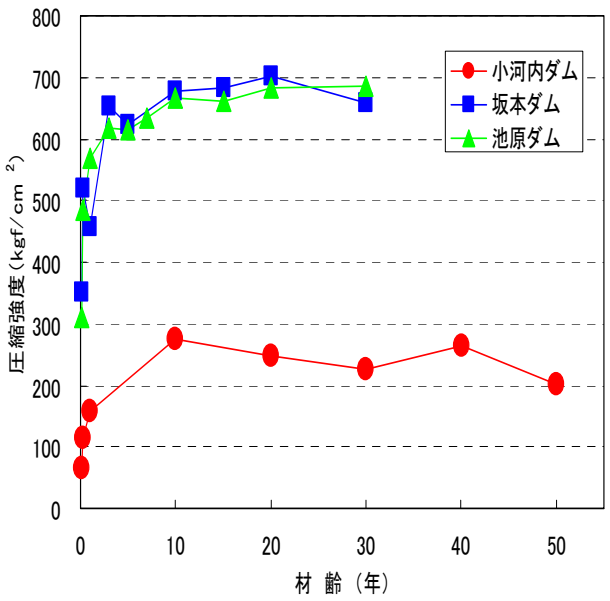
ただし，小河内ダムの 1 年の試験値は直径 150mm の試験値を直径 450mm 供試体の値に換算したものであり、他のダムの結果はφ150×300mm の供試体による。

坂本ダム，池原ダムは高さが 100m クラスのアーチダムであり，圧縮強度が 50N/mm^2 を超えるようなコンクリートが長期強度試験に使用されているが，小河内ダムの場合は材齢 1 年においても 15N/mm^2 程度の低強度のコンクリートが長期強度試験に使用されている。また，他の例は直径 150mm の供試体が使用されていること等も異なっている。さらに，小河内ダムではフライアッシュを混合しているのに対して，他の例は中庸熱ポルトランドセメントが単味で使用されている。

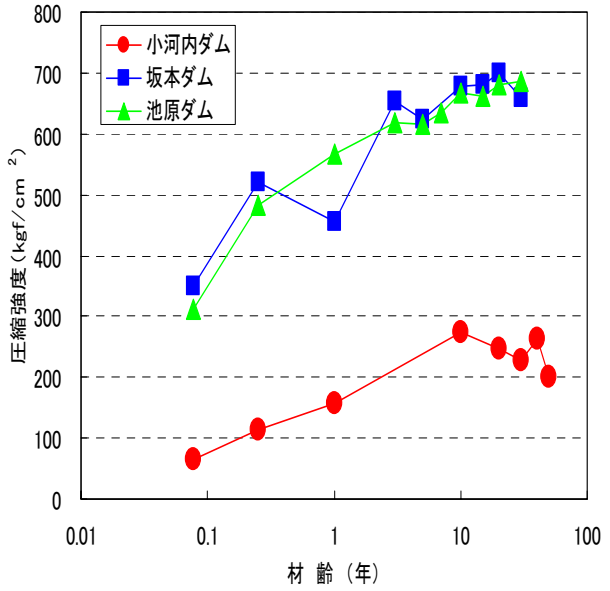
しかしながら，どのダムコンクリートも材齢 10 年程度を境に強度がほとんど増加しなくなっている。

表－5　過去の試験も含めた圧縮強度試験結果

材齢	圧縮強度 (kgf/cm^2)（下段（）内 N/mm^2） ①	②	③	平均値	標準偏差	変動係数 (%)	試験年月
1 年	155 (15.2)	160 (15.7)	157 (15.4)	157 (15.4)	2.52 (0.25)	1.6	昭和 33 年
10 年	266 (26.1)	296 (29.0)	263 (25.8)	275 (27.0)	18.2 (1.77)	6.6	昭和 42 年
20 年	258 (25.3)	235 (23.0)	250 (24.5)	248 (24.3)	11.7 (1.15)	4.7	昭和 52 年 12 月
30 年	207 (20.3)	258 (25.3)	216 (21.2)	227 (22.3)	27.2 (2.67)	12.0	昭和 62 年 8 月
40 年	288 (28.2)	262 (25.7)	241 (23.6)	264 (25.8)	23.5 (2.30)	8.9	平成 9 年 9 月
50 年	180 (17.5)	219 (21.4)	205 (20.1)	201 (19.7)	19.8 (1.95)	9.8	平成 20 年 2 月



図－7　長期材齢の圧縮強度試験結果



図－8　時間軸を対数とした長期材齢の試験結果

長期材齢の強度変化をより明確にするために，時間軸を対数グラフにしたものが図－8 である。

時間軸を対数にした場合は，小河内ダムでは材齢 10 年目から，他のダムでも 20 年目から，グラフの勾配に変化のきざしが見られるような感じもするが，ばらつきもあり変化の状況を明確に述べるためには，材齢 100 年程度まで継続試験を行い，長期材齢の試験結果を得る必要があると考えられる。それよりも 50 年経過後の現在においても．設計基準強度 14.4N/mm^2（147kgf/cm^2）に比べて，約 1.37 倍となっていることが実務的には安心で，かつ重要な意味があるものと思われる。

なお，コンクリートはダムの内部コンクリートであり適用範囲が適切かどうかわからないが，参考のために測定した中性化深さは，土木学会式[4] によるフライアッシュセメント使用コンクリートの材齢 50 年での中性化深さの計算値（25mm）より 40%程度上回っていた。次回も継続して中性化の測定をすることは，超長期の測定データの蓄積として，学術的には大きな意味があると考えられ，今後も引き続き測定していきたい。

7．まとめ

本試験により得られた結果を以下にまとめる。

(1)　小河内ダム建設時に製造され，保管されているフライアッシュ使用の水結合材比約 60%のダムコンクリート大型供試体の材齢 50 年の圧縮強度は，19.7N/mm^2 であった。

(2)　強度は材齢 10 年のピーク時よりも低下しているが，材齢 50 年においては設計基準強度よりも 37%程度上回っていた。

(3)　参考のために測定した中性化深さは土木学会式よる値よりも 40%程度大きかった。

8．今後の予定

本供試体の超長期の圧縮強度については，材齢 100 年程度までの超長期観測データが無ければ明確なことはわからない。供試体がまだ少々残っているので，これらを計画的に試験すると共に，非破壊検査の手法なども利用して，今後も長期間にわたる継続的な試験を実施していくことが望ましいと思われる。

本試験はダム管理者の東京都より受託を受けた財団法人土木研究センターが実施したが，本報告をまとめることができたのは小河内ダムのコンクリートについて 50 年にもわたる長期の試験を計画した，ダムの建設担当者，何代にもわたって計画を実施してきたダム管理事務所担当者，実験施設を使用させていただいた独立行政法人土木研究所等多くの関係者の努力および協力の賜物である。ダムの管理者としてこれらの関係者にあらためて深謝の意を表します。

参考文献

1)　東京都水道局：小河内ダム，pp.111 - 159，1960

2)　東京都水道局水源管理事務所：小河内貯水池ダムコンクリート供試体調査報告書，2008 (部内資料)

3)　電源開発株式会社総合試験所：池原・坂本ダムコンクリート長期材齢(100 年)試験（材齢 30 年），1994

4)　土木学会：コンクリート標準示方書（維持管理編），pp.92 - 93，2007