

# 昭和初期に造られたアーチ型鉄筋コンクリート 構造物の事例紹介

栗原 淳<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国地方整備局 出雲河川事務所 工務課 (〒693-0023 出雲市塩冶有原町5丁目1番地)



斐伊川放水路事業において、一級河川斐伊川水系神戸川の拡幅を行うにあたり、洪水流下時に支障となる旧神戸堰（固定堰）の撤去が必要となった。旧神戸堰は昭和2年に完成した農業用取水堰で、当時の農業施設としては珍しい多連アーチ型の鉄筋コンクリート構造物であり、土木遺産にも位置付けられた堰である。さらに、各種委員会より堰に関する資料の保存を要望されていた。

以上のことから旧神戸堰を撤去する前に堰資料の保存を行った。今回はその中で実施した「コンクリート品質試験結果」及びそこから見えてくる当時のコンクリート品質について紹介する。

キーワード コンクリート, セメント, 強度, 粒度, 品質 (耐久性), 塩化物

## 1. 旧神戸堰の概要

旧神戸堰は、島根県出雲市を流れる一級河川斐伊川水系神戸川の7k500付近に位置し、大正14年に着手し昭和2年に完成した堰延長94.55m、高さ1.82m、総コンクリート量約1,000m<sup>3</sup>の鉄筋コンクリート造多連アーチ型取水堰である。(写真-1)

アーチ構造とした経緯については、旧神戸堰建設当時セメントが高価であったためセメント量を減らすこと及び計画地盤が湧水の多い軟弱地盤であったため自重の軽減を図ったといわれている。

旧神戸堰は約80年に渡り農業用の取水堰として出雲市内の田畑へ水を供給する役割を果たしてきたが、その機能を新堰へ移行し、平成22年6月に撤去完了した。



写真-1 旧神戸堰運用時（神戸川右岸下流より）



写真-2 旧神戸堰撤去前（神戸川左岸上流より）

## 2. 旧神戸堰のコンクリート

旧神戸堰施工時のコンクリート材料についての文献は残されていないが、次の材料が使用されていたと考えられる。

セメントは、島根県では昭和50年代前半までは高炉セメントの使用事例がなく、普通ポルトランドセメントが使用されていたと考えられる。

骨材は、「日本取水堰堤誌1941年」<sup>1)</sup>より神戸川地表1m程度まで礫を有する地盤と記されており、昭和時代まで神戸堰下流で砂利の採取が行われていたため、神戸川の砂利を使用していたと考えられる。

混和剤については、昭和25年より使用され始めた材料で、当時はまだ開発されていない。

コンクリート構成材料の中でもセメントについては、当時と現代の材料では品質が異なるため、普通ポルトランドセメントの品質推移に表-1に示す。

表-1 普通ポルトランドセメントの品質推移

年度	粉末度		凝結(t-m)		圧縮強さ(N/mm <sup>2</sup> )		
	比較面積 (cm <sup>2</sup> /g)	88 μm残分 (%)	始発	終結	3日	7日	28日
1916年(大正5年)	—	6.7	2-39	5-26	—	11.7	21.3
1921年(大正10年)	—	12.6	2-16	7-31	—	6.7	14.1
1926年(昭和元年)	—	7.0	2-14	6-02	—	12.7	22.5
1935年(昭和10年)	—	2.1	1-58	3-27	10.7	18.0	32.5
1945年(昭和20年)	—	4.6	2-10	4-26	6.2	10.2	18.8
1955年(昭和30年)	3340	2.8	2-22	3-09	11.9	21.5	38.5
1965年(昭和60年)	3310	0.7	2-41	3-42	15.3	25.3	41.7
1991年(平成3年)	3390	0.6	2-23	3-15	15.5	25.1	41.5
1998年(平成10年)	3420	—	2-08	3-11	28.2	43.8	61.6
2010年(平成22年)	3360	—	2-04	3-02	30.8	45.8	62.0

※コンクリートの長期耐久性(長瀬重義監修)より

旧神戸堰が施工された時代のセメントは現在の物と比較すると粒径が大きく凝結時間が遅く、初期強度は比較的低いものであった。

### 3. 試験項目及び結果

旧神戸堰からコンクリートコアを採取(写真-3,4)し、コンクリートの性状、品質について各種試験を実施した。



写真-3 コア採取箇所



写真4 コア写真

### (1)試験項目

実施試験項目については、表-2のとおり。

表-2 試験項目一覧

試験名	試験方法	試験検体数
圧縮強度試験	JIS A 1108	3
割裂引張強度試験	JIS A 1113	3
硬化コンクリートの配合試験	セメント協会法 F18 F23	3
硬化コンクリートの気泡組織	ASTM C 457-98	3
硬化コンクリート中の塩化物含有量	JIS A 1154	3
硬化コンクリート中骨材のアルカリシリカ反応	JIS A 1145	1

※試験数3はアーチ部の上・中・下段位置

### (2)圧縮・引張強度試験結果

表-3 強度試験結果

コアの強度試験結果			
位置	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度/圧縮強度比
上段 No.7	25		1/10
上段 No.1		2.51	
中断 No.2	18.5		1/10
中断 No.8		1.95	
下段 No.3	26.9		1/13
下段 No.6		2.06	

### (3)硬化コンクリートの配合推定結果

表-4 配合推定結果

試料名	表乾単位容積質量 (kg/m <sup>3</sup> )	絶乾単位容積質量 (kg/m <sup>3</sup> )	吸水率 (%)	配合推定結果		
				セメント量 (kg/m <sup>3</sup> )	骨材量 (kg/m <sup>3</sup> )	水量 (kg/m <sup>3</sup> )
上段 No.4	2355	2267	3.9	252	1996	104
中段 No.5	2317	2225	4.2	260	1940	118
下段 No.9	2318	2221	4.4	251	1949	120

表-4の配合推定結果より、旧神戸堰の配合は以下と推察される。

単位セメント量 : 254kg/m<sup>3</sup>  
 単位骨材量 : 1,926kg/m<sup>3</sup>  
 単位水量 : 114kg/m<sup>3</sup>  
 水セメント比 : 45%

### (4)硬化コンクリートの気泡組織測定結果

表-5 気泡組織測定結果

記号	全気泡数 (個)	単位長さ当たりの気泡数 (個/mm)	平均弦長 (mm)	比表面積 (mm <sup>2</sup> /mm <sup>3</sup> )	ペースト空気比	空気量 (%)	気泡間隔係数 (μm)
コア No.4	356	0.083	0.347	11.52	6.38	2.9	449
コア No.5	262	0.061	0.255	15.71	12.84	1.6	451
コア No.9	300	0.07	0.32	12.51	8.9	2.2	481
例	546	0.228	0.195	20.53	6.51	4.4	254

(5)硬化コンクリート中の全塩化物イオン量測定結果

表-6 全塩化物イオン量測定結果

試料の記号	かさ比重 (kg/m <sup>3</sup> )	全塩化物イオン量	
		(%)	(kg/m <sup>3</sup> )
上段 No.7	2330	0.013	0.3
中段 No.2	2320	0.014	0.32
下段 No.3	2320	0.013	0.3

(6)硬化コンクリート中骨材のアルカリシリカ反応性試験結果

表-7 アルカリシリカ反応性試験結果 (化学法)

試料名	アルカリ濃度減少量 (Re) (mmol/l)	溶解シリカ量 (Sc) (mmol/l)	判定
神戸堰	130	364	無害でないもの

4. 試験結果に対する考察

各試験結果に対する考察を以下に示す。

(1)強度試験

表-3の強度試験結果より圧縮強度は、18.5~26.9N/mm<sup>2</sup>となっており、中段部コアにおいて圧縮強度が低い値が出ているが、これは圧縮試験時にせん断破壊をを起こしており、コア内部に何らかの欠陥があったものと推測される。

引張強度は圧縮強度の1/10~1/13となりほぼ理論どおりの結果となっており、旧神戸堰はコンクリート構造物として健全な力学特性を有していたと考えられる。

(2)配合

1921年(大正10年)国鉄の「土木及び建築工事示方書」<sup>2)</sup>によると、当時のコンクリートは容積配合であり、一般的な配合(セメント:砂:砂利の比率)は、橋台・橋脚強度を必要とする鉄筋構造物 1:2:4~1:3:6、建築物・一般の鉄筋コンクリート 1:2:4~1:2.5:5、基礎・強度を必要としないコンクリート 1:3:6~1:4:8とされている。

当時は水セメント比と強度の概念は少なく、1:2:4配合で28N/mm<sup>2</sup>程度、1:3:6で21N/mm<sup>2</sup>程度が経験的な数値として考えられていた様である。

旧神戸堰の配合の基準は、鉄筋コンクリートの標準的なものと考え、1:2:4配合(セメント骨材比1:6)の可能性が大きいと考えられる

ここで当時の配合をスランプ値(10cm)として推定した配合と現在の配合と比較を推定する。表-8の推定結果によると旧神戸堰のセメント骨材比は約1:8となる。

試験および推定検討により得られた配合の妥当性の検証は難しいが、「土木学会誌1巻1号(大正4年2月)」<sup>3)</sup>に記載されている山梨県猿橋で施工された猿橋水道橋の橋台、取り付け工事では、セメントと骨材の比

率は1:9であった事例もあり、一概に当時の配合量を確定するのは困難である。

表-8 推定配合

コンクリートの配合の比較		W/C	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
配合			水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
大正・昭和初期 (砂利・川砂)	旧神戸堰で使用したと推定される配合(コア試験より)	45	114	254	1962	-	
	容積配合(1:2:4)よりの推定配合(スランプ値10cm程度)	67.7	170	250	800	1170	
現在の配合 (粗骨材は砕石 細骨材は加工砂)	現在の鉄筋コンクリートの配合(BB24-8-20)	54.8	162	296	810	1026	
	骨材40mmスランプ5cmの配合例(BB24-5-40)	52.6	144	274	745	1161	

また、単位水量は114kg/m<sup>3</sup>で、ほとんどスランプを有しないコンクリートとなり、施工性に関していえばRCC舗装の配合と同程度のワーカビリティしかない水量となるため、実際の施工は困難であると考えられる。

しかし、表-8の配合比較よりスランプを10cmとしようすると大量の水が必要となる。

試験結果から考察すると、旧神戸堰建設には硬練りのコンクリートが使用されたと推測される。

(2)凍害

試験結果より、旧神戸堰に使用されるコンクリートは以下の理由により凍害に対する耐久性が劣っていたといえる。

コンクリート中の気泡間隔係数が150~200μmとした場合には対凍害性は著しく増大するといわれ、この値が大きい場合には凍害を受けやすい。気泡分布測定結果では、449~481μmと大きい値となった。

空気量についても、コンクリート中の空気量を3~6%とした場合には、耐凍害性に優れるといわれるが、これ以下の場合、耐凍害性が下がる。

旧神戸堰の空気量は1.6~2.9%だったが、旧神戸堰は凍害を受けた形跡がない(写真-5)。これは、旧神戸堰は常時水流があることから凍結融解を受ける可能性が低いこと、もし凍害を受けたとしても、流水により凍害部が洗われ、凍害に対する影響は小さくなったのではないかと考えられる。



写真-5 旧神戸堰表面(摩耗状況:表面が洗われているが凍害による骨材の流出などは見受けられない)

### (3)塩害

土木学会コンクリート標準示方書[設計編：塩害に対する照査]<sup>4)</sup>では、鋼材位置における塩化物イオンの鋼材発生限界濃度は、0.3～2.4 kg/m<sup>3</sup>程度とされている。

構造物中から採取したコア供試体の塩化物イオン量はほぼ 0.30kg/ m<sup>3</sup>であることから、当該構造物中には鋼材腐食発生限界濃度の下限値に近い塩分が存在していたといえる。

旧神戸堰位置では飛来塩分の浸透によることも考えられるが、コンクリート表面には水流があり、塩分の飛来があっても洗い流される。

また、昭和 2 年に発行された『土木建築工事画報』<sup>5)</sup>では、厳寒中のコンクリート工事でコンクリートの練混水に塩分を混入した試験について記載されている。この試験では、練混ぜ水に塩分を混入する事により、初期の強度を上げて初期凍害を抑制する方法について検討されている。

旧神戸堰についても、初期強度発現のためコンクリートの練混水に塩分を混入したことも考えられる。

以上の結果より、コンクリート中の鋼材腐食発生限界濃度下限値に達する塩化物イオンはコンクリートの製造当初から混入されたものであると推測される。

しかし、コンクリート内部の鉄筋には腐食が認められず(写真-6,7)、健全な状態であった。そのことから、製造当時から高い塩化物イオンが存在しても鉄筋腐食が発生しないほど、良質なコンクリートであったと推測される。



写真-6 撤去部断面(鉄筋断面)



写真-7 鉄筋状況

### (4)アルカリ骨材反応

試験結果ではアルカリシリカ反応性(化学法)より「無害でない」と判定され、アルカリシリカ反応性の可能性がある骨材が使用されていたことが判明した。

しかし、完成後 80 年が経過した当該構造物には、試験結果から反応性骨材が使用されていたにもかかわらず、アルカリシリカ反応によるとみられる変状が認められなかった。この主要因は、セメント中のアルカリ分が低かったためと考えられる。

アルカリの主な供給源はセメントであり、セメント原料には元来、粘土鉱物などからアルカリ分が 0.5～0.6%含まれているが、この程度のアルカリ分ではアルカリシリカ反応が生じる可能性はほとんどない。

セメントにアルカリ分が含まれる理由として、わが国のセメント工場では、昭和 40 年から 50 年代半ばにかけて、セメントの製造設備が改良され、その製造過程によりアルカリ分の多いセメントを供給することになった。わが国でアルカリシリカ反応によるコンクリート構造物の早期劣化が顕在化したのは、昭和 50 年頃からであり、それ以前にはこの種の事例が報告されていない。

旧神戸堰においては施工が昭和初期であり、当時のセメントの製造方法から判断し、アルカリ分の少ないセメントが使用されたためにアルカリシリカ反応が発生しなかったものと推測される。

## 5. 全国の事例

試験結果及び考察を踏まえ旧神戸堰は健全なコンクリート構造物であったといえる。

全国での事例では、明治後期に施工された小樽港北防波堤塊ブロックについては、80年を経過した平成2年に強度試験を実施し30N/mm<sup>2</sup>という良好な結果が出ている。また、昭和17年に施工された武智丸においては、60年後の平成15年に強度測定をしたところ34.6N/mm<sup>2</sup>という良好な結果が出ている。さらに、武智丸はコンクリート中の塩分が2.5kg/m<sup>3</sup>含まれていたにもかかわらず、コンクリート中の鉄筋は健全であることが報告されており、昭和初期のコンクリート構造物は長い年月を経ても神戸堰と同様に十分な強度を有し、コンクリート品質の劣化が見られない構造体として残っている事例が存在する。

## 6. 現代コンクリートとの比較

旧神戸堰施工当時のコンクリートと現代のコンクリートでは材料、品質、施工方法などの面で大きな変化を遂げてきている。そこで現代コンクリートとの様々な比較を行った。

材料で大きく変わったのは、混和剤の登場であるが、これは旧神戸堰には使用されておらず比較の対象とはしない。

それ以外では、やはりセメント品質である。

現代では、早期強度発現のため粒度の小さいものが主流となった。前述のとおり、昭和初期には粒度の大きいセメントを使用しており、強度は現在の約1/3、粒度は約1/10程度である。粒度が大きいことにより初期強度は出にくい、未反応セメント粒が多く存在するため乾燥収縮が小さくひび割れが起こりにくく、長期強度に優れたセメントとなるといえる。

また、アルカリシリカ反応性の骨材を使用している可能性があるが、その影響が構造物に出ていないことを考えると、現代のセメントに比べ、アルカリ分の少ないセメントを使用していたのではないかと推測される。

施工方法についていえば、締固めにおいて現代では一般的にバイブレータによる締め固めを行っている。

旧神戸堰が施工される時代には、生コンクリート工場はなく、現場練りのコンクリートを「大蛸」「小蛸」で突き固めるといった方法であったと推測される。この方法は非常に手間のかかる方法であったと思われるが、「大蛸」「小蛸」での突き固め施工では気泡の発生が少なく非常に良質なコンクリートの施工が出来たのではないかと推測される。

## 7. まとめ

旧神戸堰のコンクリート試験結果より品質の面で現在の規定値を満たさない結果が出たが、コンクリート構造の劣化としての影響が見られていない。

その要因の一つとして、セメント品質が挙げられる。凍害、塩害に対して劣る結果が出たにもかかわらずほとんどひび割れ等の影響は見られなかった。取水堰として常時流水の流れる特殊な環境下にあったからこそ、凍害、塩害に対して耐久性が保てたという事情もあったと思われるが、アルカリ成分の少ないセメントを使用することで、アルカリ骨材反応によるひび割れが抑制され、また、粒度の大きいセメントを使用することで未反応セメント粒が多く存在し、長期強度に優れるコンクリートとなっている。

さらに、今回の結果や全国的な他事例から混和剤の存在しない大正後期から昭和初期にかけて施工された構造物として凍害対策には、練り混ぜ水に塩分を混入するこ

とにより施工時の凍結防止及び初期強度を上げるなど、施工方法を工夫し、現在のような明確な基準もない中で高品質なコンクリートを施工していることが分かった。

しかし、当時のセメントは初期強度が出にくく、今回の試験結果から硬練りコンクリートを人力で突き固めるなど、施工が非常に大変であったろうこともうかがえるが、ひび割れ等の劣化はコンクリートのコンクリートの性能事態を脅かす原因にもなり、打設時からこれらの対策がなされていれば、コンクリートは80年経っても構造物としての健全な機能を期待できる材料であることが確認できた。

## 8. 最後に

これまで日本では、コンクリートの早期施工、早期強度発現を目標として材料が改良され、旧神戸堰施工当時に比べ、セメント自体は品質の優れた物になっている。

しかし、セメントの大量生産、早期施工によりそれまで発生していなかったアルカリシリカ反応等によるひび割れの発生により耐久性が損なわれる恐れがあり、施工後の対策が必要となるなどの問題が発生している。

日本ではコンクリート標準仕方書におけるコンクリートの規格は性能照査型に移行し、耐用年数と環境条件から要求性能を満足する材料・工法選定が必要になっている。また、海外では耐久性を考慮し、粒度の大きなセメントを用いて強度よりも耐久性を重視している事例もある。

旧神戸堰のコンクリート資料を整理することにより、昭和初期のコンクリート施工に関する貴重な基礎資料を得ることができた。

今回の神戸堰の試験結果が今後のコンクリート構造物発展の一助となれば幸いである。

### 参考文献

- 1) 日本取水堰堤誌 1941年(昭和16年)
- 2) 国鉄:土木及び建築工事示方書1921年(大正10年)
- 3) 土木学会:土木学会誌 1巻1号 (大正4年2月)
- 4) 土木学会:コンクリート標準示方書[設計編]
- 5) 土木画報社:土木建築工事画報 昭和2年