超高耐久性コンクリートの施工

——天河大弁財天社建替工事——

柳 橋 邦 生^{*1}・斎 藤 俊 夫^{*2}・佐久田昌治^{*3}

潮 永 廉 夫^{*4}・田 中 功^{*5}

概 要 天河大弁財天社の新社屋の設計においては、草創期の平安時代の姿をできるだけ忠実に復元することに主眼が置かれた。構造形式としては、基礎および地下部分が鉄筋コンクリート造、その上部が木造となっている。木造建築物は、日本の多くの寺に見られるように構造物としての寿命もたいへん長いので、基礎および地下部分の鉄筋コンクリートにもそれに見合う耐久性をもたせなければならない。この目的から「超高耐久性コンクリート」を採用した。施工にあたっては、とくに、混和剤の計量・添加、打込み・締固め作業、打設後の養生に注意をはらい、耐久性の確保につとめた。その結果、良好な耐久性能を確保することができた。

キーワード：耐久性、コンクリート工事、中性化、調合計画、アルカリ骨材反応、施工管理、養生

1. はじめに

弁財天（または弁天）とは、本来、インドの神の一つであり、河川を神格化したものである。もともとは農業神であったが、後に音楽、弁舌の神となり、現在では福德神として信仰を集めるようになっていく。像としてはいろいろなものがあったが、琵琶を弾いている美しい女性が代表的である。ちなみに、「弁天娘」と言えば“非常に美しい娘”を意味する。

天河大弁財天社は日本三大弁天の一つであり、紀伊半島の中央部、奈良県吉野に位置している。この神社は神武天皇がヒノモトという言葉霊を賜った地という伝説があり、また、壮麗な神社の建立については、壬申の乱での戦勝の威徳に感謝し、天武天皇によって造営されたと伝えられている。現社殿は明和5年（1768年）に修復されたが、老朽化が進んだために今回の建替えとなったものである。

今回の220年ぶりの建替えにあたっては、古くから伝わる古絵図を参考に、可能なかぎり草創期の平安時代の姿を再現するように設計された（写真—1）。新弁財天社は本殿、拝殿、拝所、神楽殿の4つの社殿で構成され、本殿は、神明造りの屋根に反りをもたせて前垂れを長く

した「流れ造り」、その他の社殿は入母屋造りとなっている。

この社殿の主要構造部分は木造であるが、本殿基礎部分と神楽殿の地下1階部分は鉄筋コンクリートとして設計されている。木造建築物の寿命は1000年程度と考えられるのに対して、鉄筋コンクリート建築物の寿命は通常の場合で60～100年程度と考えられる。主要構造物が寿命1000年クラスを目指しているのであるから、これを支える基礎部分も当然ながらこれに匹敵する耐久性を要求されることになる。このような背景から、最近開発されたコンクリートの耐久性を大幅に改善する技術「超高耐久性コンクリート」を鉄筋コンクリート部分に使用することになった。

超高耐久性コンクリートは、本殿基礎部分と神楽殿の地下1階鉄筋コンクリート部分に約200m³使用された。以下に施工の概要を述べる。

2. 工事概要

工 事 名 称：天河大弁財天社建替工事
工 事 場 所：奈良県吉野郡天川村坪内 79
設計・施工：㈱竹中工務店
工 期：1987年4月～89年6月（予定）
規 模：建築面積 409.08m²
延 面 積 422.29m²（柱間）
717.86m²（屋根）

建物全体の模型写真を 写真—1 に、平面図を 図—1

*1 やなぎばし・くにお／㈱竹中工務店技術研究所研究員

*2 さいとう・としお／同上研究員

*3 さくた・まさはる／同上主任研究員（正会員）

*4 しおなが・すみお／同上大阪本店工事主任

*5 たなか・いさお／同上作業所長

写真—1 天河大弁財天社模型写真

図—1 立面図

Construction of the New Tenkawa-Benzaiten Shrine
—Use of Concrete containing Durability Improving Agent—

By K. Yanagibashi, T. Saitoh, M. Sakuta, S. Shionaga and I. Tanaka

Concrete Journal, Vol. 27, No. 5, pp. 50~56, May 1989

Synopsis Tenkawa-Benzaiten is one of the most famous Benzaiten Shrine, which was originally built in Heian era. The whole structure of the shrine is now being renewed. The new shrine is designed as the original shape in the Heian era. The basement part of the shrine is designed as reinforced concrete and the other part as wood. Since wood has high durability as is shown by many Japanese old temples, the reinforced concrete used in the basement is required to have equivalent durability. For this purpose durability improve agent was used as concrete admixture. In addition, concrete construction was carried out very carefully in order to obtain dense cement hydration product.

Keywords : durability, concrete construction, carbonation, concrete mix proportion, alkali aggregate reaction, construction management, curing

に、立面図を 図-2 に、主に使用する神楽殿の鉄筋コンクリート躯体部分の概要を 図-3 に示す。

3. 超高耐久性コンクリートの概要

「超高耐久性コンクリート」という用語自体は、学協会などで正規に定義されたものではない。筆者らは、数年前から鉄筋コンクリートの耐久性を改善する機能をもつ

化学混和剤の研究を進めてきたが、通常的环境下における鉄筋コンクリートの劣化の主要因である「中性化」および「塩分浸透」の要因に対して顕著な改善効果をもつ混和剤の見通しを得た¹⁾。鉄筋コンクリートの耐久性は単に材料としての特性ばかりでなく、打込み、締固め、養生などの施工上の諸要因によっても深く左右されるものであるが、上記の耐久性改善用の混和剤を用いて良好

図—4 中性化促進試験
の例 (30℃, 60%
RH., CO₂5%)

図—5 塩分浸透試験結
果の例 (飽和食塩
水, 20℃)

図—6 乾燥収縮試験結果の例 (20℃, 60%RH.)

な条件で施工されたコンクリートは、通常のコンクリートに比較してきわめて良好な耐久性をもっていることが明らかになっている。このことから、筆者らは、耐久性改善剤を用いてコンクリート自体の耐久性を改善するとともに、現在の技術水準で望み得る最高レベルの施工条件で施工されるコンクリートを「超高耐久性コンクリート」と称している。

耐久性改善用混和剤の主な機能は、

- 1) コンクリート中に空気を連行せず、逆に空気を押し出す機能
- 2) コンクリートの空気量が少ないにもかかわらず、コンクリートに十分な凍結融解抵抗性を付与する機能
- 3) コンクリートの乾燥収縮を通常のコンクリートの約半分に低減する機能
- 4) 緻密なコンクリート組織を形成して鉄筋コンクリートに有害な物質の透過を抑え、コンクリートの耐久性を高める機能

の4点に集約される。

図—4 に中性化促進試験結果の例を、図—5 に塩分浸透試験結果の例を、図—6 に乾燥収縮試験結果の例を、図—7 に一軸圧縮試験結果の例を、図—8 に凍結融解抵抗性試験結果の例を示す²⁾。

超高耐久性コンクリートは、通常使用されている AE 減水剤を使用したコンクリートに比べ、圧縮強度および凍結融解抵抗性が同等であるが、中性化深さや塩分浸透深さが 1/2 以下に、乾燥収縮率が約 60% に低減されている。ちなみに、中性化促進試験結果から寿命予測を行った場合、通常のコンクリートの 10 倍以上の耐久性を示す³⁾。

4. コンクリートの調合

コンクリートの調合設計にあたっては、

- 1) 耐久性の観点から、水セメント比は 0.5 以下 (好ましくは 0.45 前後)。

図—7 一軸圧縮試験結果の例 (同一水セメント比)

図—8 凍結融解抵抗性試験結果の例

- 2) 単位水量は 175 kg/m³ 以下。
- 3) 部材への良好な充填性を確保するために流動化コンクリートとすることとし、ベーススランブ 12 cm 以下、流動化後のスランブは 18 cm 以下とする。

の3点を基本とした。
この3点にもとづき試し練りを行った結果、実施調査を 表—1 のように決定した。なお、コンクリート打設時の分離を考慮して、細骨材率を 2~3% 程度高めに設定している。

通常の建築工事では、コンクリートの設計基準強度をもとにレデーミクストコンクリート (生コン) 工場の強度のばらつき、気温による強度補正などを考慮してコンクリートの調合を定めることになっているが、本工事では、上記の3点にもとづいて調合を決定し、この調合のコンクリートが強度条件を満足するか否かをチェックすることとした。

表-1 コンクリートの調合

ポンプ ベイスラ (cm)	流動化後ス (cm)	空気量 (%)	水比セメント (%)	粗大骨材の最 (mm)	細骨材率 (%)	単位水量 (kg/m ³)	絶対容積 (l/m ³)				重 量 (kg/m ³)				化学混和剤の使用量 (cc/m ³)
							セメント	細骨材	粗骨材	混和剤	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤	
12	18	—	46	25	45	175	121	317	387	15	380	(表乾) 812	(表乾) 1 018	15	耐久性改善剤* 15 200 流動化剤 228

(注) * 耐久性改善剤は、グリコールエーテル誘導体とアミノアルコール誘導体を主成分とするF社製のものである。

図-9 奈良県天川村の気温

本工事の設計基準強度は 240 kgf/cm^2 である。天川村の平均気温のデータを 図-9 に示す。月平均気温のもっとも低い1月で 3.2°C であった。今回、試し練りの結果得られた4週標準水中養生の一軸圧縮試験結果では、 421 kgf/cm^2 が得られている。気温のもっとも低いときの強度補正量 60 kgf/cm^2 、さらに生コン工場の強度のばらつきを考慮しても、設計基準強度を十分に上回る構造体強度が確保できると考えられた。

5. 施工および施工管理

5.1 施工の概要

コンクリートの施工計画の立案にあたっては、できるがぎり基本に忠実に、かつ JASS 5 の第17節「高耐久性コンクリート」の主旨を考慮することとした。具体的に考慮した事項は以下のとおりである。

- 1) 1時間当りのコンクリート打設量は 20 m^3 以下とし、打込み、締固めの作業が十分に追従できるようにする。
- 2) コンクリート打設に先立ち、配筋およびかぶり厚さのチェックを入念に行う。
- 3) コンクリート打設に先立ち、型わくに水湿しを行うとともに、がら、くずの清掃を完全に行う。
- 4) 打込み作業中は、パイプレータをできるだけこまめに移動し、打込み箇所の締固めを十分に行う。また、1層の打込み厚さは 60 cm 以下とし、立上がり部分のコンクリートが常にほぼ同じ高さとなるように打ち込むこととする。

5) コンクリート打設後の養生にとくに留意し、打設後7日間は、スプリンクラーによって散水養生を完全に行うこととした。

これらの事項は、コンクリート施工の基本的事項として従来からよく言われていることであるが、諸般の事情からなかなか理想的なカタチでは行われていないのが実情であろう。本工事においては、コンクリート混和剤として耐久性改善剤を用い、コンクリート材料自体の耐久性を高める手段を講じているので、施工のグレードもそれにふさわしいものでなければならないとの考えから、上記の事項が厳密に実施できるよう努めた。

また、耐久性改善剤および流動化剤は、すべて生コン工場で行うこととした。これは、現場での計量・投入に比較して、工場での計量・投入のほうが管理を確実に実施できること、現場から生コンクリートの運搬時間がわずかに5分程度であり、流動化剤の効果が十分に持続できると考えられたからである。

実際の施工にあたっては、小型のアジテータ車（積載量 2 m^3 ）でコンクリートの運搬を行い、ブーム付きのコンクリートポンプ車でコンクリートの圧送を行った。コンクリート打設時の全景を 写真-2~4 に示す。

5.2 コンクリートの品質管理

コンクリート打設時の管理として、スランプ、空気量、圧縮強度のほかに、コンクリート中の塩分含有量およびアルカリ総量の測定を行った。通常のコンクリート工事における管理項目としてスランプ、空気量、圧縮強度、塩分含有量を測定するのは当然であり、さらに本工事では、コンクリートの耐久性を重視しているために、アルカリ骨材反応に対しても厳密にチェックを行ったも

写真-2 打設の様子（全景）

表—2 コンクリートの管理記録表

打設年月日	打設場所	設計強度 (kgf/cm ²)	打設量 (m ³)	スランプ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (kgf/cm ²)*		塩分量 (kg/m ³)	アルカリ量 (R ₂ O kg/m ³)
						1 週	4 週		
1987.12.16	神楽殿基礎	240	24.75	17.3	0.7	173	335	0.11	1.7
12.28	〃 B1床	240	26.5	15.5	0.7	—	328	0.11	1.4
1988.2.2	〃 B1	240	65.5	17.8	0.6	206	321	0.09	1.5
2.25	本殿基壇	240	23.25	13.5	1.5	221	397	0.12	1.5
3.9	拝殿基礎	240	12.0	12.5	1.5	276	446	0.10	1.6
5.1	神楽殿犬走り	210	10.0	12.1	1.3	299	344	0.10	1.2

(注) * 圧縮強度試験体の養生は現場水中養生とした。

写真—3 バイブレータによる締固め

写真—4 筒先きの打込み状況

のである。

超高耐久性コンクリートの原理は、あくまで外部からの劣化原因の侵入の抑制をはかるものであって、はじめに混入してしまった塩分やアルカリ骨材反応そのものの制御を行うものではない。したがって、上記のようにはじめから混入される塩分、アルカリ量は、入念にチェックを行わなければならない。

アルカリ骨材反応に関しては、①低アルカリセメントを使用する、②反応性骨材の使用をさける、③コンクリ

ート中のアルカリ総量の規制 (R₂O 換算で 3 kg/m³ 以下) などの手段がある。本工事では、生コン工場にセメント試験成績表、骨材の反応性試験結果を求めて確認したほか、現場で打設されるコンクリートについてアルカリ総量の測定を行った。

塩分含有量の測定は、試料を粉砕後、硝酸により溶出させて、電位差滴定法により測定し、アルカリ総量は、同様に前処理を行ったのち、炎光分光光度計により測定した。

測定したコンクリートの管理値を表—2に示す。これらの値は、いずれも JASS 5 の「高耐久性コンクリート」の基準をクリアしている。

また、打設されたコンクリートが所定の耐久性改善効果を発揮できるか否かを確認する目的で、神楽殿基礎部分の打設時に 10×10×40 cm のはり型試験体を採取し、中性化促進試験および塩分浸透試験を行った。中性化促進試験は、4 週水中養生後、試験体側面を残してエポキシ樹脂を塗布したのち、30°C、60%R.H.、CO₂ 5% の条件で行い、所定の材令が経過後、フェノールフタレイン溶液を吹きかけ、赤変しない領域を中性化深さとした。また、塩分浸透試験は、4 週水中養生後、試験体側面を残してエポキシ樹脂を塗布したのち、20°C の飽和食塩水に浸漬し、所定の材令が経過後、フルオレセイン溶液および硝酸銀溶液を吹きかけ、蛍光を発した部分を塩分侵入深さとして測定した。結果を表—3に示す。

表—3 の結果は 図—4 および 図—5 と同一の条件で比較したものであるが、現場での管理試験結果である表—3 の値のほうが、中性化促進試験、塩分浸透試験ともに小さな値となっている。これは、図—4 および 図—5 のデータが水セメント比 50% であったのに対し、現場に打設したコンクリートの水セメント比が 46% と、やや低い値に設定されているためと考えられる。いずれにしても、通常のコンクリートの 10 倍以上の耐久性と評価した 図—4、図—5 のレベルをさらに上回る結果が確

表—3 中性化および塩分浸透試験

試験の種類	条 件	材令	侵入深さ(mm)
中性化促進試験	30°C、60%RH.、CO ₂ 5%	4 週	4.0
塩分浸透試験	飽和食塩水、20°C	2 週	8.5

認できたことから、本工事に用いられたコンクリートは「超高耐久性コンクリート」としての性能を備えていることが確認された。

なお、耐久性に関する現場でのコンクリートの品質管理試験は、いずれも促進試験によって行ったが、建物完成後も中性化、塩分浸透、アルカリ骨材反応の有無などにつき、適宜チェックを行い、打設されたコンクリートの耐久性の確認、促進試験の妥当性の確認を継続して行っていく必要があると考えている。

6. ま と め

現在、天河大弁財天社建替工事は地上の木造部分を施工中であり、1989年中には、すべての工事を終了する予定である。

本稿では、この工事の地下の鉄筋コンクリート部分の施工について報告させていただいた。このコンクリート工事を終えて痛感することは、最新の技術によってコンクリートの素材自体の性質を改善することは、それほどむずかしいことではないが、構造物としての耐久性を確保するためには、やはり古くから指摘されているコンク

リート施工の基本事項を厳密に守らなければならないということである。十分な締固め、散水養生、生コン工場の管理状況の把握という基本的な事項に注意を払うことは言うまでもない。

超高耐久性コンクリートの技術は、この基本的な品質を確保したうえで用いるのであって、単に特殊な混和剤を用いるだけではないことをお伝えして、まとめたい。

最後に、生コンクリートの製造および管理にあたり終始絶大なご協力を賜った天河生コン(株)の諸氏に謝意を表したい。

参 考 文 献

- 1) 佐久田・浦野・田中・杉山：高耐久性コンクリートの開発研究 その1～その3，日本建築学会大会学術梗概集，pp. 211～216，1986
- 2) 佐久田・斉藤・柳橋・田中・杉山：超高耐久性コンクリートの開発，セメント・コンクリート，pp. 50～57，No. 489，1987.11
- 3) M. Sakuta, I. Izumi, K. Tanaka, M. Sugiyama: Development of Highly Durable Concrete, Transaction of the Japan Concrete Institute, Vol. 9, 1987

＜図 書 案 内＞

JCI-C 13 コンクリート構造物の寿命予測と 耐久性設計に関するシンポジウム論文集

A 4 判・130 ページ／定価 5 000 円 (税 150 円)，会員特価 4 500 円 (税 135 円)・送料 300 円

JCI では、近年のコンクリート構造物の劣化問題に対する抜本的な対策として、従来存在しなかった「耐久性設計」を導入することを考え、この問題に関する調査研究を実施する目的で“耐久性設計研究委員会”を発足させたが、その研究成果とも言うべきシンポジウムが 63 年 4 月 6 日に開催された。本書は、その論文集である。

1. 経年 RC 構造物よりみた耐久性設計について
2. 総合評価に基づくコンクリート構造物の耐久性設計
3. 首都圏 JR 線におけるコンクリート構造物保守の現状
4. RC 構造物の耐久性設計及び寿命予測のための経年変化データの解析及び検討
5. アルカリ骨材反応によるコンクリートの劣化予測に関する基礎的研究
6. 複数の劣化因子から構成されるシステムの経時変化予測
7. 塩分雰囲気中におけるコンクリート構造物の寿命予測と耐久性設計について
8. 日本建築学会材料施工委員会 耐久性小委員会の 耐久性設計に関する考え方
9. 鉄筋コンクリート 構造物における鉄筋のかぶり厚さの信頼性設計手法の提案
—コンクリートの中性化によって鉄筋が腐食する場合—
10. コンクリート橋の余寿命診断と設計へのフィードバック
[付録] 委員会報告：コンクリート構造物の寿命予測と耐久性設計に関する技術の現状

●申込先：(社) 日本コンクリート工学協会「書籍販売係」

〒102 千代田区麹町 5-7 TBR ビル 708 号／電話 (03) 263-1571

＜申込方法＞ 書籍名・送付先を明記のうえ、前金(現金書留)にてお申込みください。