水力発電所バレルコンクリートの中性化と内部拘束温度ひび割れの関連の研究

（株）開発設計コンサルタント　正会員　○野嶋潤一郎
（株）開発設計コンサルタント　正会員　佐藤　孝史
はが野農業協同組合　正会員　篠原雄一郎
東洋大学大学院　工学研究科　正会員　中川　良隆

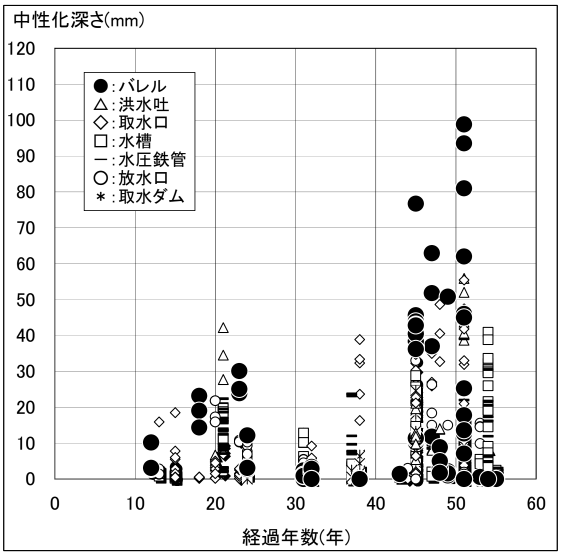
１．概要

地球温暖化問題に代表される地球的規模の環境問題やエネルギー資源の枯渇が叫ばれている昨今，CO_2 の発生が最も少なく，かつ純国産エネルギーである水力発電所の社会的重要性は，ますます高まっていく．しかし，現在稼働中の水力発電所の多くは，建設後 40 年以上を経過しており，設備劣化の進行による機能損失が懸念されている．LCC を考慮した最適な維持管理を行っていくためにも，設備の劣化原因を把握し，適確な劣化予測手法を確立する事が望まれている．

そこで，水力発電所各種コンクリートについて中性化・凍害・擦り減り等の調査を行い，劣化程度の把握に努めた．本稿では，そのうち中性化の進行が大きい水車バレルコンクリートを選定し，中性化促進要因として，内部拘束温度ひび割れに着目して検討・考察した．

２．中性化測定結果

水力発電工作物のうち，バレル・洪水吐・取水口・水槽・水圧鉄管架台・放水口・取水ダムについて，コンクリートの中性化深さの測定を行った．計測はドリル法で実施し，中性化深さデータを約 850 個採取した．中性化深さを，構造物種別と発電所経過年数で整理したグラフを図－1 に示す．



図－1　中性化深さと発電所経過年数

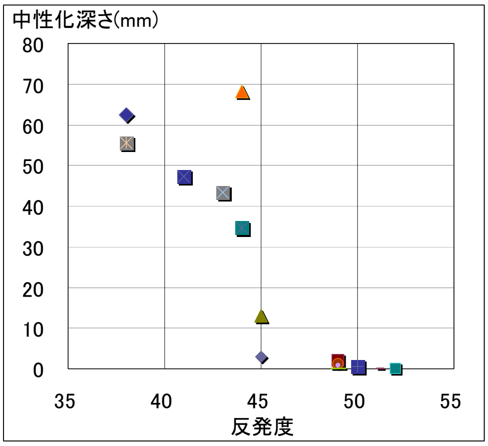
同図より，経過年数に応じて中性化深さのバラツキが大きいこと，水車バレルコンクリートの中性化深さが他の構造種別と比較して大きい事が分かった．またバレルコンクリートの中性化深さは，約 100mm に達している個所や，経過年数が 50 年超でも中性化深さが 0mm の箇所もあり，大きなバラツキがあることが分かった．

中性化速度は，環境条件（大気中の炭酸ガス濃度・温度・湿度等）を主とする外的要因の影響を受けることが知られている [1]．バレルコンクリートは屋内に設置されていることから，屋外に設置されているコンクリート構造物と比較して，環境条件は一定である．またコンクリートの配合の多くは，フライアッシュ B 種，セメント量 300kg/m^3 程度，セメント水比 50～58％であり一定と言える．

そこでバレルコンクリートの中性化深さのバラツキは，環境条件・配合以外の要因と推測した．

３．中性化深さと反発度の関係

中性化が進行したコンクリートは，細孔構造の組織が緻密化し，表面強度が向上することが報告されている．そこで，リバウンドハンマーを用いたコンクリート表面の反発度を測定した．バレルコンクリートの中性化深さと反発度の関係を図－2 示す．ここで，中性化深さは同一発電所の平均値を採用した．



図－2　バレルの中性化深さと反発度

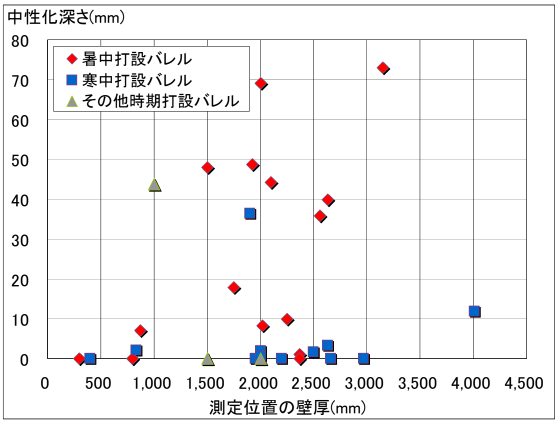
同図より，中性化深さの大きいコンクリートは反発度が小さい．中性化深さが小さいものは反発度が大きい．その境界は反発度 45 程度であることが分かった．したがって，今回の調査結果からは，中性化が進行しているバレルコンクリートの表面組織は，脆

キーワード　マスコンクリート，中性化，内部拘束，温度解析
連絡先　〒101-0021　東京都千代田区外神田 2-16-2 第２DIC ビル　土木事業本部 水力･河川部　TEL03-3255-6244

弱化していることが推測できる.

4．マスコンクリートの温度ひび割れに着目した解析

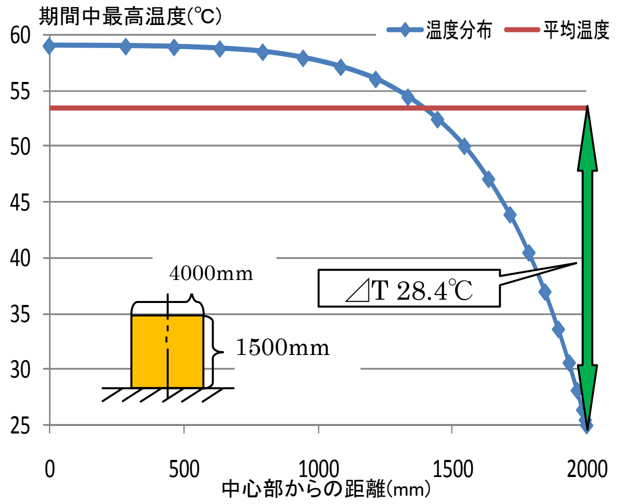
バレルコンクリートは壁厚 0.5～4.0m の円筒形状の構造物である．マスコンクリートの温度ひび割れに着目して，壁厚・打設時期・中性化深さの関係を図－3 にまとめた．ここで測定中性化深さは, 経過年数がばらばらなので, 岸谷式を用いて 55 年に揃えた.



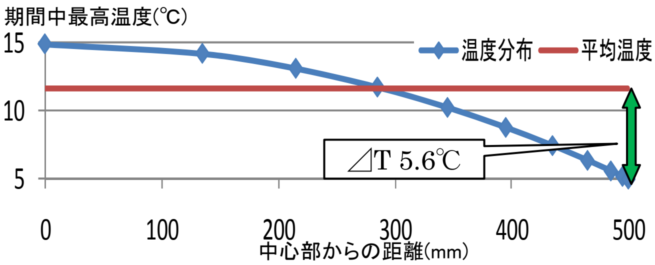
図－3　壁厚および打設時期と中性化深さとの関係

同図から，暑中打設バレル(6 月－9 月)は，壁厚と中性化深さの関係が右上がり傾向．一方，寒中打設バレル(11 月－2 月)は，この傾向を示さないものが多く見られる．したがってコンクリートの温度ひび割れが, 中性化深さに起因しているのではないかとの仮定で, 温度応力解析を行った.

バレルコンクリートの温度上昇について，壁厚・打ち込み温度をパラメーターとした．解析プログラムは JCMAC2，セメントはフライアッシュ B 種，単位量は 300kg/m^3，2 次元，壁の高さを 1.5m，壁厚を 1m，4m，打込み間隔 2 週間，5 リフト，打ち込み温度を 5℃，25℃の 4 ケースについて算定した．図－4 に壁厚 4m・打ち込み温度 25℃，図－5 に壁厚 1 m・打ち込み温度 5℃の最高温度時(3 リフト目)の層内温度分布を示す.



図－4　壁厚 4m 打ち込み温度 25℃の最高温度分布



図－5　壁厚 1m 打ち込み温度 5℃の最高温度分布

葛西ら[2] の研究よると，コンクリート内部温度が 100℃を超えると内部組織が変化して, 塩分浸透抵抗性が低下することが示されている．図－4 より，コンクリートの最大到達温度は 59℃程度であった．よって，コンクリート表面の劣化は，高温履歴によるコンクリート組成変化が原因ではなく，内部拘束による温度ひび割れが想定できる.

4 ケースについて，表面部の内部拘束による温度応力の計算結果を表－1 に示す.

表－1　内部拘束による温度応力の計算結果

壁厚	1m		4m	
打ち込み温度	5℃	25℃	5℃	25℃
最高温度(℃)	14.9	47.3	32.0	59.0
平均温度(℃)	11.6	40.0	25.0	53.4
⊿T(平均温度－端部温度)	5.6	14.9	20.0	28.4
最高温度時(日)	2日	1日	5日	2.5日
発生引張応力(N/mm²)	0.75	1.57	2.91	4.20
割裂引張応力(N/mm²)	2.34	1.15	2.84	2.37
発生／割裂	0.32	1.37	1.03	1.75

算定に当たり，ヤング率等は高炉 B 種（フライアッシュ B 種の値が得られない為:｢マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008｣による)の値を使用した.

同表から，壁厚が厚く，打ち込み温度(外気温)が高いほど発生引張応力の値が大きい．内部拘束により，コンクリート測定面(表層部)にひび割れが生じ，中性化の進行を招いている可能性が大である.

5．まとめ

以上の検討の結果，バレルコンクリートの中性化深さが大きい原因は，内部拘束による温度ひび割れと想定出来る.

バレルコンクリートは円筒形状をしていることから，昇温（≒最高温度）時のフープテンションにより，今回算定した 2 次元モデルよりも大きな引張ひずみが発生し，より大きな中性化進行要因となることが考えられる．したがって 3 次元円筒モデルでの温度解析を行い, 精度を上げていきたい. また現時点では，ドリル法による中性化深さを用いた推論であることから，今後はコンクリートコアを採取し，電子顕微鏡観察等で細孔構造の観察を行い, 中性化深さとの因果関係を明らかにする.

参考文献

1) 和泉意登志；喜多達夫；前田照信．コンクリート構造物の耐久性シリーズ．中性化. 技報堂出版，1986
2) 葛西康幸；河野広隆；渡辺博志．水和熱による高温履歴を受けた高強度コンクリートの塩分浸透性に関する検討．コンクリート工学年次論文集，2003