

## 論文 高水圧を受けるコンクリート構造物の非線形性状について

加藤定良<sup>\*1</sup>・飯塚敬一<sup>\*2</sup>・南部茂義<sup>\*3</sup>・小山俊博<sup>\*4</sup>

**要旨：**コンクリート構造物内のケーシング鋼管を介して約  $8.0\text{N/mm}^2$  の高水圧が作用した時、高水圧を受けるコンクリート構造物に発生するひびわれ幅やひびわれ発生範囲等を検討するため、非線形 FEM 解析手法を用いたケーススタディを行なった。検討にあたっては、鉄筋比やコンクリート強度をパラメータとして、これらパラメータが非線形挙動に及ぼす影響について着目することとした。その結果、鉄筋比やコンクリート強度の違いによるひびわれの大きさ、範囲、進展状況等の違いを把握することができた。またこの種の構造物においては、鉄筋比の影響が曲げを受ける梁部材等に比較して小さいこともわかった。

**キーワード：**非線形 FEM, 鉄筋比, コンクリート強度, 発電機廻りコンクリート

## 1. はじめに

揚水発電所の水車・発電機は通常、地下空洞内に設置され、これらの設備は約  $5,000\text{ m}^3$  のコンクリート（以下発電機廻りコンクリートという）によって支持されている。従来、発電機廻りコンクリートの設計は、発電機自重や水車に加わる水圧等を外力として、弾性解析に基づく許容応力度照査で行なわれており、その内容は静的 FEM から求められる引張応力を全て鉄筋が負担することを前提に配筋量が決められている。そこでは、最大約  $8.0\text{N/mm}^2$  の高水圧を考慮した場合、発電機廻り全体に平均で約  $1.5\text{ kN/m}^3$ 、特にケーシング廻りでは約  $2.0\text{ kN/m}^3$  という膨大な鉄筋量が必要とされる結果となる。

昨今のコンクリート構造物の設計は、構造物の性能を定めて安全性を照査する性能照査型設計体系に移行しつつあり、その中で RC 構造物の非線形性を考慮した設計体系の導入を図ろうと、実験的・解析的な研究が精力的に行なわれている。<sup>1)2)</sup> そこで本研究では、発電機廻りコンクリート構造物に性能照査型設計を導入する

ことを視野に入れ、高水圧を受けるコンクリートの挙動を精度良く把握するため、ひびわれを考慮した非線形 FEM 解析手法を発電機廻りコンクリートに適用し、高水圧作用時のひびわれ性状等について検討を行なった。検討にあたっては、この種の構造物の性能に大きな影響を及ぼすと考えられる鉄筋比やコンクリート強度をパラメータとしたケーススタディを行ない、これらのパラメータが非線形挙動に及ぼす影響について検討を行なった。

## 2. 解析概要

## 2.1 解析手法及び解析モデル

解析モデルを図-1に示す。対象構造物は、高さ  $21\text{m}$  幅約  $16\text{m}$  の RC 構造物である。この構造物は、大別して、発電電動機廻りコンクリート、ポンプ水車・ケーシング鋼管廻りコンクリート、発電機室コンクリートから成る。

解析では当該構造物を軸対称でモデル化し、鉄筋とコンクリートの等価剛性を考慮した 8 節点アインパラメトリック要素を用いて検討した。

\*1 東電設計（株）技術開発本部土木技術部構造物評価グループ 工修（正会員）

\*2 東電設計（株）技術開発本部土木技術部構造物評価グループ（正会員）

\*3 東電設計（株）第一土木本部水力土木部既設設備構造解析グループ 工修

\*4 東京電力（株）建設部土木建築技術センター地下構造物グループ

ケーシング鋼管は厚さ 80mm と仮定し、弾性要素でモデル化した。要素分割はケーシング廻りについては、内水圧作用時の主応力の流れを考慮して、ケーシング鋼管から約 50cm の範囲までは放射状とした。また、境界条件については、側方及び下方が岩盤と接していることから固定とし、それ以外の部分は自由とした。

解析に用いたプログラムは、岡村・前川らによって開発された「WCOMD-SJ(Ver.7.2)」<sup>3)</sup> である。

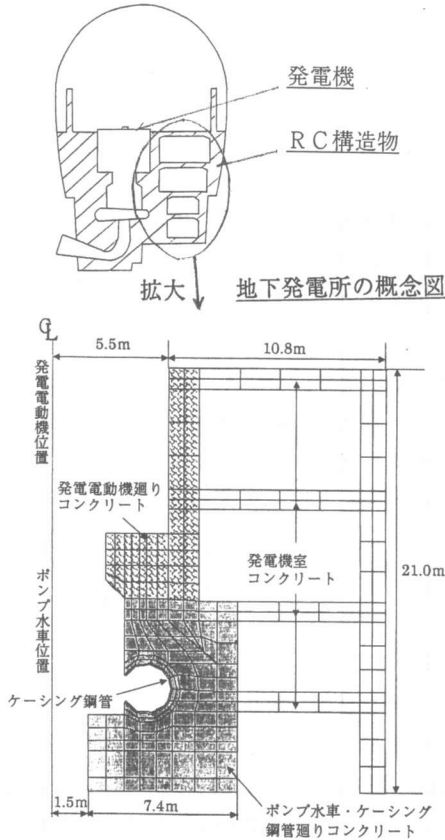


図-1 解析モデル

また、RC の非線形解析を行なう場合、次式で表されるような鉄筋とコンクリートの付着に基づく tension stiffening を考慮するが、この時、式中のパラメータ  $c$  は異形鉄筋に対して推奨さ

れる値として 0.4 を用いた。ただし、構造物が無筋コンクリートである場合は、 $c$  の値を 2.0 とし、ひびわれ後に脆性的な応力低下を示す引張軟化モデルとした。

$$\sigma_t = f_t (\epsilon_{tu} / \epsilon_t)^c$$

$\sigma_t$  : コンクリート引張応力

$f_t$  : コンクリート引張強度

$\epsilon_{tu}$  : ひびわれ発生ひずみ

$\epsilon_t$  : 引張ひずみ

$c$  : 付着パラメータ

また、解析プログラムは、軸対称問題に対しても適用できるように、また、発電機運転時に発生する温度応力を算出するため、温度荷重も考慮できるように改良されている。

## 2.2 検討ケース

検討は発電機廻りコンクリートの性能に大きな影響を及ぼす因子として考えられる鉄筋比とコンクリート強度をパラメータとし、表-1 に示す計 6 ケースとした。

鉄筋比はケーシング鋼管廻りとそれ以外のゾーンに分けて設定した。ケーシング鋼管廻りは、フープ筋で配筋されることを考慮して、既設発電所での設計実績をもとに鉄筋比  $p = 3.0\%$  (D32×6 段@150 (単位体積あたり 2 kN/m<sup>3</sup>程度)) から無筋状態の範囲までを設定した。また、ケーシング廻り以外の部分は、鉛直・水平・円周方向とも設計実績をもとに  $p = 0.6\%$  (0.4 kN/m<sup>3</sup>相当) と無筋の 2 ケースを設定した。すなわち、ケース 1 は従来設計相当の鉄筋量としてケーシング廻りの鉄筋比を 3.0%、ケース 2 はケーシング廻りの鉄筋比を従来の半分に低減、ケース 3 はケーシング廻り以外の部位の鉄筋比 0.6% をケーシング廻りにも配筋した場合を想定して、それぞれ設定した。また、鉄筋量削減の可能性を最大限追求するために、ケース 4 は構造物全体を無筋コ

表-1 解析検討ケース

検討ケース		1	2	3	4	5	6
鉄筋比 (%)	ケーシング廻り	3.0	1.5	0.6	0.0	3.0	3.0
	ケーシング廻り以外	0.6	0.6	0.6	0.0	0.6	0.6
コンクリート引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )		2	2	2	2	1.8	2.5

ース4は構造物全体を無筋コンクリートとして設定した。さらに、コンクリート強度を従来の設計値( $f_t=2\text{N/mm}^2$ )に対して増減させたケースを設定することとし、それぞれケース5では $f_t=1.8\text{N/mm}^2$ 、ケース6では $2.5\text{N/mm}^2$ として設定した。解析で用いた材料物性値を表-2に示す。

表-2 材料物性値

コンクリート	圧縮強度 $f_c$ ( $\text{N/mm}^2$ )	21
	引張強度 $f_t$ ( $\text{N/mm}^2$ )	2
	単位体積重量 $\gamma_c$ ( $\text{kN/m}^3$ )	23.5
	ポアソン比 $\nu_c$	0.20
	弾性係数 $E_c$ ( $\text{N/mm}^2$ )	23500
	線膨張係数 $\alpha$ ( $1/^\circ\text{C}$ )	$10 \times 10^{-6}$
鉄筋	弾性係数 $E_s$ ( $\text{N/mm}^2$ )	210000
	降伏強度 $\sigma_y$ ( $\text{N/mm}^2$ )	350
	単位体積重量 $\gamma_c$ ( $\text{kN/m}^3$ )	76.9

### 2.3 荷重条件

解析で考慮する荷重は構造物の自重、ケーシング荷重(内水圧)、発電機荷重、防振ステー反力、運転時温度荷重である。荷重図および運転時温度分布を図-2および図-3に示す。

ケーシング荷重は $8\text{N/mm}^2$ とするが、これは既設発電所のうち、有効落差が最大である地下発電所における荷重に相当する値である。発電機荷重は水平 $0.7\text{N/mm}^2$ 、鉛直 $2.0\text{N/mm}^2$ であり、防振ステー反力は $1.3\text{N/mm}^2$ である。また、発電機運転時の荷重については、別途実施した定常熱伝導解析(解析コード:FINAS)から得られた温度分布を用いた。

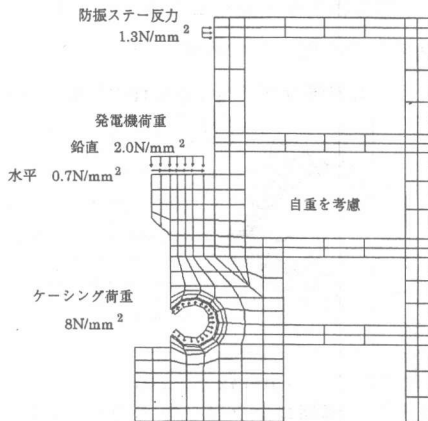


図-2 荷重図

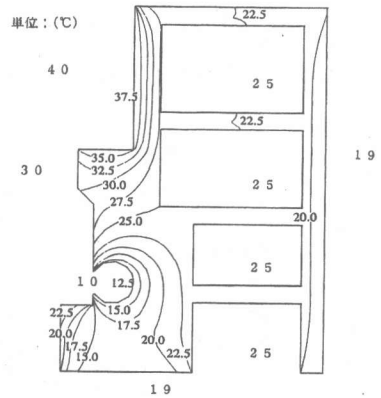


図-3 運転時温度分布

## 3. 解析結果

### 3.1 鉄筋比の違いによる挙動の比較

発電機廻りコンクリートの鉄筋比をパラメータとした検討結果を以下に示す。

荷重載荷後の変形は図-4に示すと通りである。なお、変形図の破線は変形前、実線は変形後を示す。

解析結果に示す通り、ケーシング鋼管は内水圧によって上下に押し広げられるような変形状を示す。ケーシング廻りの鉄筋比が3.0%としたケース1のケーシング鋼管廻りの変形量は、上部方向に $0.5\text{mm}$ 、下部方向に $0.6\text{mm}$ 、側方(図の右側)に $0.1\text{mm}$ である。これを他のケースと比較しても、大きな差異はみられない。

発電機設置位置では、発電機荷重 $2\text{N/mm}^2$ を作用させているが、鉛直下方に顕著な変位が現われていない。

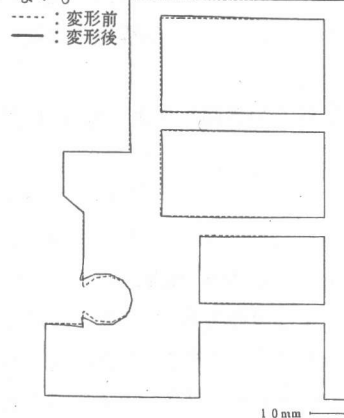
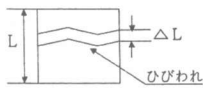


図-4 変形図(ケース1)



主引張ひずみ  $\epsilon_n = \frac{\Delta L}{L}$   
 $\epsilon_n$  の最大値を  $\epsilon_{nmax}$  とする

主引張ひずみ  $= 1.0 \times 10^{-1} \%$  —  
 ○印は主引張ひずみの最大値の要素を示す

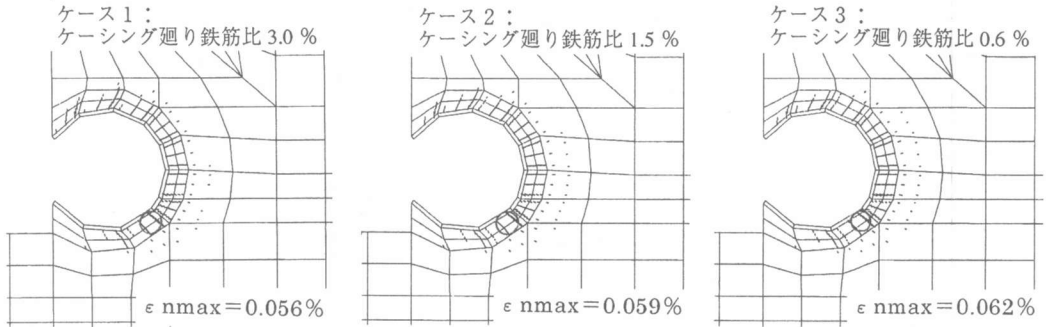


図-5 鉄筋比の違いによるひびわれ図

ひびわれを比較したものを図-5に示す。ひびわれ図に示したひびわれの長さは、ひびわれ直交方向のひずみレベルを表しており、 $\epsilon_{nmax}$  は主引張ひずみの最大値（以下、最大主引張ひずみという）を示す。ケーシング廻りでは、最大主引張応力の方向がケーシングの接線方向であるため、ひびわれは放射状に発生し、主引張ひずみが最大となる位置は、ケーシング鋼管の側部（図中ではケーシング鋼管の斜め下方部）である。

鉄筋比の違いによる挙動の比較をひびわれの範囲でみると、ケース2ではケーシング廻りの鉄筋比がケース1の1/2であるが、ケーシングの右肩部でひびわれ範囲が僅かに広がるものの、その他の部分で顕著な差異がみられず、その範囲は概ね50cm~100cmである。また、ひびわれの大きさとして最大主引張ひずみを比較すると、ケース1に対してケース2では、5%程度の増加にとどまっている。

ケーシング廻りの鉄筋比をケース1に対して80%低下させたケース3では、ケーシング右肩部においてケース2よりひびわれの範囲がさらに広がるものの、その最大範囲はケース1、2とほぼ同じであり、100cm程度に収まっている。最大主引張ひずみでも、ケース1に対して約10%、ケース2に対して約5%大きくなっている程度である。鉄筋比をパラメータとして、最大主

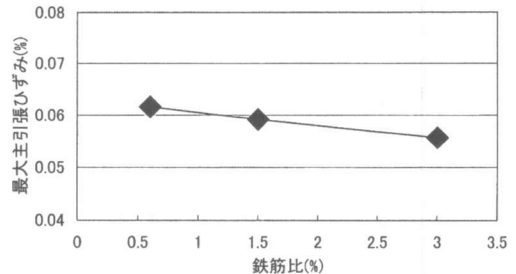


図-6 最大主引張ひずみと鉄筋比の関係

引張ひずみと鉄筋比の関係を図-6に示す。同図に示すとおり、鉄筋比の違いによりひびわれの制御効果に差異がみられるものの、顕著な効果はみられず、ケーシング廻りの鉄筋比がケーシング廻りコンクリートの損傷及び性能に及ぼす影響は小さいといえる。

次に、構造物全体を無筋コンクリートとしたケース4の結果を図-7に示す。

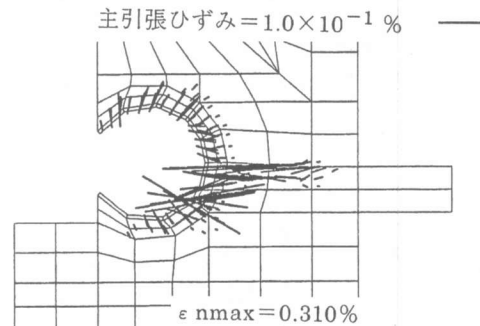


図-7 無筋コンクリートのひびわれ図

主引張ひずみ =  $1.0 \times 10^{-1} \% \quad \text{---}$

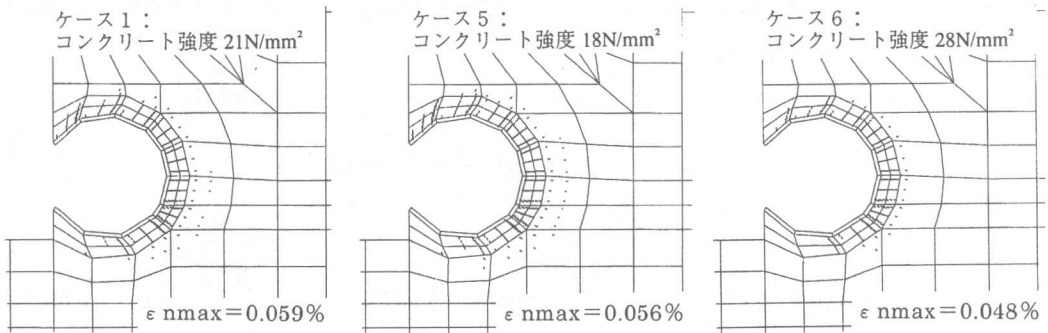


図-8 コンクリート強度の違いによるひびわれ図

ひびわれの進展は他の 3 ケースに比べて大きく異なる。その性状は、引張応力が集中するケーシング右側でひびわれが一方に広がり、発電機室コンクリート付近まで到達している。最大主引張ひずみは、約 0.3% と他のケースに比べて極めて大きい。また、ケーシング上部方向の鉛直変位も 1.0mm となり、他のケースに比べて 2 倍大きい。

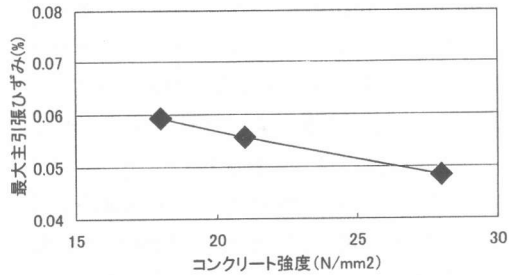


図-9 最大主引張ひずみと  
コンクリート強度の関係

### 3.2 コンクリート強度の違いによる挙動の比較

発電機廻りコンクリートのコンクリート強度をパラメータとした検討結果の比較を以下に示す。

コンクリート強度の違いによるひびわれの発生状況の違いは図-8 に示すとおりである。ひびわれの範囲については、コンクリート強度にかかわらず、大きな差異はみられない。最大主引張ひずみとコンクリート強度の関係を図-9 に示す。コンクリート強度が 18N/mm<sup>2</sup> で最大主引張ひずみは約 0.06%、コンクリート強度が 21N/mm<sup>2</sup> で約 0.055%、コンクリート強度が 28N/mm<sup>2</sup> で約 0.05% であり、コンクリート強度が上がるに伴い、最大主引張ひずみは僅かながら抑えられる傾向にある。

前節の鉄筋比の影響では、鉄筋比を 5 倍の範囲で変化させても最大主引張ひずみで約 10% の変化であったのに対し、コンクリート強度の影響で

は、強度が約 1.5 倍上がると、最大主引張ひずみは約 20% 減少しており、鉄筋比の影響に比べてコンクリート強度の影響の方が大きいことがわかる。

コンクリート強度を 21N/mm<sup>2</sup> (引張強度 2N/mm<sup>2</sup>) に対して 18N/mm<sup>2</sup> (引張強度 1.8N/mm<sup>2</sup>) に低下させたケース 5 のケーシング鋼管廻りの変形量は、上部方向に 0.5mm、下部方向に 0.6mm、側方に 0.1mm である。これはコンクリート強度が 21N/mm<sup>2</sup> (引張強度 2N/mm<sup>2</sup>) の場合とほとんど差異はない。また、28N/mm<sup>2</sup> (引張強度 2.5N/mm<sup>2</sup>) に増加させたケース 6 についても、他のケースと大きな差異はみられない。

### 3.3 ひびわれ進展状況

荷重の変化に伴うひびわれ性状の違いを図-10 に示す。なお、同図は、ケース 3 の鉄筋比 0.6% としたケースである。ひびわれは最大内水圧の

主引張ひずみ =  $1.0 \times 10^{-1} \%$  —

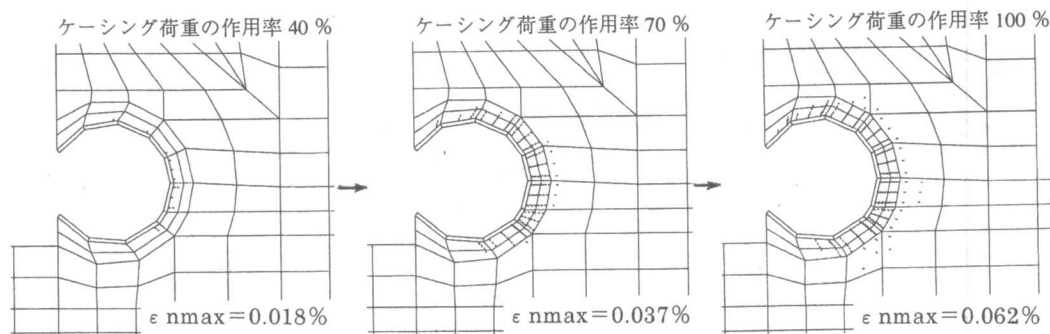


図-10 荷重の変化に伴うひびわれの進展状況

30~40% (約  $3\text{N/mm}^2$ ) の時点でケーシング鋼管の側部の一部に法線方向に向かってまず発生する。その後、ケーシング鋼管の周囲にほぼ一様に発生し、荷重の増加に伴い、ひびわれの範囲がケーシング鋼管に対して放射状に広がっていくことがわかる。最大主引張ひずみを荷重載荷に伴って整理したのが図-11である。同図の横軸は、ケーシング内水圧 100%に対する比率としている。これより、ひびわれは鉄筋比の違いによらず、最大内水圧の 30% 辺りから生じていること、および荷重載荷の進展に伴い直線的に最大主引張ひずみが大きくなることがわかる。なお、最大主引張ひずみは、全てのケース及び全ての荷重ステップにおいて同一箇所であり、先述したケーシング鋼管斜め下部である。

\*ケーシング荷重の作用率とは、ケーシング内水圧の全圧( $8\text{N/mm}^2$ )に対する比率を示す

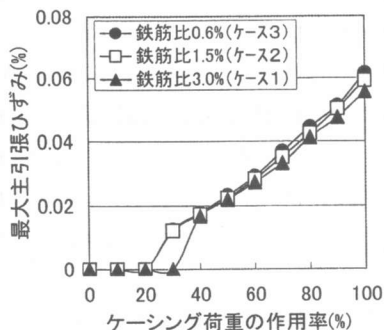


図-11 最大主引張ひずみとケーシング荷重の関係

#### 4. まとめ

本検討で得られた知見をまとめると以下のとおりである。

- ① 鉄筋比をパラメータとした解析から、ケーシング廻りの鉄筋比を現状から 80% 低下させても、ひびわれ性状は大きく変化しない。従って、ケーシング廻りの鉄筋量  $2.0\text{ kN/m}^3$  を 1/5 程度まで低減できる可能性が高い。
- ② コンクリート強度をパラメータとした解析では、コンクリート強度が約 1.5 倍変化すると、最大主引張ひずみは約 20% 変化する。鉄筋比に比べてコンクリート強度の方がひびわれ性状に及ぼす影響は大きい。

#### 謝 辞

本研究の実施にあたり、東京大学前川宏一教授には貴重なコメントをいただきました。ここに感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 岡村, 前川: 鉄筋コンクリートにおける非線形解析有限要素解析, 土木学会論文集, 1985.8
- 2) Vecchio and Collins: Modified Compression-Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear, ACI, 1986
- 3) 岡村, 前川: 鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則, 技報堂出版, 1991