要素節点力に基づく RC 構造物の配筋設計

REINFORCED-CONCRETE DIMENSIONING BASED ON NODAL FORCES CONSIDERING PLASTICITY

神山義則 ———*1
清水 明 ———*2
宮原貴昭 ———*3

Yoshinori KAMIYAMA
Akira SHIMIZU
Takaaki MIYABARA

The dimensioning design of the nuclear reactor building is based on the elastic analysis. But the real stress is different from the elastic situation. A rational dimensioning procedure that considered the stress redistribution due to plasticity is expected. A new approach for the dimensioning on Finite Element Method (FEM) was presented by Anderheggen and et.al^{1),2)} in 1994. Its main idea is to impose dimensioning constraints not on the stress components by FEM, but directly on the nodal forces. This paper is about the investigation on the application of the procedure to the practical design.

キーワード：
有限要素法，塑性配筋設計法，要素節点力，鉄筋コンクリート構造物

Keywords：
FEM, Plastic dimensioning design procedure, Nodal forces, RC structure

1 はじめに

原子炉建屋は主に RC の連続壁構造物であり、配筋設計は弾性解析に基づいてされている。しかしながら、コンクリートにひび割れを生じると応力は再配分され、弾性状態とは異なる応力分布となる。

ここでは、コンクリートの塑性化を考慮し、応力再配分がなされた状態に対する配筋設計手法を例示し考察する。また、このような配筋設計手法を用いることで、応力集中部位の過密な配筋が緩和され、合理的な配筋となることが期待される。

塑性を考慮した配筋設計手法の一つとして、有限要素法に基づいた RC 構造物の終局状態設計に関する新しい配筋設計手法を示した論文^{1),2)}がAnderheggen等により発表された。多くの単純化された仮定に基づいているが、弾性 FEM 解析に基づく応力分布を基に、塑性化を考慮した応力分布を求める点で注目される配筋設計方法である。

本報告はこの論文に示された塑性理論に基づく配筋設計手法を検討したものである。

2 検討目的と検討方法

本報告は、RC 構造物の塑性化を考慮した応力分布を求めて配筋設計を行う新しい配筋手法を紹介し、試計算を通し、実務設計への適用性について検討評価することを目的とした。

検討は、試計算モデルによる計算結果を通して本法の概念を確認し、簡略化した構造物に対する本手法の適用性について行った。

試計算モデルは、配筋設計が自明な片持梁のケース、一般的な耐震壁のケース、開口周りに応力集中が生じる開口を有する壁とした。試計算において、既往の配筋法との比較および応力集中部での局所的な高密度配筋の緩和の程度、構造物の耐力性状などを検討した。

3 概念と断面設計手順

3.1 概念

本手法の中で行なわれる FEM 解析は弾性解析であるが、塑性ひずみの導入を図る点で、塑性ひずみによる応力再配分を考慮した RC 構造物の終局状態設計法の一つと考えられる。

弾性 FEM で得られる要素応力から、塑性化を考慮することにより解放される要素応力は節点に外荷重のよう作用する節点力とし

*1 戸田建設(株)建築技術統轄部原子力室
(〒104 東京都中央区八丁堀 4-6-1)

*2 (株)大林組原子力本部技術部

*3 (株)熊谷組技術研究所

*1 Toda Corporation, Nuclear Power Dept., Construction Technology Div.

*2 Obayashi Corporation, Engineering Dept. Nuclear Facilities Div.

*3 Kumagai Co., Ltd., Institute of Construction Technology

て取り扱われ隣接要素に伝達される。算定の過程で材料の塑性化による塑性ひずみの概念を導入することで応力再配分がなされる。これにより塑性化を考慮した応力分布が得られる。

コンクリートと鉄筋が外力と釣り合う任意の応力状態の内力に耐えうという条件で配筋設計を行うことから、崩壊に対する安全性を確保した合理的な配筋設計がなされる。

すなわち、本手法では構造物の安全性は、鉄筋とコンクリートのもつ内部エネルギーが外力の持つエネルギーより大きければ保証されるという仮定をおいている。この原理は鉄筋が完全弾塑性的に挙動し、十分な靱性が保証される場合、微小変位条件のもとで成立するものである。なお、釣合式の中では、鉄筋の圧縮力、コンクリートの引張力は考慮されない。

本手法では、各要素が配筋算定単位となり断面算定条件を満たすように配筋がきめられる。このとき、自己釣り合い状態にある塑性ひずみは構造系の終局耐力に影響を与えないという原則を利用し塑性ひずみを自由に選択し、塑性ひずみによる応力を解放する。従って、適切な塑性ひずみと塑性ひずみを設定する要素を仮定することで設計者の意図した配筋設計ができる。ただし、設計者には崩壊形を考慮した設計が求められる。

3.2 手順

配筋設計をする上で過大な応力が発生する要素に対し適当な塑性ひずみ ε_p を任意に仮定し、応力を解放したい要素に応力再配分による応力の修正をしながら配筋設計を行う。概略手順を図1に示す。

図1 概略算定手順フロー

3.3 基本式

本手法の論理的な基本式を示すと以下の通りである。

要素節点力 q は FEM 弾性解析による節点変位から (1) 式により求める。

$$q = \int_V B^T \sigma dV = \int_V B^T C \varepsilon dV = \int_V B^T C B dV a = k a \quad (1)$$

ここで、 B : ひずみマトリックス、 C : 弾性マトリックス、 ε : ひずみベクトル

σ : 応力ベクトル、 k : 要素剛性マトリックス、 a : 要素節点変位ベクトル

この節点力 q を外荷重のように構成要素に作用させ、配筋設計のベースとなる要素の平均応力 $\bar{\sigma}$ を (2) 式から求める。

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{V} \int_V \sigma dV = \frac{1}{V} a^T \int_V B^T \sigma dV = \frac{1}{V} a^T q = \frac{1}{V} a^T k a \quad (2)$$

v : 要素体積 a : それぞれのひずみに対応した変位マトリックス

塑性ひずみ ε_p を導入した要素の節点力から全体座標系の荷重ベクトルを組み立て、全体座標系で解くことで、すべての要素の塑性ひずみによる節点変位 a_p を求めることができる。要素節点力 q は (4) 式で与えられる。

$$\varepsilon_p = B a_p \quad (3)$$

$$q = \int_V B^T C (\varepsilon - \varepsilon_p) dV = k(a - a_p) = k a - q_p \quad (4)$$

$$q_p = \int_V B^T C \varepsilon_p dV = k a_p \quad (5)$$

(4) 式から得られた要素節点力 q と (2) 式から要素平均応力 $\bar{\sigma}$ が求まる。

この時の塑性ひずみによって、構造物に応力再配分が生じることになる。配筋設計は、要素平均応力 $\bar{\sigma}$ を用いて行なわれる。

3.4 直交配筋された平面応力要素の配筋設計

直交配筋された耐震壁の配筋設計については、配筋量 (鉄筋比 μ_x , μ_y) を、鉄筋のもつエネルギーと外力の仕事の釣り合いから (6) 式で求める。

$$0 \leq \mu_x \leq \frac{\bar{\sigma}_x + |\bar{\tau}|}{f_y}, 0 \leq \mu_y \leq \frac{\bar{\sigma}_y + |\bar{\tau}|}{f_y} \quad (6)$$

f_y は鉄筋の降伏応力度である。

応力は (2) 式から求める。図2に示す3角形平面応力要素においては (7) 式で求められる。

$$\bar{\sigma}_x = \frac{1}{V} a_1^T q, \bar{\sigma}_y = \frac{1}{V} a_2^T q, \bar{\tau} = \frac{1}{V} a_3^T q = \frac{1}{V} a_3^T q \quad (7)$$

ここで a_1^T, a_2^T, a_3^T は下式で与えられる。

$$a_1^T = \{x_1, x_2, x_3, 0, 0, 0\}$$

$$a_2^T = \{0, 0, 0, y_1, y_2, y_3\}$$

$$a_3^T = \{y_1, y_2, y_3, 0, 0, 0\}$$

$$a_3^T = \{0, 0, 0, x_1, x_2, x_3\}$$

x_n, y_n は要素節点の x, y 座標

図2 平面応力要素

3.5 応力再配分と最適化

塑性ひずみを仮定した要素の応力と等価な節点力は (4) 式で表される。具体的な作業は、弾性ひずみの一部あるいは全てを塑性ひずみに置き換えるものとし、塑性ひずみ要素に対し、塑性モードとして弾性変形に応力再配分係数 β をかけて、(8) 式のように設定する。 β は弾性変形量を塑性変形量に置き換える時の割合であり、

0 から 1.0 の値をとる。

$$a_p = \beta a \quad (8)$$

解の信頼性は応力分布の変化が著しいところは有限要素分割を細かくすることで得られる。

論文¹⁾では適正な要素の細かさの指標として (9) 式の Δ が 1 より小さくなるようにし、越えた場合には要素分割を細かくする必要があるとしている。

$$\Delta = \frac{\mathbf{V} \boldsymbol{\sigma}^T \boldsymbol{\varepsilon}}{\int_V \boldsymbol{\sigma}^T \boldsymbol{\varepsilon} dV} = \frac{\mathbf{V} \boldsymbol{\sigma}^T \mathbf{C}^{-1} \boldsymbol{\sigma}}{\mathbf{q}^T \mathbf{a}} \quad (9)$$

ここで $\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{C}^{-1} \boldsymbol{\sigma}$

4 試計算

4.1 先端集中荷重を受ける片持ち梁の配筋設計 (事例 1)

(1) 試計算モデルと配筋設計方針

梁先端に集中荷重 12tonf を受ける長さ 240cm、断面 30cm×60cm の片持ち梁を対象とした。

試計算モデルの配筋は上端部集中配筋となることが適正と考えられるので、塑性ひずみの設定要素は上端部への集中配筋になるように設定した。

(2) 手順

- ① 弾性 FEM 解析により応力と変形を算出する。図 3 に FEM 解析結果を示す。
- ② 弾性変形解析から要素節点力 q を算出する。
節点力 q は $[k] \{a\}$ より求める。図 4 に弾性応力から求めた要素構成節点の節点力を示す。図中、上段に x 方向節点力を下段に y 方向の節点力を示す。口内の数字は要素番号を示す。
- ③ 初期応力から鉄筋比を算定する。
- ④ 応力再配分作業：節点力 q を外力として試計算モデルを解析する。
- ⑤ 一部要素 (図 4 の要素 3 の層) の q をすべてか一部解放し、隣接の要素に分配する。このとき全体の釣り合いは確保されている。
- ⑥ 節点力による隣接要素の応力を (7) 式で算定する。
- ⑦ 構造物全体の配筋を修正する。
- ⑧ ③～⑦を適正な配筋となるまで繰り返す。
- ④～⑧の作業の過程を必要鉄筋比について図 5 に示す。

(3) 計算結果

配筋検討は、それぞれの節点解放繰り返し回数で応力再配分係数をすべて $\beta=1.0$ で行った。繰り返し計算 1 回目では、上端主筋への集中傾向がみられるが、まだ断面中央部の必要鉄筋量が過大と考えられるため繰り返し計算を進めた。回を加えるごとに主筋への集中傾向は顕著になる。しかしながら、各要素を板として配筋設計を行っているため梁中央部にもせん断補強筋としての軸筋が必要となっている。

3 回目の配筋設計と弾性応力に基づく配筋を図 6 に、平均配筋量を表 1 に示す。鉄筋総量は弾性計算のものと差はないが、配筋は上端に集中し、主筋量は少なくなっている。

(4) 結果の検討

3 回の繰返しではあるが意図した配筋へ指向していくことが示されている。また、本手法による配筋設計と弾性 FEM 解析から得られた配筋設計とは、非線形 FEM 解析ではほぼ同じ荷重変形挙動を示した結果を得ている。

図 3 弾性 FEM 解析結果

I 段 x 方向		II 段 y 方向 (tonf)															
33.2	-27.3	27.3	-23.9	23.9	-19.8	19.8	-15.9	15.9	-11.9	11.9	-7.9	7.9	-3.9	3.9	0.0		
-6.4	-0.3	0.3	1.0	-1.0	0.8	-0.8	0.8	-0.8	0.8	-0.8	0.9	-0.9	0.3	-0.3	3.0		
4	8	12	16	20	24	28	32										
12.6	-18.4	12.2	-15.6	9.6	-13.6	7.5	-11.5	5.4	-9.4	3.3	-7.3	1.1	-5.2	-1.0	-2.9		
3.5	3.2	-2.0	0.8	-1.1	1.3	-1.2	1.2	-1.2	1.2	-1.2	1.1	-1.1	1.8	-1.7	-1.1		
17.1	-10.9	17.1	-8.6	14.6	-6.7	12.8	-4.7	10.8	-2.8	8.9	-0.9	7.1	1.3	4.9	2.9		
-3.2	0.8	-2.0	2.2	-1.9	1.9	-2.0	1.9	-1.9	2.0	-1.9	2.0	-2.0	2.1	-2.2	1.1		
3	7	11	15	19	23	27	31										
-2.4	-3.8	-3.7	-4.9	-3.5	-4.4	-3.6	-4.4	-3.7	-4.3	-3.8	-4.2	-4.0	-4.4	-3.8	-4.0		
0.1	2.3	-2.3	2.1	-2.1	2.0	-2.0	2.1	-2.1	2.1	-2.1	2.0	-2.2	2.1	-1.7	2.8		
24	3.8	3.7	4.9	3.5	4.4	3.6	4.4	3.7	4.3	3.8	4.2	4.0	4.1	4.1	4.0		
0.1	2.3	-2.3	2.1	-2.1	2.0	-2.0	2.1	-2.1	2.1	-2.0	2.1	-1.9	2.3	-2.7	0.2		
2	6	10	14	18	22	26	30										
-17.1	10.9	-17.1	8.6	-14.6	6.7	-12.8	4.7	-10.8	2.8	-8.9	0.9	-6.9	-1.2	-4.9	-3.2		
-3.2	0.8	-2.0	2.2	-1.9	1.9	-2.0	1.9	-1.9	2.0	-2.0	1.9	-2.1	1.7	-1.3	3.8		
-12.6	18.4	-12.2	15.6	-9.6	13.6	-7.5	11.5	-5.4	9.4	-3.3	7.3	-1.3	4.9	1.2	3.2		
3.5	3.2	-2.0	0.8	-1.1	1.3	-1.2	1.2	-1.2	1.2	-1.2	1.2	-1.1	1.8	-1.7	-1.1		
1	5	9	13	17	21	25	29										
-33.2	27.3	-27.3	23.9	-23.9	19.8	-19.8	15.9	-15.9	11.9	-11.9	7.9	-7.9	4.4	-4.4	0.0		
-6.4	-0.3	0.3	1.0	-1.0	0.8	-0.8	0.8	-0.8	0.8	-0.8	0.9	-0.9	0.3	-0.3	3.0		

図 4 弾性解析から求めた節点力 q

$\mu x(\%)$ $\mu y(\%)$		弾性解析によるケース (12tf)							
3.09	2.62	2.25	1.86	1.48	1.10	0.69	0.33		
0.40	0.07	0.14	0.12	0.13	0.12	0.16	0.00		
1.13	1.12	0.96	0.84	0.71	0.58	0.45	0.29		
0.27	0.27	0.25	0.26	0.25	0.25	0.29	0.16		
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09	0.19		
0.12	0.28	0.25	0.25	0.26	0.25	0.25	0.32		
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
0.00	0.15	0.12	0.13	0.12	0.14	0.06	0.34		
$\mu x(\%)$ $\mu y(\%)$		1回目節点力解放							
3.55	3.04	2.62	2.17	1.72	1.27	0.80	0.38		
0.46	0.08	0.15	0.14	0.15	0.14	0.17	0.00		
0.46	0.54	0.47	0.43	0.39	0.35	0.30	0.24		
0.18	0.25	0.23	0.24	0.24	0.24	0.26	0.16		
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.12	0.19		
0.15	0.27	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.32		
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
0.00	0.16	0.12	0.13	0.13	0.14	0.07	0.34		
$\mu x(\%)$ $\mu y(\%)$		2回目節点力解放							
3.64	3.16	2.72	2.25	1.78	1.32	0.83	0.40		
0.47	0.09	0.15	0.15	0.15	0.14	0.17	0.00		
0.22	0.33	0.31	0.29	0.28	0.27	0.25	0.22		
0.14	0.24	0.23	0.24	0.24	0.24	0.25	0.16		
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.12	0.18		
0.16	0.26	0.24	0.25	0.25	0.25	0.25	0.31		
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
0.00	0.16	0.12	0.13	0.12	0.14	0.07	0.34		
$\mu x(\%)$ $\mu y(\%)$		3回目節点力解放							
3.64	3.19	2.74	2.28	1.80	1.33	0.84	0.41		
0.46	0.09	0.15	0.15	0.15	0.14	0.17	0.00		
0.14	0.26	0.26	0.25	0.25	0.25	0.24	0.22		
0.12	0.23	0.23	0.24	0.24	0.24	0.25	0.17		
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.12	0.18		
0.17	0.25	0.24	0.24	0.25	0.25	0.25	0.31		
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
0.00	0.17	0.12	0.13	0.12	0.14	0.07	0.34		

図 5 各要素に対する必要鉄筋比の算定過程

$\mu x(\%)$ $\mu y(\%)$		$\mu x(\%)$ $\mu y(\%)$	
3.1	0.4	0.4	0.3
1.1			
0.2			
0			
i) 弾性応力に基づく配筋		$\mu x(\%)$ $\mu y(\%)$	
3.6	0.5	0.5	0.3
0.3			
0.2			
0			
ii) 3 回目の開放後の配筋		$\mu x(\%)$ $\mu y(\%)$	
3.6	0.5	0.5	0.3
0.3			
0.2			
0			

図 6 各要素の層および列に対する配筋設計例
(層、列毎にグルーピングした最大値)

表 1 各要素の平均配筋量 (%)

	μ_x	μ_y	平均
FEM弾性	1.13	0.33	0.49
3回開放	1.05	0.34	0.48

平均: μ_x, μ_y の加重平均

4.2 曲げせん断力をうける耐震壁 (事例2)

(1) 試算モデルと配筋設計方針

適正配筋が容易に予想される片持梁の場合に対し、弾性応力分布がいかに塑性を考慮した応力分布に近づくかを検討するため、頂部に水平荷重をうける耐震壁について検討した。

試算モデルの各材料定数は事例1と同じであり、壁脚部固定とし頂部に 500tonf の水平力を加えた。

配筋設計の基本的な方針としてウェブの応力の平滑化を目指した。この際、せん断応力度分布を均等になるようにし、端部の曲げ補強筋は減らさないようにした。

なお、配筋設計手順は事例1の片持梁と同様である。

(2) 配筋設計ケース

応力解放要素及び解放力をパラメータとして以下の CASE1～CASE3 を試算した。

CASE1 と CASE2 では、横筋は各要素均等に、縦筋は曲げによる軸力分布に従うような配筋分布となるように塑性ひずみ要素を設定した。

CASE1 と CASE2 の違いは応力再配分係数 β の違いである。これに対し、CASE3 は最も応力の大きな要素に対し、塑性ひずみの導入を2度繰り返して行った場合である。

各試算ケースの応力再配分係数 β は以下の通りである。

CASE1: $\beta = 1.0$ (全てを解放した場合)

CASE2: $\beta = 0.5$ (半分解放した場合)

CASE3: $\beta = 0.5$ (半分解放した場合、2度繰り返す)

(3) 計算結果

弾性 FEM 解析結果の変形図および主応力図を図7に示す。図8は本手法での配筋設計アプローチとして検討した3ケースおよび弾性解析結果の応力から求めたウェブの必要配筋量を示したものである。

(4) 結果の検討

CASE2 の方が CASE1 よりせん断応力を均等に均すという意図した配筋に近いものになっているが、双方とも、せん断応力度分布が弾性でも元々比較的均等であるため、塑性ひずみを導入した効果は顕著にはみられない。

CASE3 の例では、全体の配筋量は減っており、配筋はより均一化しているが、頂部の曲げ補強筋が壁脚部と同じとなるなど不自然な配筋となった。

図9に本手法で求めた配筋 (CASE2) と参考としてこれと同等の配筋量を縦横均等に配した壁 ($p_w = 1.0\%$) の弾塑性解析による荷重変位曲線を示す。

水平荷重 500tonf に対し、いずれの配筋もこれを上回る耐力を保持しているが、CASE2 の耐力は縦横等量配筋に比べ脚部縦筋量が多い分、高くなっている。

以上より、配筋設計へのアプローチとしては FEM の各要素毎の

の配筋を行う場合でも構造物全体で釣合状態を考え、曲げとせん断に対する補強筋を明確に分けて配筋設計を行う必要があることが確認された。特に配筋設計方針を本参考ケースのように曲げ補強筋まで縦横均等に配するとした場合では適正配筋とはならない可能性がある。

弾性解析から求めた配筋は、脚部の縦筋量が耐力性状に与える影響が大きいため CASE2 よりも若干高い耐力を示すと予想される。

図7 FEM解析結果

図8 ウェブの必要配筋量

図9 壁頂部の荷重変位曲線

4.3 曲げせん断力をうける開口を有する耐震壁 (事例3)

(1) 試算モデルと配筋設計方針

頂部に水平荷重を受ける中央に円形開口を有する耐震壁 (開口直径 1m) を検討対象とした。外形寸法、壁厚等は事例2の無開口壁と同じである。

脚部固定とし、頂部に 500tonf の水平荷重を加えた。

事例2の場合、弾性時の応力、特にせん断応力分布が比較的一様であったため、ここでは、結果の違いが顕著に現れると思われる開口を有する耐震壁のウェブについて検討を行った。

塑性ひずみを考慮する要素の選定および目標とする断面設計は以下の方針で行った。

①開口周辺の応力集中を緩和し、配筋を平均化する。

②無開口壁の配筋を参考に、せん断応力分布も平均化する。

(2)配筋設計ケース

試算は、塑性ひずみ要素の応力再配分係数および設定要素範囲をパラメータとした5例について行った。CASE3以降は順次前ケースの結果を踏まえたものである。

試算ケースを図10に示す。

CASE1：最も応力が大きな2要素のみ塑性要素とし、応力再配分を試みた場合。その時の応力再配分係数 β を0.5とした。

CASE2：CASE1に対し、応力再配分係数を1.0とし、2つの要素の要素応力をすべてを解放した場合。

CASE3：応力の比較的大きな開口周りの範囲を広げて開口周りの4半分づつを、応力再配分係数0.5で解放した場合

CASE4：CASE3に同じで、応力再配分係数を1.0とした場合。

CASE5：同じく、部位により応力再配分係数を1.0、0.5と分けた場合。

(3)計算結果

図12に、弾性FEM解析による変形図、主応力図を示す。

応力分布図で示されるように開口周りには応力集中が生じており、過密な配筋となることが予想される。

図13に弾性応力による場合と塑性ひずみを考慮した本手法による配筋設計例について、各ケースの部位エリア(図11参照)ごとのx、y方向必要配筋量を示す。弾性応力に基づく配筋(基本ケース)で特に、開口周りが高密度な配筋となっている。

(4)結果の検討

CASE1では、開口周辺の応力集中は緩和されているが、配筋の均一化には至っていない。要素応力をすべて解放したCASE2では開口周りの応力集中は緩和されているが、開口周りよりその外側の配筋量が多くなっているなど不自然な配筋となっている。

応力解放範囲を広げたCASE3は開口周りの範囲の応力集中は緩和されているが、十分ではない。また、開口周りの要素よりその外側の配筋量が多くなっているなど不自然な配筋となっている。CASE4は比較的一様な配筋となるが、まだ一部不自然な配筋となっている。これらに対し、応力再配分係数を部位により変化させたCASE5は、せん断補強筋が均一化され、比較的一様な配筋となっている。

なお、いずれもウェブの壁筋量はFEM弾性解析のものよりやや大きくなっている。

図14にFEM弾性解析から求めた配筋例と塑性ひずみを考慮した配筋例(CASE5)の頂部の荷重変位曲線を示す。最大耐力を含めほぼ同じ耐力性状を示しているが、鉄筋量の多い弾性解析の方が若干耐力は大きくなっている。

以上より、開口周りの集中応力に対し、本手法を用いて周辺要素に再配分し、配筋を平均化(均等化)しても耐力は弾性応力に基づいて配筋したものと大きな差のないことを確認した。

試算では一回の応力再配分から得られた応力でいくつかのケースの配筋設計を行い比較検討した。計算過程でファクターをいくつか変えることで部位毎の配筋量が変わることが示された。今回の

試算から何回かの計算を試行錯誤で繰り返すことによって意図した適正な配筋へ導くことが可能であることが確認された。

図10 試算ケース(応力開放要素)

図11 部位エリア

図12 FEM解析結果

図 13 必要配筋量分布

図 14 荷重変位曲線

4.4 各試計算結果のまとめ

- 試計算は限られた範囲での数回の繰り返し計算の結果であるが、まとめると以下の通りである。
- ・本配筋法による反復計算を繰り返すことで設計者の設計方針に沿った配筋が可能である。
 - ・応力再配分における塑性歪み要素を適切に設定し、応力集中部の応力を再分配することで、応力集中が緩和され、高密度になる配筋を緩和することができることが示された。
 - ・本手法で配筋設計された構造物の耐力は弾性応力に基づくものと大きな差のない結果が得られている。

5 考察

本手法を用いることにより比較的簡単な方法でコンクリートの塑

性化を考慮し、FEM弾性解析を基に応力再配分がなされた状態の応力分布を算定でき、それに基づいた配筋設計ができることが確認された。この手法で配筋設計を行う場合には、塑性ひずみの導入要素の設定、応力再配分係数 β の設定などかなり大きな自由度があり、設計者の設計意図に沿った配筋設計が可能となる。ただし、塑性ひずみの導入要素及び応力再配分係数 β の設定についてはある程度の試行錯誤が必要となる。

応力再配分要素の設定方法の最も簡便な方法例は、FEM弾性解析結果による配筋が過大と思われる要素を塑性ひずみ導入要素と設定することである。

今回、比較的単純な構造物数例について試計算を実施し本手法の適用性を検討したが、いずれの例においても設計意図に沿った合理的な配筋が得られたものと考えられる。また、それぞれの配筋設計例に対して非線形FEM解析を実施し耐力についての検討も行ったが、いずれも弾性応力により配筋されたものと大きな差はなかった。

基本的には複雑な構造物へも本手法を適用することが可能と考えられるが、設計者はより明確な設計意図を持つことが必要となる。

なお、本手法はFEM弾性解析の応力に基づいており、CADシステムによる設計につながるものと考えられる。

6 おわりに

弾性FEM解析結果に基づく塑性を考慮した実用的な配筋設計法を、まだ学術レベルの研究開発段階のものであるが、今後の実務設計への一助として位置づけ紹介した。今回の試計算結果から得られた知見から、原子炉建屋原子炉周りのRC構造物等の応力集中による過密な配筋を緩和させるという実務設計者のニーズに応える可能性が示された。今後、本手法を含め塑性を考慮したCADシステムによる断面設計の合理化を目指した手法の開発が期待されるものである。

謝 辞

本報告は日本建築学会原子力プラントコンクリート構造小委員会原子炉建屋設計法WG(主査川股重也東北工大教授)における塑性配筋法に関する検討結果をまとめたものである。まとめるにあたりWG各位のご協力を得ました。ここに、付記し、謝意を表します。

参考文献

- 1)E. Anderheggen, et al. "Reinforced-Concrete Dimensioning Based on Element Nodal Forces", ASCE, Vol. 120, pp1718-1731, June, 1994
- 2)E. Anderheggen, et al. "Computer-Aided Dimensioning of Reinforced Concrete Wall and Flat slab Structures" Structure Engineering International, pp17-22, Jan. 1994

[1997年6月20日原稿受理 1997年9月1日採用決定]