

正負交番繰り返し载荷を受ける鉄筋 コンクリート構造物の弾塑性解析

大屋誠¹・加藤史郎²・島岡俊輔³・原隆⁴

¹工博 松江工業高等専門学校助手 土木工学科 (〒697-8518 島根県松江市西生馬町14-4)

²工博 豊橋技術科学大学教授 工学部建設工学系 (〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)

³工修 豊橋技術科学大学大学院生 工学部建設工学系 (〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)

⁴工博 徳山工業高等専門学校 土木建築学科 (〒745-8585 山口県周南市久米高城3538)

The present paper investigates the nonlinear behavior of reinforced concrete structures based on a finite element analysis. The loading type is a horizontal cyclic one such as earthquake loads. Experiments are compared with the results obtained from the finite element analysis. The finite element analysis is based on an isoparametric degenerated shell formulation. The nonlinear constitutive equations for concrete are modeled adopting the formulation based on a concept of Ring Typed-Lattice Model. A fine agreement between the experiments and analyses is obtained, accordingly, it is confirmed that the present numerical analysis scheme based on the Lattice Model is a powerful one to evaluate the behavior of reinforced concrete structures.

Key Words : constitutive equation, lattice model, reinforced concrete, cyclic loading, FEM

1. 序

鉄筋コンクリート（以下、RC と略称）シェル構造物は、浄化槽や貯水タンク、クーリングタワー、原子力格納容器などの産業用容器構造物に多用されているが、このような構造物の安全性は、単調荷重下だけでなく地震などの繰り返し荷重下においても確認する必要がある。その確認のためには、弾性域から破壊に至るまでの力学挙動を繰り返し荷重下においても精度良く追跡可能な構成則モデルが必要となる。しかしながら、RC シェル構造物の数値解析では、実験における破壊近傍の挙動や繰り返し荷重下における挙動を必ずしも追跡できていないのが現状であり、多軸応力下のコンクリート材料に関する非線形性状のモデル化にまだ問題が残されている。

そこで本研究では、単調から繰り返し荷重下における RC 構造物の耐力を精度良く推定するための新しいコンクリート構成則として放射環状形格子モデル（以下、格子モデルと略称）を提案することとその適用性について検討を行うことを目的とする。

この構成則モデルの特徴は、(1) 格子内の棒状の各部材を環状形に構成することにより方向性をなくしたため、応力を評価する際に主応力あるいは

は主ひずみ方向を求める必要がないこと、(2) 棒状部材の非線形特性のみで、2 軸応力下のコンクリートの非線形性状が表現可能であることである。

提案するコンクリート構成則の有限要素解析への応用性を検討するために、繰り返し水平荷重を受ける RC 円筒壁、クーリングタワー、クランクを有する RC 耐震壁に適用し、その精度と適用性について検討を行った。検討の結果、提案する格子モデルによる解析手法は、繰り返し荷重下における RC 構造物の耐力推定において有効な手法であることが確認された。

2. 放射環状形格子モデル

コンクリートのひび割れや圧壊などによる非線形挙動を表現する構成則モデルとして、著者らは図-1 に示す放射環状形格子モデルを提案^{1),2)}している。本格子モデルは、4 本の放射材 (a-d) と 8 個のリング要素 (e-l) で構成されている。また、リング要素は、それぞれ 4 本の棒部材、すなわち水平材 H、鉛直材 V 及びブレース材 B₁、B₂ で構成されている。格子モデルは連続体置換法に基づいて定式化されており、その格子形状から方向依存性が小さいモデルである。よって格子モデルは、基準座標系で与えられたひずみに対して、そのま

ま基準座標系で応力度を評価する。また、モデルを構成する棒部材は軸方向の応力-ひずみ関係を与えるだけであって、複雑で、かつ、多くの計算量を要するせん断応力の伝達機構についてはひび割れ方向を基準とするモデル化をしていないことが特徴として挙げられる。格子モデルを構成する各部材の役割^{1), 2)}は、概略的に表現すれば、放射材とリング要素内部の水平材は等二軸の圧縮あるいは引張時に主として抵抗し、リング要素内のブレース材と鉛直材はせん断変形時に主として抵抗する部材と仮定され、また、複合的な応力に対しては、全ての部材が協働して抵抗すると仮定される。これらの抵抗作用がコンクリート要素の抵抗作用とほぼ等しくなるように各部材の諸特性が仮定されている。格子モデルに関する詳細は、参考文献1), 2)を参照されたい。尚、この格子モデルは、有限要素中の積分点に配置され、その積分点で求められたひずみに対する応力度を評価する。また、この格子モデルにおいては、直交異方性の仮定は用いていない。

格子モデルを構成する各部材の代表的な応力-ひずみ関係を図-2 に示す。この応力-ひずみ関係は、過去に経験した引張や圧縮のひずみレベルに応じた剛性劣化や耐力劣化を考慮するためのものである。図-2 の各係数は、コンクリート供試体の一軸圧縮試験結果に基づいて一義的に算定され、以下に示すような推定方法を用いている。

格子モデルの各構成部材の強度等を決定するにあたって、(1) 基本的には、コンクリートのシリンダー試験から得られる一軸圧縮強度 f'_c 、弾性係数 E_c 、ポアソン比 ν_c 、一軸圧縮強度時のひずみ ϵ_c 及び一軸引張強度 f_t を用い、(2) さらに必要となるいくつかの定数については、既往の研究成果に

よる値を採用する。また、(3) 等二軸圧縮強度時及び等二軸引張強度時に、各部材が同時にそれぞれの強度に達するとして各部材の強度に関する定数を推定する。

上記の仮定により放射材、リング要素の水平材とブレース材のパラメータを推定することが可能だが、リング要素の鉛直材は等二軸応力状態において応力を負担しないため、強度等の特性値を他の部材と同様に推定することはできない。したがって、2つのパラメータ σ_t と ϵ_{tu} だけは、シリンダー試験から得られる一軸圧縮強度を基に試行錯誤的な予備計算により決定しなければならない。

クラックが発生した後のコンクリートの圧縮強度は、クラック発生前の圧縮強度に比べ低下することが報告³⁾されている。本格子モデルでもモデルを構成する部材が、その構成部材内の劣化により圧縮強度が低下する圧縮特性を持たせた。図-3 に示す圧縮強度低減係数 λ を用いて、格子モデルを構成する放射材、リング要素の水平材、ブレース材を例にして式(1)に示す低減量 λ の計算方法を仮定した。この低減量 λ は、各部材の過去に経験した最大の引張ひずみ量 ϵ_{max} (図-2 参照)を用い計算される。ここで、 λ は圧縮低減係数、 ϵ_{max} は各部材が過去に経験した最大引張ひずみ量、 ϵ_{ter} は各部材の引張強度時(T点)のひずみ量、 σ_t は各部材の引張強度時の応力度、 E_r は各部材の等価初期剛性¹⁾であり、 $\kappa=2.7$ とする。本研究において用いた格子モデル各部材の圧縮低減係数の値を表-1 に示す。これらの値は、これまでの研究¹⁾で得られた現時点での推奨値である。

$$\lambda = 1 - \Lambda \frac{\epsilon_{max} - \epsilon_{ter}}{\kappa \frac{\sigma_t}{E_r}} \quad (1)$$

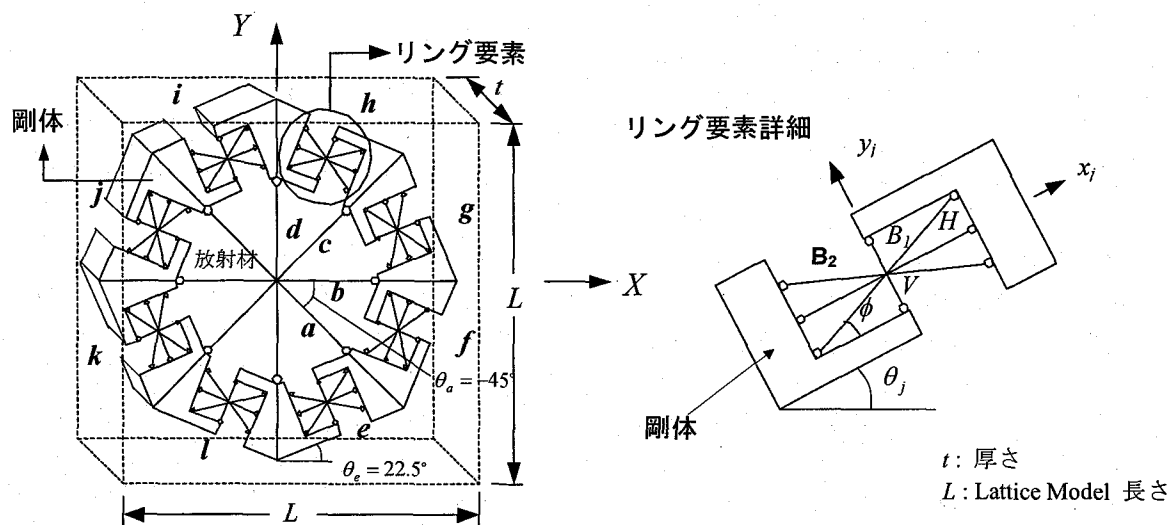
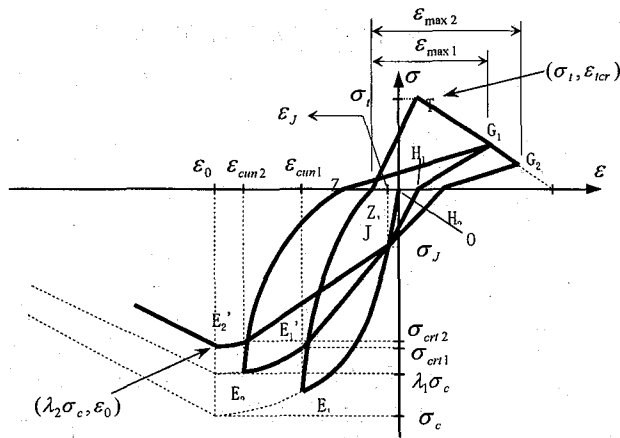


図-1 放射環状形格子モデルの概念図



Loading Pass : O → E₁ → Z₁ → T → G₁ → H₁ → J → E₁'
→ E₂ → Z₂ → G₂ → H₂ → J → E₂'

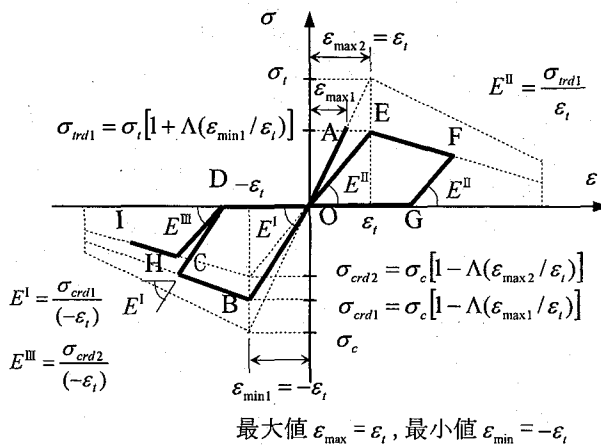
$\varepsilon_{\max 1}, \varepsilon_{\max 2}$: 過去に経験した最大引張りひずみ量

J : 引張除荷曲線から圧縮包絡線への移行点

E' : 最大引張りひずみ $\varepsilon_{\max}$ の更新に伴って変化した圧縮包絡線上の戻り点

Z : 塑性ひずみ点

(a) 放射材, リング要素水平材, ブレース材



Loading Pass : O → A → B → C → D → E
→ F → G → H → I → J → K → L → M → N → O
→ P → Q → R → S → T → U → V → W → X → Y → Z

(b) リング要素鉛直材

図-2 構成部材の応力ひずみ関係

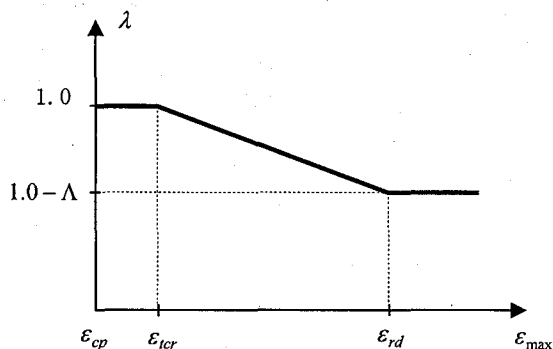


図-3 圧縮低減係数

表-1 圧縮低減係数推奨値^{1), 2)}

Strut Name	Reduction Factor Λ
放射材	$\Lambda^{hub} = 0.4$
リング要素鉛直材	$\Lambda^V = 0.4$
リング要素水平材	$\Lambda^H = 0.0$
リング要素ブレース材	$\Lambda^{B1}, \Lambda^{B2} = 0.8$

3. RC立体構造物の有限要素解析

数値解析として積層化有限要素法⁴⁾を採用し、シェル要素として、9 節点 Heterosis 要素⁴⁾を採用した。数値積分法としては、面内剛性について 3×3 Gauss 積分、面外剛性について 2×2 Gauss 積分の選択低減積分法⁴⁾を採用した。幾何学的非線形性と材料的非線形性を考慮に入れ数値解析を実施した。また、厚さ方向にも材料的非線形性を考慮するため積層化手法を採用した。コンクリートの材料特性として著者らが提案している格子モデル^{1), 2)}をコンクリートの構成則として採用し、変位増分法によって弾塑性解析を行った。鉄筋はバイリニア型の履歴特性を採用し、シェル要素内の鉄筋量と等価な鉄筋シートとしてモデル化した。

(1) 解析対象

せん断特性が RC 構造物の耐力に大きく影響を与える模型実験を対象に、提案する格子モデルの適用可能性を検討する。対象実験としては、円筒型耐震壁の模型実験として、(株)熊谷組原子力開発室で 1982 年に実施されたプレストレスコンクリートの円筒壁試験体 RC-C の静的水平加力実験⁵⁾と(財)原子力工学試験センターで 1980 年から 1981 年にかけて RC 立体耐震壁の復元力特性に関する基礎資料を得るために行われた水平加力実験の内 B2-2⁶⁾を数値解析例として取り上げた。RC 大型冷却塔の模型実験として、(株)大林組技術研究所で 1975 年に大型冷却塔の耐震設計の基礎資料を得るために実施された模型実験⁷⁾を採用した。また、RC 耐震壁として、1998 年に金沢工業大学高山研究室で実施された静的水平加力実験 CE-0, CE-1/2⁸⁾を数値解析例として取り上げた。

(2) RC円筒耐震壁の数値解析例

図-4に試験体の形状を、表-2に試験体の寸法及び材料特性の一覧を示す。解析モデルを図-5に示す。いずれも対称構造物であるので1/2モデルとした。厚さ方向にはコンクリートを8層に分割し、縦横の複配筋に対し鉄筋層を4層設けた。加力スラブは、厚さと鉄筋量を壁部のものと比べて非常に大きくし、剛体とみなせるようにした。また、実験では壁部と基礎スラブが一体打設されているので、解析における支持条件は完全固定とした。

図-6にRC-Cの荷重-変位関係を格子モデルによる解析結果と実験結果を重ねて示す。また、図-7にB2-2の荷重-変位関係の解析結果と実験結果を重ねて示す。表-3に各試験体の最大耐力を示す。

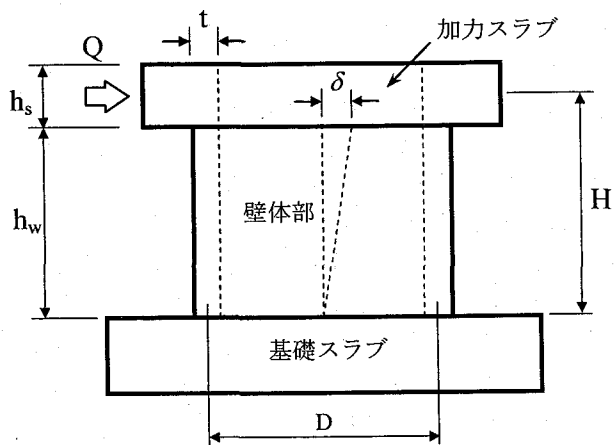
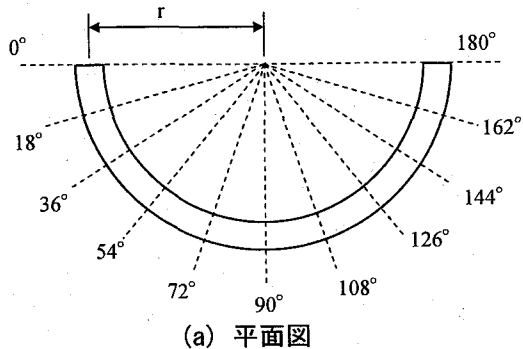
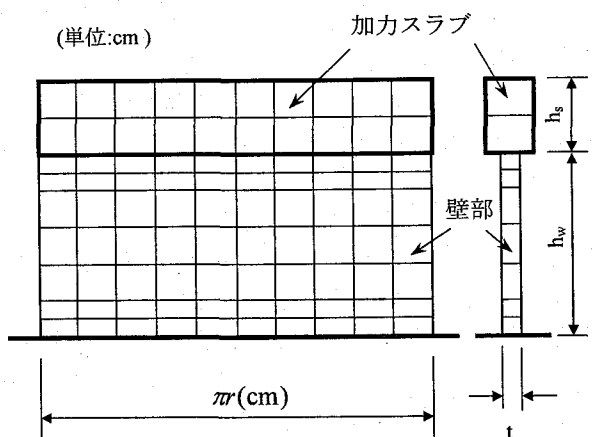


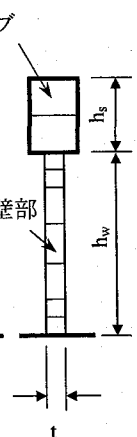
図-4 円筒耐震壁の実験概要



(a) 平面図



(b) 展開図



(c) 側面図

図-5 RC 円筒壁の数値解析モデル

図-6, 図-7より, 包絡線, 内部曲線とも良好な一致を示しており, 格子モデルの解析精度及び繰り返し載荷時の弾塑性解析の能力の高さが伺える。

(3) RC大型冷却塔模型の数値解析例

図-8は, 大型冷却塔模型の載荷実験であり, 頂部に繰り返し荷重を載荷している。この場合も同様に, 対称条件から1/2をシェル要素を用いてモデル化した。厚さ方向には, コンクリートを8層に分割し, 鉄筋を周方向, 子午線方向にシングル配筋しているため2層でモデル化した。

図-9に荷重-変位関係を格子モデルによる解析

表-2 試験体の寸法及び材料特性一覧

		RC-C	B2-2
シアスパン比		1.0	0.6
加力点高さH[cm]		130	60
壁部高さ h_w [cm]		110	50
加力スラブ高さ h_s [cm]		40	20
壁部厚さ t [cm]		7	8
円筒壁の直径D[cm]		130	100
鉄筋比	鉛直方向[%]	2.4	1.6
	水平方向[%]	1.2	1.6
コンクリートの圧縮強度[N/mm ²]		43.5	27.2
コンクリートの弾性係数[×10 ⁴ N/mm ²]		3.12	2.43
鉄筋の降伏応力度[N/mm ²]		412	376
鉄筋の弾性係数[×10 ⁵ N/mm ²]		1.83	1.91

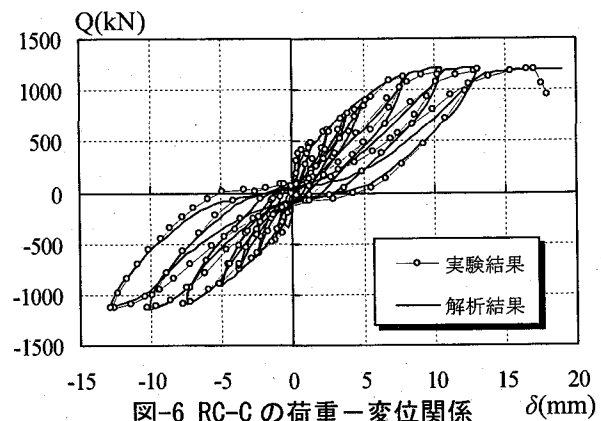


図-6 RC-Cの荷重-変位関係

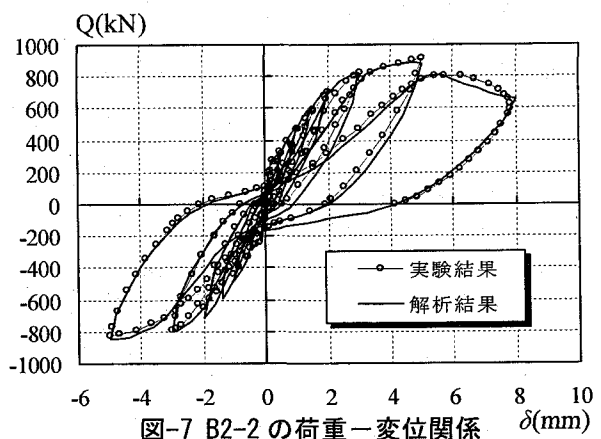


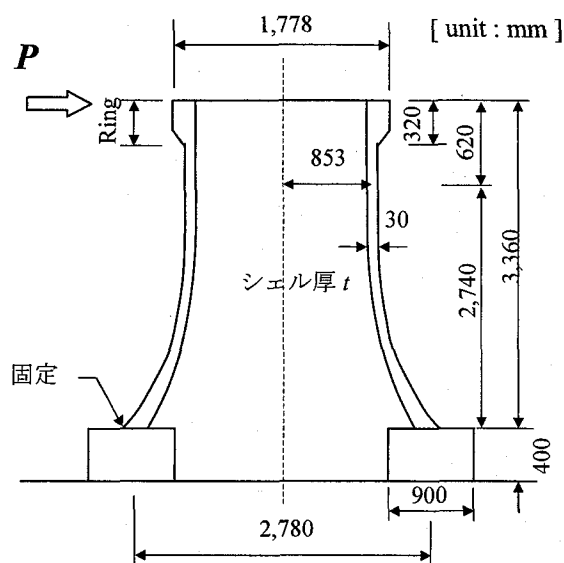
図-7 B2-2の荷重-変位関係

表-3 解析と実験の耐力比較

	RC-C		B2-2	
	(+)	(-)	(+)	(-)
解析結果[kN]	1220.3	1151.4	885.3	846.7
実験結果[kN]	1202.5	1130.8	907.3	829.3
解析/実験	1.01	1.02	0.98	1.02

結果と実験結果を重ねて示す。また, 表-4に解析結果と実験結果の耐力の比較を示す。図-9より, 格子モデルによる解析結果の包絡線, 内部曲線とも実験結果と概ね一致しているが, 実験の耐力に比べ若干低い結果となった。

図-10に格子モデルによる解析の最大耐力時のひ



コンクリート: $f'_c = 26.6 \text{ N/mm}^2$ 鉄筋: $f_y = 374.6 \text{ N/mm}^2$

P = クーリングタワー全体に作用する荷重

図-8 クーリングタワーの試験体の概要及び解析モデル

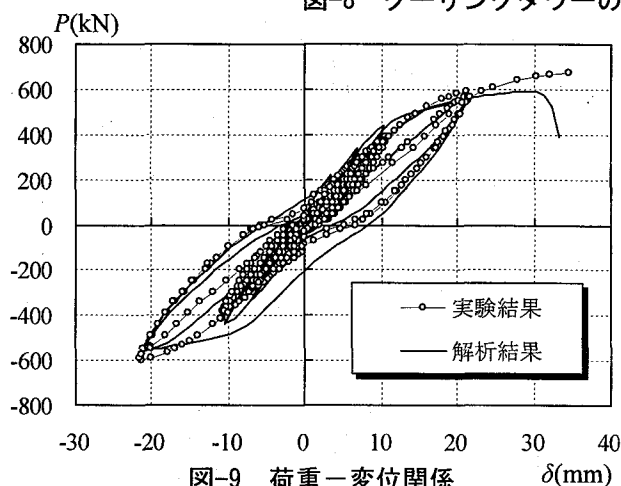


図-9 荷重-変位関係

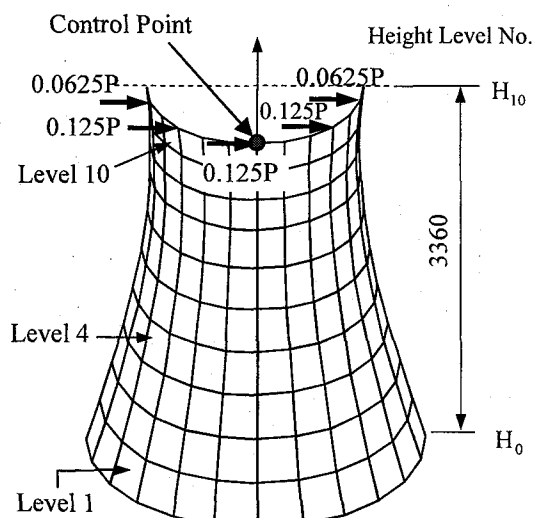
表-4 解析と実験の耐力比較

	解析[kN]	実験[kN]
曲げ初期ひび割れ荷重	113.4(2Cycle)	78.5(2Cycle)
せん断と曲げひび割れの急激な進展荷重	106.0(4Cycle)	98.1-196.1(4Cycle)
縦方向鉄筋降伏荷重	335.7	441.3
円周方向鉄筋降伏荷重	439.1	588.4
最大耐力	590.9	676.7

ひび割れ図と変形モード図を示す。ひび割れ発生状況は実験結果と同様の結果が得られている。また、実験での最終崩壊形態はThroat部で明瞭な破壊面を伴う急激な直接せん断破壊であった。本格子モデルによる解析においても図-10の変形図に示すように同様な変形形態を示し、耐力が低下している。

(4) クランクを有する耐震壁の数値解析例

図-11に試験体形状と寸法を示す。試験体は、130mm×100mmの断面を持つ梁と柱で補剛され、基礎梁は400mm×250mmの断面である。図-12に解析モ



Throat 部のせん断
変形とクラック

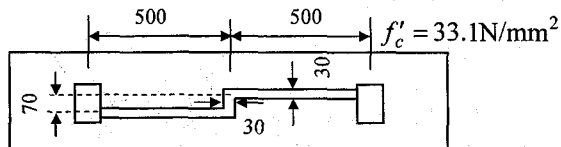
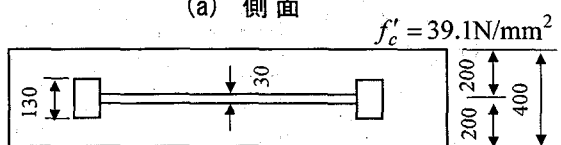
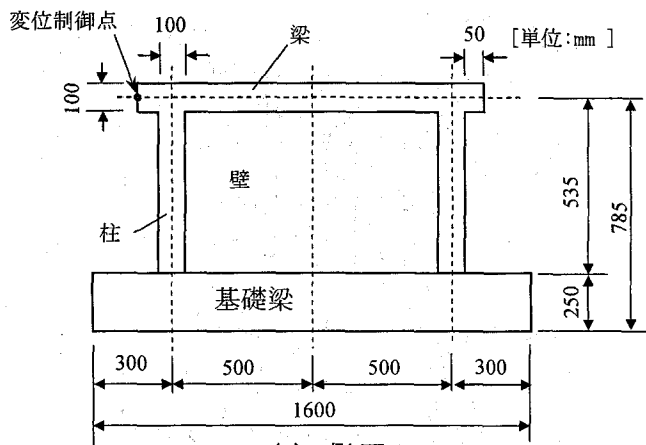
図-10 変形モードとクラック図

デルの例としてCE-1/2を示す。壁上部の梁のX方向並進変位は同時変位とし、Y方向変位を拘束した。水平荷重は梁要素の各節点に集中荷重として与えた。また、各要素のコンクリートは厚さ方向に8層、鉄筋は壁部で2層、梁・柱部で4層にモデル化した。

図-13にCE-0の荷重-変位関係を、図-14にCE-1/2の荷重-変位関係を示す。また、表-5に解析と実験の耐力比較を示す。図-13と図-14より、解析による履歴ループは実験に比べやや細身の結果となったが、格子モデルによる解析結果の包絡線、内部曲線とも実験結果と概ね一致している。

4. まとめ

提案した格子モデルによるコンクリート構成則を有限要素解析法に応用し、繰返し水平荷重を受けるRC構造物に適用し、その精度と応用性について検討を行った。その結果から得られた見解を以下にまとめる。



(c) CE-1/2 断面図 (壁中央部に crank 有り)

図-11 試験体形状及び寸法

表-5 解析と実験の耐力比較

	CE-0		CE-1/2	
	(+)	(-)	(+)	(-)
解析結果[kN]	203.4	199.8	150.5	144.6
実験結果[kN]	201.9	192.9	158.3	161.4
解析/実験	1.01	1.04	0.95	0.90

- (1) 解析結果は実験の履歴ループの形状や変形性状を良好に追跡できており、本手法の妥当性及び適用可能性を示すことができた。
- (2) 他の解析結果と同様に、繰り返し水平荷重を受けるRC構造物の解析において、圧縮強度低減係数を考慮する必要があることが分かった。

参考文献

- 1) Kato, S., Ohya, M. and Hara, T.: Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Shells under Cyclic Loading, *Journal of the IASS*, Vol.43(2002), No.1, pp. 23-40, 2002.
- 2) 加藤史郎, 大屋 誠, 前田佐登男, 吉野文雄: 放射・環状形格子モデルによるコンクリートの構成方程式とRCシェルの有限要素解析への応用, 日本建築学会構造工学論文集, Vol.44B, pp. 441-454, 1998.
- 3) Vecchio, F.J. and Collins, M.P.: The Modified Compression-Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear, *ACI Journal*, Proceedings Vol.83, No.2, pp.219-231, 1986.
- 4) Hinton, E and Owen, D.R.J.: *Finite Element Software for Plates and Shells*, Pineridge Press Limited, 1984.
- 5) 町原亘寛, 白井一郎, 中村善郎: 鉄筋コンクリート構

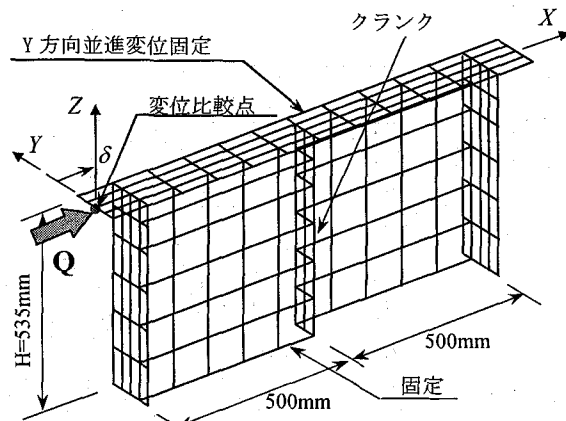


図-12 解析モデル (CE-1/2)

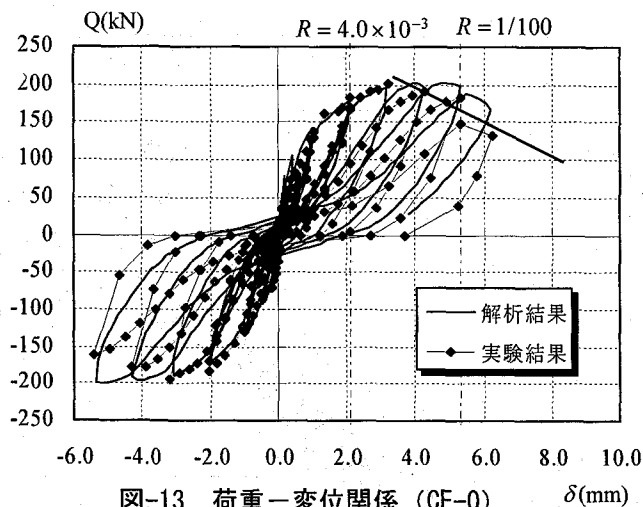


図-13 荷重-変位関係 (CE-0)

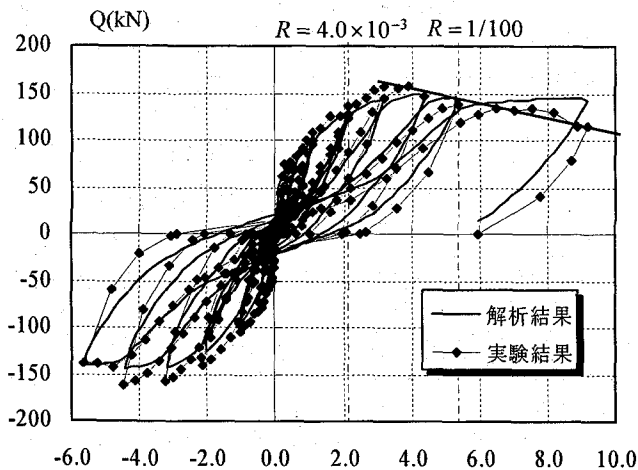


図-14 荷重-変位関係 (CE-1/2)

造物の非線形有限要素解析, 熊谷技報第34号, pp.115-123, 1984.

- 6) 稲田泰夫, 秋野金次, 杉田和直: 原子力建屋の復元力特性試験 (小型および部分模型) (その5) B2 (円筒壁) シリーズ試験, 日本建築学会学術講演概要集 (東北), pp.965-966, 1982.
- 7) 大内一, 小池健仁, 伊藤雅保, 武田寿一: RC大型冷却塔模型の水平加力実験と弾塑性解析, 土木学会論文報告集, 第266号, pp.39-50, 1977.
- 8) 加藤史郎, 高山誠, 大屋誠, 島岡俊輔: クランク型鉄筋コンクリート耐震壁の有限要素解析, 構造工学論文集, Vol.48B, pp.119-127, 2002.