

論文 機器アンカー一部の引き抜き耐力評価のための解析的研究

美原 義徳^{*1}・植木 孝^{*2}・樋口 智一^{*3}・小田島 政廣^{*4}

要旨：地震や経年変化などによる RC 構造物のひび割れ状態を考慮した機器アンカー部の引き抜き耐力を、コンクリート構成則に留意した 3 次元有限要素法に基づき解析的に評価することを目的に、既往の実験結果と解析結果を比較し、引き抜き耐力評価のための解析手法の妥当性を検証した。なお、同時に、要素寸法、ボルトとコンクリートの摩擦係数及びコンクリートの引張側非線形特性が引き抜き耐力に与える影響を定量的に検討した。

キーワード：機器アンカー部、引き抜き耐力、ひび割れたコンクリート、3 次元有限要素法

1. はじめに

原子力施設などの機器や配管系の耐震設計において、これらのアンカー部の健全性評価は耐震支持構造上、重要な項目である。コンクリートに埋め込まれたスタッドボルトなどのアンカー部（以降、機器アンカー部と呼ぶ。一般的な埋込金物も対象とする。）が引張荷重を受ける場合の破壊モードとして、基礎ボルトが破断するモードとコンクリートがアンカープレートを起点にしてコーン状の破壊をするモードが考えられる。このうち、後者のコンクリートがコーン状に破壊するモードに対する引き抜き耐力の評価方法として、多数の実験結果に基づく経験式が様々な学協会から既に提案されている¹⁾など。さらに、地震や経年変化によって、埋め込まれたコンクリートにひび割れが生じた場合の引き抜き耐力の評価方法に関しては、作用している面内せん断ひずみや面内せん断力に応じた引き抜き耐力の低減効果²⁾や機器アンカー部を横切るひび割れ幅に応じた引き抜き耐力の低減効果³⁾などの知見があるものの、限られた実験結果に基づく経験式であるために、実験データから極端に逸脱した場合や非常に複雑な境界条件を有する場合にはその適用性に課題が残る。

そのような背景から、本論においては、機器

アンカー部の引き抜き耐力の評価方法として、従来の実験結果に基づく経験式ではなく、3次元有限要素法を用いた解析的な評価方法を提案し、その適用性を検討することを目的とする。

ここで、3次元有限要素法を用いた機器アンカー部の耐力評価方法に関しては、Ozbolt らの成果⁴⁾や川島らの成果⁵⁾などここ数年斬新な研究成果が見られるものの、無損傷のコンクリートを対象にしたものであり、コンクリートにひび割れなどの損傷が生じた場合の機器アンカー部耐力に関する数値解析的検討の報告例は、少なくとも筆者らの知る限り、見当たらない。このような現状を踏まえて、本論においては、コンクリートにひび割れなどの損傷が生じた場合の機器アンカー部の引き抜き耐力に関して、既往の実験結果のシミュレーション解析を実施し、本論で用いている解析手法の妥当性を検証する。

2. コンクリート構成則

2.1 等方性塑性損傷モデル

3. に示す機器アンカー部の引き抜き耐力シミュレーション解析に用いるコンクリート部分の弾塑性構成則は、Lee と Fenves により提案されている等方性塑性損傷モデル⁶⁾を用いる。等方性塑性損傷モデルとは、図-1 に示すように、

*1 鹿島建設（株） 原子力部 原子力設計室課長 工修（正会員）

*2（株）東芝 磯子エンジニアリングセンター 原子力機器設計部主査 工修

*3（株）東芝 磯子エンジニアリングセンター 原子力機器設計部 工修

*4 鹿島建設（株） 原子力部 原子力設計室担当部長

ひび割れ等による損傷を等方性のスカラー量 d (損傷値 d と呼ぶ。 $0 \leq d \leq 1$ であり、 $d=0$ で無損傷、 $d=1$ で破壊) によって定義し、損傷値 d と応力 σ 及びひずみ ε の関係を式(1)により表現する。

$$\sigma = (1-d)E_0(\varepsilon - \varepsilon_{pl}) \quad (1)$$

なお、 E_0 は弾性時のヤング係数

ε_{pl} は塑性ひずみ

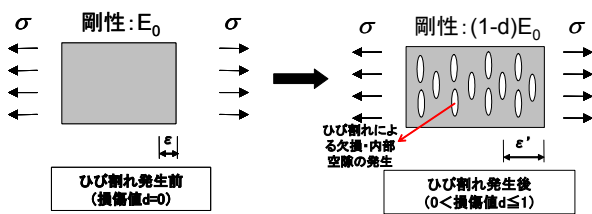


図-1 等方性塑性損傷モデルの概念

損傷値 d は、塑性ひずみに依存し、かつ、コンクリートの圧縮側と引張側の挙動の相違を表現するために、圧縮側損傷値 d_c と引張側損傷値 d_t から構成される。等価1軸応力-ひずみ関係における損傷値の取り扱いを図-2に示す。

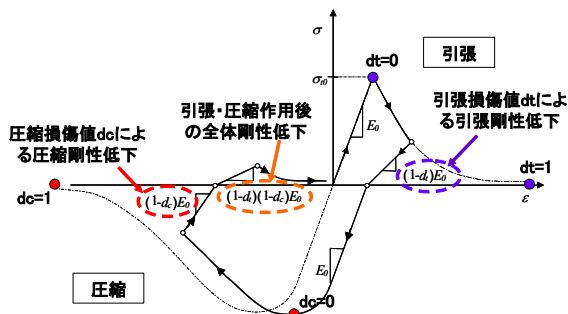


図-2 等価1軸応力-ひずみ関係

ここで損傷値 d は、無筋コンクリートの純せん断強度に関するパラメータスタディ結果⁷⁾を参考に、引張側及び圧縮側とも1軸応力-ひずみ関係における最大強度点 ($d=0$) 以降の軟化部分を破壊点 ($d=1$) まで直線近似で与える。

2.2 降伏曲面及び流れ則

機器アンカー部の引き抜き耐力シミュレーション解析に用いるコンクリート部分の降伏曲面は、Lubliner⁸⁾の提案する圧縮、引張及びせん断で統一した降伏曲面を採用している。流れ則

(塑性ポテンシャル面) も同様に、Lubliner⁸⁾の提案する非適合の流れ則を採用し、ひび割れの発生によるダイラタンシー効果を考慮できるようにしている。ここで、図-3に示す塑性ポテンシャル面の膨張角 ψ は、損傷値 d の与え方と同様に、無筋コンクリートの純せん断強度に関するパラメータスタディ結果⁷⁾を参考にして、 $\psi = 30$ 度を与える。

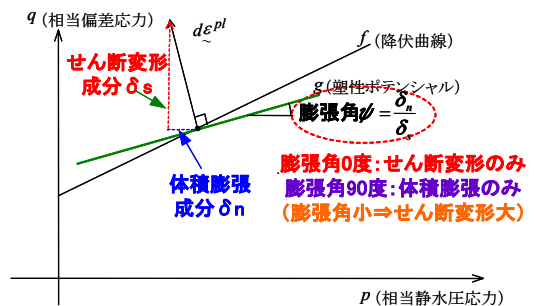


図-3 膨張角の概念

2.3 求解法

機器アンカー部の引き抜き耐力シミュレーション解析に用いる求解法は、数値積分に後退型オイラー法を用い、リターンマッピングアルゴリズム⁹⁾により降伏曲面の逸脱に対して補正するようにしている。

なお、コンクリートのひび割れ発生による急激な不安定性を回避するために、既往の知見⁷⁾を参考に、人工的な減衰である Duvaut-Lion による粘塑性減衰¹⁰⁾として、系におけるひずみエネルギー全体の1%程度を与えている。

3. シミュレーション解析

ここでは、2.で示したコンクリート構成則を用いて、機器アンカー部の引き抜き耐力に係る既往の実験結果2例を対象にシミュレーション解析を実施し、本解析手法の妥当性を検証する。なお、シミュレーション解析に際しては、汎用解析コード ABAQUS Ver.6.5 を使用した。

3.1 スタッドボルトの引き抜き実験

コンクリートがコーン状の破壊を呈した、1本のスタッドボルトの引き抜き実験を対象に、

要素寸法，コンクリートモデルのパラメータ及びスタッドボルトとコンクリートの摩擦が引き抜き耐力に与える影響に関して検討した。

(1) 解析対象とする実験の概要

解析対象とする実験は，実スケール構造物への適用を念頭に，ひび割れのないコンクリートに埋め込まれた M42 の太径ボルトの引き抜き実験¹¹⁾のうち No.3 の実験結果を対象とする。

(2) 解析モデル

ソリッド要素を用いた解析モデルを図-4 に示す。シアコーンの発生・進展のメカニズムを検討するために，骨材径と要素寸法の関係を示唆した Bazant らの知見¹²⁾を参考に，ボルト深さ方向の要素サイズをパラメータにして，簡易モデル（1要素サイズを最大粗骨材径 25mm の 2～3 倍）及び詳細モデル（1要素サイズを最大粗骨材径 25mm の 0.5～1 倍）の 2 種類の解析モデルを用いる。また，ボルトとコンクリートの摩擦係数は，保守的に無視した場合の 0.0 と現実的な設定である 0.4 の 2 ケースを検討する。

これらを踏まえて，要素寸法，ボルトとコンクリートの摩擦係数及び後述の (3) に示すコンクリートの引張側非線形特性をパラメータにした解析ケースを表-1 に示す。

(3) 材料特性

No.3 試験体のコンクリート及びボルトの材料特性は，試験時の材料試験結果¹¹⁾及び JIS の規格値に基づき，コンクリートの圧縮強度，ボルトの降伏点及び引張強度を設定した。コンクリートの圧縮側応力-ひずみ関係は，既往の知見⁷⁾を参考に，CEB-FIP1990¹³⁾に示された 1 軸圧縮応力-ひずみ関係を多折れ線で近似して図-5 に示すように設定した。

コンクリートの引張側応力-ひずみ関係は，材料試験結果が存在しないために，引張強度を土木学会¹⁴⁾，CEB-FIP1990¹³⁾及び JEAG4601-1991²⁾の 3 種類で評価し，破壊エネルギーと骨格曲線を土木学会¹⁴⁾及び CEB-FIP1990¹³⁾の 2 種類で評価した図-6 の 1 軸引張応力-ひび割れ変位関係で示された 3 ケースを検討する。

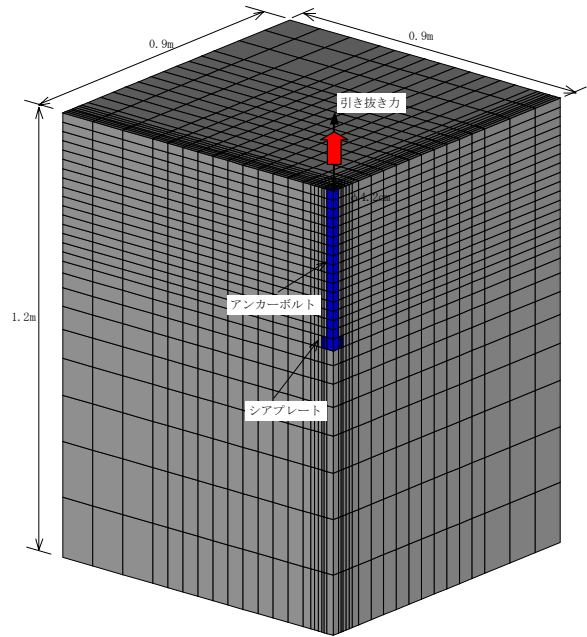


図-4 解析モデル（詳細モデル）

表-1 解析ケース

ケース名	解析モデル	コンクリート引張側非線形性		ボルトとコンクリートの摩擦係数
		引張強度	破壊エネルギー	
基本	簡易	土木学会	土木学会	0.0
A	詳細	土木学会	土木学会	0.0
B	簡易	土木学会	土木学会	0.4
C-1	簡易	CEB-FIP	CEB-FIP	0.0
C-2	簡易	JEAG4601	CEB-FIP	0.0

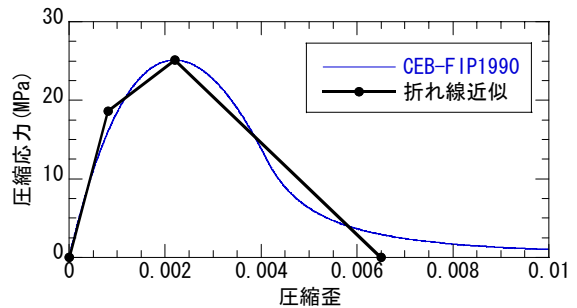


図-5 圧縮側応力-ひずみ関係

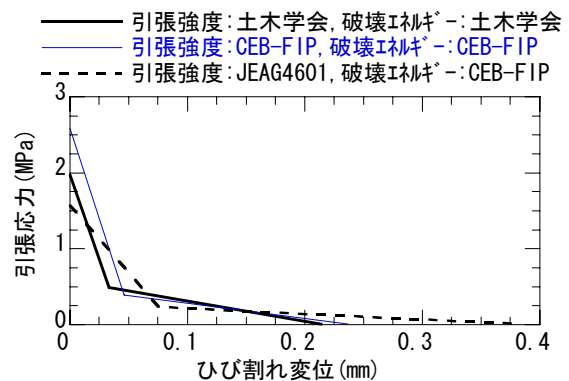


図-6 引張側応力-ひずみ関係

(4) 解析結果

実験時の引き抜き耐力と解析より求まる引き抜き耐力を比較し、3次元有限要素法を用いたシミュレーション解析の分析を行う。なお、解析に際しては、引き抜き耐力以降の軟化領域も精度良く求めるために、変位制御の解析方法を用いた。シミュレーション解析より得られた引き抜き力とボルト先端の引き抜き変位の関係を実験時の引き抜き耐力と併せて図-7に示す。

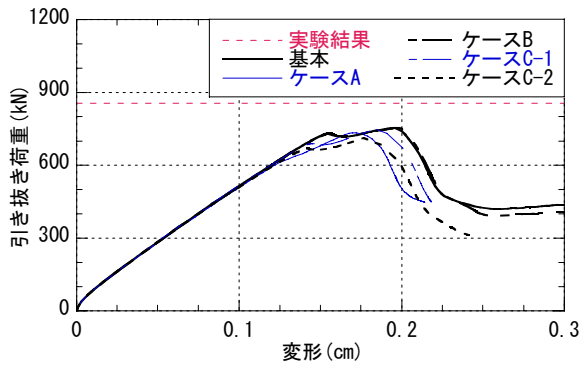
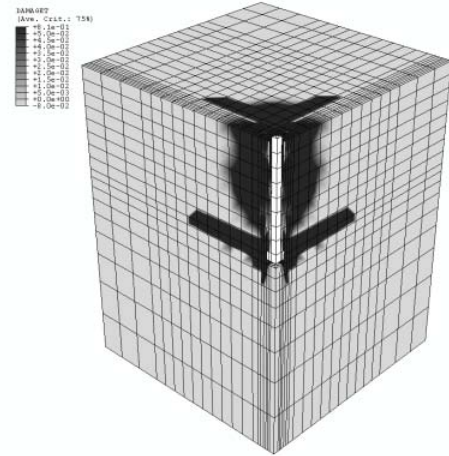


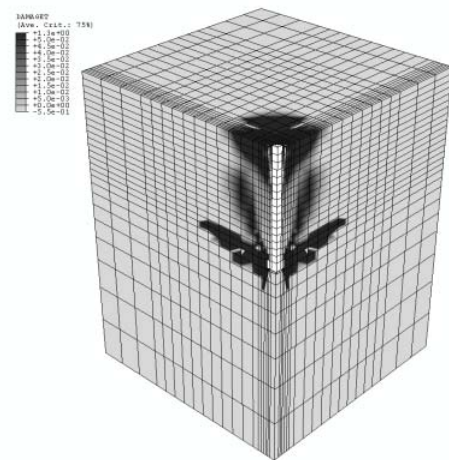
図-7 引き抜き荷重－変形関係の比較

要素寸法が引き抜き耐力に与える影響を分析するために、要素寸法の粗い簡易モデルによる結果（基本）と要素寸法の細かい詳細モデルによる結果（ケース A）を比較する。また、両ケースにおけるシアコーンの発生・進展状況を比較するために、最終変形状態でのひび割れ状況（白から黒になるほどひび割れが大きくなる）を図-8に示す。これより、シミュレーション解析結果は実験時の耐力と比べて若干小さめではあるものの、要素寸法の精粗に関係なく、実験時の引き抜き耐力を概ね再現している。なお、解析結果が若干小さくなった原因として、載荷面の拘束効果を見逃していることなどが考えられる。また、アンカープレート先端からのコンクリートのコーン状ひび割れの発生・進展も実験時の状況を概ね捉えているものと考えられる。従って、要素寸法を最大粗骨材径の2～3倍でモデル化すれば、機器アンカー部の引き抜き耐力をシミュレーションできることが示された。

次に、ボルトとコンクリートの摩擦係数が引



(a) 簡易モデルによる結果（基本）



(b) 詳細モデルによる結果（ケース A）

図-8 コンクリートのひび割れ状況

き抜き耐力に与える影響であるが、図-7の基本ケースとケース B の比較から、引き抜き耐力がコンクリートのコーン状破壊で決まる場合にはほとんど影響を与えないことが分かる。

最後に、コンクリートの引張側非線形特性が引き抜き耐力に与える影響に関して、基本ケース、ケース C-1 及びケース C-2 の引き抜き耐力に大きな相違は見られないことから、本検討の範囲内では影響がないことが示された。しかし、引張強度のみを変更したケース C-1 及びケース C-2 の引き抜き耐力の比較から、引張強度が小さくなると引き抜き耐力も小さくなる傾向も見受けられる。

3.2 面内ひび割れ時のアンカー部引き抜き実験

一般的な機器アンカー部はプレートの四隅にスタッドボルトを接合した構造となっており、

引き抜き力が作用した場合には 4 本のスタッドボルトによる各々のシアコーンによる破壊モードを示す。ここでは、3.1 で検証された解析手法を用いて、面内ひび割れがコンクリートに生じた場合の複雑な構造を有する機器アンカー部の引き抜き実験を対象に、シミュレーション解析を実施した。

(1) 解析対象とする実験の概要

解析対象とする実験は、図-9 に示す面内せん断を受ける RC 壁に埋め込まれた 2 対の埋込み金物の引き抜き実験¹⁵⁾であり、最も小さい面外耐力を示した P3-2 試験体を対象とする。

(2) 解析モデル

3.1 での知見を参考に、最大粗骨材径 10mm の 2~3 倍の要素寸法を目安として、コンクリート部にソリッド要素を、アンカーボルトに梁要素を用いた解析モデルを図-10 に示す。なお、ボルトとコンクリートの摩擦係数は無視した。

シミュレーション解析における境界条件及び荷重条件は、試験時の加力状況を模擬して、図-11 に示すように、繰り返し面内せん断変形を作用させながら、面外荷重を作用させた。

(3) 材料特性

選定された P3-2 試験体を構成するコンクリート及びボルトの材料特性は、3.1 と同様に、試験時の材料試験結果に基づき設定した。なお、コンクリートの引張側応力-ひずみ関係は、引張強度及び破壊エネルギーとともに、土木学会¹⁴⁾に基づき設定した。

(4) 解析結果

シミュレーション解析より得られた引き抜き力とボルト先端の引き抜き変位の関係を実験時の引き抜き耐力と併せて図-12 に示す。本解析では、実験と同様に引き抜き力を荷重制御で与えざるを得なかったために、数値的に不安定となった時点で解析を終了している。ここで、面外引き抜き力を除荷した直後に面外変形が進展しているが、これは負側の面内せん断変形によって閉じていたコンクリートのひび割れが開き、ダイラタンシー効果により面外方向に孕みだし

ているものと考えられる。

最終変形状態における、実験でのひび割れ状況を図-13 に、解析でのコンクリートの相当引張塑性ひずみ分布を図-14 に示す。これより、コンクリートのコーン状ひび割れの発生・進展も観察でき、かつ、数値的に不安定となった時点での引き抜き力は、実験時の引き抜き耐力と対応している。

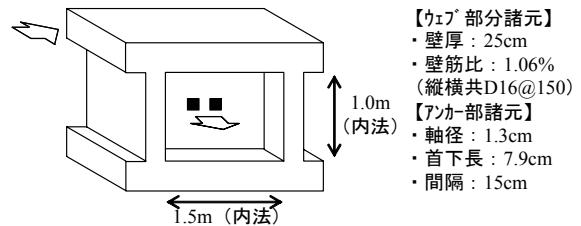


図-9 解析対象とする実験のイメージ

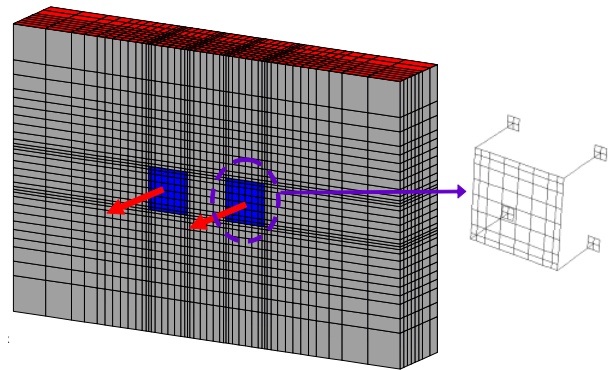


図-10 解析モデル

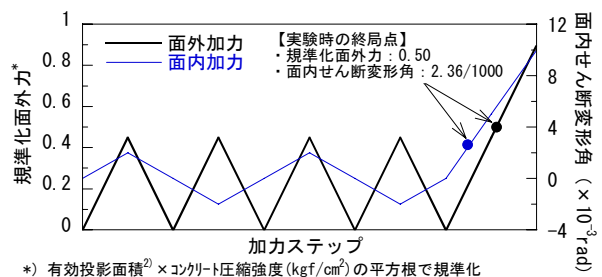


図-11 载荷パターン

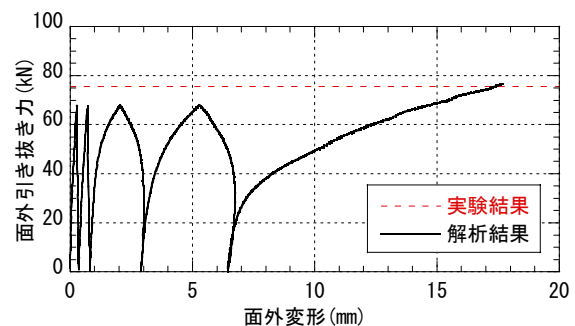


図-12 引き抜き荷重-変形関係の比較

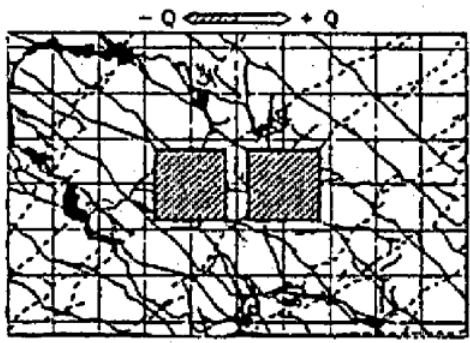


図-13 実験での最終ひび割れ状況¹⁵⁾

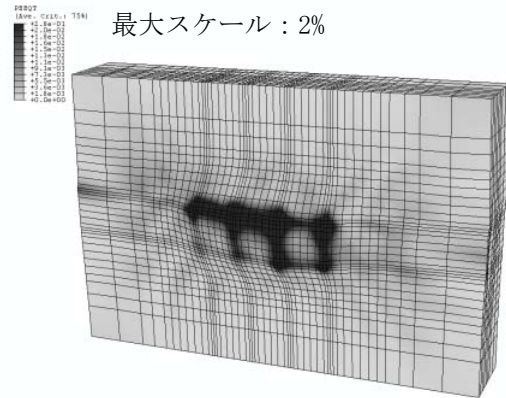


図-14 解析でのコンクリート相当引張塑性ひずみ

4. まとめ

地震や経年変化などによる RC 構造物のひび割れ状態を考慮した機器アンカー部の引抜き耐力を、コンクリート構成則に留意した 3 次元有限要素法に基づき解析的に評価することを目的に、既往の実験結果と解析結果を比較し、解析手法の妥当性を検証した。なお、同時に、要素寸法、ボルトとコンクリートの摩擦係数及びコンクリートの引張側非線形特性が引き抜き耐力に与える影響を定量的に検討し、以下のことが分かった。

- ・ 要素寸法を最大粗骨材径の 2~3 倍でモデル化すれば、十分精度よく機器アンカー部の引き抜き耐力が得られる。
- ・ コンクリートのコーン状破壊で引き抜き耐力が決まる場合、ボルトとコンクリートの摩擦係数は影響ない。
- ・ 土木学会¹⁴⁾及び CEB-FIP1990¹³⁾におけるコンクリートの 1 軸引張応力-ひび割れ変位関係のどちらを用いても機器アンカー部の引き抜き耐力にはほとんど影響を与えない。

なお、本論では機器アンカー部の引き抜き耐力のみに着目し解析手法の妥当性の検証を実施したが、今後は変形性能にも着目した検証を行い、解析手法を更に高度化することが望まれる。

参考文献

- 1) 各種合成構造設計指針・同解説, 社団法人日本建築学会, 1985.2
- 2) 電気技術指針原子力編 原子力発電所耐震設計

- 3) Hoehler, M. et al. : Fastening to Concrete for Use in Seismically Active Regions, Proceedings of the 1st fib Congress, Session 6, pp.249-258, 2002
- 4) Ozbolt, J. et al. : 3D FE analysis of anchor bolts with large embedment depths, Fracture Mechanics of Concrete Structures, Li et al (eds), Ia-FraMCoS, pp.845-852, 2004
- 5) 川島正樹ほか：鋼板コンクリート構造のスタッド設計法に関する研究 その 2 スタッドせん断耐力評価式の FEM 解析による検証, 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿), 21557, pp.1113-1114, 2005.9
- 6) Lee, J., and Fenves, G. L. : A Plastic-Damage Concrete Model for Earthquake Analysis of Dams, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 27, pp. 937-956, 1998
- 7) 美原義徳ほか：ABAQUS V6.3 における塑性損傷論に基づくコンクリートモデルについて, ABAQUS 国内ユーザーズミーティング 2002 講演論文集, pp.59-68, 2002
- 8) Lubliner, J., Oliver, J., Oller, S., and Oñate, E. : A Plastic-Damage Model for Concrete, International Journal of Solids and Structures, Vol.25, no.3, pp. 229-326, 1989
- 9) Ortiz, M. and Simo, J.C. : An Analysis of a New Class of Integration Algorithms for Elastoplastic Constitutive Relations, Int. J. for Num. Meth. in Engrg., Vol.23, Issue3, pp.353-366, 1986
- 10) Duvaut, G. and Lions, J. L. : Inequalities in Mechanics and Physics, Springer, New York, 1976
- 11) 市橋一郎ほか：原子力発電所の機器定着部に関する実験研究 (その 1), 日本建築学会学術講演梗概集(近畿), 2079, pp157-158, 1987.10
- 12) Z.P. Bazant, and J. Planas : Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quasibrittle Materials, CRC Press, 1997
- 13) Comite Euro-international du Beton : CEB-FIP MODEL CODE 1990, Thomas Telford, 1993
- 14) コンクリート標準示方書[構造性能照査編], 土木学会, 2002.3
- 15) 柴田明徳ほか：原子炉建屋の弾塑性試験 支持機能試験 (その 6) ~ (その 8), 日本建築学会学術講演梗概集(北海道), 21500~21502, pp.999-1004, 1995.8