

論文 鉄筋コンクリートフーチングの3次元有限要素解析

牧 剛史^{*1}・田邊 成^{*2}・前川宏一^{*3}

要旨:本論文は送電用鉄塔基礎フーチングの押し抜きせん断挙動を3次元構造解析プログラムを用いて推定し、併せて組み入れた3次元鉄筋コンクリート構成則の検証を行ったものである。検証において、終局荷重・荷重-変位関係・せん断補強筋降伏荷重の3点を評価の指標としている。その結果、比較的粗いメッシュの分割を行っても、載荷形式を適切にモデル化すれば、現実の結果に即した推定が可能であることが認められた。

キーワード:3次元構造解析、フーチング、終局荷重、せん断補強筋

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造はひび割れ以後及び鉄筋降伏後に強い非線形性を呈するために、統一的な手法による力学挙動の推定は容易ではないが、現在では2次元応力場での構造解析手法は確立されつつある。しかし、3次元的な応力流れを持つ構造物に対して2次元解析を準用するにはおのずと限界があり、あらゆる構造物に対して適用可能な3次元構造解析手法の確立が今後一層望まれる。本論文は、ひび割れを含む3次元鉄筋コンクリート構成則と、それを組み入れた3次元有限要素解析プログラムの適用性を、送電用鉄塔基礎フーチングの押し抜きせん断試験の結果を用いて検証することを目的としたものである。

2. 送電用鉄塔基礎フーチングの押し抜きせん断試験

2. 1 送電用鉄塔基礎

超高圧送電用鉄塔の大型化に伴い、その基礎フーチング（図1）も併せて大型化が進み、実物大の試験体による実験が技術や経済性の面で困難となってきている。一方、縮小モデルによる実験は、せん断破壊強度の寸法効果[1]を考慮すると、必ずしも安全側の評価を与えないため、縮小実験の結果を実大構造に直接当てはめることは出来ない。従って、この問題に対して解析的なアプローチが望まれるのである。検証に用いる実験は本来、フーチングの押し抜きせん断耐力算定式の作成のために行われたものであるが、本論文においてはこの試験結果を用いて、3

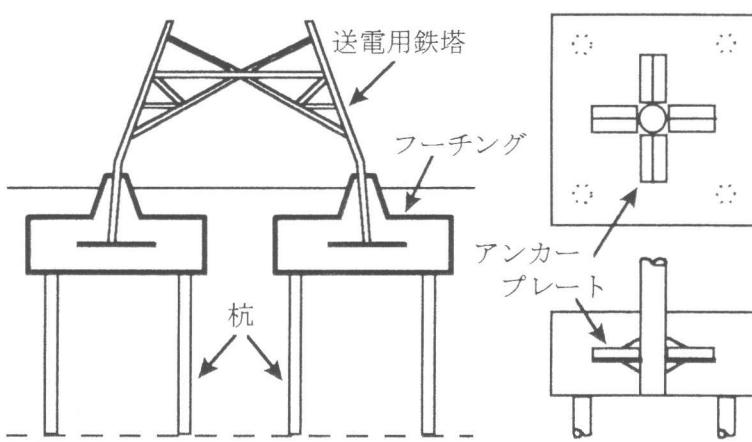


図1 送電用鉄塔基礎フーチング

*1 東京大学大学院 工学系研究科土木工学専攻 (正会員)

*2 東京電力㈱ UHV送変電建設所 (正会員)

*3 東京大学助教授 工学部土木工学科、工博 (正会員)

次元非線形解析のチェックと、目では見ることの出来ないフーチング内部のせん断ひび割れ挙動を推定することを試みるものである。

2. 2 試験概要
せん断耐力に影響を及ぼす因子を様々に変化させた4種類の試験体を用いて載荷試験を行った。各試験体の諸元を図2

に、各材料特性値を表1に示す。また、本実験における主要な測定項目を表2に示す。試験体は鋼管杭による4点支持とし、載荷板を取り付けた脚材による1点強制変位載荷を行った。載荷ピッチは各ステップ5tfピッチを基準とし、予想ひび割れ荷重近傍及び予想終局荷重近傍では1~2tfピッチとしている。載荷開始直後は荷重を均等に配分するために、支承のジャッキアップによる調整を行っており、開始直後の数ステップ間の測定変位については精度が十分保証できないものと考えられる。そのため、開始後数ステップの測定変位を補正し、さらにそれに合わせて全ステップの測定変位を補正する必要がある。

2. 3 試験結果

Case.1~4まで全て押し抜きせん断破壊を生じた。各ケースとも初めに床板裏面に曲げひび割れが発生し、側面まで達した後、内部でせん断ひび割れが発生したことが、せん断補強筋ひずみの測定から推定された。せん断ひび割れが裏面まで達し、同心円状ひび割れが形成された後に、せん断補強筋が降伏を始める。やがて全せん断補強筋が降伏し、しばらくして終局に至った。ただし、Case.3においては多量のせん断補強筋が配置されており、せん断補強筋が降伏を開始する以前に水平ひび割れを生じて終局に至った。他の3ケースは全てせん断補強筋の全降伏が観察された。各ケースのせん断補強筋降伏開始荷重、全面降伏荷重及び終局荷重と荷重-変位関係の一例は、後章の解析結果と併せて示す。

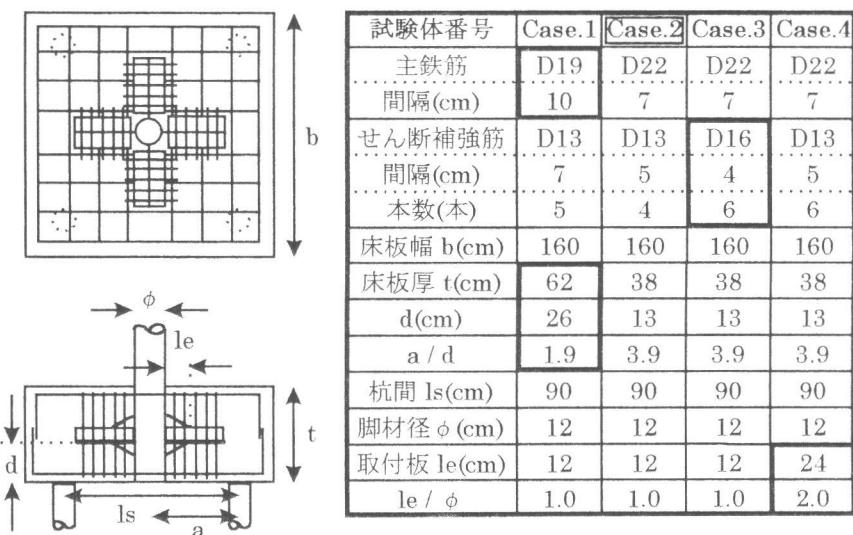


図2 各試験体の因子

表1 各材料の特性値

コンクリート (単位: MPa)				
	Case.1	Case.2	Case.3	Case.4
圧縮強度	36.7	37.9	37.5	38.1
引張強度	3.02	3.33	3.15	3.48
鉄筋 (単位: MPa)				
	D13	D16	D19	D22
降伏強度	376.2	396.1	511.9	518.0
弾性係数	1.80E+5	1.62E+5	1.89E+5	1.90E+5

表2 押し抜きせん断試験の測定項目

測定目的	測定部材	測定項目	Case.1	Case.2	Case.3	Case.4
荷重管理	大型試験器	荷重			1点	
床板変形	フーチング	変位			11点	
床板変形	主鉄筋	軸ひずみ			16点	
せん断補強筋挙動	せん断補強筋	軸ひずみ	70点	40点	60点	60点

3. 3 次元有限要素解析プログラムによる推定

3. 1 解析プログラムと構成モデル[2]

本プログラムは8節点及び20節点アイソパラメトリック要素を用いた有限要素解析プログラム「COM3」である。鉄筋コンクリートの非線形性を再現するモデルとして、コンクリートに対して弾塑性破壊モデルを適用し、ひび割れ以後は分散ひび割れモデルを組み入れてある。弾塑性破壊モデルは塑性変形と弾性エネルギー吸収能の低下を弾性ひずみを主パラメータとする関数で表現し、それらを結合したものである[3][4][5]。分散ひび割れモデルは複数本のひび割れと鉄筋とを1要素に含む有限領域を仮想連続体とみなし、平均ひずみー平均応力関係を定式化したものである。ひび割れ面に対してせん断方向には接触面密度関数を用いた Li-Maekawa モデル[6] を用い、ひび割れ直交方向には Shima らの Tension-Stiffness モデル[7] を用いた。また、ひび割れ平行方向の応力は、2次元平面応力下での弾塑性破壊モデルを適用した。

プログラムの具体的な形式としては、節点の座標と拘束条件、各要素の諸元・鉄筋比、荷重条件を入力することで、節点変位・要素内のコンクリートひずみ・鉄筋応力等が各荷重ステップ毎に出力される。本論文においては、実験結果を推定する際の指標として、終局荷重・荷重一変位関係・せん断補強筋降伏挙動の3点に着目した。この3指標を選んだ理由としては、1)鉄筋コンクリート構造物の設計において、一般に各部材の耐力や変位が重要なポイントとなること、2)せん断破壊を起こす試験体では、コンクリート内の3次元的応力流れの影響が、せん断スパン内に配置されたせん断補強筋の挙動に顕著に反映されることによる。これらの項目を統一的に推定出来ていることを検証することが本章での目的である。

3. 2 入力データ

解析に必要な入力データは、試験体のメッシュデータ、鉄筋比、コンクリートの圧縮強度と引張強度、弾性係数、初期ポワソン比、および鉄筋の降伏強度、弾性係数、ポワソン比である。各材料特性値は表1に示すものを、材料試験値を元に決定した。

試験体はX方向、Y方向共に対称な構造であるので、4分の1領域を解析対象としている。また、杭より外側の部分は解析結果にそれ程影響を及ぼさないと考えられたので、解析対象から除外している（図3参照）。

解析メッシュにおける脚材と載荷板、鋼管杭の取り扱いについては、基礎フーチングは載荷板を取り付けた脚材を介して荷重を受け持つので、これらをメッシュ内に組み込むことが必要となると考えた。しかし、脚材や載荷板とコンクリートとの間の摩擦や付着等の扱いが困難であること等の理由から、脚

材と載荷板はメッシュ内に組み込みず、等価な分布載荷形式によって荷重伝達を考慮することにした。また、鋼管杭については床板の底面に弾性要素を配置することで、応力の分配を模擬している。

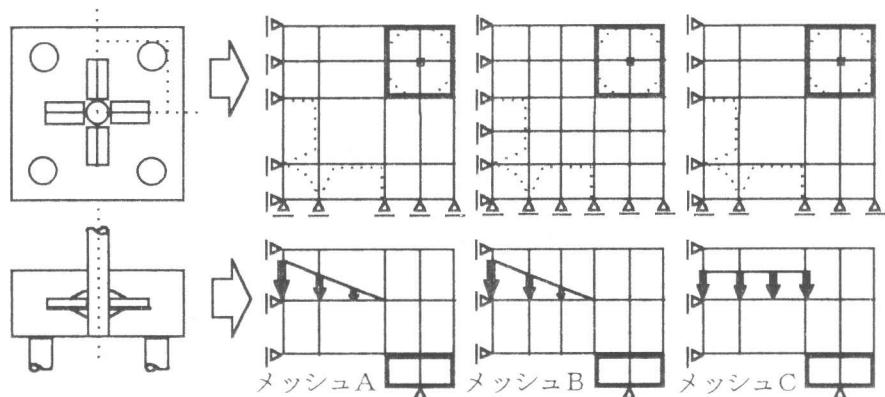


図3 解析用メッシュの例

3. 3 解析のタイプ

解析は4つの試験体に対して各々A・B・C3種類のメッシュデータを用いて行った。3種類のメッシュの相違を表3に、各メッシュの一例を図3に示す。解析Aを基準解析とし、分割数と載荷形式の妥当性を調べるために解析B・Cを行っている。

3. 4 解析結果と考察

各ケースにおける3種類の解析結果を、鉄筋降伏開始・終了荷重・終局荷重は表4に、荷重-変位関係はCase.1のみについて図4(a)～(c)に示す。図の凡例中のせん断筋降伏区間とは、せん断補強筋の降伏開始から全面降伏に至るまでの範囲を示している。

実験結果に関して特徴的な点は、大きな載荷板が配置されているCase.4で終局荷重が最大となっており、載荷板による荷重の分散効果が顕著であること、一方でせん断補強筋が多量に配置され、高い強度が予想されたCase.3では、せん断補強筋全てが効果的に働かず、それ程高い耐力を得ることができなかったこと等が挙げられる。

実験結果と解析A(基準解析)の結果を比較すると、終局荷重・荷重-変位関係・せん断補強筋降伏挙動のいずれも良く推定されていることがわかる。

分割数の影響についてあるが、高次のアイソパラメトリック要素を用いた本解析では、終局荷重や荷重-変位関係においてはそれほど大きな変化は見られない。せん断補強筋挙動については、

表3 各解析の相違

	解析A	解析B	解析C
使用メッシュ	メッシュA	メッシュB	メッシュC
分割数	32	50	32
載荷形式	三角形分布	三角形分布	等分布

表4 実験結果と解析結果の比較

	解析A			解析B			解析C			
	Case.1			Case.1			Case.1			
	Pys	Pye	Pu	Pys	Pye	Pu	Pys	Pye	Pu	
解析値 Pa(MPa)	2983	3607	3607	2983	====	3468	未降伏	未降伏	3468	
実験値 Pe(MPa)	3110	3440	3480	3110	3440	3480	3110	3440	3480	
Pa / Pe	0.959	1.048	1.036	0.959	---	0.997	---	---	0.997	
Case.2			Case.2			Case.2				
解析値 Pa(MPa)	2011	2566	2566	2081	====	2566	2448	2652	3400	
実験値 Pe(MPa)	2050	2600	2826	2050	2600	2826	2050	2600	2826	
Pa / Pe	0.981	0.987	0.908	1.015	---	0.908	1.194	1.02	1.203	
Case.3			Case.3			Case.3				
解析値 Pa(MPa)	未降伏	未降伏	3260	未降伏	未降伏	3052	3400	====	3808	
実験値 Pe(MPa)	未降伏	未降伏	3260	未降伏	未降伏	3260	未降伏	未降伏	3260	
Pa / Pe	---	---	1	---	---	0.936	---	---	1.168	
Case.4			Case.4			Case.4				
解析値 Pa(MPa)	2527	3402	3402	2624	====	3402	2736	3600	3816	
実験値 Pe(MPa)	2750	3680	3680	2750	3680	3680	2750	3680	3680	
Pa / Pe	0.919	0.924	0.924	0.954	---	0.924	0.995	0.978	1.037	

Pys … せん断補強筋降伏開始荷重

Pu … 終局荷重

Pye … せん断補強筋全面降伏荷重

==== … 全面降伏せず

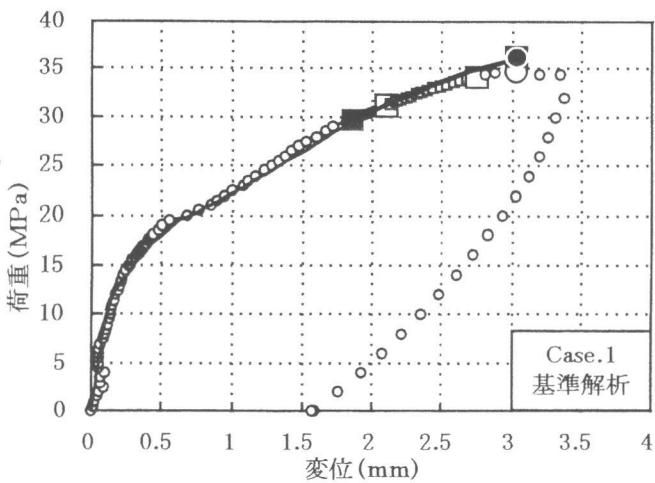


図4(a) 荷重一変位関係・解析A

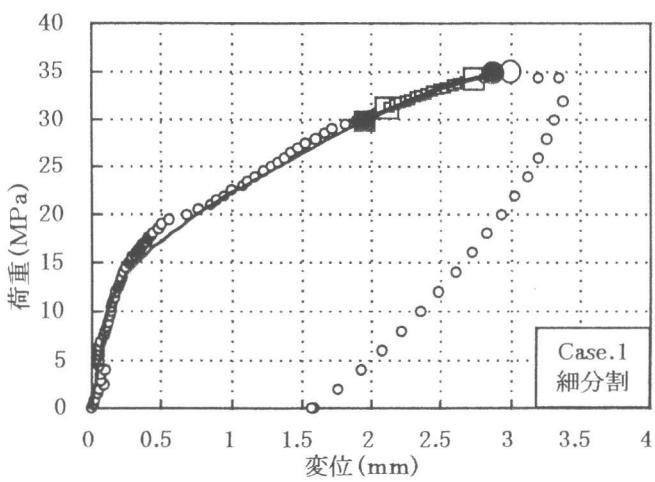


図4(b) 荷重一変位関係・解析B

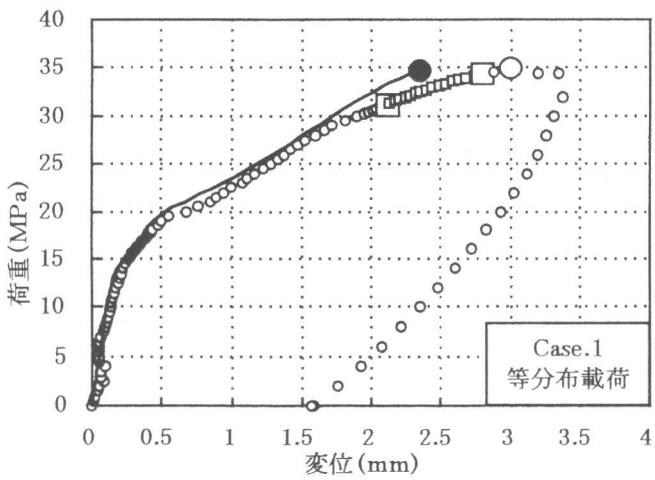


図4(c) 荷重一変位関係・解析C

凡 例	
○ □	実験値
—	解析値
○	終局荷重
□～□	せん断補強筋降伏区間 (実験値:白ヌキ、解析値:黒)

解析Aでは全面降伏まで達していたものが、全面降伏前に終局に至っている。しかし、これらの未降伏鉄筋の応力はいずれも終局荷重時には降伏応力付近にまで達しており、直前の応力上昇程度から判断してあと1～2ステップの間に降伏に至るものと思われた。以上の結果から判断すると、分割数を32から50まで増加させても総合的な推定精度の顕著な上昇は見られず、構成モデルと3次元プログラムの検証の目的に対しては、解析A程度の分割数で必要十分であると判断した。

載荷条件の影響については、各指標ごと、また各試験体ごとに結果が異なっている。Case.1～3においては総じて推定精度は下降したと言えるが、Case.4については、ここでは記載していない荷重一変位関係においても大幅な逸脱がなく、推定精度はむしろ上昇していると言える。この原因はCase.4で用いた載荷板が他の3ケースで用いたものよりもスパンが長く、荷重分布が等分布に近いものだったためと思われる。載荷板による載荷を三角形分布荷重で近似したことは妥当であるとは思われるものの、載荷形式の相違が与える影響は無視できないことから、この点については荷重分散用の鋼材をより正確にモデル化する必要があると言える。

4. まとめ

本研究の結果をまとめると以下のようになる。

- (1) 検証の対象とした3次元構造解析プログラムと構成モデルは、未だ十分な検証を得たわけではないが、今後、送電用鉄塔基礎フーチングの押し抜きせん断破壊挙動の推定に、今後用いるこ

とが可能であると思われる。本研究では特に、終局荷重・荷重－変位関係・せん断補強筋降伏挙動の3点を評価の指標として検証を行ったが、いずれの指標についても、この構造形式に対して満足のいく解析結果を得ることが出来た。

- (2) 解析する際の要素分割数については、高次アイソパラメトリック要素を用いた場合、比較的粗い分割を用いても、十分な収束が得られた。荷重伝達条件について、載荷板を介したフーチングへの載荷を三角形分布及び等分布載荷の2者で検討したが、載荷条件の相違による影響は上記の3指標に照らし合わせても無視できず、今後脚材と載荷板を組み込んだ詳細解析を行う必要がある。
- (3) 分散ひび割れモデルと弾塑性破壊モデルを組み合わせた3次元解析は、3次元的な広がりを持つせん断破壊問題に対して一つの切り口を与えることが出来る。使用した分散ひび割れに基づく3次元構成則は、本実験に関する限り使用に耐え得るものと思われるが、今後さらに詳細な部材レベルでの検証が必要であることは言うまでもない。

謝辞

本研究を行うに当たり、前田建設工業株式会社の三島徹也氏の御協力を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- [1] Tanabe,S., et al : Experimental Study on Size Effect in Pull-out Shear using Real Size Footings, JCI Int. Workshop on Size Effect in Concrete Structures, Sendai, 1993
- [2] Maekawa,K., Takemura,J., Irawan,P. and Irie,M. : Triaxial Elasto-Plastic and Continuum Fracture Model for Concrete, Concrete Library of JSCE, No.22, 1993
- [3] Maekawa,K., Takemura,J., Irawan,P. and Irie,M. : Continuum Fracture in Concrete Nonlinearity under Triaxial Confinement, Proceedings of JSCE, No.460/V-18, 1993.2
- [4] Maekawa,K., Takemura,J., Irawan,P. and Irie,M. : Plasticity in Concrete Nonlinearity under Triaxial Confinement, Proceedings of JSCE, No.460/V-18, 1993.2
- [5] Maekawa,K., Takemura,J., Irawan,P. and Irie,M. : Triaxial Elasto-Plastic and Fracture Model for Concrete, Proceedings of JSCE, No.460/V-18, 1993.2
- [6] Li,B., Maekawa,K. and Okamura,H. : Contact Density Model for Stress Transfer across Cracks in Concrete, Journal of the Faculty of Engineering, University of Tokyo (B), Vol.40, No.1, 1989
- [7] Shima,H., Chou,L. and Okamura,H. : Micro and Macro Models for Bond Behavior in Reinforced Concrete, Journal of the Faculty of Engineering, University of Tokyo (B), Vol.39, No.2, 1987