

機関番号：11301

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2008～2010

課題番号：20760311

研究課題名（和文） 計算地盤工学と鋼構造解析の統合による設計支援ツールの開発：構造物
全体系の連成解析研究課題名（英文） Development of a designing tool by integrating computational methods
for geomechanics and steel structures: Coupled analysis of total
structural systems

研究代表者

山川 優樹 (YAMAKAWA YUKI)

東北大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：80324010

研究成果の概要（和文）：

本研究は、最新の計算力学・地盤工学・鋼構造工学における研究成果を集約して統合型解析ツールを構築したものである。地盤・基礎・上部構造の解析モジュール統合、ならびに高い非線形性を有する問題に対する数値解析のロバスト性と計算効率の向上を図ることにより、座屈など幾何学的非線形性が卓越する鋼構造と、変形・破壊など材料的非線形性が支配的な地盤・基礎部分とを統合的に取り扱うことを可能とし、高度な構造物全体系連成解析を可能とした。

研究成果の概要（英文）：

A numerical analysis tool for structural systems has been developed by integrating advanced technologies developed in the research areas of computational mechanics, geomechanics, and structural mechanics. The integration of analysis modules for soil, foundations, and structures, and improvement of efficiency and robustness for highly nonlinear problems enable the analysis of soil-foundation-structure coupled systems.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2009年度	600,000	180,000	780,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・地盤工学

キーワード：地盤と構造物

1. 研究開始当初の背景

これまでの土木工学においては、地盤と構造は異なる専門分野で取り扱われており、それらの設計・照査法は独自に発展してきた。

例えば鋼構造分野では、橋梁上部工の弾塑性・座屈を考慮した精緻な非線形解析は数多くあるが、橋台や橋脚基礎を支える地盤は固定境界や弾性バネとする簡易処理が用いられるなど、地盤工学分野の高度な知見が十分活用されているとは言い難い。しかし、近年で

は地盤と構造物の連成挙動が重要視されつつあり、構造物全体系の挙動や各構成要素間の相互作用を評価しうる統合的な数値解析ツールの開発が望まれている。

一方、地盤工学分野では構成モデルに関する研究が盛んに行われ、土の骨格構造の生成・消失や、飽和・不飽和土の多相系挙動に至るまで、要素挙動の数理モデル化は完成の域に達している。さらに計算地盤工学の発達により、圧密沈下・液状化・流動・浸透破壊

など複雑な問題に対して的確な予測を与える解析手法の開発が急速に進んでいる。

本研究は、近年著しい進歩を遂げている地盤工学分野における数値解析技術を活用し、上記の地盤工学の成果を上部構造も含めた構造物全体の設計に反映することを試みるものであり、土木構造物の全体系としての性能の向上にも大きく寄与するものである。

2. 研究の目的

本研究では、最新の地盤の弾塑性・大変形解析技術に橋梁・鉄塔などの上部構造の解析コードを統合した地盤-基礎工-上部構造連成系解析システムを実務設計支援ツールとして提案することを目的とする。この解析システムにより、従来の土木工学では別々の専門分野で扱われてきた地盤と上部構造を、それらの連成挙動として高精度で評価できる。

具体的には、連成作用が顕著となる適用対象として「強風による送電鉄塔と地盤基礎の繰返し変形挙動」を取り上げ、連成挙動の解明から得た知見に基づき、各構成要素（上・下部工など）の性能規定型設計へ向けた具体的方策を提案する。

本研究の着眼点は、最新の数値解析技術を駆使して「材料的・構造的性質の異なる構成要素からなる構造物全体系の統合的な強度・安定性評価」を試みる点であり、計算力学・非線形力学分野の最新の方法論を実務利用に還元し、性能規定型設計への移行において学問分野に囚われない横断的視点で技術の相互連携強化にも貢献するものである。

3. 研究の方法

本研究では地盤・基礎・上部構造の連成作用が顕著となる適用対象として「強風による送電鉄塔と地盤基礎の繰返し変形挙動」を取り上げ、以下に挙げるふたつの検討を行った。

はじめに、架渉線の風応答解析と鉄塔・基礎への作用について検討を行った。送電鉄塔やその基礎に対しては、風速変動と架渉線の張力変動により複雑な荷重が作用することが知られているが、そうした外力の作用形態や構造系における荷重の伝達機構が詳しく論じられることはなかった。本研究では、架渉線-鉄塔で構成される連成系の三次元有限要素解析を行い、架渉線の動的振動挙動が鉄塔および基礎に及ぼす影響の評価と構造系全体での安定性照査の重要性について検討を行った。

次に、強風時における鉄塔に対する風荷重の作用を評価するため、電力中央研究所が開発した動的風応答の有限要素解析プログラムCAFSSを用いて架渉線の振動解析を行い、風荷

重による架渉線の震動が鉄塔に対してどのような作用荷重をもたらすかを評価した。

最後に、地盤-基礎-鉄塔構造からなる全体系の連成解析を行い、風荷重が鉄塔部材を介してどのようなモードで基礎へと伝達されるかを明らかにするとともに、風荷重の方向によって鉄塔の損傷が卓越する場合と基礎の引揚変位が卓越する場合とがあるという解析例を示し、現実的な外力に対する全体系の応答を調べることの重要性を示した。

4. 研究成果

最初に、風荷重と鉄塔の力学挙動との関連性を確認するため、漸増する一定モードの風荷重に対する鉄塔倒壊挙動の静的解析を行った。鉄塔モデルは、一般的な高圧送電鉄塔を梁要素により有限要素モデル化したものであり、部材断面毎に色を変えて図-1に示す。鉄塔部材の材料構成則としてvon Mises等方硬化弾塑性モデルを使用した。鉄塔自重を作用させた後、風上に位置する部材を図-2に示すように設定し、空気力 $q = (1/2)\rho cAU^2$ を等価な節点力に換算して解析モデルに作用させた。ここで ρ は空気密度、 c は形状係数、 A は受風面積、 U は風速であり、 $\rho = 1.3\text{kg/m}^3$ 、 $c = 1$ とした。図-3に定義する風向 $0^\circ \sim 90^\circ$ の範囲を 15° 刻みで7通りの風向に関して解析を行った。

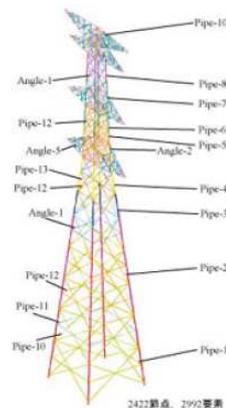


図-1: 鉄塔の解析モデル

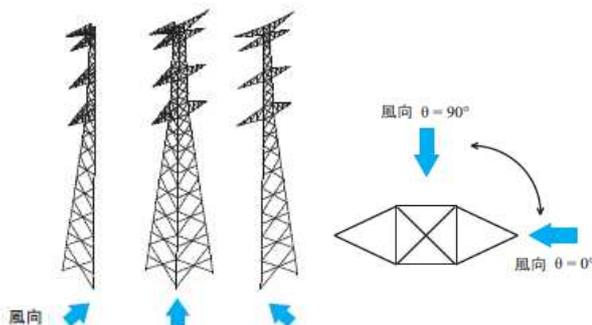


図-2: 風上部材の設定

図-3: 風向の定義

鉄塔破壊時の変形状況と部材座屈発生箇所を図-4に、各風向の風速と鉄塔頂部の変位との関係を図-5に示す。図-5での風速の極大値を鉄塔の破壊風速とし、風向と破壊風速との関係を図-6に示す。図-4より、今回解析対象とした鉄塔は風向により破壊時の部材座屈発生箇所が異なっている。また、図-5および図-6に示すように、破壊風速も風向によって大きく異なり、鉄塔は風向0°方向に最も強く、45°方向に最も弱いという結果が得られた。

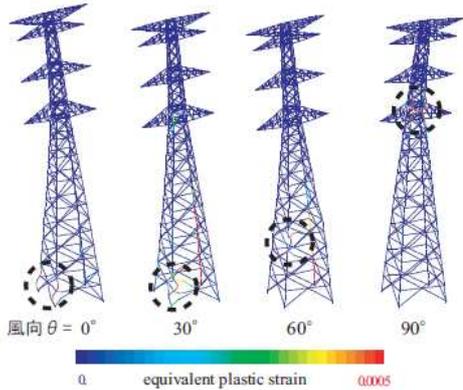


図-4: 各風向における鉄塔の崩壊形態

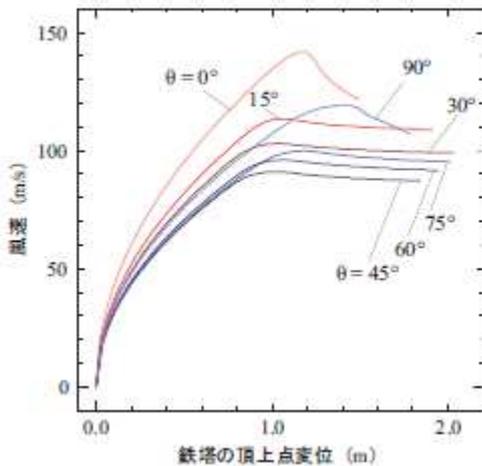


図-5: 風速と鉄塔頂部変位との関係

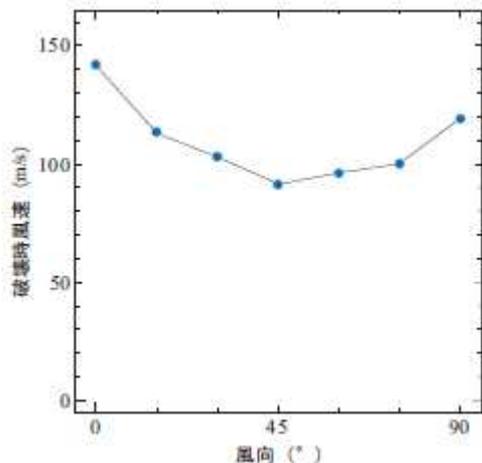


図-6: 風向と鉄塔崩壊風速との関係

以上より、鉄塔は風荷重の作用方向によって強度や崩壊形態が大きく変化する構造であることが確認された。実際の風荷重は大部分が架渉線から鉄塔の各アームに作用し、その大きさと方向は複雑に時間変化することを考えると、実際に風荷重作用下において鉄塔は極めて複雑な応答を呈することが示唆された。

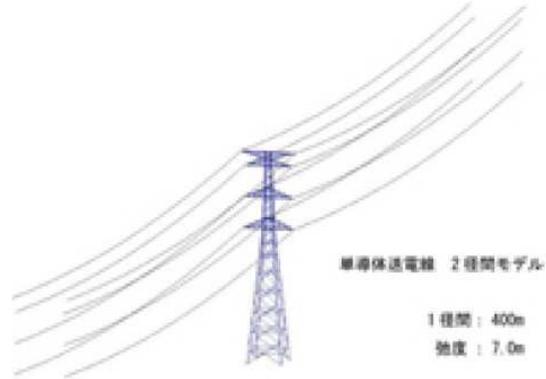


図-7: 架渉線-鉄塔の連成系解析モデル

表-1: 解析に用いた材料定数

	ヤング率 GPa	Poison 比	直径 mm	密度 g/cm ³
鉄塔	206.0	0.300	-	7.85
送電線	83.59	0.300	28.5	3.48
架空地線	120.0	0.343	5.0	8.89

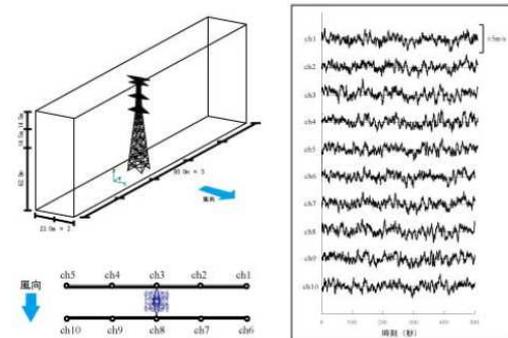


図-8: 変動風速のシミュレーション

次に、動的風応答の有限要素解析プログラムCAFSSによる架渉線の振動およびその鉄塔への作用に関する解析結果を示す。

本解析に使用したモデルは、図-7に示すように、鉄塔を電線経間中心に配置した2径間線路をモデル化したものである。鉄塔は一般的な高圧送電鉄塔を梁要素により有限要素モデル化した。架渉線に関しては、1径間400m、弛度7.0mとし、1径間を50要素でモデル化しており、最上相は架空地線として硬銅線を、それ以外は送電線として鋼心アルミより線としてモデル化した。解析に用いた材料定数を表-1に示す。なお、本解析では全て線形弾性モデルを用いている。

岩谷の方法による変動風速シミュレーションにより、入力風荷重として与える波形を作

成した。図-8左側に示すように解析領域を鉛直方向に3分割、線路方向に160m間隔で5分割、線路直交方向に23m間隔で2分割し、30地点で線路直交方向の変動風速(平均風速50m/s)を発生させた。最下部領域の10地点におけるシミュレーション結果を図-8右側に示す。以上の方法で発生させた風荷重を入力波として架渉線-鉄塔連成系の動的解析を行った。

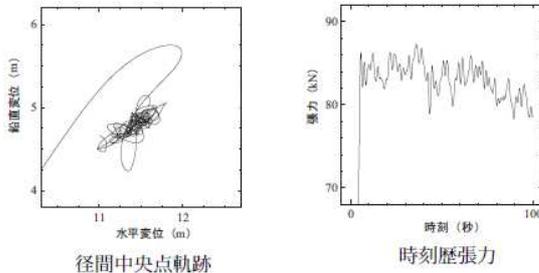


図-9: 変動風による電線の振動解析結果

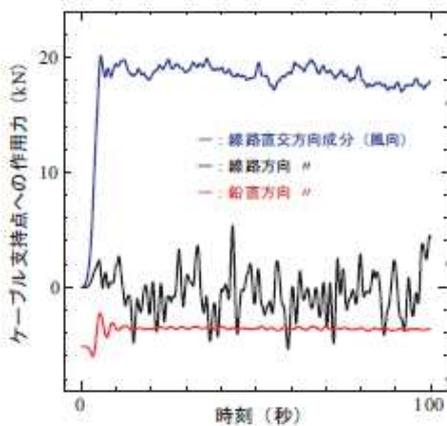


図-10: 電線支持点における反力

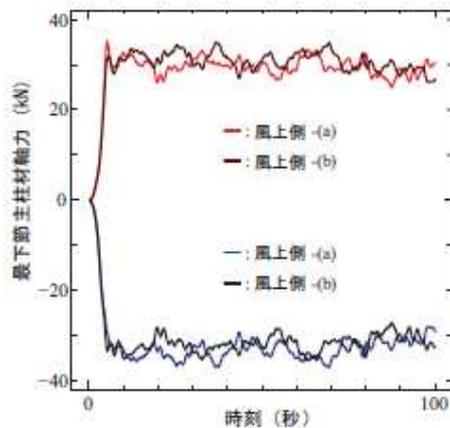


図-11: 鉄塔最下節の支柱材軸力

解析結果のうち、例として最下部に位置する電線の径間中央における軌跡と張力の時刻歴を図-9に示す。ある程度の時間経過後に変位・張力ともに概ね平衡状態を迎え、その後は変動風による振動が解析されている。電線支持点での反力を図-10に、鉄塔最下節の支柱

材軸力を図-11に示す。図-11に示した軸力は鉄塔自重の寄与分を除いたものである。図-10より、電線支持点反力で支配的なのは線路直交方向(風向)成分であるが、線路方向成分は線路直交方向(風向)の数分の一程度の大きさであり、また、反力の変動量が非常に大きい。電線振動により、鉄塔には風向方向以外にも無視できないレベルの力が作用していることが伺える。図-11を見ても同様に、風荷重の変動に応じて鉄塔支柱材軸力は変動しており、鉄塔部材から基礎に対して引揚げ・押し込み荷重が伝達されることが示唆される。従って、鉄塔の耐荷力や基礎の支持力を検討する際には、様々な方向の作用荷重に対する検討の必要性が認められる。

最後に、鉄塔単体解析と地盤-基礎-鉄塔の全体系モデルを用いた解析との比較を通じて、地盤変形による基礎変位が鉄塔の崩壊挙動にどの程度の影響を有するかを調べる。図-12に地盤-基礎-鉄塔の全体系モデルを示す。鉄塔単体解析では鉄塔脚部を完全固定して解析を行った。鉄塔部材にはSS400材を想定したvon Mises等方硬化弾塑性モデルを、地盤にはDrucker-Prager弾塑性モデルを用い、基礎は弾性体とした。図-13に示すmode-A1, B1の荷重を作用させた。

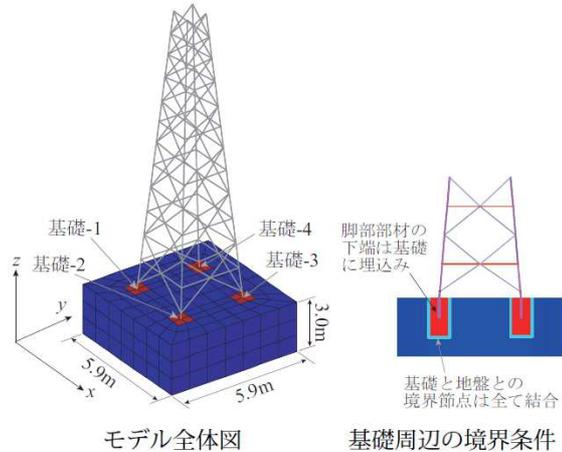


図-12: 地盤-基礎-鉄塔の全体系解析モデル

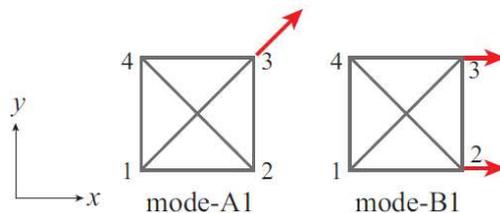


図-13: 鉄塔に作用させた荷重モード

鉄塔単体解析での崩壊状況を図-14に示す。同図は鉄塔作用荷重が最大値を過ぎて低下し始めた時点の様子について、鉄塔脚部から上方の数パネル部分を拡大して示しており、コ

ンターは部材の梁要素の回転角 (radian) を表している。Mode-A1では圧縮側 (脚部-3) の主柱材が座屈により大きく変形している。一方、mode-B1では圧縮側 (脚部-2, 3) の主柱材の座屈に加えて、脚部直上とその上方1パネル目の圧縮を受ける斜材の座屈も顕著である。次に、全体系解析の結果をmode-A1, B1についてそれぞれ図-15と図-16に示す。Mode-A1の全体系解析 (図-15) では、基礎の引揚変位は小さく、鉄塔上部の斜材で座屈が生じている。これと鉄塔単体解析 (図-14(a)) とを比較すると、鉄塔単体解析で見られた圧縮側主柱材の脚部付近での座屈は全体系解析では生じなかったものの、上部斜材の座屈が鉄塔の耐力低下をもたらしている。一方、mode-B1の全体系解析 (図-16) では、基礎に大きな引揚変位が生じ、鉄塔脚部付近の斜材に座屈が生じている。これと鉄塔単体解析 (図-14(b)) とを比較すると、全体系解析と鉄塔単体解析ともに脚部付近の斜材に座屈が見られるが、全体系解析では圧縮側主柱材の顕著な座屈は見られない。このように鉄塔単体解析と全体系解析とを比較すると、基礎の変位の影響により鉄塔の座屈の様子に違いが見られる。

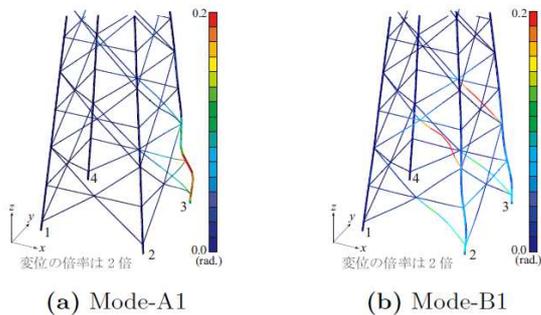


図-14: 鉄塔単体解析での崩壊状況

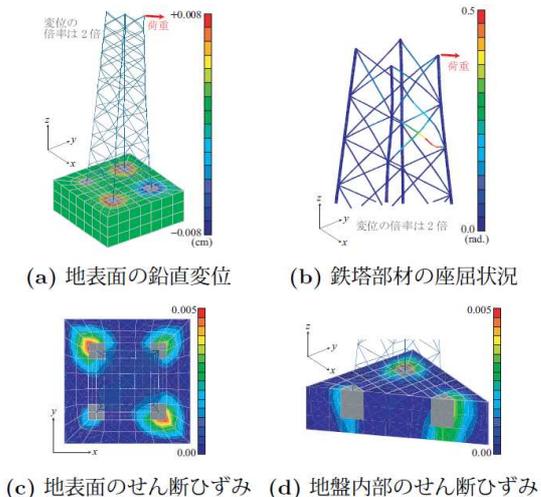


図-15: 全体系解析での崩壊状況 (mode-A1)

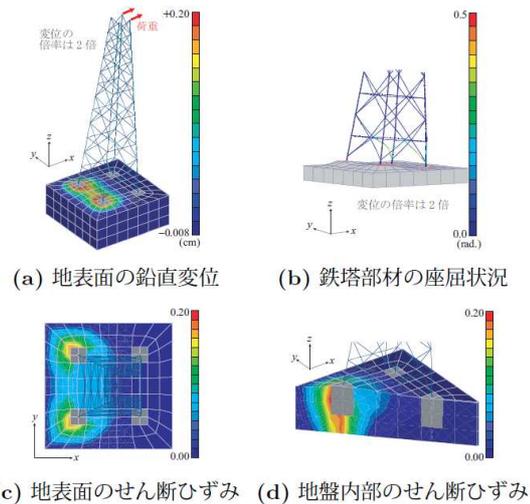


図-16: 全体系解析での崩壊状況 (mode-B1)

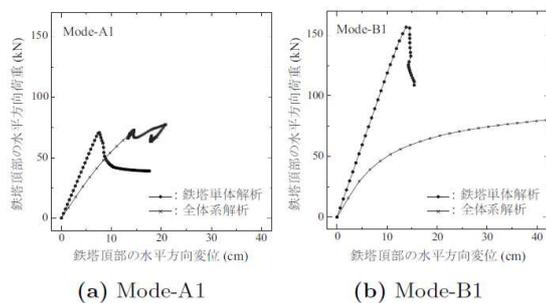


図-17: 鉄塔の荷重-変位関係 (鉄塔単体解析と全体解析との比較)

鉄塔に作用させた水平荷重 (合力) と鉄塔頂部の水平変位との関係について、鉄塔単体解析と全体系解析とを比較したものを図-17に示す。Mode-A1 では、鉄塔単体解析よりも全体系解析の方が荷重-変位曲線の初期勾配が小さく、鉄塔頂部に大きな変位が発生しており、これは基礎の鉛直変位によるものである。また、両者ともに鉄塔の全体座屈によると思われる急激な荷重低下に転じており、そのときの荷重は両者ほぼ同じである。次に、mode-B1 について見ると、鉄塔単体解析では約150kNの荷重に達した後に急激な崩壊挙動を示しているが、全体系解析では緩やかな荷重増加を伴いながら大きな変位を生じており、急激な荷重低下は見られない。このことから、mode-B1の全体系解析では鉄塔自体は崩壊に至っておらず、鉄塔頂部の水平変位は引揚側基礎の変位によるものであることが分かる。

5. 主な発表論文等
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 7 件)
1. 山川優樹, 橋口公一, 詳説: 弾塑性力学

(43)－有限変形弾塑性構成式の数値計算法 その1, 査読無, 機械の研究, 第63巻, 第1号, pp.64-69, 2011年.

2. 山川優樹, 山口洋介, 橋口公一, 池田清宏, 拡張下負荷面 Cam-clay モデルの有限変形理論に基づく定式化とリターンマッピングを用いた陰的応力更新法, 応用力学論文集, 土木学会, 査読有, Vol.13, pp.411-422, 2010年.
3. 山川優樹, 池田清宏, 田村崇, 砂の平面ひずみ供試体における拡散型分岐モードの抽出, 土木学会論文集 C, 査読有, Vol.66, No.4, pp.671-683, 2010年.
4. Fumio Fujii, Yuki Yamakawa, Hirohisa Noguchi, Extracting the left and right critical eigenvectors from the LDU-decomposed non-symmetric Jacobian matrix in stability problems, 査読有, Computational Mechanics, Vol.46, No.2, pp.215-228, 2010.
5. Yuki Yamakawa, Koichi Hashiguchi, Kiyohiro Ikeda, Implicit stress-update algorithm for isotropic Cam-clay model based on the subloading surface concept at finite strains, 査読有, International Journal of Plasticity, Vol.26, pp.634-658, 2010.
6. Yuki Yamakawa, Koichi Hashiguchi, Kiyohiro Ikeda, Implicit return mapping algorithm for isotropic Cam-clay model with the subloading surface concept based on the multiplicative finite strain elastoplasticity, 査読無, Proc. of the 15th International Symposium on Plasticity 2009, A. S. Khan and B. Farrokh (eds.), pp.268-270, 2009.
7. 山川優樹, 中市翔也, 池田清宏, 尾崎利行, 松村政秀, 北田俊行, 地盤－基礎－送電鉄塔の連成作用を考慮した三次元解析と基礎の安定性の検討, 土木学会論文集 C, 査読有, Vol.64, No.4, pp.782-801, 2008年.

[学会発表] (計6件)

1. 千田大, 山川優樹, 池田清宏, 逆 T 型基礎の引揚支持力評価への弾塑性有限要素解析の適用性に関する考察, 平成 22 年度土木学会東北支部技術研究発表会, 2011年3月5日, 東北工業大学 (仙台市).
2. Bui Huu Truong, 箕輪健太郎, 山川優樹,

池田清宏, 地盤－基礎－送電鉄塔の連成作用を考慮した三次元解析と基礎の安定性の検討, 平成 22 年度土木学会東北支部技術研究発表会, 2011年3月5日, 東北工業大学 (仙台市).

3. 箕輪健太郎, 山川優樹, 池田清宏, 中市翔也, 地盤－基礎体－構造物の相互作用を考慮した送電線鉄塔系の安定性解析, 平成 21 年度土木学会東北支部技術研究発表会, 2010年3月6日, 日本大学工学部 (郡山市).
4. 山川優樹, 藤井文夫, 非対称な接線剛性行列の LDU 分解情報による分岐モードの抽出法, 第 58 回理論応用力学講演会, 2009年6月9-11日, 日本学術会議 (東京).
5. 山川優樹, 池田清宏, 小橋宏昭, 清水幹夫, 架渉線の風応答シミュレーションと鉄塔・基礎への作用の評価, 土木学会全国大会第 63 回年次学術講演会, 2008年9月10-12日, 東北大学 (仙台市).
6. 藤澤利光, 山川優樹, 池田清宏, 下負荷面 Cam-clay モデルの応力積分法の開発と支持力解析への適用性検討, 第 43 回地盤工学研究発表会, 2008年7月9-12日, 広島国際会議場 (広島市).

[図書] (計1件)

1. 山川優樹, 有限変形理論と土の構成モデル, 地盤工学・基礎理論シリーズ 3: 土の弾塑性構成モデル, 地盤工学会刊行, pp.161-201, 2009年.

[その他]

ホームページ等

<http://msd.civil.tohoku.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山川 優樹 (YAMAKAWA YUKI)

東北大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 80324010

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: