

座屈拘束ブレースを用いた通信鉄塔の耐震補強法に関する研究

グリッドシステムを用いた遺伝的アルゴリズムによる座屈拘束ブレースの最適配置探索法

STUDY ON A RETOROFIT METHOD OF TELECOMMUNICATION STEEL TOWERS
USING BUCKING RESTRAINED BRACES

Application of a grid computing system for optimum device arrangements based on a genetic algorithm

中澤 祥二^{*1}, 村上 秀樹^{*2}, 加藤 史郎^{*3}大河内 靖雄^{*4}, 竹内 徹^{*5}, 柴田 良一^{*6}Shoji NAKAZAWA, Hideki MURAKAMI, Shiro KATO,
Yasuo OKOUCHI, Toru TAKEUCHI and Ryoichi SHIBATA

This study discusses a retrofit method for telecommunication steel towers by using buckling restraint braces (BRB), and proposes a method to determine the optimum arrangement. First, an ordinary tower on a SRC substructure is investigated to see how it behaves under earthquake motions. Second, a tower installed with BRBs, a retrofit model, is also analyzed. Based on both analyses, it is concluded that introduction of such braces can improve much the earthquake resistant capacity. And finally, determination method of optimum arrangement by the genetic algorithm is proposed using a grid computing system. The performance of the hybrid algorithms and efficiency for solving the optimum arrangement problems is illustrated by the results of numerical studies.

Keywords : Telecommunication tower, Buckling restraint brace, Optimum Arrangement, Genetic Algorithm, Grid System

通信鉄塔, 座屈拘束ブレース, 最適配置, 遺伝的アルゴリズム, グリッドシステム

1. はじめに

兵庫県南部地震以後, 建築構造物やライフラインの耐震補強が大きな社会問題となっている。本研究で対象としている通信鉄塔は, 発電・送電の連絡網を構成する重要な構造体であり, 震災後も機能を維持し, 利用可能である必要がある。しかしながら, 通信鉄塔は新耐震設計法以前に建てられたものも多く, 通信鉄塔設計指針類¹⁾も最近まで下部構造の増幅効果や大地震に対する安全性を考慮したものとはなっていなかった。このことから, 設計では地震荷重に関する応力よりも風荷重に対しての変形に重点が置かれていた。一方, 鉄塔が震源に近い場合には相当に大きな入力が予想され, 有効な耐震補強法を提案することが急務である。既往の研究では, 座屈拘束ブレースを用いた耐震補強法が提案されており, 座屈拘束ブレースの効果を数値解析から確認した研究²⁾や竹内らの座屈拘束ブレースの実験的研究^{3),4)}がある。また, TMDを用いた通信鉄塔の振動制御手法⁵⁾も提案されている。しかしながら, 座屈拘束ブレースの最適配置問題や TMD の最適パラメータについての検討はほとんど行われていないのが現状である。そこで, 本研究では, 座屈拘束ブレースを用いて鉄塔の耐震補強を行うことを想定し, 座屈拘束ブレースの最適配置問題を検討する。

座屈拘束ブレースの最適配置問題は, いわゆる組合せ最適化問題

に分類される。組合せ最適化問題の解法としては, さまざまな方法が提案されているが, 遺伝的アルゴリズム (以後, GA と呼ぶ) も極めて有効な探索方法であることが既往の研究⁶⁻¹⁰⁾から示されている。一般に, GA を用いた構造最適化手法では, 世代ごとに候補解の適応度を計算する必要がある。適応度をどのような関数にするかにも依存するが, 座屈拘束ブレースの最適配置問題では, 地震応答解析結果に基づいて適応度を計算することが想定される。このため, GA を用いて最適問題を実際に解くためには, 1)莫大な数の応答計算を実現可能にするハイパフォーマンスコンピューティング (HPC), または, 2)弾塑性応答解析の効率的な解析法の利用が不可欠となる。等価線形化手法を基本とした簡易的な応答推定法は数多く研究されているものの, 残留変形などの推定は現状では困難であると考えられる。一方, 曾我部¹⁰⁾は PC クラスタを用いた並列 GA を提案し, PC クラスタによる並列処理が GA の解析時間を大幅に短縮できることを示している。そこで, 本研究では, 適応度を計算するために時刻歴弾塑性応答解析を行うものとし, この莫大な応答解析を解くためにグリッドシステム^{11,12)}を導入する。

グリッドシステムは, HPC の一手法であり, 安価な計算機群を用いて, 多くのパラメトリック解析に利用可能なシステムである。既報¹¹⁾では, グリッドシステムの構築例と全数解析を基本とした構造

^{*1} 豊橋技術科学大学建設工学系 助手・博士(工学)

^{*2} 豊橋技術科学大学大学院建設工学専攻 大学院生

^{*3} 豊橋技術科学大学建設工学系 教授・工博

^{*4} 中部電力株式会社 工務部

^{*5} 東京工業大学大学院理工学研究科建築学専攻 助教授・博士(工学)

^{*6} 岐阜工業高等専門学校建築学科 助教授・博士(工学)

Research Assoc., Dept. of Arch. and Civil Eng., Toyohashi Univ. of Tech., Dr. Eng. Graduate Student, Dept. of Arch. and Civil Eng., Toyohashi Univ. of Tech. Prof., Dept. of Arch. and Civil Eng., Toyohashi Univ. of Tech., Dr. Eng. Chubu Electric Power Co., Inc., Building Const. Div., M. Eng. Assoc. Prof., Dept. of Arch. and Building Eng., Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng. Assoc. Prof., Dept. of Arch., Gifu College of Tech., Dr. Eng.

最適化の実現可能性について検討を行っている。さらに、GA によって候補解を発生し、グリッドシステムを用いて効率的に適応度を計算するようなシステムを構成すれば、より効率的な探索が可能であると考えられる。本研究では、このシステムを「グリッドシステムを用いた GA による最適設計システム」と呼び、通信鉄塔の座屈拘束ブレース最適配置問題への適用例を通して、本システムの有効性や実用可能性を検討する。

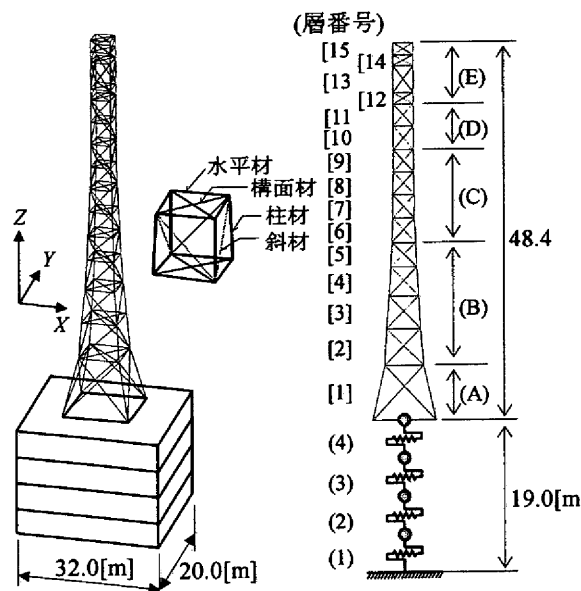


図1 下部SRC造を有する通信鉄塔の解析モデル

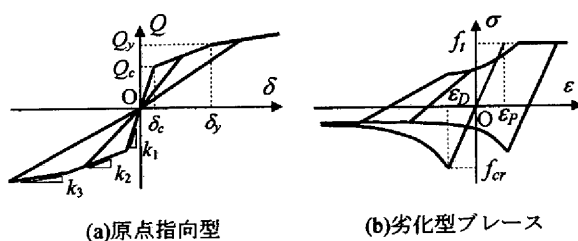


図2 復元力特性

2. 座屈拘束ブレースを有する通信鉄塔の解析モデル

2.1 既存通信鉄塔の概要

解析対象は、図1に示すように下部に4階建てのSRC造の建屋を持ち、上部に通信鉄塔を有するモデルとする。下部建屋はせん断質点系モデルに置換し、鉄塔は3次元の立体モデルとする。

耐震壁の負担率が大きい下部建屋を想定する。下部建屋の各層の復元力特性としては、図2(a)に示すトリリニア型の原点指向を採用し、下部建屋の弾塑性性を考慮する。本研究では、下部SRC建屋のX方向およびY方向の剛性と降伏耐力は同一と仮定する。下部建屋の各層の剛性、降伏せん断力および各層の重量を表1に示す。

上部通信鉄塔の部材は全て鋼管とし、柱材、外側フープ材（水平材）は弾性梁要素、斜材および構面材はトラス要素でモデル化する。ヤング係数は $E_s=206\text{GPa}$ である。既存鉄塔の斜材の履歴には座屈を伴う劣化履歴特性¹³⁾（図2(b))を採用し、斜材の劣化特性を考慮する。各層の斜材の座屈応力度 f_{cr} は短期許容応力度（学会式）とする。既存鉄塔の部材設計断面や部材細長比を層ごとに表2に示す。

表1 SRC建屋の質点モデルの特性

層	質量 [ton]	k_1 [kN/cm]	k_2 [kN/cm]	k_3 [kN/cm]	Q_c [kN]	Q_y [kN]
4	1089	70099	13109	616	15190	36672
3	1094	70560	10513	49	16454	36005
2	1209	72284	11927	621	24500	39200
1	977	90405	8091	488	34300	44100

表2 既存鉄塔の断面諸元

層	使用箇所	F値 [GPa]	部材径 D [cm]	厚さ t [cm]	細長比
A [1]	柱材	323.4	35.6	1.8	62
	斜材	323.4	21.6	0.7	132
	水平材	323.4	16.5	0.5	89
	構面材	235.2	11.4	0.4	181
B [2~5]	柱材	323.4	35.6	1.6	26~40
	斜材	323.4	21.6	0.7	60~90
	水平材	323.4	16.5	0.5	54~77
	構面材	235.2	11.4	0.4	157~110
C [6~9]	柱材	323.4	35.6	1.2	24~26
	斜材	323.4	21.6	0.7	52~58
	水平材	235.2	10.2	0.3	72~82
	構面材	235.2	11.4	0.4	91~103
D [10~11]	柱材	323.4	31.9	1.0	26
	斜材	323.4	19.1	0.5	59
	水平材	235.2	8.9	0.3	82
	構面材	235.2	8.9	0.3	97~103
E [12~15]	柱材	323.4	31.9	1.0	14~33
	斜材	323.4	16.5	0.5	50~76
	水平材	235.2	11.4	0.4	64
	構面材	235.2	11.4	0.4	91

表3 座屈拘束ブレースの等価断面

層		A_B [cm ²]	$l_0-2\xi l_0$ [cm]	σ_{yeq} [MPa]	N_y [kN]	導入 コスト
A	[1]	14.0	500.0	142.6	301.8	2.0
	[2]	14.0		133.4		1.0
B	[3]	14.0	300.0	142.7	301.8	1.1
	[4]	14.0		152.9		1.2
	[5]	14.0		168.1		1.3
C	[6]	24.0		185.0		1.4
	[7]	24.0	300.0	188.4	517.4	1.5
	[8]	24.0		192.1		1.6
	[9]	24.0		193.3		1.7
D	[10]	24.0	300.0	207.3	517.4	1.8
	[11]	24.0		207.3		1.9
E	[12]	18.0	300.0	196.3		2.0
	[13]	18.0	200.0	197.0	388.1	2.5
	[14]	18.0		197.8		2.1
	[15]	18.0	300.0	196.3		2.2

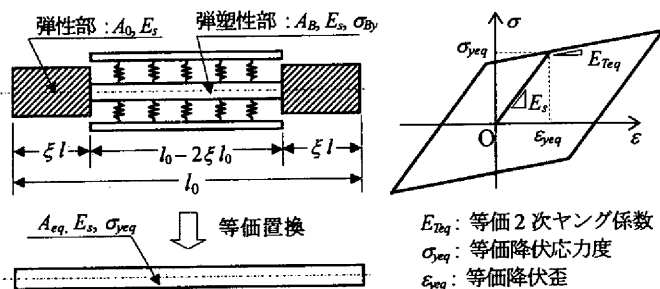


図3 座屈拘束ブレースの等価置換と復元力特性

2.2 座屈拘束ブレースのモデル化

座屈拘束ブレース¹⁴⁻¹⁶⁾は図3に示すように、低降伏型の芯材と外側の管との間はモルタルで充填され、芯材は座屈することなく、エネルギー吸収が可能な部材とする。図中において、 A_0 は鋼材の断面積であり、この部分は弾性と仮定する。 A_b は制振部分(芯材)の断面積であり、降伏を考慮し、降伏応力度 σ_{by} とする。座屈拘束ブレースのヤング係数は全ての部分において E_s とする。等価断面部材の等価断面 A_{eq} 、等価降伏応力度 σ_{yeq} 、等価2次ヤング係数 E_{Teq} および降伏軸力 N_y は次式から求めることができる。

$$\left. \begin{aligned} A_{eq} &= \frac{1}{1-2\xi+2\xi b} A_b, \quad \sigma_{yeq} = (1-2\xi+2\xi b) \sigma_{by} \\ E_{Teq} &= \frac{1-2\xi+2\xi b}{(1-2\xi)/\eta+2\xi b} E_s, \quad N_y = A_{eq} \cdot \sigma_{yeq} \end{aligned} \right\} (1)$$

ここで、 b は芯材と弾性部の断面比($b=A_b/A_0$)、 η は芯材の2次ヤング係数と弾性ヤング係数の比であり、 $\eta=1/100$ とする。本研究では、座屈拘束ブレースの履歴はBi-Linear型の履歴と仮定する。各層に

表4 固有振動解析結果(弾性)

モード s	sT [sec]	$s\beta$ (%)	$s\rho$	歪エネルギー比	
				$s\gamma_s$	$s\gamma_{SRC}$
1	0.728	1.0	0.012	0.998	0.002
2	0.219	2.9	0.895	0.089	0.911
3	0.185	0.9	0.255	0.912	0.088
4	0.093	1.1	0.054	0.980	0.020
5	0.076	8.5	0.078	0.031	0.969

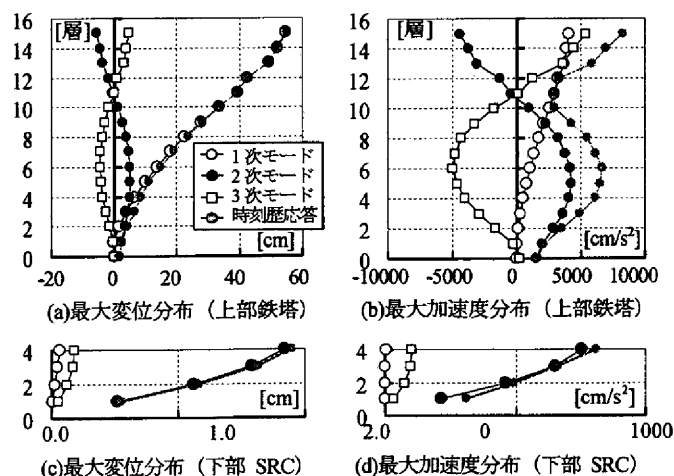


図4 各モードの最大変位および最大加速度分布(安全限界レベル, 弾性)

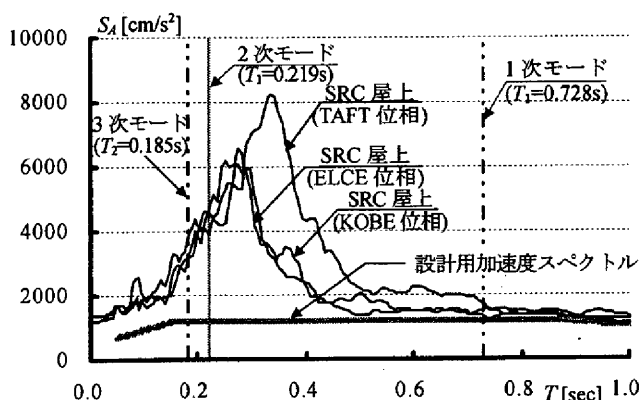


図5 絶対加速度応答スペクトル(安全限界レベル, $h=5\%$)

導入する座屈拘束ブレースの部材特性および降伏軸力を表3に示しておく。

3. 座屈拘束ブレースを有する通信鉄塔の地震応答性状

3.1 解析手法および減衰マトリクスの仮定

まず、既存通信鉄塔の基本的な応答性状を分析するために、固有振動解析を行い、地震時に励起されるモードを分析する。地震応答解析ではNewmark- β 法($\Delta t=0.005\text{sec}$, $\beta=0.25$)を用い60秒間の応答解析を行う。構造物の減衰は、下部建屋と上部鉄塔に分けて仮定する¹⁷⁾。下部建屋は下部建屋の変形が支配的な2次モードに対して3%の剛性比例型、上部鉄塔は鉄塔の応答に大きな影響を与えると考えられる1,4次モードに対して1%のレーリー減衰を仮定する。

3.2 入力地震動

本研究では、構造物への水平方向入力地震動は国土交通省告示にしたがって作成する。1)表層地盤による増幅係数 G_s は簡易法¹⁸⁾による第二種地盤用の増幅係数を採用し、2)減衰定数を5%とした場合の加速度応答スペクトルに適合するような模擬地震波を作成する。模擬地震波は位相角に観測地震波El Centro 1940(NS成分)の位相特性を用い、目標スペクトルに適合するようなフーリエ振幅を収束計算によって求める。なお、発生させた模擬地震波の損傷限界レベルでの最大加速度 114cm/s^2 となる。なお、模擬地震波の位相特性が応答に与える影響を分析するために、Taft 1952(NS成分)、1995年兵庫県南部地震の神戸海洋気象台(NS成分)と同じ位相特性を持つ模擬地震波も作成する。なお、作成した模擬地震波(3波)の絶対加速度応答スペクトルは図5に示す設計用加速度スペクトルと概ね重なることを確認している。地震動は X 方向及び45度方向から入力する。

3.3 固有振動解析結果の分析

下部構造および上部構造が弾性的な場合の固有振動解析結果を分析する。 X 方向の地震入力に対して励起されるモード(X 方向の刺激係数が大きいモード)について、表4に固有周期 sT 、減衰定数 $s\beta$ 、刺激係数 $s\rho$ および有効質量比 $s\rho$ を示す。また、各モードに対し、構造物全体の弾性歪エネルギーに対する上部鉄塔(S)および下部建屋(SRC)の弾性歪エネルギーの比 $s\gamma_s$, $s\gamma_{SRC}$ も同表に示しておく。歪エネルギー比は、各部分構造が構造物全体の中で占める振動の励起率を表す指標である。また、安全限界レベルの地震動が X 方向に作用した場合の各モードの最大変位分布 $s\beta sA\{u\}$ および最大加速度分布 $s\beta sA\{u\}$ を図4に示す。ここで、 $\{u\}$ は s 次の固有モードであり、 sA_s , sA_D は s 次モードに対する安全限界時の設計用加速度および変位スペクトルの値を示す。また、比較のために、安全限界レベルの模擬地震動(El Centro NS位相)に対する弾性の時刻歴応答解析の結果も同図に示しておく。図4より、上部鉄塔の変位応答は1次モードの影響が大きい。一方、上部鉄塔の加速度応答は1次モードに加えて2,3次の影響も無視できない。下部建屋の変位および加速度応答は2次モードの影響が大きい。

つぎに、安全限界レベルの地震入力に対する下部SRC建屋の弾塑性応答解析を行い、下部建屋の最上階の絶対加速度(鉄塔への入力地震動)の分析を行う。下部建屋の最上階の絶対加速度を入力地震動とした場合の絶対加速度応答スペクトルを図5に示す。下部構造の影響により、鉄塔への入力地震動は大きく増幅されることがわ

かる。地震動の下部構造の塑性化に伴い、応答スペクトルのピークは、弾性時の下部建屋の1次固有周期より大きくなる。模擬地震動の位相の違いにより下部建屋の塑性化の状態が異なり、このため、鉄塔への入力地震動に差が生じると考えられる。図5より、対象とした鉄塔では、TAFT位相の模擬地震動を入力した場合が最も大きな応答を示すと予想される。

3.4 既存鉄塔の応答性状の分析

まず、下部建屋の弾塑性を考慮し、既存鉄塔（非補強）の応答性状を分析する。なお、既存鉄塔を構成する部材は弾性と仮定する。安全限界レベルの地震動をX方向に作用させた場合、変位、絶対加速度および柱、斜材の軸力の最大値分布を図6に示す。また、短期座屈許容軸力 N_{cr} も同図に示しておく。図より、最大変位は鉄塔頂部で60cm程度、最大応答加速度は、SRC建屋屋上（鉄塔脚部）で約1000 cm/s^2 、鉄塔頂部で5000~8000 cm/s^2 程度となることが確認できる。柱材は概ね弾性範囲にとどまるものの、鉄塔の第1層から3層、10層および11層の斜材は座屈することが確認できる。下部建屋の各層の最大層せん断力はひび割れせん断耐力 Q_c を超えるものの、降伏(Q_y)までには至っていない。また、各層の最大層間変形角は1/300以下となることが確認できる。

安全限界レベルの地震動を45度方向から入力した場合の鉄塔の応答性状を分析する。図7に鉄塔を構成する柱材および斜材の最大軸力の分布を示す。45度方向入力の柱材の最大軸力はX方向入力時の最大軸力より大きくなり、第5層から第13層までの柱材は座屈すると考えられる。一方、45度方向入力の斜材の最大軸力はX方向入力時の最大軸力より小さく傾向があるが、第5層から第7層までの斜材は座屈と考えられる。

3.5 座屈拘束ブレースを有する鉄塔の応答性状の分析

安全限界レベルの地震動を入力した場合、既存鉄塔の柱材や斜材は座屈すると想定される。施工の容易性を考慮し、常時荷重を負担することの少ない斜材を座屈拘束ブレースに変更し、鉄塔の耐震性能を向上させることを考える。なお、固定荷重が作用する柱材に座屈拘束ブレースを導入した場合、大きな残留変形が生じることも想定できるため、柱材へ座屈拘束ブレースを導入することは考えない。そこで、3.3節の応答解析の結果を参照し、第1層から第5層の斜材を座屈拘束ブレースに取り替えるものとする。座屈拘束ブレースの降伏軸力が小さいほど地震入力エネルギーを効率よく吸収できると予想されるが、座屈拘束ブレースの降伏軸力は損傷限界時の地震動に対して弾性となるように設定した。

安全限界レベルの地震動をX方向に作用させた場合について、座屈拘束ブレースを導入した鉄塔（補強）の変位、絶対加速度および柱、斜材の軸力の最大値分布を図6に示す。また、45度方向入力の結果を図7に示す。座屈拘束ブレースを導入することにより、鉄塔の最大応答を低減することが可能である。斜材に座屈拘束ブレースを導入することによりエネルギー吸収がなされ、柱材の座屈を防ぐことができる。また、座屈拘束ブレース以外の鉄塔の部材が弾性範囲となることを確認し、安全限界レベルの地震入力に対して安全であることが確認できる。

弾塑性地震応答解析で求めた応答値と座屈拘束ブレースの累積歪みの限界値を比較することにより、安全限界レベルの地震荷重に対して座屈拘束ブレースの変形性能が十分かどうかを検討する。最も

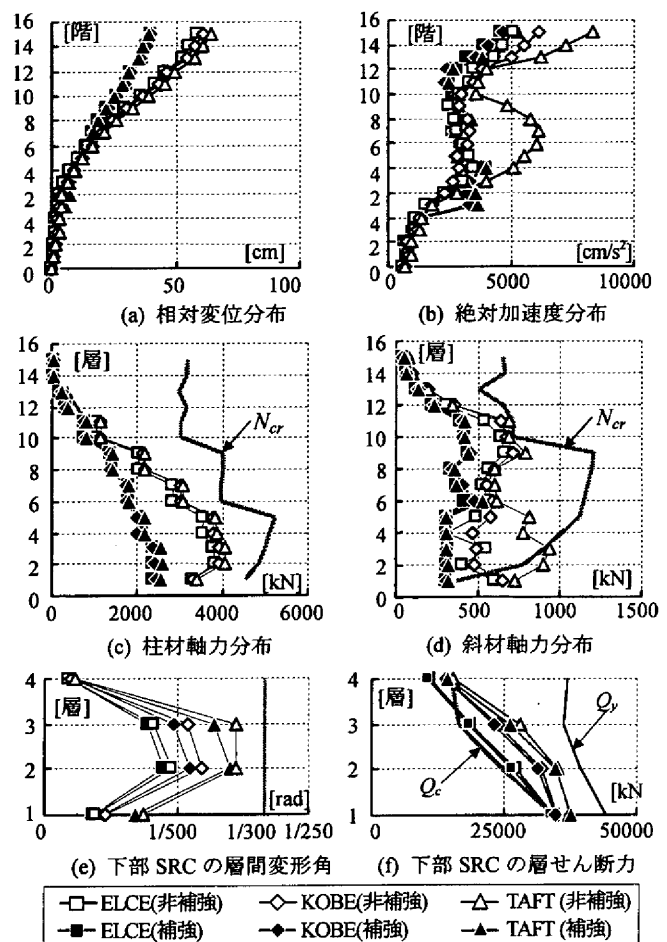


図6 X方向入力時解析結果（安全限界レベル）

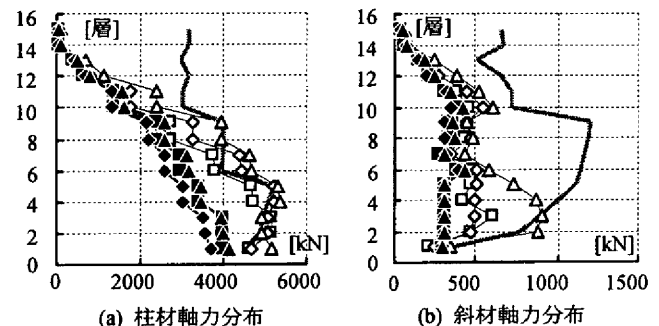


図7 45度方向入力時解析結果（安全限界レベル）

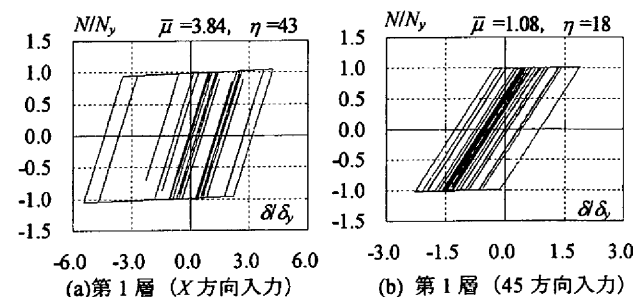


図8 復元力特性（安全限界レベル、TAFT位相）

変形が大きくなる第1層の座屈拘束ブレースに注目する。X方向および45度方向入力時の第1層の座屈拘束ブレースの応答復元力特性を図8示す。なお、図8は座屈拘束ブレースの変形が最も大きく

なる TAFT 位相の結果を示している。X 方向入力時の座屈拘束ブレースの最大歪は 45 度方向入力より大きくなる。X 方向および 45 度方向入力時の最大歪はそれぞれ 0.38%, 0.16% であり、解析から得られた全体歪振幅は 1% 以下となる。また、X 方向および 45 度方向の座屈拘束ブレースの平均塑性変形倍率¹⁹⁾はそれぞれ $\bar{\mu}=3.84$, 1.08, 累積塑性変形倍率は $\eta=43$, 18 である。また、繰返し回数 N はそれぞれ $\eta/4\bar{\mu}=2.7$, 4.2 である。座屈拘束ブレースの塑性歪み限界値に関する研究^{14~16)}では、全歪振幅と繰返し回数の限界値の関係式が提案されており、全歪振幅が 1% 程度についての繰返し回数の限界値は 300~400 程度である。応答解析から得られた繰返し回数 N はこの限界値と比較して僅かな値であり、座屈拘束ブレースの導入が可能と考えられる。

3.6 座屈拘束ブレースの配置と応答低減効果の関係

本節では幾つかの座屈拘束ブレースの配置例を設定し、配置方法と低減効果の関係を分析する。損傷が予測される層の斜材を座屈拘束ブレースに置換するとし、座屈拘束ブレースを第 1 層、第 1~2 層、第 1~5 層に配した補強モデルをそれぞれ、TYPE1, TYPE2, TYPE3 とする。なお、入力地震波としては、応答が最も大きくなる 45 度方向入力時の TAFT-NS 位相を採用する。弾塑性応答解析結果を図 9 に示す。鉄塔の最下層のみ座屈拘束ブレースを導入した TYPE1 では、柱材および既存斜材の圧縮軸力が許容軸力を超え、補強が不十分であると考えられる。一方、複数の層に座屈拘束ブレースを配した TYPE2, TYPE3 では、柱材および既存斜材に作用する最大応答圧縮軸力を許容軸力以内に抑えることができる。TYPE2, TYPE3 と上部鉄塔が弾性的の場合と比較すると、鉄塔頂部の最大変位は 25%, 中間層の最大加速度は 45%, 鉄塔の既存部材軸力は、それぞれ最大 45% の程度応答が低減されることが確認できる。TYPE2 と TYPE3 ではほぼ同じ応答低減効果があることを考慮すると、TYPE2 の方がより少ない座屈拘束ブレースを用いて応答低減をすることが可能であり、より経済的であると考えられる。

4. 遺伝的アルゴリズムを用いた座屈拘束ブレースの配置方法

前節では、斜材に座屈拘束ブレースを導入することにより通信鉄塔の応答を大きく低減させることが可能であることを示した。また、座屈拘束ブレースの数や導入位置により応答低減効果が異なり、最適な導入量と導入位置を求めることが重要であることを示した。本節では、最適組合せ問題を解く方法として遺伝的アルゴリズムを採用し、座屈拘束ブレースの有効な配置方法を提案する。

4.1 設計変数

設計変数は、各層の斜材の種類とする。層内の斜材は同一と仮定すると、設計変数の数は層数 15 となる。本研究では、各層に導入される座屈拘束ブレースの候補が複数存在することも考慮し、個体の表現として自然数表記^{20, 21)}を採用する。本研究では簡単のため、設計変数は 1 および 2 の値をとるものとし、1 は既存の斜材のまま、2 は座屈拘束ブレースを導入する場合、と仮定する。この場合、組合せの総数は $2^{15}=32768$ 通りとなる。例えば、以下の例では、第 4 層、12 層、13 層が座屈拘束ブレースとなることを表している。

$$X_k = \{1 \ 1 \ 1 \ 2 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 2 \ 2 \ 1 \ 1\} \quad (1)$$

設計変数値と斜材の材料特性の対応表を各層ごとに設定する必要がある。

ある。本研究では、表 3 に示した座屈拘束ブレースを導入するものとする。なお、座屈拘束ブレースの断面としては、損傷限界レベルの地震入力に対して、座屈拘束ブレースが降伏しないような断面を仮定した。

4.2 適応度の定義

適応度 f はさまざまなものが考えられるが、1) 柱材は座屈させない、2) 座屈拘束ブレース以外の既存斜材は座屈させない、3) 座屈拘束ブレースを導入する層はできるだけ少なくする、という観点に立ち多目的最適化手法の目的関数と同様に適応度を次のように仮定する。

$$f = -\sum_{i=1}^3 C_i, \quad C_i = w_i \cdot N_i, \quad i=1,2 \quad (2)$$

$$C_3 = \sum_{k=1}^{15} \delta_k L_k, \quad \delta_k = \begin{cases} 1 & \dots \text{座屈拘束ブレースに取替える} \\ 0 & \dots \text{既存斜材のまま} \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 C_1 は柱材が座屈した場合の被害および修復に関わるコスト、 C_2 は既存斜材が座屈した場合に想定される被害およびその修復に関わるコストとする。柱および斜材の損傷やその修復に関わるコストを一般的に求めることは困難と考え、本研究では、便宜的に C_1 , C_2 をそれぞれ座屈が起きた柱材および斜材の総数 N_1 , N_2 に重み係数 w_1 を乗じて計算をする。本研究では、重み係数を $w_1=10$, $w_2=1$ と設

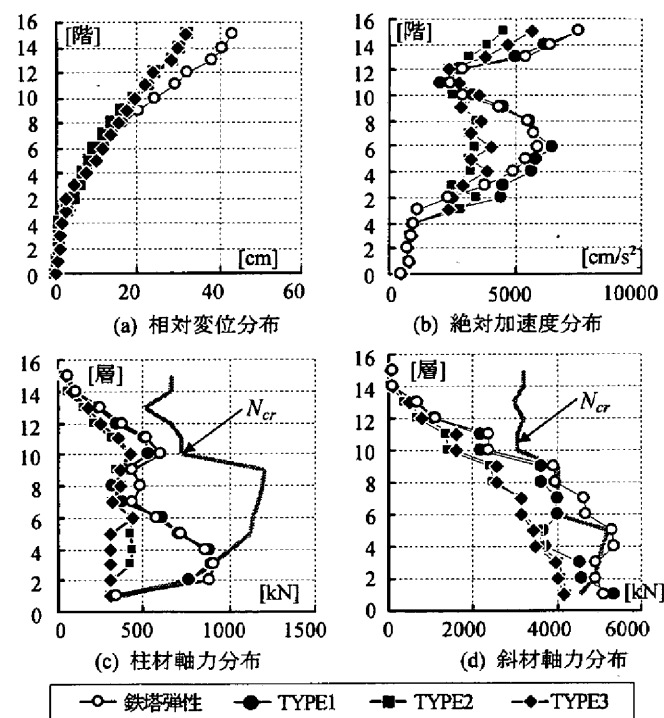


図9 弾塑性解析結果 (安全限界, 45 度方向入力, TAFT 位相)

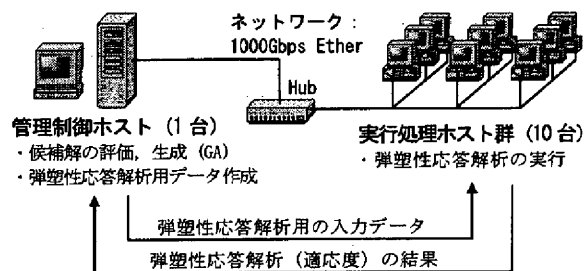


図10 グリッドシステムの概要

定する。 C_3 は座屈拘束ブレースの導入コストの総和とし、式(3)より計算する。1)設置位置が高いほど導入が困難であり、2)第1層と第13層は他の層に比べてブレースの数が多いことを考慮し、第 k 層の既存斜材をすべて座屈拘束ブレースに取替えるための導入コスト L_k を表3のように仮定する。

耐震設計では複数の地震動に対して構造物の安全性を検討する必要がある。本研究では、鉄塔の柱材の応答軸力が最も大きく励起される TAFT-NS 位相の模擬地震動を45度方向に入力した場合の弾塑性応答解析結果のみを用いて適応度を計算する。したがって、個体数を n とすると、1世代あたり n 回の弾塑性応答解析を行う必要がある。

4.3 グリッドシステムの概要

膨大なケースについて式(2)の適応度を計算するために、グリッドシステムを利用する。グリッドシステムは、多くの計算機群を用いて多数のジョブを分散処理し、一定時間あたりの処理能力を向上させることができるものである。ネットワークの構成¹³⁾は、図10に示すように、管理制御ホスト(1台)はハブを通して、多数の実行処理ホスト群(最大10台)と連結されている。管理ホストではGAにより候補解を発生させ、実行処理ホスト群で弾塑性応答解析を行うための解析データを作成する。実行処理ホスト群では実際に弾塑性応答解析を行い、管理ホストへ解析結果を受け渡す。管理ホストでは、解析結果より適応度を計算し、候補解の評価を行う。また、適応度に基づきGAの手順に従って次世代の候補解を作成する。

4.4 GAのパラメータ

本研究では、ランク戦略を用いて親となる個体を選択する。適応度の大きい順に候補解に順位付けをし、順位 i の個体が親個体として選択される確率 p_i を式(4)のように設定する。

$$p_i = \begin{cases} \frac{2(n_i+1-i)}{n_i(n_i+1)} & \dots \quad 1 \leq i \leq n_i \\ 0 & \dots \quad n_i+1 \leq i \leq n \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 n_i は親として選択されうる個体の順位を示し、順位 i が n_i+1 以上の個体は淘汰されることを示している。交叉は一様交叉を採用する。交叉により適応度の高い個体が消失することを防ぐために、エリート保存戦略も併用する。本研究ではエリート保存戦略として、最大適応度の個体を1つ残す。

本研究で採用した突然変異の手続きは、突然変異確率 P_m を設定し、すべての個体の桁要素に対して、突然変異を行うかどうかを確率的に決める。ある個体のある桁要素が突然変異を起す場合には、その桁要素の値をランダムに変化させる。

4.5 単純GAから得られた最適配置の分析

単純GAによって得られた最適解を検討する。本研究では、5章で述べるHybrid GAと区別するために、局所探索を行わない通常のGAを便宜上「単純GA」と呼ぶことにする。個体数 $n=30$ 、交叉確率 $P_c=0.9$ 、突然変異確率 $P_m=0.05$ 、親として選択されうる個体の順位 $n_i=20$ とし、20世代まで計算する。表5.aに初期個体集団の一例とその個体に対応した適応度を示す。表中の1は既存斜材、2は座屈拘束ブレースを導入した層を表す。表中の*はブレースまたは座屈拘束ブレースが座屈したことを示す。柱材が座屈した層を○印で囲んでおく。第1層と第2層(又は第3層)に座屈拘束ブレースを

表5.a 初期個体集団 (45度方向入力 TAFT位相)

個体	適応度	層	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	-12.8	2*	2*	1	1	2	2	2	1	2	1	2	2	1	1	1	1
2	-13.0	2*	2*	1	2*	2*	2	1	2	1	1	1	2	2	1	1	1
3	-13.2	2*	1	2*	2*	1	2	2	1	2	2	1	1	2	1	1	1
4	-16.0	2*	1	2*	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	2	1
5	-23.6	2*	1	1	2*	2*	2	1	2	1	2	2	1	2	1	2	1
6	-45.2	2*	1*	1*	1	1	2*	1	2	2	2*	2*	2	2	2	2	2
7	-58.5	1*	2*	1	2*	2*	2	1	2	2	1	1	2	2	2	1	1
8	-60.5	1*	1	2*	1	1	2	1	1	1	1	2	1	1	2	1	1
9	-67.9	1*	2*	2*	1	2*	2*	2	2	1	2	1	2	1	1	2	1
10	-95.8	1*	1	2*	2*	1	2*	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1

(最大適応度: -12.8, 平均適応度: -54.7, 適応度の標準偏差: 35.7)

表5.b 20世代目の個体集団 (45度方向入力 TAFT位相)

個体	適応度	層	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	-3.0	2*	2*	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	-4.4	2*	2*	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	-8.4	2*	2*	1	1	1	1	2	1	1	2	1	1	1	1	2	1

(最大適応度: -3.0, 平均適応度: -6.6, 適応度の標準偏差: 11.0)

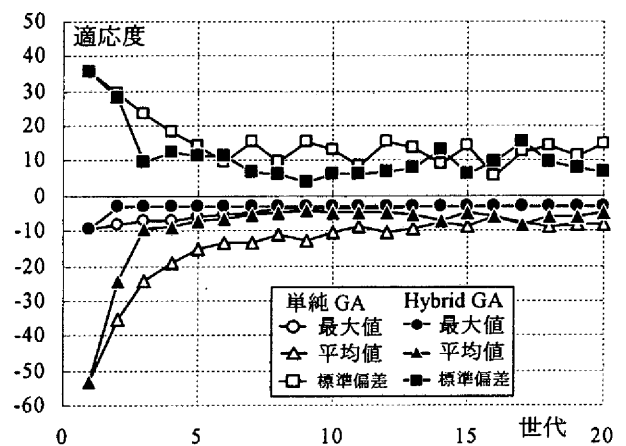


図11 世代と平均適応度および適応度の関係

導入した候補解(個体1~個体4)は柱材や既存斜材の座屈を抑えることが可能となり、適応度も高くなる。しかしながら、これらの候補解は座屈拘束ブレースを導入したにも関わらず降伏しない層も存在する。一方、第1層のみに座屈拘束ブレースを導入し、第2, 3層を既存斜材とした場合(個体4, 5)は第1層の柱材が座屈し、適応度が小さくなる。第1層に座屈拘束ブレースを導入しない場合(個体7~個体10)、第1層から第3層の柱材が座屈し、適応度がさらに小さくなる傾向がある。

20世代目の個体集団の中で代表的な個体を表5.bに示す。20世代目の最大適応度、平均適応度および標準偏差は初期個体集団の値より大きくなり、個体集団全体が最適値に近づいていることが予想される。最も適応度の高い個体は、個体1(第1, 2層へ座屈拘束ブレースを導入する配置)であり、適応度は-3.0をとる。また、鉄塔の第1, 2層へ座屈拘束ブレースを導入した場合、座屈拘束ブレース以外のすべての柱材および既存斜材は座屈しないことを時刻歴弾塑性応答解析より確認した。したがって、単純GAを用いて最適解が得られたことになる。

4.6 単純GAの探索効率

単純GAの探索効率および信頼性を検討するために、乱数の初期

値を変えて5回のランダムシミュレーションを行う。世代の進行に伴う個体集団の平均適応度、最大適応度および適応度の標準偏差の変化(5回の試行の平均)を図11に示す。世代が進むにつれ、個体集団の平均適応度は徐々に大きくなり、個体集団が最適値に近づいていることが確認できる。3.5節より、最適解は第1層と第2層のみに座屈拘束ブレースを導入した場合(適応度-3.0)であることを確認している。なお、5回の試行すべてにおいて、単純GAではほぼ10世代以内で最適解が得られている。

表5.5の個体2, 3を注目すると、導入した座屈拘束ブレースの中で降伏しない部材がある。これは、導入コストの増加につながり、結果として適応度を下げる。そこで、「降伏しない座屈拘束ブレースは導入しない」というアルゴリズムを加えることにより、より効率的な探索を行うことができると考えられる。

5. 単純GAと局所探索手法を組合せたHybrid GAの可能性

全体的な探索を単純GAで行いながら、局所探索法と組合せて探索を行うことは、探索効率を向上させる上で有効な方法である^{9, 21)}。本研究では、局所探索を行わない通常のGAを単純GAと呼び、単純GAと局所探索法を組合せた探索法をHybrid GAと呼ぶ。

本研究におけるHybrid GAでは、次世代の個体集団は1)単純GAから生成される個体集団と2)局所探索から求められる個体集団の2つから構成される。したがって、個体数 n は単純GAから生成される個体数 n_G と局所探索から得られる個体数 n_L の和として表される。

次世代の n 個の個体はつぎのように生成される。現世代の n 個の個体すべての適応度が求められているとすると、4章の単純GAと同様に、ランク戦略を用いて個体数 n の現世代の個体集団から親個体となる個体を選択し、一様交叉により n_G 個の個体を生成する。突然変異の手続きを行った後、 n_G 個の個体の適応度を計算する。この個体数 n_G の個体集団に対して局所探索を行い、 n_L 個の個体を生成し、その個体の適応度を計算する。単純GAから生成された n_G 個の個体と局所探索から得られた n_L 個の個体を合わせ、適応度が既知な個体数 n の次世代の個体集団を生成することができる。

5.1 局所探索手法

局所探索手法^{21, 22)}は問題ごとに考える必要があり、一般的な方法はない。本研究では、すべての世代において、以下のようなアルゴリズムを用いて局所探索を行う。

- 1) n_G 個の個体に対し、適応度が高い順に m 個の個体を選択する。
- 2) m 個の個体の中からランダムに1つの個体 X_0 を選定する。
- 3) ①既存の斜材が座屈した層は座屈拘束ブレースに取り替え、②座屈拘束ブレースが降伏しない層は既存の斜材に変更する、という2つのルールを設け、個体 X_0 から新しい個体(候補解)を生成する。
- 4) 1)~3)の操作を n_L 回繰り返し、 n_L 個の個体を生成する。

例えば、第1, 2, 7, 10, 14に座屈拘束ブレースが導入され、応答解析の結果、第1, 2層の座屈拘束ブレースが塑性化し、第13層の斜材が座屈した場合、上記の局所探索では、第7, 10, 14層を既存斜材に戻し、第13層を座屈拘束ブレースとした候補解が生成される。

5.2 Hybrid GAの探索効率

個体数 $n=30$ ($n_G=25$, $n_L=5$, $m=10$)、交叉確率 $P_c=0.9$ 、突然変異確率 $P_m=0.05$ 、親として選択される個体の順位 $n_s=20$ とし、Hybrid GAを用いて最適配置問題を解く。5回のランダムシミュレーションを行い、Hybrid GAの探索能力、信頼性を確認する。世代の進行に伴う個体集団の平均適応度、最大適応度および適応度の偏差の変化を図11に示す。世代が進むにつれ、個体集団の平均適応度は大きくなり、個体集団が最適値に近づく。単純GAに比べ初期の世代から適応度の高い個体を発見し、急速に最大適応度を有する個体に収束していく。Hybrid GAは効率よく最適解を求めることが可能であることが確認できた。しかしながら、GAの探索では、局所解に陥らないためにも個体集団の多様性を維持しながら探索を進めることが望ましいとされており、有効なHybrid GAのパラメータ(m , n_L , 突然変異確率など)については、検討する必要がある。

6. まとめ

本研究では、SRC建屋に設置された通信鉄塔を対象とし、斜材に座屈拘束ブレースを導入する耐震補強法の有効性を検討した。座屈拘束ブレースの有効な配置を求める手法として、遺伝的アルゴリズムを用いた配置方法を提案した。GAでは適応度を計算するために多数の数値解析が必要となる。現実的な時間で最適解を求めるために、HPCの1手法であるグリッドシステムとGAを組合せた「グリッドシステムを用いたGAによる最適設計システム」を提案し、そのシステムの有効性を検討した。以下に、結論を要約する。

- 1) 本研究で対象とした通信鉄塔に安全限界レベルの地震動を入力した場合、鉄塔の柱材や斜材が座屈する。
- 2) 鉄塔の下層(第1層~第5層)の斜材に座屈拘束ブレースを導入した場合、安全限界レベルの地震入力に対して柱材や既存斜材を座屈させないような補強が可能であること示した。
- 3) 安全限界レベルの地震入力に対する座屈拘束ブレースの累積塑性変形倍率は、一般的な座屈拘束ブレース塑性変形倍率の限界値に対して僅かであり、座屈拘束ブレースを用いた鉄塔の耐震補強法は実現可能であると判断できる。
- 4) GAによって候補解の評価や発生を行い、グリッドシステムを用いて適応度を計算するような最適化システム「グリッドシステムを用いたGAによる最適設計システム」を提案し、通信鉄塔の座屈拘束ブレース配置問題に適用した。既存の柱材や斜材の座屈を防ぎ、できるだけ座屈拘束ブレースの数を少なくするような評価関数を設定したところ、本システムにより最適配置を求めることができた。
- 5) 局所探索法と組合せたHybrid GAを用いることによりさらに効率よく最適解を得ることができる。

謝辞

本研究は、平成17年度東海産業振興財団研究助成「電力通信鉄塔の地震時被害抑制法の開発に関する研究」(代表者:加藤史郎)、ならびに、平成17年度科学研究費助成金・若手(B)(課題番号17760451, 代表者:中澤祥二)の一部として行われた研究成果であることを記します。また、グリッドシステムの構築には豊橋技術科学大学建設工学系博士課程島岡俊輔氏の協力を得ました。ここに、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省大臣官房技術調査課電気通信室監修, 通信鉄塔設計要領・同解説, 2003
- 2) Kato S., Nakazawa S., Sugiyama T., Matsui N. and Yoshida T.: On An Efficient Method to Improve the Earthquake Resistant Capacity of Steel Tele-Communication Towers, Proc. of IASS Symposium 2003, Taiwan.
- 3) 竹内 徹, 内山智晴, 鈴木一弁, 大河内靖雄, 小河利行, 加藤史郎: 座屈拘束ブレースによるトラス鉄塔の耐震補強—実大架構繰返し実験—日本建築学会構造系論文集, No.589, pp.129-136, 2005.3
- 4) 竹内 徹, 鈴木一弁, 丸川智輝, 木村祥裕, 小河利行, 杉山 武, 加藤史郎: モルタル充填鋼管により座屈拘束された圧縮鋼管部材の変形性能, 日本建築学会構造系論文集, No.590, pp.71-78, 2005.4
- 5) 藤山淳司, 杉本靖夫, 大久保浩光, 大河内靖雄, 篠崎洋三: 通信鉄塔の耐震補強に関する研究, (その1) TMD システムの開発とその有効性の確認, 日本建築学会学術講演梗概集, B2, pp.135-136, 2004.9
- 6) D. E. Goldberg: Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, Addison-Wesley, 1989
- 7) 林 康裕, 護 雅史: GA と樹形モデルを用いた制振構造物の創生的基本設計, 日本建築学会構造系論文集, No.480, pp.47-56, 1996.2
- 8) 三井和男, 登坂宣好: 遺伝的アルゴリズムの空間構造形態解析への応用, 日本建築学会構造系論文集, No.484, pp.75-83, 1996.6
- 9) 中澤祥二, 加藤史郎: ハイブリッド GA を用いた張弦梁構造のプレストレス導入部材最適配置の探索法に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No.497, pp.99-105, 1997.7
- 10) 曾我部博之: 非線形感度によるロバスト性を考慮した平面骨組の最適塑性設計, —PC クラスタを用いた並列 GA の多目的最適設計への応用—, 日本建築学会構造系論文集, No.556, pp.63-69, 2002.6
- 11) 柴田良一, 島岡俊輔, 加藤史郎, 山内祥郎, 中澤祥二: グリッドシステムによる分散処理を用いた構造最適化に関する基礎的研究, 構造工学論文集, Vol.51B, pp.73-78, 2005.3
- 12) 村上秀樹, 加藤史郎, 柴田良一, 中澤祥二, 杉山武, 大久保浩光, 島岡俊輔: 通信鉄塔の耐震補強に関する研究, (その2) グリッドシステムの応用によるパラメータ設定, 日本建築学会学術講演梗概集, B2, pp.137-138, 2004.9
- 13) 柴田道生, 中村武, 若林實: 鉄骨筋違の履歴特性の定式化—その1 定式化関数の誘導—, 日本建築学会論文報告集, No.316, pp.18-24, 1982.6
- 14) 中込忠男, 岩本剛, 加村久哉, 下川弘海, 原山浩一: 低降伏点鋼を用いた鋼管補剛平鋼ブレースの疲労特性に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第530号, 155-161, 2000.4
- 15) 前田泰史, 中田安洋, 岩田衛, 和田章: 軸降伏型履歴ダンパーの疲労特性に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第503号, 109-115, 1998.1
- 16) 竹内徹, 井田茉莉, 山田哲, 鈴木一弁: 変動歪振幅下における座屈拘束ブレースの累積塑性変形性能予測, 日本建築学会構造系論文集, No.586, pp.203-210, 2004.12
- 17) 加藤史郎, 中澤祥二, 嶺岸孝志, 打越瑞昌: 減衰マトリクスの仮定法が大スパンドームの地震応答性状に与える影響について レーリー減衰と剛性比例型減衰に関する比較・検討, 日本建築学会構造工学論文集, pp.159-171, 1999.3
- 18) 国土交通省告示: 平12 建告第1457号
- 19) 秋山宏: 建築物の耐震極限設計, 東京大学出版会, 1980
- 20) 古谷 寛, R. T. Haftka: 制御アクチュエータ位置決定問題への遺伝的アルゴリズムの応用, 第43 回応用力学連合講演会, pp.11-14, 1994.1
- 21) 北野宏明編: 遺伝的アルゴリズム, 産業図書, 1993
- 22) 奈良宏一, 佐藤泰司: システム工学の数理手法, コロナ社, 1996

(2005年9月1日原稿受理, 2006年2月11日採用決定)