

解析モデルに応じた基礎構造部材の応力変動に関する研究
(3階建てRC造学校建物を用いた検討)

鉄筋コンクリート造 基礎構造部材 荷重増分解析
解析モデルカテゴリー 一体モデル 単杭モデル

準会員 ○大橋未奈*1 準会員 吉本ナル*1
正会員 津森崇行*2 正会員 秋田知芳*3
正会員 稲井栄一*4

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震において、杭基礎に被害を受けた建物が多く見られた¹⁾²⁾。現行の法基準では上部構造は大地震に対する設計が義務付けられているのに対し、下部構造は大地震時の安全性の検討が規定されていない³⁾。しかし、杭基礎に被害が生じると建物の継続使用が困難になるため、学校建築など避難場所となる建物で杭基礎の被害を防ぐことが必要である。そのため今後は杭基礎についても大地震に対する設計が必要になるものと考えられる⁴⁾。

建築物の耐震設計を行う場合、上部構造、基礎構造部材、地盤までを含めて一体として扱うことが望ましいと考えられるが、一般に広く行われている状況ではない。『鉄筋コンクリート基礎構造部材の耐震設計指針(案)』⁵⁾(以下指針(案)と略記)では基礎構造部材の設計用応力を求めるための解析モデルが4つ示されている。上部構造と下部構造が分離しているモデルでは、相互作用の影響が考慮されていないため上部構造と下部構造を一体としたモデルに比べて応答値が小さくなる場合があり設計の際には応答値を割増すことが提案されている。解析モデルの違いによって、基礎構造部材に発生する応力がどの程度変動するかについては、指針(案)では伊藤による検討⁶⁾が示されているのみで検討例が非常に

少ない。そこで本研究では、単杭モデルと一体解析モデルの荷重増分解析を行い杭に生じる応力を比較して、基礎構造部材の解析モデルの違いによる応力の変動について検討する。

2. 基礎構造部材の耐震設計

指針(案)では基礎構造部材の設計応力を求めるための解析モデルは、図1に示すように以下の4つの「解析モデルカテゴリー」に分類されている。

- ・解析モデルカテゴリー①：上部構造・基礎構造一体，多層地盤モデル(または一体型という)
- ・解析モデルカテゴリー②：上部構造・基礎構造分離，多層地盤モデル(または分離型1という)
- ・解析モデルカテゴリー③：上部構造・基礎構造分離，単杭・多層地盤モデル(または分離型2という)
- ・解析モデルカテゴリー④：上部構造・構造基礎分離，単杭・一様地盤モデル(または分離型3という)

一体型は最も適用できる範囲が広い上、相互作用の影響が考慮できるメリットがあるが計算が複雑で難しい。分離型1、分離型2、分離型3の順で適用範囲が限定的になると共に考慮できる要素も限られてくる一方で、計算の手間は軽減される。指針(案)で示されている応力の割増し係数を表1に示す。割増し係数は1.0~2.0であり、変動軸力の大きさで使い分けることが示されている。

表1 指針(案)における割増し係数

モデル	検討部位	曲げ	せん断
分離型1	杭頭部	1.0	1.5 (1.0) ^{*3}
	杭中間部	2.0 (1.0) ^{*1}	
分離型2	杭頭部	2.0 (1.0) ^{*2}	1.5 (1.0) ^{*4}
	杭中間部	2.0 (1.0) ^{*1}	

*1杭中間部の検定において、杭頭部と杭中間部の大きいほうの設計用曲げモーメントに作用する場合
*2軸力の変動の影響が、杭頭回転ばねの曲げモーメント回転角関係に反映できている場合、もしくは設計用地震力より杭に作用する地震時変動軸力が長期軸力の20%以内である場合
*3設計用地震力により杭に作用する地震時変動軸力が長期軸力の50%以下である場合
*4設計用地震力により杭に作用する地震時変動軸力が長期軸力の20%以下である場合

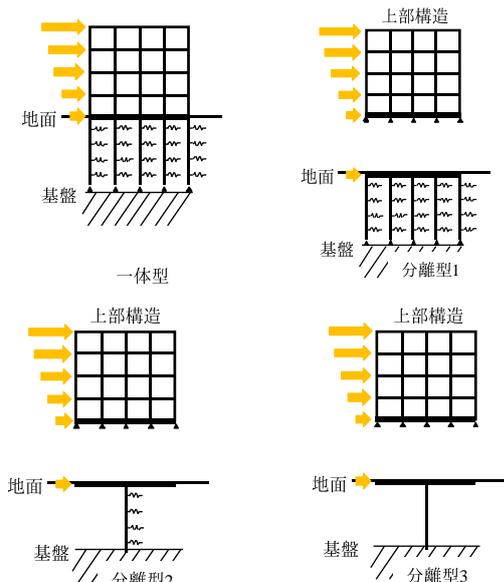


図1 解析モデルカテゴリー

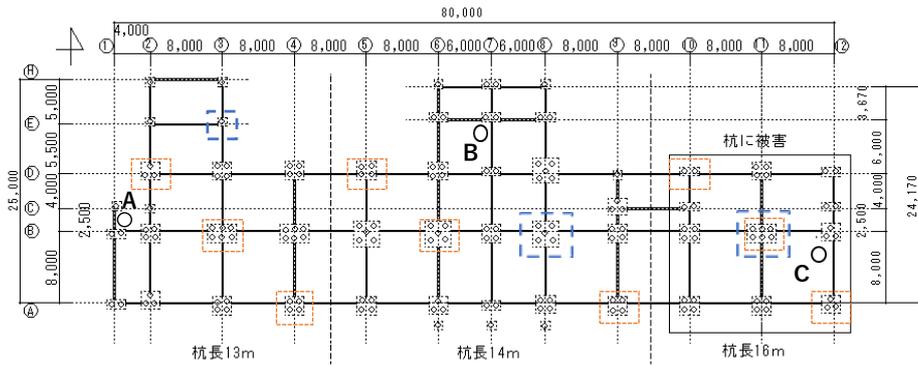


図2 杭伏図

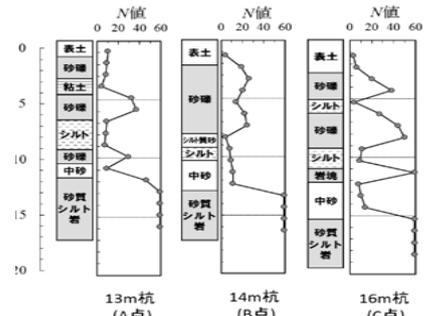


図3 柱伏図

3. 解析計画

3.1 検討対象建物概要

解析対象は、2011年東北地方太平洋沖地震の被害に遭った学校建物で、杭基礎を有する3階建てのRC造建物である。地下階はなく、桁行方向（以下X方向と呼ぶ）が11スパンのラーメン構造（一部耐震壁）、梁間方向（以下Y方向と呼ぶ）が5スパンの耐震壁を含むラーメン構造である。本建物に配置されている壁の大半には開口が設けられている。図2に杭伏図、図3に柱状図を示す。基礎は杭基礎で、杭にはPHC杭（B種）400φが用いられており、現行の技術基準に従った耐震設計（許容応力度設計）が行われていた。杭長は1~4通りが13m（48本）、5~9通りが14m（71本）、10~12通りが16m（36本）となっており、計155本である。地盤は第2種地盤である。

3.2 解析モデル

図4に単杭モデルの概略図を示す。杭は100cmずつの要素に分割してモデル化している。杭断面は標準的なPHC杭（φ400）を参考とし、杭断面を36分割したFiberモデルでモデル化した。杭の要素の節点に水平地盤バネを取り付け、杭先端をピン支持とした。なお、本モデルでは杭長は地表面から杭先端までの長さとした。

図5に水平地盤バネの骨格曲線のモデル化の考え方を示す。水平地盤バネは、参考文献⁷⁾に基づいて水平方向の極限地盤反力 P_{max} を求め、水平地盤反力 P と水平変位 d の関係を表す曲線を描き、 $d=0.1m$ のときの地盤反力を F_u とし、 $1/3F_u$ となる点を第1折れ点の地盤反力 F_c とする。また、第2折れ点後の剛性を初期剛性の $1/1000$ として、面積が等価となる点を第2折れ点とし、そのときの地盤反力を塑性地盤反力 F_y とした。

単杭モデルは、検討対象建物の杭基礎に従って13、14、16mの3種類を作成した。モデル上の杭頭から杭先端までの長さは、13mの杭が11.29m、14mの杭が12.29m、16mの杭が14.29mとなっている。それぞれの長さのモデルに一定の軸力（-500、0、500、1000、2000、圧縮側は正、引張側は負、単位は全てkN）をかけ、基礎梁位置に上部構造の慣性力に

相当する水平力を与えて荷重増分解析を行った。解析は杭が概ね最大耐力を発揮する時点で終了した。

図6に一体モデルの概略図を示す。解析モデルは建物上部（基礎梁含む）をモデル化した立体骨組とし、柱部材および梁部材は線材に置換したフレームモデルとしている。梁部材は材端ばねモデルとし、曲げに対するスケルトンカーブは曲げひび割れ、曲げ降伏を考慮したトリリニア型とする。柱部材は曲げと軸に対してはマルチスプリングモデル、せん断に対しては材端ばねモデルとしている。壁部材は、耐力壁をエレメント置換した材端ばねモデル、その他の壁は自重のみを考慮する。ただしその他の壁は側ばりの腰壁・垂壁、側柱の袖壁に置換し、側ばりおよび側柱の剛性と耐力に考慮する。なおここでは開口周比0.4以下の壁を耐力壁としている。スラブは1階が土間であることから、2階と3階のみ剛床と仮定している。荷重増分解析に用いる水平力分布は A_i 分布に基づいて設定した。

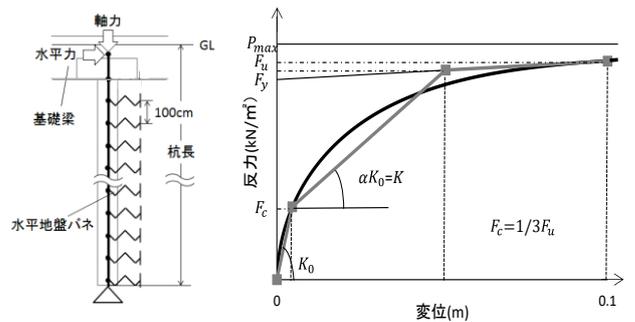


図4 単杭モデル概略図

図5 水平地盤バネのモデル化

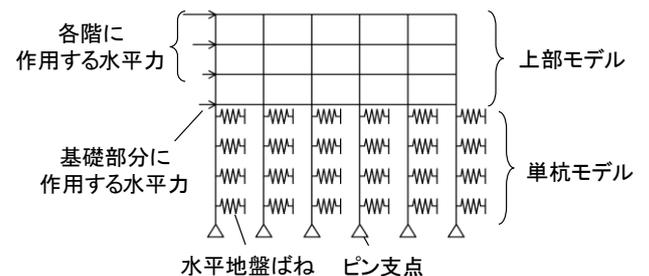


図6 一体モデル概略図

4. 解析結果と考察

4.1 杭頭せん断力—杭頭水平変位関係

図 7 に単杭モデルの解析から得られた杭頭せん断力と杭頭水平変位の関係を示す。図中の●は、杭頭降伏時を表し、■が大地震時($C_B=0.3$)を示している。杭頭降伏時は、杭頭において最も外側の鉄筋が降伏した時のステップとする。杭頭降伏時の杭頭せん断力は、軸力 2000kN のとき 13m の杭でおよそ 270kN、14m の杭でおよそ 380kN、16m の杭でおよそ 380kN となった。杭頭水平変位は、13m の杭でおよそ 47mm、14m の杭でおよそ 24mm、16m の杭でおよそ 26mm となった。また、いずれの杭においても圧縮軸力を大きくすることでせん断剛性は上昇した。

4.2 杭頭降伏時の検討

図 8 に杭頭降伏時の杭頭曲げモーメント分布図を示す。図中の●は単杭モデルを表し■が一体モデルの結果を示している。単杭モデルでは、曲げモーメントは圧縮軸力が大きい方が大きくなった。曲げモーメントの値は 13m の杭では地表面からの深度が 5m で、14m の杭では 2m~4m、16m の杭では 4m が最大となり、13m の杭は 8m で、他の 2 本の杭は 7m

以深でほぼ 0 になっている。また、曲げモーメントは一体モデルと軸力が 500 kN の単杭モデルとほぼ同じ値を示しており杭頭降伏時において一体モデルと単杭モデルの整合性が確認できた。

図 9 に増分解析開始、終了時の一体モデルにおける A ~ D 通りの各杭頭に作用する軸力を示す。軸力の値は解析開始時でおよそ 250kN~350kN、 $C_B=0.3$ 時でおよそ 200kN~400kN、解析終了時でおよそ 200kN~500 kN (引張り軸力を除く)である。AB の 1 通り 8 通り、D の 2 通り 8 通りは建物の壁力や吹き抜けの影響により引張り軸力が生じている。

降伏時における一体モデルと単杭モデルの整合性および一体モデルから得られた杭頭の軸力の値から、4.3 節の検討では軸力を 500kN とした単杭モデルの解析結果を使用する。

4.3 杭の応力変動

図 10 に $C_B=0.3$ 時の一体モデル、単杭モデルにおける杭頭曲げモーメント分布図および杭頭せん断力図を示す。一体モデルの値は各杭の本数で除して杭 1 本にかかる曲げモーメントとせん断力を示す。単杭モデルにおける基礎梁位置の水平力は、一体モデルにおける $C_B=0.3$ に相当する杭 1 本

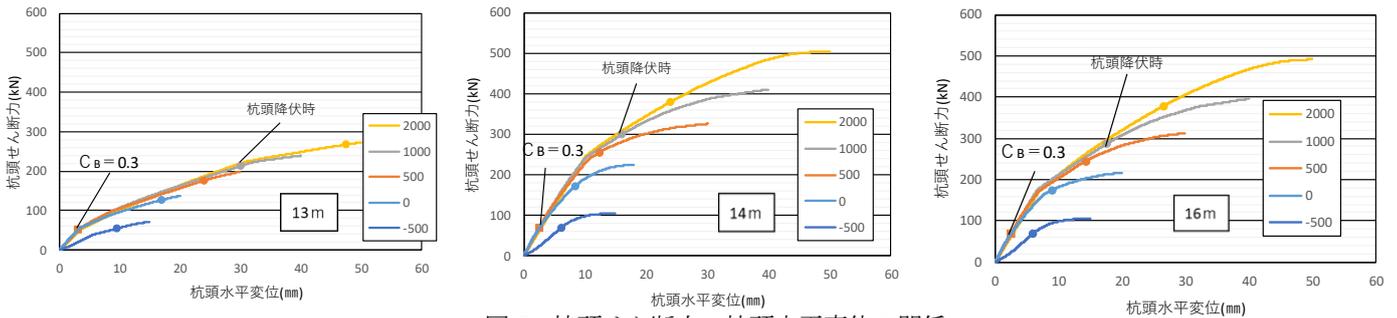


図 7 杭頭せん断力—杭頭水平変位の関係

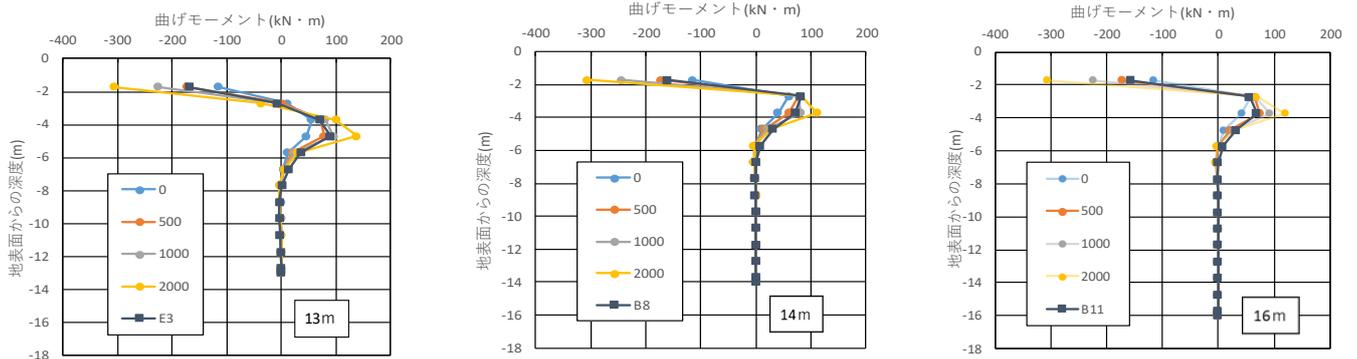


図 8 杭の曲げモーメント分布図

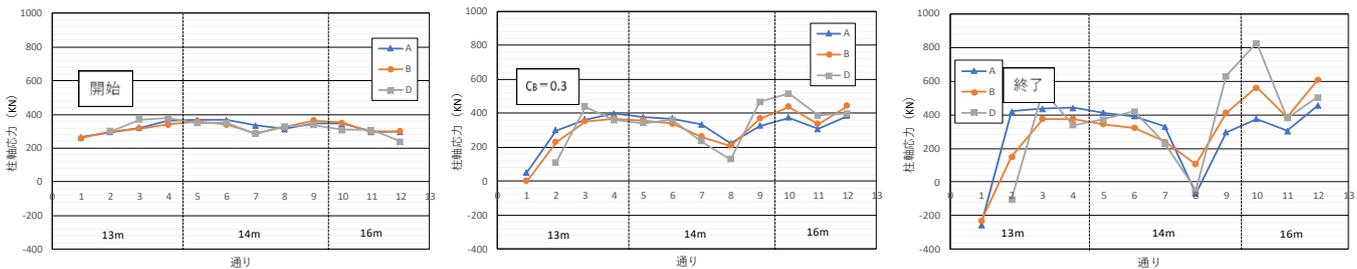


図 9 杭 1 本あたりにかかる軸力

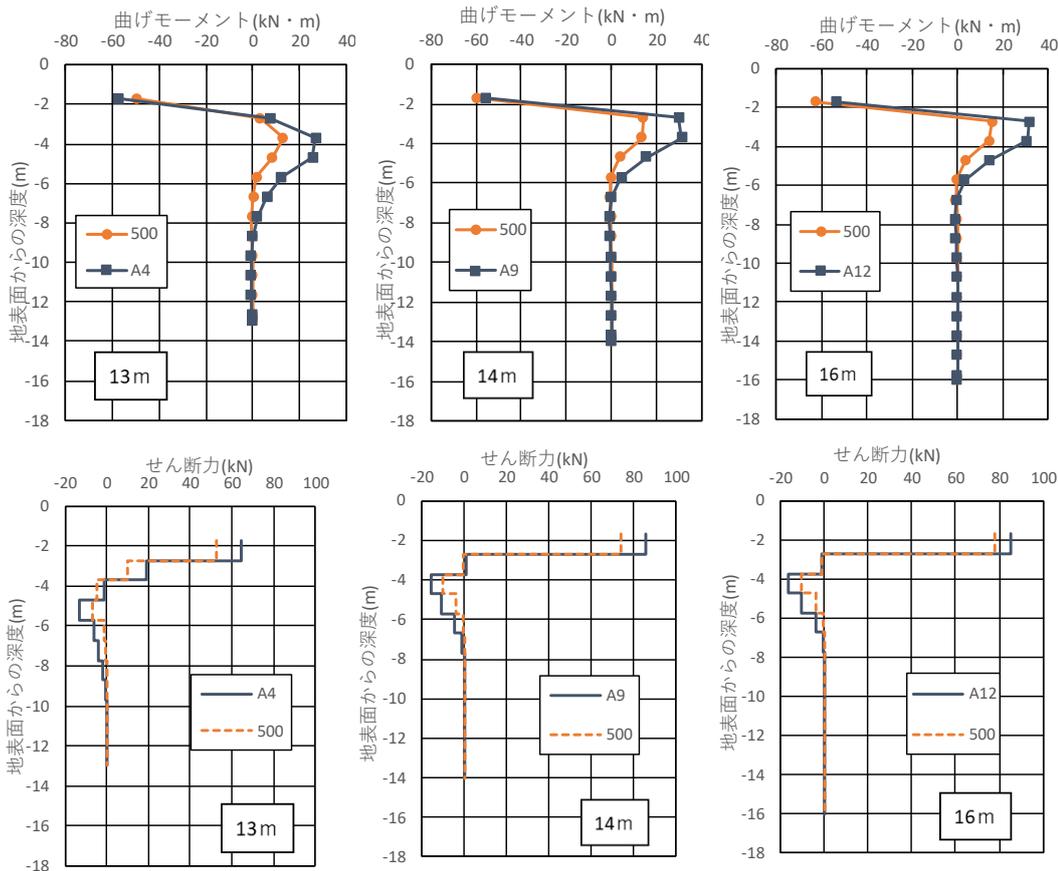


表2 単杭モデルに対する
一体モデルの比率

位置	曲げモーメント		せん断力		
	杭頭	中間部	杭頭	中間部	
13m	A4	1.151	2.095	1.228	1.977
	B3	1.106	1.605	1.128	1.548
	D2	1.063	1.631	1.091	1.365
14m	A9	0.935	2.21	1.163	1.592
	B6	1.056	1.564	1.162	1.29
	D5	1.122	1.321	1.079	0.982
16m	A12	0.855	2.072	1.095	1.607
	B11	1.077	1.175	1.059	1.007
	D10	1.225	1.544	1.057	1.679

図10 $C_B=0.3$ 杭の曲げモーメント分布図およびせん断力図

の水平力（基礎梁位置の水平力を杭本数で除して換算）としている。

杭頭では一体モデルと単杭モデルの曲げモーメントの値がほぼ同じになっている。杭中間部では単杭モデルに対して一体モデルが約2倍大きい値になっている。一体モデルの曲げモーメントおよびせん断力を単杭モデルの値で割った比率を表2に示す。単杭モデルの曲げモーメントに対する一体モデルの曲げモーメントの比率は杭頭で1.1、杭中間部で1.5~2.1となっている。表1で示した指針(案)の分離型2における割り増し係数と比べると、杭頭では軸力変動が小さい場合の値(1.0)とほぼ同じとなり、杭中間部では最大値が概ね示されている値(2.0)と対応した。単杭モデルのせん断力に対する一体モデルのせん断力の比率は杭頭で1.1、杭中間部で1.0~2.0であり、指針(案)と比べると杭頭では変動軸力が小さい場合の値(1.0)とほぼ同じとなったが、杭中間部では示されている値(1.5)を上回る結果となった。

5. まとめ

解析モデルカテゴリーの違いによる応答値の変動を検討するため、単杭モデル、一体モデルの荷重増分解析を実施し

た。杭の応力に着目して検討し、以下の知見が得られた。

- (1) 単杭モデルの曲げモーメントに対する一体モデルの曲げモーメントの比率は杭頭で1.1、杭中間部で1.5~2.1であり、指針(案)の割り増し係数の値と概ね対応した。
 - (2) 単杭モデルのせん断力に対する一体モデルのせん断力の比率は杭頭で1.1、杭中間部で1.0~2.0であり、指針(案)の値の割り増し係数の値を上回る結果となった。
- 今後は上部構造・基礎構造分離、多層地盤モデルを対象とした検討が必要である。

参考文献

- 1) 日本建築学会：2011年東北地方太平洋沖地震被災調査速報、577pp.、2011.7
- 2) 日本建築学会文教施設委員会耐震性能等小委員会：文教施設の耐震性能等に関する調査研究報告書、570pp.、2012.3
- 3) 国土交通省住宅局建築指導課ほか：建築物の高層関係技術基準解説書、pp.57-67、2007.8
- 4) 日本コンクリート工学会：東日本大震災に関する特別委員会報告書、pp.359-360、2013.3
- 5) 日本建築学会：鉄筋コンクリート基礎構造部材の耐震設計指針(案)・同解説、pp.100-103、2017.3
- 6) 伊藤央：ばらつきを考慮した基礎構造部材の応答評価、日本建築学会鉄筋コンクリート基礎構造部材の耐震設計 pp.35-46、2010.9
- 7) 間瀬辰也、中井正一：単杭の杭周地盤ばねの評価法に関する検討、日本建築学会構造系論文集、第77巻 第680号、pp.1527-1535、2012.10

*1 山口大学工学部感性デザイン工学科 学部生

*2 山口大学大学院創成科学研究科 大学院生

*3 山口大学大学院創成科学研究科講師 博士(工学)

*4 山口大学大学院創成科学研究科教授 博士(工学)

Student, Dept. of Perceptual Sciences and Design Eng., Faculty of Eng., Yamaguchi Univ.

Graduate Student, Graduate School of Sciences and Technology for Innovation, Yamaguchi Univ. Dr. Eng.

Lecturer, Graduate School of Sciences and Technology for Innovation, Yamaguchi Univ., Dr. Eng.

Prof, Graduate School of Sciences and Technology for Innovation, Yamaguchi Univ., Dr. Eng.