

杭基礎に被害を受けた学校建物の地盤変位と杭応力に関する研究

鉄筋コンクリート造 相対変位 1次元地震応答解析
変位増分解析 2011年東北地方太平洋沖地震

準会員 ○津森崇行*1 正会員 秋田知芳*2
正会員 稲井栄一*3

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震では甚大な被害が生じ、杭基礎の被害も見られた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て、下部構造は大地震に対して安全性の検討が義務付けられていない³⁾。杭基礎などの下部構造に被害が生じると建物が傾斜するなどの被害が生じるが人命に関わるような事態が起りにくいということが、下部構造の大地震時に対する安全性の検討が規定されていない理由の1つである。しかし、杭基礎に被害が生じると建物の継続的な使用が困難になる場合があるため、特に避難所となるような建物では杭基礎の被害を防ぐ必要がある。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と考えられる⁴⁾。

2011年東北地方太平洋沖地震によって、杭基礎に被害を受けた学校建物の上部構造の耐力や被害杭に生じる応力に着目して検討された既往の研究⁵⁾では、耐震壁による応力の集中及び、上部構造の偏心が被害の一因であると推測されている。また、同建物の杭基礎について単杭モデルを用いて上部構造から杭に作用する軸力やせん断力に着目して検討された既往の研究⁶⁾では、杭頭付近に応力及び変形が集中しており、杭頭の降伏は表層地盤や耐震壁の影響を大きく受けることが推測されている。しかし、地盤変形を考慮した検討は十分になされていない。そこで本研究では、検討対象建物の地盤の相対変位を1次元地震応答解析によって求め、次にその変位を用いて単杭モデルの変位増分解析を行い杭に生じる応力を算定して、地盤変形による杭基礎被害への影響を検討する。

2. 検討対象建物概要

2.1 建物概要

検討対象建物は、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、桁行方向が11スパンのラーメン構造（一部耐震壁）、梁間方向が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1に杭伏図と柱状図を示す。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）が行われている。また、本建物は支持地盤が傾斜しているため13、14、16mと長さの異なる杭が使用されており、1~4通りが13m（48本）、5~9通りが14m（71本）、10~12通りが16m（36本）の計155本である。地盤は第2種地盤である。

2.2 被害概要

既往の報告⁷⁾によると上部構造は9、10通りの柱と壁に、幅1~2mmのひび割れが見られたが、コンクリートの剥落はわずかで、鉄筋は露出していない。下部構造は10~12通りの杭頭がすべて圧壊しており、PC鋼材が露出し変形もしていた。さらに、9通りを境に東側に建物が沈下していた。なお、液状化は見られなかった。

3. 地盤の応答解析

3.1 解析概要

図2に地盤の解析の模式図を示す。まず、観測点における地震波をもとに引き戻し計算によって基盤における地震波を算出する。以下、この地震波を引き戻し基盤波と呼ぶこととする。続いて、引き戻し基盤波を用いて、1

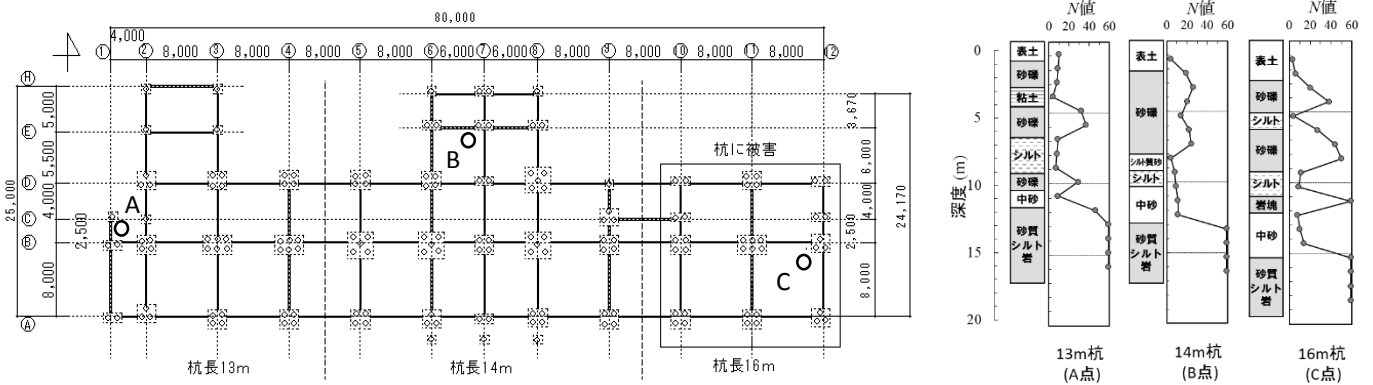


図1 杭伏図と柱状図

次元地震応答解析により検討対象建物の地盤変形を算出する。本解析で用いる基盤の単位体積重量は 20t/m³、せん断波速度は 480m/s とし、地盤の減衰定数は一律で 5% とした。

3.2 引き戻し基盤波の作成

2011 年東北地方太平洋沖地震時に検討対象建物の最寄りの K-NET 観測点で観測された EW 方向と NS 方向の 2 つの強震記録を用いる。観測された地震波は地表面上のものであるので、観測点の地盤をモデル化し、基盤面に入射される波形を引き戻し計算(時刻歴解析)によって求めた。解析には SHAKE[®]を用いた。観測点の地盤条件を表 1 に示す。地表面で得られた地震波を入力するので進行波(E)のみが含まれていることから露頭波(E)で入力した。また、時刻歴解析により算出した観測点と基盤における加速度時刻歴と加速度応答スペクトルを図 3 に示す。短周期を除くと、EW 地震波では周期 0.7 秒付近にピークがあり、ピーク時の観測点の加速度に対する基盤の加速度の比は約 0.88 である。NS 地震波では周期 0.4 秒付近にピークがあり、ピーク時の観測点の加速度に対する基盤の加速度の比は約 0.65 である。

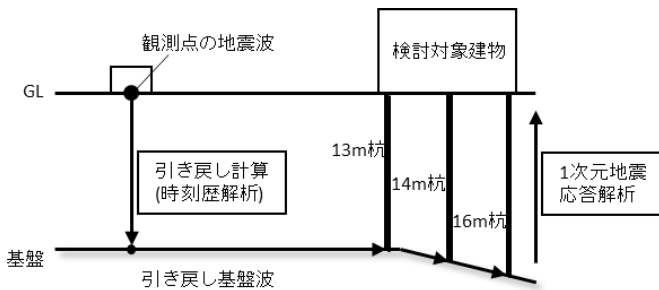


図 2 引き戻し計算と 1次元地震応答解析の模式図

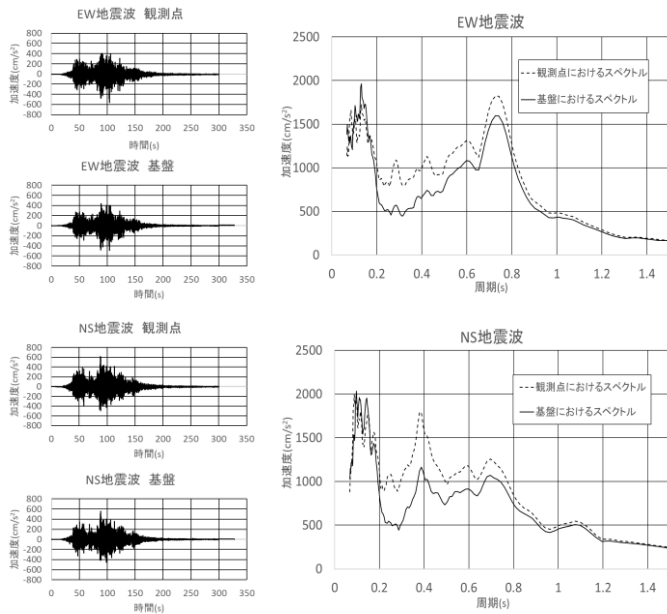


図 3 加速度時刻歴と加速度応答スペクトル

3.3 検討対象建物の地盤の相対変位の算出

検討対象建物には 13、14、16m の長さの異なる杭が用いられているので、各杭に対応する地盤をモデル化し、3.2 節で求めた引き戻し基盤波を用いて 1 次元地震応答解析を行い、基盤を基準にした相対変位を算出した。解析には SHAKE[®]を用い、等価線形解析を行った。また、解析に用いるせん断波速度は 2 通りの方法で求めたものを用いた。1 つ目は K-NET 観測点の土質データに基づいて設定した値(以下、せん断波速度①と呼ぶこととする)であり、この場合の地盤条件を表 2 に示す。密度は観測点の地盤条件(表 1)のせん断波速度が同じ箇所の密度の平均値を採用した。2 つ目は標準貫入試験の N 値からせん断波速度の値を求める方法⁹⁾(以下、せん断波速度②と呼ぶこととする)で式(1)に示す。

$$V_s = 97.0N^{0.314} \quad (\text{m/s}) \quad \text{式(1)}$$

この場合の N 値(図 1)とせん断波速度の関係を表 3 に示す。密度と単位体積重量については表 2 と同じである。求める相対変位は、(EW 地震波と NS 地震波の 2 種類)×(13、14、16m の杭の地盤の 3 種類)×(せん断波速度①とせん断波速度②の 2 種類)の計 12 ケースである。

3.4 解析結果・考察

図 4 に基盤を基準にした地盤の相対変位の分布図を示す。せん断波速度①を用いた場合では、13m 杭の地盤では深度 0~6m、14m 杭と 16m 杭の地盤では深度 0~8m において変位は緩やかに変化した。また、13m 杭の地盤で

表 1 観測点の地盤条件 表 2 検討対象建物の地盤条件

深度 (m)	密度 (g/cm ³)	単位体積重量 (t/m ³)	せん断波速度 (m/s)
0~1	1.76	17.248	200
1~2	1.75	17.15	310
2~3	1.91	18.718	310
3~4	1.88	18.424	160
4~5	1.81	17.738	160
5~6	1.92	18.816	160
6~7	1.85	18.13	160
7~8	1.82	17.836	160
8~9	1.87	18.326	160
9~10	2.05	20.09	160
10~11	1.97	19.306	160
11~12	1.93	18.914	480
12~13	1.91	18.718	480

地盤	深度 (m)	密度 (g/cm ³)	単位体積重量 (t/m ³)	せん断波速度 (m/s)
13m杭	0~4	1.76	17.248	200
	4~6	1.83	17.934	310
	6~11	1.9	18.62	160
	11~13	1.92	18.816	480
14m杭	0~2	1.76	17.248	200
	2~8	1.83	17.934	310
	8~13	1.9	18.62	160
	13~14	1.92	18.816	480
16m杭	0~2	1.76	17.248	200
	2~8	1.83	17.934	310
	8~14	1.9	18.62	160
	14~16	1.92	18.816	480

表 3 N 値とせん断波速度の関係

(a)13m杭			(b)14m杭			(c)16m杭		
深度 (m)	N値	せん断波速度 (m/s)	深度 (m)	N値	せん断波速度 (m/s)	深度 (m)	N値	せん断波速度 (m/s)
0~1	10	200	0~1	4	150	0~1	3	137
1~2	9	193	1~2	19	245	1~2	6	170
2~3	8	186	2~3	26	270	2~3	20	248
3~4	4	150	3~4	20	248	3~4	38	304
4~5	32	288	4~5	14	222	4~5	4	150
5~6	37	301	5~6	22	256	5~6	27	273
6~7	9	193	6~7	24	263	6~7	44	318
7~8	8	186	7~8	4	150	7~8	50	331
8~9	7	179	8~9	8	186	8~9	11	206
9~10	29	279	9~10	9	193	9~10	9	193
10~11	9	193	10~11	11	206	10~11	59	349
11~12	46	323	11~12	11	206	11~12	8	186
12~13	59	349	12~13	59	349	12~13	10	200
			13~14	59	349	13~14	14	222
						14~15	59	349
						15~16	59	349

は深度 11~13m、14m 杭の地盤では深度 13~14m、16m 杭の地盤では深度 14~16m においても変位は緩やかに変化した。それに対して、13m 杭の地盤では深度 6~11m、14m 杭の地盤では深度 8~13m、16m 杭の地盤では深度 8~14m において変位は急に変化した。従って、この地盤は杭の中間部で変位が大きい地盤であると言える。この変位が急に変化した位置は表 2 に示すせん断波速度が 160m/s の範囲と一致する。

一方、せん断波速度②を用いた場合では、せん断波速度①を用いた場合と同様に杭の中間部で地盤変位が大きくなる様子が伺えるがそれほど明確ではなかった。また、せん断波速度①を用いた方が、全体的に相対変位が大きくなった。これは表 2、表 3 に示すようにせん断波速度①で 160m/s であった深度においてせん断波速度②では 160m/s よりも大きい値となるためである。

2 種類の地震波について見ると、せん断波速度①を用いた場合では 13m 杭の地盤ではほとんど同じで 14、16m 杭の地盤では NS 地震波を用いた方が全体的に相対変位が大きくなった。一方でせん断波速度②を用いた場合では EW 地震波と NS 地震波による違いはほとんど無かった。

4. 地盤変形を考慮した杭の解析

4.1 解析概要

1 次元地震応答解析によって求めた地盤の相対変位を、図 5 に示すように水平地盤バネを介して杭に作用させ変位増分解析を行った。なお、解析は各節点が図 4 に示す地盤の相対変位の値に達した時点で終了した。解析には汎用解析プログラム¹⁰⁾を用いた。3 章ではせん断波速度を 2 種類用いて解析を行ったが、せん断波速度②を用いたケースよりもせん断波速度①を用いたケースの方が、全体的に相対変位が大きかったことから杭の被害は大きくなることが推測できる。よって本解析では、杭の被害という観点から、せん断波速度①を用いたケースの相対変位を使い解析を行った。なお、杭の軸力は軸力 0kN と圧縮軸力 500kN の 2 ケースを設定した。

4.2 モデル化

図 5 に示すように杭は単杭モデルとし、杭断面は標準的な PHC 杭(φ400)を参考にし、杭断面を 36 分割した Fiber モデルでモデル化した。杭は 100cm ずつの要素に分割し、そ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。単杭モデルは検討対象建物の杭基礎に従い 13、14、16m の 3 種類を作成した。なお、本モデルでは地表面から杭先端までを杭長とした。

図 6 に水平地盤バネの骨格曲線のモデル図⁶⁾を示す。水平地盤バネは、参考文献 11)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 $1/10000$ 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。

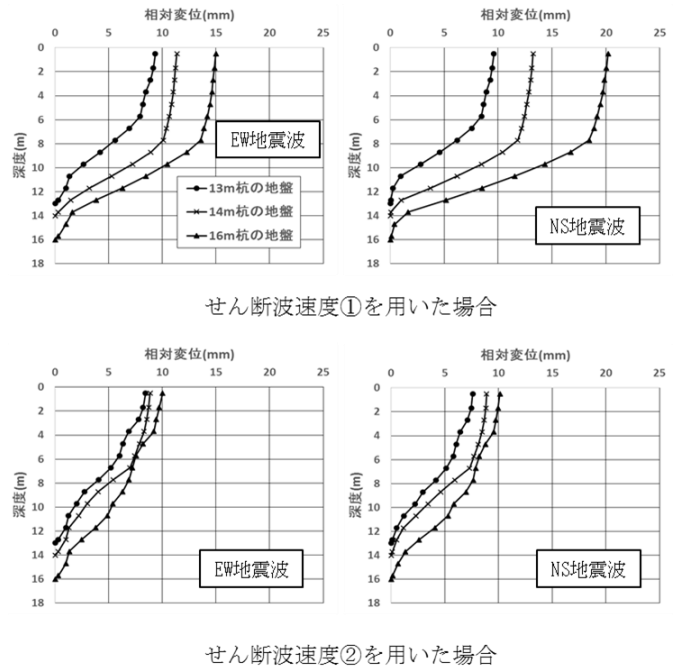


図 4 基礎を基準にした地盤の相対変位分布図

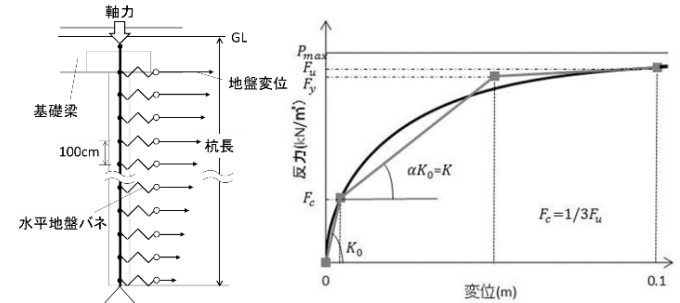


図 5 杭のモデル化

図 6 水平地盤バネのモデル化

4.3 解析結果・考察

杭の軸力 0kN のケースと圧縮軸力 500kN のケースではほぼ同様の結果であったので、ここでは軸力 0kN のケースのみを示す。

図 7 に杭先端を基準にした杭の相対変位の分布図を示す。どのモデルも地盤の変形に従って杭が変形していることが確認できた。

図 8 に杭の曲げモーメントの分布図を示す。杭の深さ方向で見ると、どの杭も杭頭付近で曲げモーメントの値は小さかった。杭頭付近と比べて、13m 杭では深度 6m 付近、14、16m 杭では深度 8m 付近で曲げモーメントの値は大きかった。また、13m 杭では深度 11~12m 付近、14m 杭では深度 13m 付近、16m 杭では深度 14~15m 付近でも曲げモーメントの値は大きかった。杭長別で見ると、13m 杭よりも 14m 杭、14m 杭よりも 16m 杭で曲げモーメントの最大値は大きかった。地震波別で見ると、EW 地震波よりも NS 地震波の方が杭の全長にわたって曲げモーメントの値は大きかった。

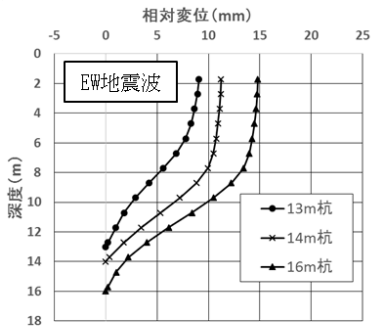


図7 杭の相対変位分布図

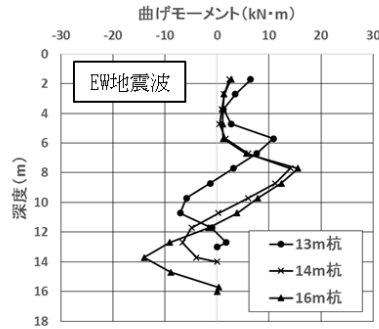


図8 杭の曲げモーメント分布図

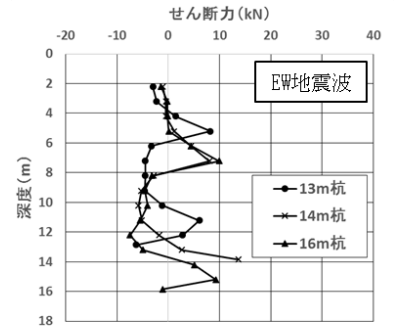


図9 杭のせん断力分布図

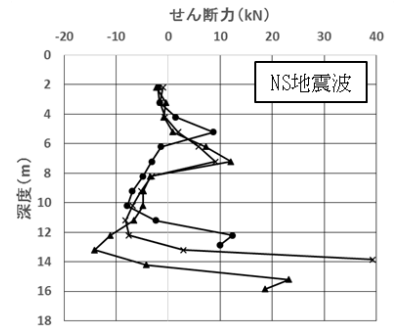
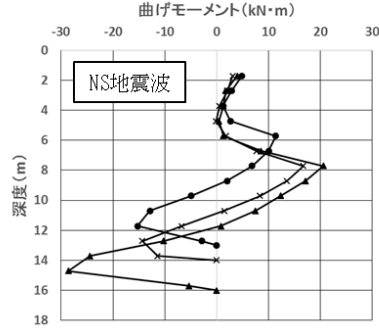
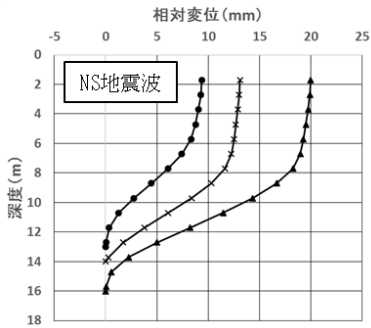


図9に杭のせん断力の分布図を示す。杭の深さ方向で見ると、どの杭も杭頭付近でせん断力の値は小さかった。杭中間部や杭先端では杭頭付近と比べてせん断力の値は大きかった。杭長別で見ると、EW地震波とNS地震波で違いが見られた。EW地震波ではどの杭もせん断力の最大値はほぼ一定だったがNS地震波では14m杭と16m杭の先端でせん断力の最大値が大きかった。地震波別で見ると、EW地震波よりもNS地震波の方が杭先端でせん断力の値が大きかった。

杭頭付近において、曲げモーメントとせん断力のいずれも小さい値となったことから、地盤変位が杭頭の被害に与える影響は小さい。一般的なPHC杭のB種のφ400の軸力0kN時の許容曲げモーメントは長期で51kN・m、短期で62kN・mであり、許容せん断力は長期で116kN、短期で147kNである¹²⁾ことから、本解析で算出した応力が許容応力度よりも小さいことが分かる。従って、地盤変位による杭基礎被害への影響は小さいと言える。

5. まとめ

1次元地震応答解析で求めた地盤の相対変位を用いて単杭モデルの変位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)NS地震波の方がEW地震波よりも地盤の相対変位が大きく、それに対応して杭に生じる応力も大きくなった。
- (2)相対変位の増加が大きい杭中間部で応力が大きく、杭頭付近の応力は小さかった。また、杭長が長いほど地盤変位の影響が大きかった。

- (3)地盤変位によって杭に生じる応力は許容応力度よりも小さく、地盤変位による杭基礎被害への影響は小さい。

謝辞

本研究では防災科学技術研究所強震観測網(K-NET)の強震記録及び土質データを利用させていただきました。ここに記して深く感謝の意を表します。

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：建築物の構造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) 東田実樹、秋田知芳、稲井栄一：杭基礎に被害を受けた学校建物の下部構造に起因する被害要因に関する研究、日本建築学会中国支部研究報告集第38巻、pp.257-260、2015.3
- 6) 原紺純花、秋田知芳、稲井栄一：単杭モデルを用いた解析による学校建築の杭基礎被害に関する研究、日本建築学会中国支部研究報告集第39巻、pp.377-380、2016.3
- 7) 金子治、中井正一：東日本大震災において被害を受けた杭基礎耐震性の評価、日本建築学会構造系論文集、第695号、pp.83-91、2014.1
- 8) 構造計画研究所：成層地盤地震応答解析プログラムk-SHAKE+ for Windows (V6.0)
- 9) 日本建築学会：日本建築学会大会 PD 資料「建築基礎設計・施工のための地盤評価と活用」、pp.39、2013.8
- 10) 構造システム：任意形状立体フレームの弾塑性解析 SNAP (Ver.6.0)
- 11) 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
- 12) 三谷セキサン株式会社 HP：PHC パイル本体部標準性能表、URL「http://www.m-sekisan.co.jp/download/pdf/cat_pmc_pile.pdf」

*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講師 博士(工学)

*3 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.

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.