

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 21 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22310107

研究課題名（和文）首都圏に特有の微地形境界斜面に着目したマイクロレベル地震防災

研究課題名（英文）Microlevel earthquake disaster mitigation focused on the slopes between two landforms typical of Tokyo metropolitan area

研究代表者

中井 正一（NAKAI SHOICHI）

千葉大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：90292664

研究成果の概要（和文）：

関東平野は一見すると低平であるが、実際には、樹枝状の細長い谷が台地の奥深くへと入り込む複雑な微地形構造を有する。この台地-低地境界には斜面が存在し、斜面および低地の表層地盤構造は非常に複雑である。本研究課題は、微地形境界に着目し、斜面の特定、表層地盤構造の解明、地震危険度の評価、避難行動予測、地震危険度の低減等により、地震防災に及ぼす影響を総合的に評価したものである。なお、東北地方太平洋沖地震による液化化被害の分析も併せて行った。

研究成果の概要（英文）：

One of the characteristic features of the landform in Southern Kanto is the existence of a widespread narrow river valleys (lowland) that penetrate deep into terrace, which makes the landform of this area very complex. In addition, steep slopes are formed along most of the boundaries between terrace and lowland, meaning that irregular ground is quite popular in this area. In this study, earthquake disaster mitigation is discussed by looking into this complex landform and surface soil conditions to come up with hazard maps and counter measures. Also studied is non-uniform liquefaction damage distribution due to 2011 Tohoku earthquake.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	5,300,000	1,590,000	6,890,000
2011年度	4,400,000	1,320,000	5,720,000
2012年度	2,800,000	840,000	3,640,000
総計	12,500,000	3,750,000	16,250,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学・自然災害科学

キーワード：被害予想・分析・対策、斜面、地震危険度、避難シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

関東平野は一見すると低平であるが、より子細には、樹枝状の細長い谷が台地の奥深くへと入り込む複雑な微地形構造を有している。これは谷地（谷津田）と呼ばれ、軟弱地盤が厚く堆積している。地形による地盤の相違は、現状の方法論でも考慮されているが、台地-

低地境界は多くの場合急崖であることや斜面付近で複雑に変化する地盤構造については考慮されていない。地震ハザード評価・防災計画の両面から、これらは極めて深刻な問題になり得る。すなわち、台地-低地境界では、

- ・地形効果により地震動が大きくなる。
- ・斜面にゆるみ層が存在する場合、震動の増

幅や斜面崩壊の危険性が大きくなる。

- ・ 斜面や建物の崩壊によって交通路が絶たれると、避難・救助・復旧の面で大きな阻害要因となる。

ミクロレベルにおけるこれらの視点の欠如は、斜面近傍地盤の構造や地震危険度を評価するための方法論が確立されていないことによる。台地-低地境界の急崖・斜面は首都圏に広く分布することからその影響度合いは大きく、評価手法・対策法の確立が急務である。

2. 研究の目的

首都圏に特有な台地-低地境界の斜面に着目し、その分布・地盤構造の特定から、地震防災上の影響要因の定量化およびその低減策に至る一連の検討を対象とした。また、研究期間内の2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震により、首都圏東部地域で広範囲に液状化が発生した。地震直後の液状化被害調査によれば、表層地盤の不均一性が地震危険度に大きな影響を及ぼすことが分かった。このため、研究の目的を若干修正し、台地-低地境界の斜面に加えて、東京湾岸の埋立地における液状化危険度についても研究対象とすることとし、研究目的を以下のように再設定した。

- (1) 台地-低地境界部の表層地盤構造の解明
- (2) 台地-低地境界部の地震危険度の評価
- (3) 斜面近傍における避難行動予測
- (4) 斜面近傍における地震危険度の低減
- (5) 埋立地における液状化被害とその分析

3. 研究の方法

- (1) 台地-低地境界部の表層地盤構造の解明

まず、数値標高モデル当により斜面の特定・分類を行う。ついで、自然斜面、切土斜面、造成地盤を選択し、地盤調査・常時微動計測・地震観測等により典型的な微地形境界における表層地盤構造を明らかにする。

- (2) 台地-低地境界部の地震危険度の評価

自然斜面、切土斜面、造成地盤における常時微動計測・地震観測により地震動増幅特性の差異を検証する。また、三次元微地形・表層地盤構造を有する地盤の波動伝播解析手法を定式化・プログラム化する。

- (3) 斜面近傍における避難行動予測

斜面近傍でのリスクを対象に、①リアルタイムでの避難経路の確保と効果的な誘導、および、②情報配信が避難者に与える影響予測の2つの問題を取り上げ、①については逆強化学習(逆解析)、②についてはゲーム理論と複雑ネットワーク解析によるアプローチで問題解決を試みる。

- (4) 斜面近傍における地震危険度の低減

斜面災害を防止する手段として杭の利用を考える。環境負荷低減の観点から杭材としての丸太の可能性について検討する。また、水

平力を受ける合理的な杭の挙動計算法を開発する。

- (5) 埋立地における液状化被害とその分析

千葉市美浜区を対象に、地盤調査・常時微動計測・地震観測・地震応答解析等を行って被害程度に見られる不均一性のメカニズムを明らかにする。

4. 研究成果

- (1) 台地-低地境界部の表層地盤構造の解明

- ① 首都圏東部地域における台地-低地境界斜面の特定

国土地理院が整備する10mメッシュの数値標高モデル(DEM)を用い、首都圏東部地域における斜面の分布を求めた。図1に、傾斜角15度以上の斜面分布を示す。図より、東部沿岸の海岸平野、西部東京湾岸の埋立地以外の地域は下総台地と呼ばれる洪積台地が占めていること、台地内部にはこれを侵食した谷が入り込み、台地と谷底平野の境界には斜面が広範囲に分布している状況が読み取れる。斜面の総延長は約5000kmに及ぶ。

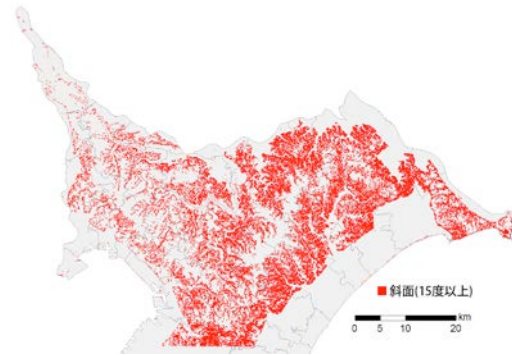


図1 首都圏東部地域の斜面分布

- ② 台地-低地境界の表層地盤構造

微地形境界として、大規模造成地、切土斜面、自然斜面をとりあげ、それぞれの表層地盤構造を調査した。

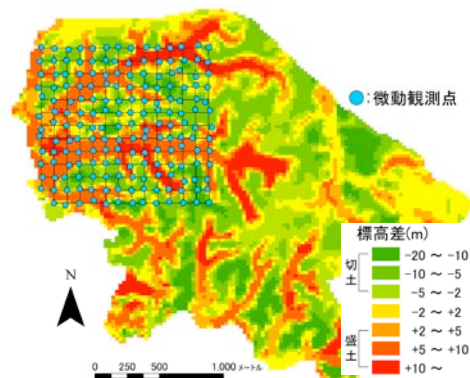


図2 おゆみ野地区造成前後の標高差

まず、大規模造成地として、千葉市南部のおゆみ野地区を取り上げた。ここでは、1977年から2006年の間に大規模な宅地開発がな

され、総面積 605ha におよぶ国内有数の大規模ニュータウンが形成された。この地区は元々標高 30~40m の台地と、これを侵食して深く入り込んだ標高 10~20m 程度の谷津と呼ばれる所によっては腐植土を含む軟弱な沖積低地から構成されていた。宅地造成により、現在は比較的平坦な地形へと変化している。図 2 に造成前後の標高差を示す。枝状に伸びた赤色の部分が元の低地であり、10m 以上盛土されている場所もあることが分かる。

図 3 に、常時微動 1 点観測による H/V スペクトルから得られたピーク周期を示す。大まかな傾向としては、旧台地部分でピーク周期が短く、旧低地では長いことが、相関はあまり高くはない。詳細な分析によれば、盛土地盤のうち、旧低地部に腐植土を含む場合にはピーク周期が長くなること、切土地盤では、ほぼ一様な砂地盤からなる場合にはピーク周期は短く、10~20m 程度の区間にシルト層を含む場合にはピーク周期が長いことが分かった。切盛の区別だけでは必ずしも地盤の硬軟が判断できないことを示している。

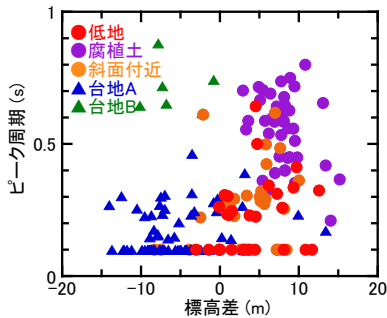


図 3 微動 H/V スペクトルのピーク周期

次に、斜面地盤の地盤構造について考察を加える。ここでは、亥鼻地区（千葉市中央区）の自然斜面と松戸地区（千葉県松戸市）の切土斜面で実施した地盤調査に基づいて表層地盤断面図を作成した。その結果、自然斜面法肩では台地中央部に比べて表土やローム層が厚くなっていること、切土斜面法肩は台地中央部と同程度のローム層厚であることが分かった。これまでの調査結果も踏まえると、自然斜面ではゆるみ層など軟弱な層が台地中央部よりも厚く堆積しているとの仮説が検証できたと言える。

(2) 台地-低地境界部の地震危険度の評価

ここでは、常時微動計測・地震観測により、大規模造成地および斜面地盤の地震動増幅特性の検討を行った。また、三次元不整形地盤の地震応答解析手法を開発し、数値解析を可能とした。

① 大規模造成地における地震動増幅特性

(1)②で述べたとおり、同じ谷埋め盛土地であっても、旧低地地盤に腐植土層が含まれるか否かにより卓越周期が異なっている。この

ことが、地震動増幅特性にどのような影響を与えるかを地震観測により検証した。図 4 に地震観測結果のフーリエスペクトルを示す。S1 地点は腐植土層を含む地盤であり、S2 地点ではそれがない。図より、盛土前の地盤に腐植土が含まれる場合、腐植土が無い場合に比べて、卓越周期はかなり長くなることが分かる。

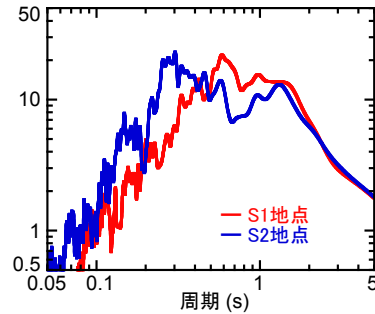


図 4 地震記録のフーリエスペクトル

② 斜面地盤における地震動増幅特性

前述の 2 地点（亥鼻：自然斜面、松戸：切土斜面）における地震観測結果の例を図 5 に示す。図から、自然斜面法肩では台地中央部に比べて地震動が非常に大きくなること、切土斜面ではこのような現象は観測されず、法肩と台地中央部の地震動はほぼ同等であると言える。

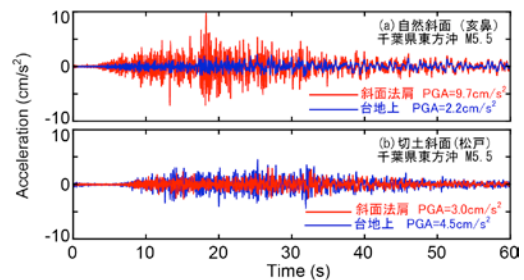


図 5 地震観測結果（加速度時刻歴波形）

③ 三次元不整形地盤の地震応答解析

関東平野に特有の、樹枝状の細長い谷（谷底平野）が台地の奥深くへと入り込む独特の微地形構造の振動特性を明らかにするため、図 6 に示すように、二次元的な斜面地盤に直交する小谷が入り込んでいる不整形地盤構造を対象とし、表面波または実体波が入射する問題の解析手法を定式化し、プログラム化した。このように、遠方自由地盤（解析対象領域を取り巻く周囲の地盤）が二次元的な不整形性を（この場合は斜面）を有する問題の厳密な定式化に基づく三次元振動解析はこれまでに例がない。

解析は、3次元有限要素法を用い、切欠き型の動的サブストラクチャー法に基づいて行った。すなわち、解析対象を 3次元の有限要素によりモデル化し、境界にインピーダンスを付加するとともに、入射波によるドライビ

ングフォースを入力する。このドライビングフォースは、2.5次元解析、すなわち、2次元の斜面地盤に対して振動方向が斜交するような実体波または表面波が入射する問題を解くことにより得られる。

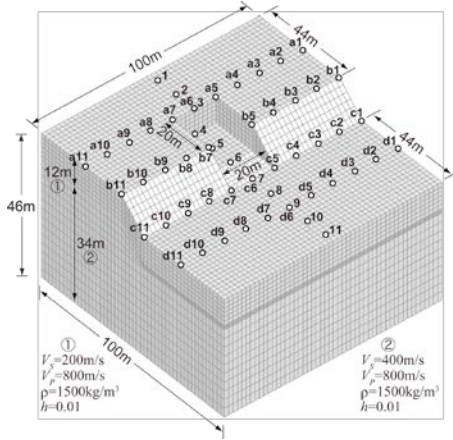


図6 単純化された三次元不整形地盤

図6のモデルに鉛直下方からS波（振動方向は斜面に対して45度方向）が入射する場合の地表面変位分布によれば、小谷端部や低地側で大きな影響が見られることが分かった。

(3) 斜面近傍における避難行動予測

① 避難経路の確保と効果的な誘導

実時間経路探索アルゴリズム A*を用いて有効な経路を予め計算し、目標地点（避難先）までの途中箇所に避難スポット、あるいは誘導員を配置することによって効果的な避難誘導を実現する。具体的には、A*アルゴリズムで導いた経路を所与として、経路上の途中箇所（サブゴール）を逆強化学習（逆解析）によって特定する方法を提案した。

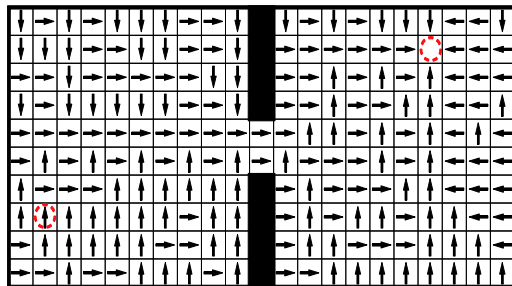


図7 各位置における適切な誘導方向

図7は、対象環境を格子状に分割し、右上の丸印の箇所を避難所（目標状態）、左下の丸印の箇所を現在地（初期状態）として表した図である。各矢印は、避難所に辿りつくまでの安全度の高い行動を示している。提案法の概略を以下に示す。

i) 避難所までの経路を所与として逆強化学習を用いて各格子の安全度を、報酬値と呼ばれるスカラー量として算出する。

ii) この値に基づいて、順強化学習を用いて期待報酬値の高い行動を抽出する。

提案法は、実際に被害が生じてから有効な経路探索をするのではなく、被害が起こりやすい地点の「価値」を低くすることによって、その場その場で安全な行動を特定する方法であることを特徴とする。これは必ずしも「安全な避難経路」とは限らない。

実際にいくつかの格子を通行不能にして、実時間 A*によって求めた経路に沿って避難する場合と、“各地点”で最良の行動を選択する場合を比較し、通行不能になる箇所の増加速度が速いほど、提案法が優れていることを示した。

② ゲーム理論に基づく意思決定モデル

—情報配信が避難者に与える影響予測—

避難者は局所的な不完全情報に基づいて行動するため、動的に変化する状況や、他避難者の動向次第では、不適切な行動（UE）を選択することが知られている、この状況は社会的ジレンマ（social dilemmas）と呼ばれる。本課題は、全体最適(SO)を実現することを目的として以下の2段階からなる問題解決を試みた。

i) 情報の不完全性によって生じる社会的ジレンマ状況を、図8のプライスのパラドクス（Braess's Paradox）と呼ばれるモデルを用いた説明モデルを構築する。

ii) i)のモデルを用いて、情報提供による避難者行動の制御戦略を獲得する方法の確立。

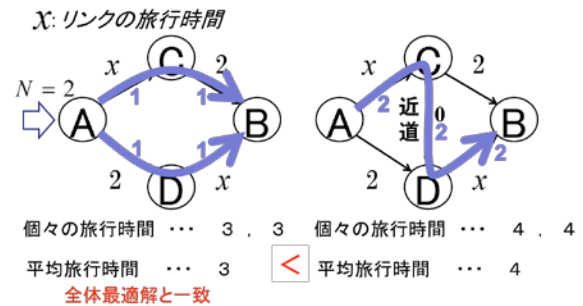


図8 Braess's Paradox

経路選択による旅行時間（全避難者が目的地に到着するまでの時間）を報酬として強化学習を繰り返すことによって各避難者は、ACB と ADB をバランス良く選択する政策（行動規範）を獲得することができた。図9は横軸が f （単位時間あたりの人の流入量）、縦軸は旅行時間を示している。図9中の p は情報を提供する確率を示しており、 $p=1$ の時、全避難者が情報提供を受けてそれに従う場合である。 $p=1$ の場合には流入量が増えても SO（全体最適）な状況を実現できることを示している。これに対して情報を提供しない場合には、 f の変化に対して急激に旅行時間が増大することがわかる。

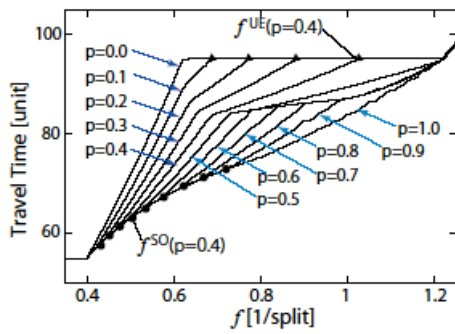


図9 情報提供による旅行時間増大の抑制

(4) 斜面近傍における地震危険度の低減

① 丸太を用いた斜面崩壊対策

分担研究者らは、地球温暖化緩和策として木材を地盤対策に積極的に活用することを提案している。ここでは、台地-低地境界の急斜面の崩壊対策に、地域で得られる材料の丸太を用いることを考え、模型実験と数値解析によりその可能性を検討した。

実験は、傾斜45度の斜面を作成し、そのままの斜面の場合と、丸太による対策を施した場合について、模型地盤を水平方向に加振し斜面の挙動を比較した。一方、数値解析では、非線形地盤解析コードFLIPを用い、模型実験の再現解析を行うとともに、パラメータを変化させた解析を行った。図10に模型実験の概要を示す。

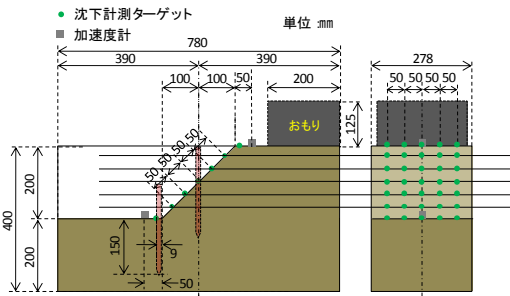


図10 模型斜面地盤と対策工の配置

実験および解析によれば、200gal加振の場合、無対策の場合と法尻および斜面中腹に丸太を設置した場合ではほとんど差が無いものの、300gal加振では対策により斜面の変形が約50%に抑制されることが分かった。また、法尻または中腹のいずれかにのみ丸太を設置した場合には変形抑制効果は小さいことから、丸太の配置や地震動強度、地盤条件により効果が変わるものと考えられる。

② 水平力を受ける杭の合理的な応力計算法の提案

水平力や地盤による強制変位を受ける問題は杭の水平抵抗問題と呼ばれ、長い研究の歴史を有している。しかしながら、地盤工学の原理に従いつつも簡便な評価法は今に至るまで提示されていない。ここでは、杭を梁、地

盤をウインクラーばねでモデル化する、いわゆる弾性支承梁モデルを対象に、微小ひずみ時は弾性理論、大変形時は下負荷面モデルを構成則とする弾塑性理論に従うとし、両者を無理なく接続することにより、微小変形から大変形に至るまでの杭-地盤系の挙動を評価する方法論の提示を行った。実大杭を用いた水平載荷試験のシミュレーション解析により、提案方法が極めて妥当な結果を与えることを示した。(図11)

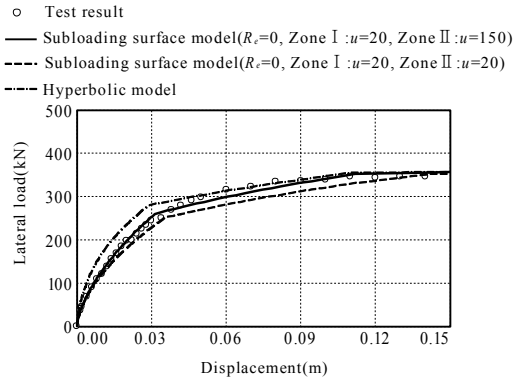
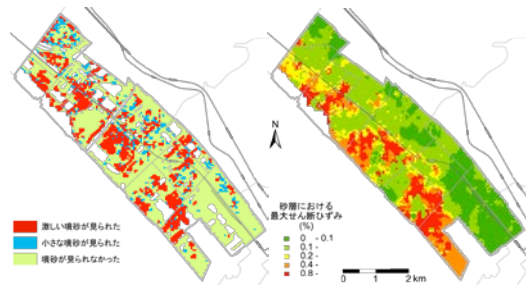


図11 現場実験のシミュレーション解析

(5) 埋立地における液状化被害とその分析

2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震により関東地方では広範囲にわたって液状化が発生した。本研究では、地震直後の3月12日~20日にかけて、美浜区(全域が埋立地)における噴砂の発生状況調査を実施した。図12(a)に噴砂被害の分布を示す。図から、液状化被害には著しい偏りのあることが分かる。

液状化被害に見られる不均一性のメカニズムを解明するため、まず、美浜区全体を50mメッシュ7439個で分割し、540本のボーリング資料を用いて工学的基盤までの土質・N値・S波速度構造を推定した。ついで、非液状化地区で観測された地震記録から各メッシュでの地震動を計算し、表層20mまでの砂層の最大せん断ひずみを求めた。結果を図12(b)に示す。これを図12(a)の液状化被害分布と比較すると、おおむね整合していることから、被害分布に見られる不均一性は表層地盤構造の不均一性が大きく寄与していると言える。



(a) 噴砂マップ (b) 最大せん断ひずみ

図12 液状化被害とその分析

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 26 件)

- ① 中井正一、関口徹：東北地方太平洋沖地震による千葉市美浜区における液状化被害分析、物理探査、Vol.66、No.1、pp.37-43、2013 (査読有)
- ② 中井正一：建築基礎構造の被害と耐震設計、基礎工、Vol.40、No.12、pp.2-3、2013 (査読無)
- ③ 関口徹、中井正一：千葉市美浜区の液状化被害に与えた表層地盤構造の影響、日本地震工学会論文集、第 12 巻、第 5 号、21-35、2012 (査読有)
- ④ 中井正一、関口徹、石野尋生：地震計アレイを用いた千葉市における深部地盤構造の推定、日本地震工学会論文集、第 12 巻、第 4 号、pp.80-93、2012 (査読有)
- ⑤ 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 (査読有)
- ⑥ 中井正一：杭頭非接合方法の効果と課題、基礎工、Vol.40、No.6、pp.24-28、2012 (査読無)
- ⑦ 内田英明、藤井秀樹、吉村忍、荒井幸代：道路ネットワークの変化に対する経路選択の学習、情報処理学会論文誌、Vol. 53、No. 11、pp.2409-2418、2012 (査読有)
- ⑧ Sachiyo Arai, and Tatsuya Masubuchi: A Study of Traffic Flow Optimization by Learning Pace-car, International Journal of Advancements in Computing Technology, Vol. 4, No. 22, pp.257-268, 2012 (査読有)
- ⑨ 富松義晴、沼田淳紀、濱田政則、本山寛、三輪滋：持続可能社会へ向けた土木事業における木材利用の提案、土木学会論文集 F4、Vol. 68、No. 2、pp.80-91、2012 (査読有)
- ⑩ 中川博人、中井正一：斜面地盤が短周期微動の H/V スペクトルと分散曲線に与える影響-2.5 次元表面波入射解析による検討-、日本建築学会構造系論文集、第 75 巻、pp.1827-1835、2010 (査読有)
- ⑪ 三輪滋、古川愛子、清野純史：接着剤を用いた墓石の耐震補強における接着強度の経年劣化に関する基礎的研究、土木学会地震工学論文集、31 巻、pp.328-341、2010 (査読有)
〔以下は全文査読の国際会議・シンポジウム論文 (雑誌論文にカウント)〕
- ⑫ Nakai, S. and Nakagawa, H.: Wave propagation analysis of a ground with three-dimensional irregularities based on the finite element method, 4th International Symposium: Effects of Surface Geology on Strong Ground Motion, Santa Barbara, U.S.A., August 23-26, 2011 (12pp.) (査読有)
- ⑬ Sachiyo Arai, and Yuta Mabuchi: Learning Strategic Information Support for Controlling Traffic Flow, International Conference on

Intelligent Unmanned Systems 2011, Oct. 31-Nov.2, 2011 (6pp.) (査読有)

- ⑭ Nakai, S., Nagata, Y. and Sekiguchi, T.: Effect of a slope on the dynamic properties of diluvial terrace, 5th Int. Conf. Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, San Diego, U.S.A., May 24-29, 2010 (12pp.) (査読有)
- ⑮ Sachiyo Arai, and Tatsuya Masubuchi: A Study of Traffic Flow Optimization by Learning Pace-car, 15th Asia Pacific Symposium on Intelligent and Evolutionary Systems, Dec. 8-9, 2011 (6pp.) (査読有)

その他 11 件

〔学会発表〕(計 65 件)

- ① T. Sekiguchi, and S. Nakai: Comparison between Damage Distribution and Estimated Liquefaction Potential in Chiba City, 10th International Conference on Urban Earthquake Engineering, Tokyo, Mar. 1-2, 2013
- ② Shigeru Miwa, Hiroshi Motoyama and Atsunori Numata: Countermeasure for slope failure by wooden pile, 15th World Conference on Earthquake Engineering, Sep. 24-28, Lisbon, Portugal, 2012
- ③ 野村一平、荒井幸代：集団のジレンマを解消する相互監視ネットワーク形成アルゴリズム、第 39 回計測自動制御学会システム・情報部門、知能システムシンポジウム講演論文集、千葉、pp.1-6、2012.3.15-16

その他 62 件

〔図書〕(計 1 件)

- ① Arai, S. (Shu-Heng Chen eds.), IGI Global, Multi-Agent Applications with Evolutionary Computation and Biologically Inspired Technologies: Intelligent Techniques for Ubiquity and Optimization, Chapter13: Effects of Shaping a Reward on Multiagent Reinforcement Learning, 2010, 353pp., (pp.232-247)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件) ○取得状況 (計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中井 正一 (NAKAI SHOICHI)
千葉大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：90292664

(2) 研究分担者

荒井 幸代 (ARAI SACHIYO)
千葉大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：10372575
関口 徹 (SEKIGUCHI TORU)
千葉大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：50451753
三輪 滋 (MIWA SHIGERU)
飛鳥建設 (株)・技術研究所・所長
研究者番号：60443636

(3) 連携研究者：なし