

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6月4日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2011～2012

課題番号：22360178

研究課題名（和文） 線状地下構造物に対する縦断方向の耐震性評価手法の開発とその設計への適用

研究課題名（英文） Investigation of Longitudinal Aseismic Capacity for Underground Structures and Application to Seismic Design

研究代表者

清野 純史（KIYONO JUNJI）

京都大学・地球環境学堂・教授

研究者番号：00161597

研究成果の概要（和文）：線的・面的な拡がりを持つ線状地下構造物の地震被害は、都市型災害の嚆矢とも言える1923年関東大震災以降枚挙に暇がないが、その構造を3次元的な拡がりの中の点（横断方向）としてではなく、縦断方向の線や面あるいはボリュームとして捉え、その入力地震動から地震時挙動までを統一的に捉え、設計や地震対策へ結びつけることを目標に、地震被害の分析や各種解析に基づく詳細な検討を行った。

研究成果の概要（英文）：Earthquake damage to underground structures of which extent can not be ignored are too numerous to enumerate in the recent large earthquakes after the 1923 Kanto Earthquake. However, the issue to be improved is the absence of perspective that the underground structures with spatially extent should be considered as a line, a plane or a volume structures with 3-dimensional behavior. In this study, we intend to deal with the underground structures comprehensively from their input ground motions to seismic behavior. We conducted the analyses and discussions by considering the suitable aseismic design and countermeasures.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	6,900,000	2,070,000	8,970,000
2011年度	3,300,000	990,000	4,290,000
2012年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
年度			
年度			
総計	13,600,000	4,080,000	17,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・構造工学/地震工学/維持管理工学

キーワード：入力地震動、地下構造物、縦断方向挙動、ライフライン、地盤震動、耐震設計

1. 研究開始当初の背景

地下鉄、共同溝、地下通路、電力・ガス・上下水道・通信等のライフライン施設など、空間的な拡がりを見逃し得ない線状地下構造物の地震被害パターンについては徐々に明らかになってきてはいるが、これまでの性能評価のための耐震計算は主に横断面が対象であり、線状地下構造物の全体挙動を捉え

なければならない縦断方向の耐震計算は、入力地震動の設定やそれに基づく地震時挙動の解明、その耐震設計や地震対策に至るまで、物理的な根拠の下に適切に設定されるまでには至っていない。このような線的・面的な拡がりを持つ地下構造物の縦断方向の耐震設計に関しては、1967年に建設省土木研究所で取りまとめられた「新耐震設計法(案)」

が、埋設管や沈埋トンネルに対する耐震計算法を提示したのに端を発する。その後、ライフラインの耐震設計に大きな影響を与えた1978年の宮城県沖地震を経て、ガス等の埋設管や沈埋トンネル、共同溝などの長手方向の入力地震動の考え方や挙動解析が研究され始めた。しかし、1995年の兵庫県南部地震では地下鉄にも被害が生じ、2004年の新潟県中越地震では地下通路の被害も生じている。またマンホールや管渠の浮き上がりによる下水道被害やガス・上水道被害も1983年日本海中部地震や1993年釧路沖地震から2007年新潟県中越沖地震に至るまで数多く生じている。兵庫県南部地震の際の、いわば内陸型の短周期が卓越する地震動とは異なり、今後、南海トラフ沿いの大地震の発生を間近に控え、近代都市が有する地下構造物ネットワーク網が初めて長周期地震動の洗礼を受けることも十分考えられる。このためにも、特に波動の伝播の影響を受けやすい線状地下構造物縦断面に関する耐震設計法を、科学的な根拠の下に整備しておかなければならないという背景の下に、研究をスタートさせた。その間、東日本大震災が起り、長周期地震動の問題は現実的な形で現れたことになる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、横断面に比して整備が遅れていた地下構造物の縦断方向の耐震性能評価法を確立し、物理的根拠を明確にした縦断方向設計法への道筋を提示することである。空間的な拮抗りを無視し得ない線状地下構造物は、縦断方向への入力地震動の設定やそれに基づく地震時挙動の解明、その耐震設計法や地震対策など多くの課題を抱えている。そのため本研究では、各種ライフライン管渠や線状地下構造物等を対象に、(1)入力地震動の空間分布特性の解明、(2)地震時縦断方向挙動・応答特性の把握、(3)耐震性能評価と耐震設計に関する検討、を大きな柱として研究を遂行した。

3. 研究の方法

研究は、全体目標および各研究分担者の分担課題に沿った形で実験・解析や調査・分析を行い、主に研究分担者が所属する大学・研究機関において遂行された。研究分担者全員が参加する研究会を年3回開催するとともに、所属学会の研究発表会や国際シンポジウムでの発表や議論を通して、進捗の確認、意見交換を行った。

4. 研究成果

本研究で行ったこと、および得られた成果を以下に示す。

(1) 耐震設計のための海溝型巨大地震の新しい震源モデル

2011年東北地方太平洋沖地震(M_w 9.0)は、今日のような密な強震観測網が構築されて以来、初めて発生したM9クラスの巨大地震である。この地震の発生により我々はM9クラスの巨大地震による強震動の実態を初めて知ることになったと言える。今後、他の地域を対象として、同程度の規模の地震を想定した強震動評価を行う機会が増えるものと考えられるが、その際の震源のモデル化においては、東北地方太平洋沖地震の強震記録から得られる知見を反映させることが極めて重要と考えられる。その際、強震動予測の目的が耐震設計である場合には、対象とする構造物に影響を及ぼしやすい周波数帯域に着目することが重要であると考えられる。ここでは、海溝型巨大地震による強震動パルスの生成事例を示すとともに、海溝型巨大地震による強震動パルスの再現を目的として構築された既往の震源モデルを整理した。そして、断層面上で強震動パルスを生成したと考えられる領域(強震動パルス生成域またはSPGAと呼ぶ)の諸特性と地震規模との関係について検討した。最後に、南海トラフの地震へのSPGAモデルの適用方法について検討を行った。図1に工学的基盤における大阪港の速度波形と加速度フーリエスペクトルの計算結果の例(サイト増幅特性との比較)を示す。

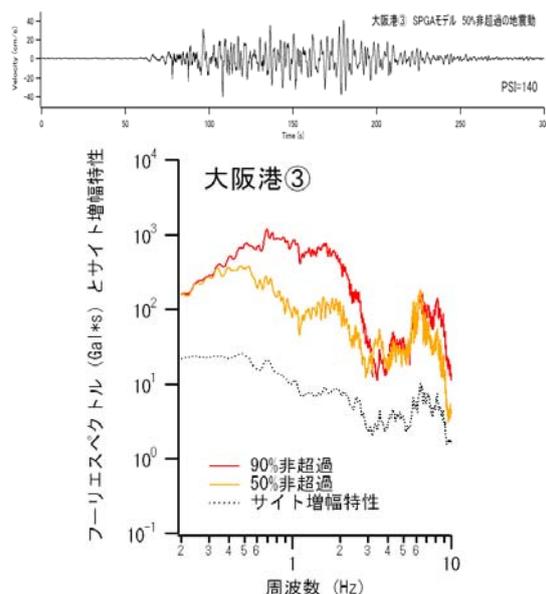


図1 大阪港における計算例

(2) 斜め入射による正弦規則波が作用する地中構造物の周波数応答解析

水平2層地盤の表層中に設置された地中構造物の応答を周波数応答関数により計算する方法を提案した。対象地点の地盤データから2層地盤モデルを作成し、SH波とSV波を斜め入射することにより生じる表層の地盤変位を弾性支持されたはりに作用させる解析法を示した。水平成層地盤に斜め入射する

地震動の計算は複素振幅に関する連立方程式の計算で求められる。さらに斜め入射により、地表に沿って一定の位相速度で進行する波動が得られるために弾性支持されたはりの方程式から周波数応答関数を計算できる。入力地震動のフーリエ変換に2層地盤の周波数応答関数とはりの周波数応答関数を乗じて応答を求める計算は動的解析に比べて単純であり、大量の既設構造物の耐震性能評価に向いていると考えられる。また周波数応答関数により増幅要因が示される点も対策の考案に有利となる。単純な正弦規則波を仮定した解析解は近似的に非線形性を考慮した形に変換が可能であり、最小限のパラメータから応答値を決める計算法は有用な手法となり得る。図2は、提案手法により、SV波が斜め入射するとき、剛体として地盤につれて移動する立坑部分に接続された地中構造物を解析的に分析した例である。

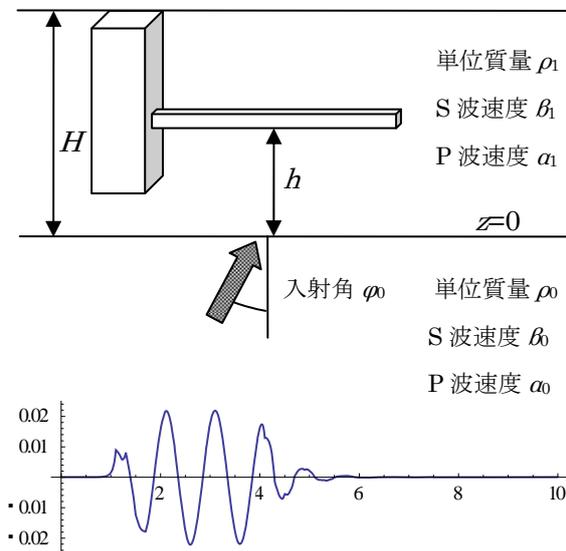


図2 解析モデルと立坑際の軸ひずみの時間変化

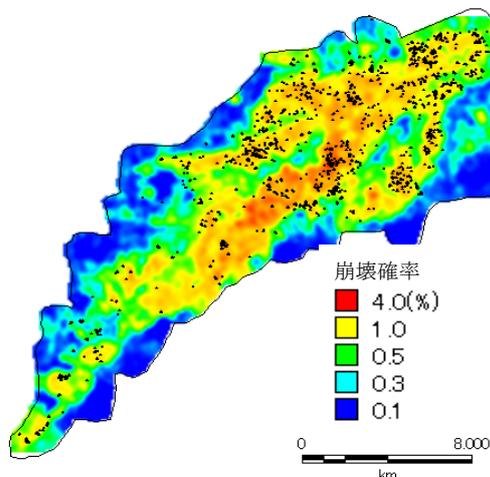


図3 回帰分析の崩壊確率と崩壊箇所図

(3) 地震時における斜面の簡易信頼性評価
六甲山全地形データ、崩壊領域ポリゴンデータ(多角形の面データ)を基に、斜面崩壊、非崩壊を判別し、ロジスティックモデルを用いて、兵庫県南部地震における六甲全山の自然斜面崩壊リスク評価方法の検討を行った。その結果、容易が入手可能な地形データとして斜面勾配と地表面最大加速度(PGA)を用いた評価式により、兵庫県南部地震の崩壊エリアと整合した結果が得られることが確かめられた。この評価式より得られた斜面崩壊確率分布マップと崩壊領域をプロットしたものが図3である。

(4) 土構造物の地震時変形量の定量評価のためのSPH法解析

地震時には、盛土・切土などの崩壊による交通遮断や土砂災害に起因する建物の倒壊など、土構造物の崩壊による被害が多くみられる。こうした被害を抑制するにあたり、地震時の土構造物の挙動を数値解析により予測することの意義は大きい。土構造物の地震時挙動に用いる数値解析法としては、古くから有限要素法が利用されてきた。しかし、有限要素法ではメッシュを利用するため、対象が大きく変形する場合にはメッシュが歪み、精度の大幅な低下が生じる、あるいは解析の続行が困難になるという問題がある。そのため、土構造物が崩壊を起こすかどうかの検討や、その安全率の計算には十分な実績を持っているが、最終的な変形状態や被害の及ぶ範囲を予測するためには、不十分である。そこで、有限要素法に代わる数値解析手法として、Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)法を用いた土構造物の地震時動的挙動解析を行い、その適用性を検証した。

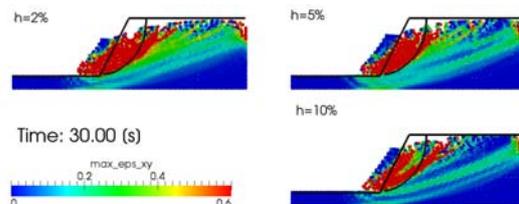


図4 レイリー減衰の大きさによる比較

結果として、SPH法による斜面の地震応答解析において、応力から粒子の加速度を求めるための計算式を新たに提案し、従来のものより高い精度で応答が求められることを示した。また、SPH法による地震応答解析にレイリー減衰を導入し、有限要素法による解析結果との比較(図4)により、レイリー減衰を用いた解析が、土構造物の崩壊過程に与える影響についても考察してその妥当性を確認することができた。

(5) 断層変位を受ける地中構造物の耐震性と免震対策の適用性

断層変位に対して地中線状構造物の安全性を確保するために、本研究では、断層変位により構造物にどのような影響が生じるのかを詳細に分析することを目的として、地盤—地中構造物—断層系の詳細な3次元有限要素解析を実施した。さらに、有効な断層変位対策についても検討した(図5)。結果として、地中構造物の解析を行うとき、地盤を線形材料として扱っていると断面力を過大評価するため、非線形性を考慮する必要があること、免震層を設けることにより、断面力は低減することが確認できた。軸力の場合は免震層の長さより長さを長くすることにより低減効果に期待でき、傾斜角の小さいケースほどその効果は大きい。曲げモーメントとせん断力の場合は免震層の長さがある一定の長さを超えると低減率が横ばいになるため、長さより厚さを変える方が低減効果を期待できるなどが明らかとなった。

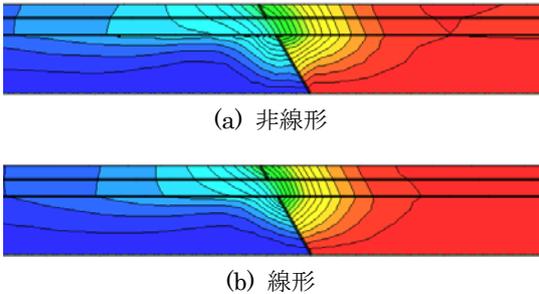


図5 地盤の非線形・線形が変位に与える影響

(6) 地震時における不整形地盤中の埋設管長手方向の挙動

ここでは、ガス導管の長手方向の被害に及ぼす不整形地盤の影響を検討するために、地震時における埋設管位置での管軸方向の地盤ひずみが不整形地盤によってどのような影響を受けるのかを、新潟県柏崎市の地盤を対象とした地盤応答解析によって明らかにすることを目的として研究を行った。

P-SV波解析においては、成層地盤の鉛直入射では現れないP波入射時の U_x とSV波入射時の U_z は不整形境界の影響を受けて応答が発生することを確認した(図6)。P波入射時の地盤の軸ひずみ ϵ_{xx} は高周波かつ堆積層が深いところで大きくなり、SV入射時の軸ひずみ ϵ_{zz} はSH波解析で求めたせん断ひずみと同様、不整形境界面の急変部で大きくなることわかった。また、実観測地震波を入力波として、地下2mにおけるひずみの時刻歴波形を求めた。そこから各時間ステップ毎に地下2mのひずみの分布を表示し、軸ひずみの変化の様子を調べた。地盤の最大軸ひずみは、

長柱座屈が起こると考えられる軸ひずみを上回る場合もあり、長柱座屈が起こる可能性があることが確認された。

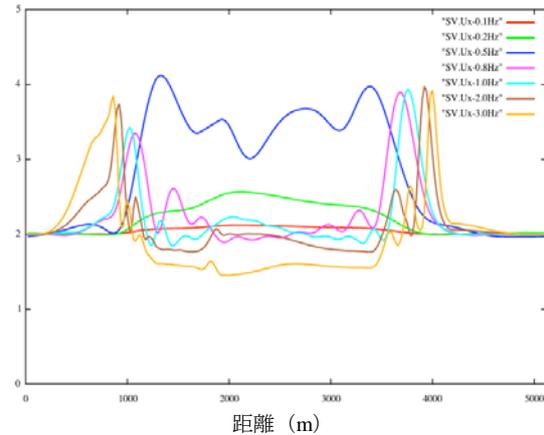


図6 SV波入射に対する各地点の応答倍率

(7) 橋梁の橋軸・橋軸直角方向の耐震性能の照査のための2方向入力地震動

構造物の地震時挙動という観点からは、2方向入力(図7)の構造物への影響は1方向入力とは異なる(大きくなる)ことが推察され、実験的にも検証されているものの、耐震設計体系の中で1方向入力の基本として用いられている。

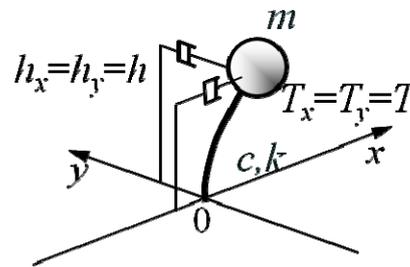


図7 2次元線形弾性1質点振動子

橋梁の時刻歴応答解析による2方向性を考慮した耐震性能照査を行うためには、規定された照査用スペクトルに適合し、特性が明確な2次元性を持つ2方向入力地震動時刻歴波形を用いることが望ましいと考えられる。そこで、このような2方向入力地震動を作成する1つの方法として、相補直交成分波と呼ぶ概念を用いる考え方を提案した。この方法は、固有周期に関わらず2方向弾性応答の大きさが1方向入力の場合の応答の大きさと一致するような2方向入力は、加速度軌跡が円運動の性質を持つ、という仮説に基づき導かれるものである。この手法に関して検討を行なった結果、2方向入力地震動として望ましい条件は、各々の直交成分が照査用スペクトルに適合していることと、2方向入力地震動の2方向応答倍率が周期に関わらず

一定値 1 となる強度を持つことの 2 つであると考えられる。道路橋示方書で規定する標準波を用いてこの方法で作成した 2 方向入力は、これらの条件を十分な精度で満たしていることを示した。

(8) 水道管の耐震設計における地盤の不均一度係数に関する検討

本研究では、埋設管のひとつである水道管を対象に耐震検討を行う上での地盤の不均一度係数について検討することを目的として、近年の地震である平成 16 年新潟県中越地震と平成 19 年新潟県中越沖地震における被害事例 (図 8) から、現行の不均一度係数の検証を行うとともに、微地形区分の境界部に着目した検討を行った。その結果、現行の水道施設耐震工法指針における不均一度係数では、不均一度係数の選択によっては、計算結果が許容ひずみ以下となり実被害と差があり、耐震性を過大評価し危険側に判定することもあること、地盤変形等の影響を考慮するため、地盤条件等の情報を簡易に取り込むことができる微地形分類図を用いて微地形区分ごとの不均一度を検討した結果、微地形分類だけでは不均一度係数の設定が困難であること、微地形分類図を用いて、1 つのメッシュに対して周囲 8 メッシュに異なる微地形がある場合を微地形境界部とした場合、境界部と境界以外の被害率を比較した結果、微地形境界部の被害率が高くなる傾向があること、そのため、微地形の境界部であるか、境界以外であるかを把握することで、地盤の不均一性を判断するひとつの指標となることなどがわかった。

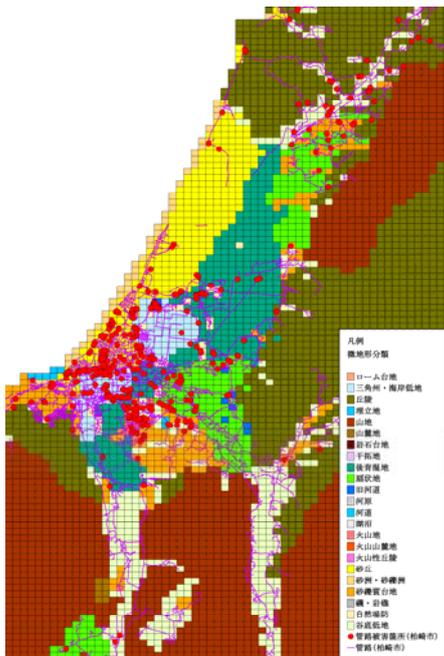


図 8 柏崎市の被害位置と微地形分類図

(9) 軟弱・基盤面不整形地盤の地震時のひずみと被害発生管路との関係

本研究では、北海道の浦河町を対象に表面波探査結果とボーリング資料に基づき地盤の地震応答解析によって地震時の地盤ひずみを計算し、泥炭地盤の影響や不整形地盤による影響を解析的に検討した。さらに管路に与える影響を過去の地震における管路被害分布から分析した。その結果、浦河町における 1982 年浦河沖地震、2003 年十勝沖地震の水道管被害から、泥炭地盤の方が他の地盤よりも 2 倍近く被害が大きくなることがわかった。泥炭を含む地盤で表面波探査を行った結果、軟弱な泥炭地盤の S 波速度が $V_s=50\sim 110\text{m/s}$ 程度にあることが示され、泥炭地盤の下層の地盤も 150m/s と比較的遅いことがわかった。浦河町の地盤断面の地震応答解析の結果、西部・東部ともに最大 0.03% 程度のひずみが算出された。ひずみに影響を与えているのは、主に西部は泥炭層と基盤面の不整形構造、東部は基盤面の不整形構造によるものと考えられる。

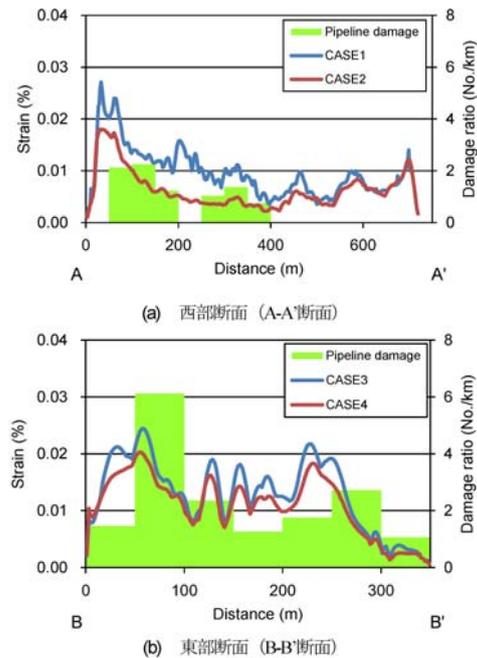


図 9 地表面のせん断ひずみと管路被害率

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 36 件)

- ①野津 厚: 強震動を対象とした海溝型巨大地震の震源モデルをより単純化する試みー疑似点震源モデルによる 2011 年東北地方太平洋沖地震の強震動シミュレーションー、地震 2、査読有、第 65 巻、第 1 号、(2012)、pp. 45-68、DOI: なし。
- ②鈴木崇伸: 東日本大震災にみるライフライン防災の課題、東洋大学現代社会研究第 9 号、査読無、(2012)、pp. 23-32、DOI: なし。

③五十嵐 晃・井上和真・古川愛子・宇野裕恵・松田宏：標準波一相補直交成分波の組合せによる橋梁の耐震照査用水平2方向入力地震動、土木学会論文集A1（構造・地震工学）[特]地震工学論文集、査読有、Vol. 68, No. 4, (2012)、pp. I_458-I_469、DOI:なし。

④七郎丸一孝・宮島昌克：水道管の耐震検討における微地形分類を考慮した地盤の不均一度係数の検討、土木学会論文集A1（構造・地震工学）、査読有、(2012)、Vol. 68, No. 4, pp. I_790-I_799、DOI:なし。

⑤鍬田泰子・池尻大介：鹿島地域の液状化による管路被害集中地域と地形変遷、日本地震工学会論文集・東日本大震災特集号第12巻、第4号（特集号）、査読有、(2012)、pp. 249-262、DOI:なし。

⑥奥村与志弘・加藤亮輔・岡二三生：津波による地盤の液状化に関する一次元解析、土木学会論文集A1（構造・地震工学）、査読有、Vol. 68, No. 4, (2012)、pp. 1171-1178、DOI:なし。

⑦Junji Kiyono, Y. Ono, A. Sato, T. Noguchi and Rusnardi R. Putra: Estimation of Subsurface Structure Based on Microtremor Observation at Padang, Indonesia, ASEAN Engineering Journal, 査読有、Vol. 1, No. 3, (2011), pp. 66-81, DOI:なし。

⑧Aiko Furukawa, Junji Kiyono, Kenzo Toki, Proposal of a Numerical Simulation Method for Elastic, Failure and Collapse Behaviors of Structures and its Application to Masonry Walls, Journal of Disaster Research, 査読有、Vol. 6, No. 1, (2011), Paper: Dr6-1-4524, DOI:なし。

[学会発表] (計7件)

①M. Faraji and J. Kiyono: Interdependency Effect on Seismic Performance of Lifelines, Proc. of 1st Symposium of Seismic Protection of Interdependent Lifeline Systems, JSCE & JAEE, pp. 61-67, 2012. 11. 8, National olympics Memorial Youth Center, Tokyo, Japan.

②鍬田泰子・大野顕大：東北地方太平洋沖地震における宮城県北西部の管路被害分析、土木学会第32回地震工学研究発表会、2012. 10. 25、東京大学。

③M. Faraji, J. Kiyono and T. Koike: Risk Assessment of Lifelines Subjected to Spatial Correlated Seismic Intensities, 15th World Conference of Earthquake Engineering (15WCEE), Paper No. 946, 2012. 9. 24, Lisbon, Portugal.

④井上和真・五十嵐晃・古川愛子・和田吉憲・松田哲夫・宇野裕恵・松田宏・中谷隆生：免制震すべりシステム (II-2)：標準波一相補直交成分波を用いた2方向同時入力の作成、

土木学会第66回年次学術講演会、発表番号1-344、2011. 9. 7、愛媛大学。

[図書] (計1件)

①清野純史編著、芙蓉出版、巨大災害と人間の安全保障、(2013)、208 (131-167)。

[その他]

ホームページ等

<http://quake.kuciv.kyoto-u.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

清野 純史 (KIYONO JUNJI)
京都大学・地球環境学堂・教授
研究者番号：00161597

(2) 研究分担者

宮島 昌克 (MIYAJIMA MASAKATSU)
金沢大学・環境デザイン学系・教授
研究者番号：70843881

鈴木 崇伸 (SUZUKI TAKANOBU)
東洋大学・理工学部・教授

研究者番号：50256773

酒井 久和 (SAKAI HISAKAZU)
法政大学・工学部・教授

研究者番号：00360371

五十嵐 晃 (IGARASHI AKIRA)
京都大学・工学研究科・准教授

研究者番号：80263101

野津 厚 (NOZU ATSUSHI)

(独) 港湾空港技術研究所・主任研究官
研究者番号：60370770

小野 祐輔 (ONO YUSUKE)

鳥取大学・工学部・准教授

研究者番号：00346082

鍬田 泰子 (KUWATA YASUKO)

神戸大学・工学部・准教授

研究者番号：50379335

古川 愛子 (FURUKAWA AIKO)

京都大学・地球環境学堂・准教授

研究者番号：00380585

フレディ デュラン (Duran C. Freddy)

京都大学・工学研究科・特定准教授

研究者番号：90576232

奥村 与志弘 (OKUMURA YOSHIHIRO)

京都大学・地球環境学堂・助教

研究者番号：80514124

(H24より研究分担者として参画)