

平成21年6月21日現在

研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2005～2008
 課題番号：17560438
 研究課題名（和文） 海溝型地震のやや長周期成分の不確定性を考慮した沿岸域防災施設の耐震性能評価法
 研究課題名（英文） Evaluation of seismic safety of coastal facilities taking into account the variability of strong ground motions
 研究代表者
 野津 厚（NOZU ATSUSHI）
 港湾空港技術研究所 地盤・構造部 主任研究官
 研究者番号：60371770

研究成果の概要：発生が懸念される東南海・南海地震などの海溝型巨大地震では周期と継続時間の長い地震動の発生が予測される。このような地震動に対応した沿岸施設の合理的な地震対策に資することを念頭におき、地震動の予測手法、沿岸施設の耐震照査手法に関する基礎的な研究を行った。具体的には、微動と重力を活用した簡便な地盤構造推定手法、サイト増幅特性に着目した実用的な地震動予測手法、長時間地震動に対する護岸の挙動と液状化の予測、非線形系への入力地震動の設定について検討を行った。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005年度	800,000	0	800,000
2006年度	600,000	0	600,000
2007年度	500,000	150,000	650,000
2008年度	400,000	120,000	520,000
年度			
総計	2,300,000	270,000	2,570,000

研究分野：地震工学

科研費の分科・細目：地震工学

キーワード：海溝性地震、地震動、沿岸施設、耐震性能、重力、微動、遠心模型実験

1. 研究開始当初の背景

発生が予測されている東南海・南海地震では、甚大な被害が予測されており、防災や耐震設計を考える上で、重要な課題となっている。これらの地震は、兵庫県南部地震とはメカニズムが大きく異なる海溝型の巨大地震であり、生じる地震動の特性も異なるものであることが予想される。防災対策施設に関しては、これらの地震及び地震動の特性を考慮した対策が求められる。また、東南海・南海地震では、津波による被害が予想されており、沿岸部における防災施設の耐震性を認識し、必要に応じて補強等の耐震対策を施すことは重要性が高い。特に、沿岸施設の場合、埋め立て地盤上に建設されていることも多く、

地盤を含めた耐震性能の評価が重要である。しかも、沿岸域の場合、地盤が比較的軟弱であることが多いためやや長周期といわれる周期帯の地震動による影響が大きい。

2. 研究の目的

以上のような背景に鑑み、本研究では、沿岸防災施設の耐震性能評価や耐震設計において用いる入力地震動のやや長周期帯の評価法の開発を行う。その際、地震動の推定において重要となる地盤構造を簡便に推定する方法についても検討を進める。また、東南海・南海地震で想定される継続時間の長い地震動に対し、護岸の挙動予測ならびに液状化予測に関する検討を行う。さらに、ばらつき

を有する入力地震動に対して、構造物が複雑な非線形応答を示すことを考慮し、非線形の応答特性を確率論等に基づき、系統立てて処理して耐震性能評価や耐震設計に活用する方法論を構築する。

3. 研究の方法

(1) 地盤構造の推定

地震動の推定では対象地域の地盤構造を把握することが重要である。地盤構造を推定する手法として、これまでいくつもの手法が提案されてきた。しかしこれらの手法は、それぞれコストや精度の問題を含んでいる。このような背景の下で、比較的容易に観測可能である重力と微動のデータを併合処理することにより、両者の特徴を活かした、精度の良い地盤構造を推定する手法について検討を行った。一般に微動の観測点に比して重力の観測点は密であることが多いこと、重力と微動の性質が互いに他を補う関係にあることを利用して、微動データから速度構造、重力データから密度構造を逐次的に決定し、最終的に両者のデータを満足する速度、密度構造を推定することを検討した。

(2) 地震動の予測

地震動予測手法に関しては、まず、沿岸域等における強震記録の収集整理を行い、収集された記録に対してスペクトルインバージョン手法を適用し、震源特性・伝播経路特性・サイト増幅特性の分離を行った。また、ここで得られたサイト増幅特性を用いて、盆地生成表面波等の影響も含む形で、想定地震に対する地震動の評価を行う方法について検討を行った。さらに、同手法について、因果性を満足する地震波を生成するという観点での改良を行った。

(3) 長時間地震動に対する護岸の挙動

東南海・南海地震は海溝性の巨大地震であり、比較的振幅の大きな継続時間の長い揺れが生じると予測されている。過去において1995年兵庫県南部地震のような内陸地殻内地震による強い揺れに対する沿岸施設の被災事例は存在するが、東南海・南海地震の際に想定されるような長時間地震動に対する護岸の変形挙動には未知の点が多い。そこで本研究では、ケーソン式護岸を対象に、長時間地震動を入力した遠心模型実験を行い、その変形挙動を調べた。

(4) 長時間地震動に対する液状化予測

東南海・南海地震の際に想定されるような長時間地震動に対する沿岸施設の耐震性を検討するためには、極めて繰り返し数の多い载荷に対応した地盤の液状化強度を適切に評価することが必要である。そこで本研究で

は R_{1000} すなわち1000回の载荷で液状化が生じるようなせん断応力比を中空ねじり試験で評価した。さらに、 R_{1000} を簡便に評価する方法と、繰り返し数の極めて多い領域における液状化強度曲線を簡便に評価する方法について検討を行った。

(5) 非線形系への入力地震動の設定

非線形系への入力地震動の設定に関して、本研究では次の二つの検討を行った。一つは、複数の入力波形を、複数の非線形応答特性値を座標とする特徴空間に写像するものである。そして、Kullback-Leibler距離(KL距離)を用いて合理的に波形を探索し、最終的に用いる入力地震動を設定する。もう一つは、非線形系の応答の時間周波数特性を所与とし、ウェーブレット変換を利用して入力波形を合成する方法である。

4. 研究成果

(1) 地盤構造の推定

本研究で提案する、重力及び微動データの併合処理による地盤構造の推定手順(坂井・盛川, 2006)を図1に示す。Step1では重力観測で得られたブーゲー異常値から、地盤を基盤と堆積層の二層構造であると仮定して逆解析を行い、密度構造を求める。この際、基盤と堆積層の密度については適当な値を与える。Step2では、各微動観測点に対し、堆積層を $n-1$ 層に分割し、微動観測で得られた位相速度に合うように逆解析を行い、各層厚、S波速度を求める。このとき各層の密度としてはすべてStep1で用いた密度を用いる。Step3では、Step2で得られた各層のS波速度を微動観測点間で平均し、得られたS波速度を固定して、変数を層厚のみとした位相速度の逆解析を各観測地点に対して行う。その後、微動観測点間の層境界の形状の補間を行う。最後にStep4では位相速度の逆解析から得られた層厚を固定してブーゲー異常値の逆解析により各堆積層の最適な密度を求める。以上のStep2からStep4までを、得られる密度の値が収束するまで繰り返す。上記の解析手法の妥当性を評価するため、cubic splineで表現される境界をもつ地盤構造に対し、理論的に求められるブーゲー異常値と位相速度に、それぞれの値の1%の大きさの白色雑音を与え、得られたデータに対して上記の手法を適用したところ、計20回の繰り返し計算により、ブーゲー異常値と層厚、S波速度のmisfitは十分に小さくなり、図2に見られるようにほぼ正解の構造を得ることが出来た。また同様の手法を重力及び微動アレイ観測が行われている鳥取県弓ヶ浜半島周辺地域に適用し、別途実施されている人工地震探査の結果とも非常によく一致した地下構造を推定することができた。

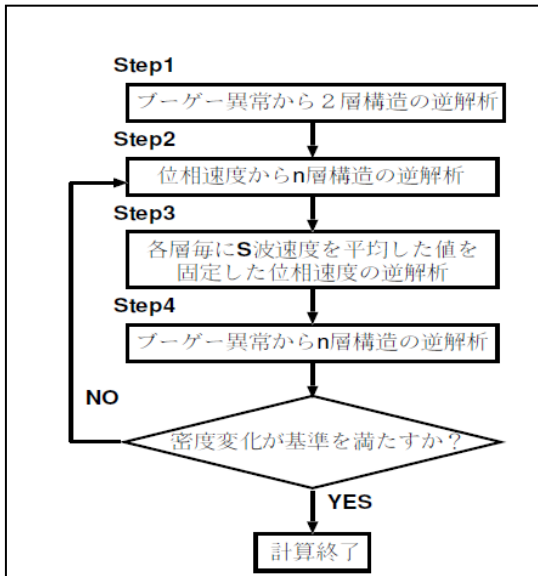


図1 ブーゲー異常値と位相速度の同時インバージョン手順

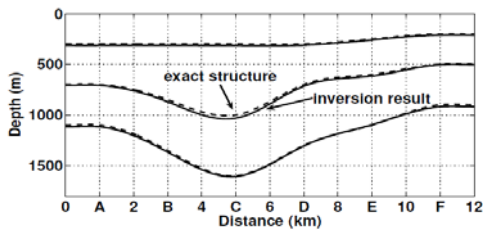


図2 仮定した構造 (破線) とインバージョンで得られた構造 (実線)

(2) 地震動の予測

スペクトルインバージョンにより得られたサイト増幅特性の例として、図3は埼玉県のK-NET観測点におけるサイト増幅特性を示したものである。西部の山間部に位置する観測点 (黒で表示) ではサイト増幅特性は小さな値を示すのに対し、東部の低地に位置する観測点 (赤で表示) ではサイト増幅特性は大きな値を示す。西部の山間部でも、山間の小盆地である秩父 (SIT006) では、周辺の観測点より多少大きなサイト増幅特性を示す。沿岸部における解析結果を整理すると、大局的には、内陸部よりも長周期の地震動が増幅されやすい傾向にあることがわかる。これは、沿岸部では内陸部に比べ堆積層が厚い傾向にあることを反映したものであると考えられる。我が国を代表する強震観測網であるK-NETは全国をおよそ20kmメッシュでカバーしているが、本研究で得られた沿岸部の強震観測地点での記録と、最寄りのK-NET観測点における記録を比較すると、対象とす

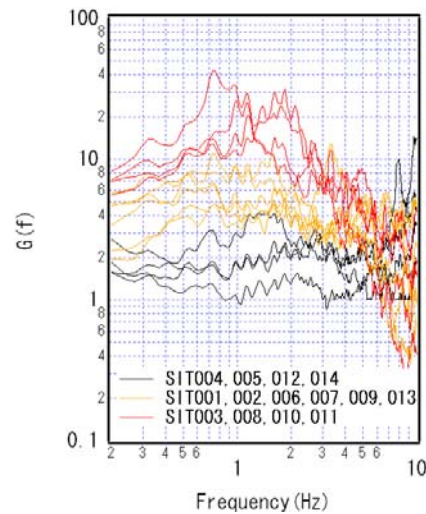
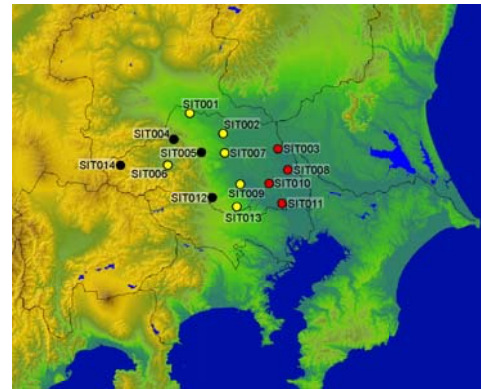


図3 スペクトルインバージョンの結果として得られたサイト増幅特性の例

る周波数によってはフーリエ振幅が10倍程度異なることも珍しくない。従って、今後、沿岸部において地震災害対策を合理的に推進していくためには、重要施設の立地する地点においてピンポイント的に地震観測を実施し、対象地点における地震動の増幅特性を把握する必要があると考えられる。なお、ここで得られたサイト増幅特性の数値データは公開されている (野津・長尾, 2005)。

上述のサイト増幅特性と共に位相特性を考慮し、想定地震に対する地震動の予測を行う手法について検討を行い、海溝型巨大地震である1968年十勝沖地震、2003年十勝沖地震の強震記録に対してこれを適用し、その妥当性の検討を行った。この方法では、まず、小規模な地震による対象地点での地震動を評価し (これをグリーン関数という)、これを重ね合わせるにより、大地震による揺れを評価する (図4)。図4のlarge eventは想定地震のアスペリティ (の一つ) を示す。ここにアスペリティとは大地震の断層面上

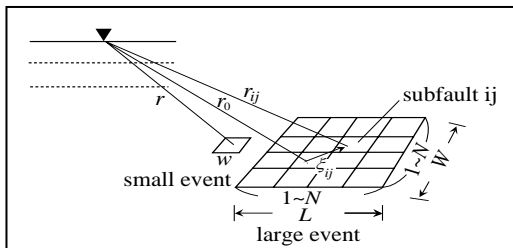


図4 グリーン関数の重ね合わせ

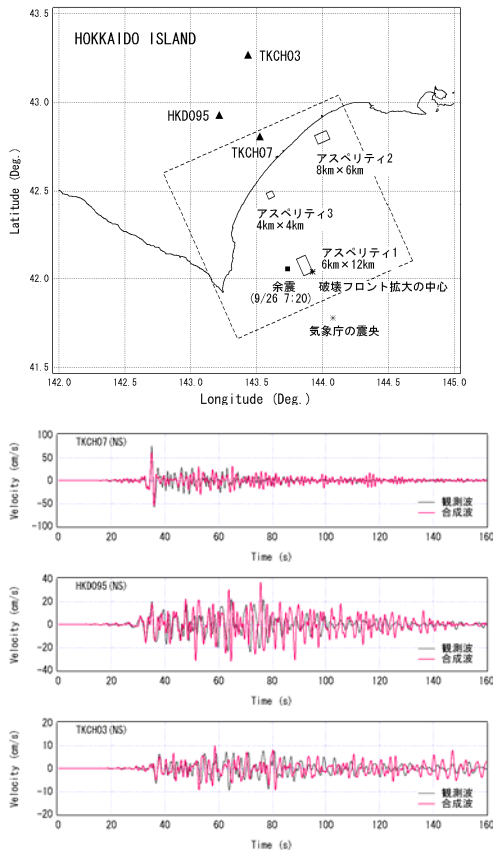


図5 2003年十勝沖地震の震源モデルとそれによる速度波形の再現状況

で特に強い地震波を出す領域のことである。これを分割し、分割後の各々の小断層と同じ面積の小地震(図4のsmall event)を考える。小地震の震源スペクトルに伝播経路特性とサイト増幅特性を乗じることによりグリーン関数のフーリエ振幅を定める。このときサイト増幅特性としては、スペクトルインバージョン等により得られたものを用いることができる。グリーン関数のフーリエ位相としては、対象地点で得られている中小地震観測記録のフーリエ位相をそのまま用いる。このとき、中小地震観測記録のフーリエ振幅に含まれる細かい山谷(リップル)を残すことにより、因果性を満足するグリーン関数を生成することができる。対象地点において複数の中小地震観測記録が利用可能である場合には、対象地点への入射角ができるだけ想定地震と類似した中小地震のフーリエ位相を

用いる。アスペリティからの地震動は、経験的グリーン関数法(入倉, 1997)と同じ方法でグリーン関数を重ね合わせることで算定できる(図4)。ここで紹介した強震波形計算手法を既往の大地震に対して適用しその適用性を検討した結果が野津・菅野(2007)に示されている。同文献では計算プログラムも公開されている。図5には2003年十勝沖地震に対してTKCH07, HKD095, TKCH03の3地点における速度波形を計算し観測波と比較した結果を示す。振幅や継続時間など地点毎の揺れの特徴がよく再現されている。同様の手法を想定東海地震に適用し、震源近傍における強震動の評価を実施したところ、想定される地震動は地点依存性が顕著であり、サイト増幅特性の特に大きい地点では、兵庫県南部地震による神戸市内の揺れを上回る地震動も想定されることがわかった。

(3) 長時間地震動に対する護岸の挙動

長時間地震動によるケーソン式護岸の変形挙動を明らかにするため遠心模型実験を行ったところ、次のような結果が得られた。

- 1) 長時間地震動では加振中の変位量が漸増する傾向にある。
- 2) 長時間地震動では加振終了後も間隙水圧の高い状態が維持される。
- 3) 入力加速度振幅の最大値の増加と共に変形量が増加する傾向にあるが、長時間地震動の場合には入力加速度振幅の増加に対して変形量の増加する割合が著しく大きい。

(4) 長時間地震動に対する液状化予測

中空ねじり試験は、7号珪砂を用い、相対密度は40%, 60%, 80%の3通りに設定した。例えば相対密度が60%で応力比が0.107のとき、1031回の載荷で液状化すると結果が得られている。平均有効応力は、最初98kPaから80kPaまで急激に低下し、その後25kPaまでゆるやかに低下し、最後にまた急激に低下して液状化に至っている。 R_{1000} の評価を毎回行うことは大変なので、本研究では、実験結果に基づき、 R_{1000} を簡便に求めるための式として次式を提案した。

$$R_{1000} = (0.001Dr + 0.845) b_2 \quad (1)$$

ここに $Dr(\%)$ は相対密度、 b_2 は2回目の載荷におけるせん断ひずみ両振幅とせん断応力比との間の「疑似線形関係」における y 切片である。この式から得られる R_{1000} に基づき、繰り返し数の極めて多い領域における液状化強度曲線を簡便に評価する方法を提案した。さらに、これらの関係が、液状化を考慮した有限要素解析の解析定数を設定する上で有用であることを示した。

(5) 非線形系への入力地震動の設定

非線形系への入力地震動の設定に関する検討のうち、入力波形を複数の非線形応答特

性値を座標とする特徴空間に写像し、KL 距離を用いて波形を探索する手法に関しては、バイリニア型の 1 自由度系を対象とした検討を行うことにより、十分に大きな非線形応答を与えながらも、単純な振幅調整を行うよりはコスト的に有利となるような入力地震動を設定するための手法として有用であることが明らかにされた。一方、非線形系の応答の時間周波数特性を所与とし、ウェーブレット変換を利用して入力波形を合成する方法については、2 種類の構造モデルを対象とした数値シミュレーションによりその有効性を確認した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 34 件)

1. Uemura, H., Ichii, K., Mikami, T. and Ozutsumi, O.: Assessment of liquefaction potential against long duration shaking and its application, *Proceedings of the International Conference on Performance-Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering*, 2009, To appear, 査読有.
2. Ishida, H., Ichii, K. and Mishima, T.: Simplified modeling of wave absorbing concrete blocks for performance-based design, *Proceedings of the International Conference on Performance-Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering*, 2009, To appear, 査読有.
3. Morikawa, H. and Zerva, A.: Approximate representation of the statistics for extreme responses of single degree-of-freedom system excited by non-stationary processes, *Probabilistic Engineering Mechanics*, Vol. 23, 2008, pp. 279-288, 査読有.
4. 本田利器, 宮本崇: 非線形系の応答の時間周波数特性の複素数表現に基づく入力波の推定, 応用力学論文集, Vol. 11, 2008, pp. 665-673, 査読有.
5. 野津厚, 菅野高弘: 港湾地域強震観測年報 (2007), 港湾空港技術研究所資料, No. 1184, 2008, 査読無.
6. Nozu, A.: Rupture process of the 2007 Noto Hanto earthquake: waveform inversion using empirical Green's function, *Earth, Planets and Space*, Vol. 60, 2008, pp. 1029-1034, 査読有.
7. Nozu, A.: Rupture process of the 2007 Chuetsu-oki, Niigata, Japan earthquake - waveform inversion using empirical Green's functions, *Earth, Planets and Space*, Vol. 60, 2008, pp. 1169-1176, 査読有.
8. 鈴木優斗, 盛川仁: 逆解析による地盤構造の推定の際に Love 波の位相速度が与える効果について, 土木学会地震工学論文集, Vol. 29, 2007, pp. 1058-1062, 査読無.
9. 高橋千佳, 盛川仁, 澤田純男: Moving-window Poisson Analysis 法の実データへの適用性に関する考察, 土木学会地震工学論文集, Vol. 29, 2007, pp. 1063-1068, 査読無.
10. 盛川仁, 大堀道広, 飯山かほり: 微動の 2 点同時観測から得られる空間自己相関係数の確率論的性質と位相速度の推定法に関する一考察, 土木学会地震工学論文集, Vol. 29, 2007, pp. 1069-1079, 査読無.
11. 本田利器, 宮本崇: 解析信号ウェーブレットによる時間周波数特性を考慮した入力地震動表現, 土木学会地震工学論文集, Vol. 29, 2007, pp. 139-145, 査読有.
12. 本田利器, 岡本良輔, 澤田純男: 構造系の非線形応答特性に基づいた地震動の類似性の評価, 土木学会地震工学論文集, Vol. 29, 2007, pp. 146-152, 査読有.
13. 野津厚, 菅野高弘: 経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法 - 因果性と多重非線形効果に着目した改良, 港湾空港技術研究所資料, No. 1173, 2007, 査読無.
14. 野津厚, 菅野高弘: 港湾地域強震観測年報 (2006), 港湾空港技術研究所資料, No. 1164, 2007, 査読無.
15. 野津厚: 2005 年福岡県西方沖の地震の震源モデル - 経験的グリーン関数を用いた波形インバージョン, 地震 2, Vol. 59, 2007, pp. 253-270, 査読有.
16. 野津厚: 非線形パラメタと有効応力解析を併用した強震動評価手法, 土木学会地震工学論文集, Vol. 29, 2007, pp. 114-122, 査読有.
17. Nozu, A. and Irikura, K.: Strong-motion generation areas of a great subduction-zone earthquake: waveform inversion with empirical Green's functions for the 2003 Tokachi-oki earthquake, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 98, 2008, pp. 180-197, 査読有.
18. 野津厚, 山田雅行, 長尾毅: スペクトルインバージョンに基づく全国の強震観測地点におけるサイト増幅特性とこれを利用した強震動評価事例, 日本地震工学会論文集, Vol. 7, 2007, pp. 215-234, 査読有.
19. 秦吉弥, 一井康二, 李黎明, 土田孝, 加納誠二: 傾斜基盤を有する盛土の地震応答特性に関する動的遠心模型実験, 土木学会地震工学論文集, Vol. 29, 2007, pp. 295-304, 査読有.

20. 宇田川鎮生, 盛川仁: 時間一周波数解析を用いた微動の位相速度の推定法の適用性に関する研究, 第12回日本地震工学シンポジウム論文集, 2006, pp. 270-273, 査読有.
21. 坂井公俊・盛川仁・野口竜也: 重力及び微動データの併合処理による地盤構造推定手法の適用性の検討, 第12回日本地震工学シンポジウム論文集, 2006, pp. 274-277, 査読有.
22. Morikawa, H.: A method to estimate phase velocities of surface waves using array observation records of three-component microtremors, *Structural Eng. / Earthquake Eng., JSCE*, Vol. 23, 2006, pp. 143s-148s, 査読有.
23. Honda, R. and Yamashita, R.: Input Motion Synthesis Considering the Information of the Response of Nonlinear Systems, *Proceedings of Fourth International Conference on Urban Earthquake Engineering*, No. 4, 2006, pp. 155-162, 査読有.
24. 野津厚, 菅野高弘: 経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法—内陸活断層地震および海溝型地震への適用性の検討, 港湾空港技術研究所資料, No. 1124, 2006, 査読無.
25. 野津厚, 菅野高弘: 港湾地域強震観測年報 (2005), 港湾空港技術研究所資料, No. 1136, 2006, 査読無.
26. 野津厚, 菅野高弘: 港湾におけるサイト増幅特性を考慮したレベル2地震動の算定事例, 港湾空港技術研究所資料, No. 1146, 2006, 査読無.
27. 野津厚, 菅野高弘: スペクトルインバージョンに基づく南西諸島の強震観測地点におけるサイト増幅特性, 港湾空港技術研究所資料, No. 1149, 2006, 査読無.
28. 野津厚, 宮島正悟, 中西豪, 山田雅行: 海溝型地震の震源近傍における強震動の評価事例, 土木学会論文集 A, Vol. 62, 2006, pp. 877-890, 査読有.
29. 野津厚, 山田雅行, 長尾毅: 経験的サイト増幅・位相特性を考慮した盆地生成表面波のシミュレーション—九州地方のカランダラを例として—, 土木学会論文集 A, Vol. 62, 2006, pp. 877-890, 査読有.
30. 野津厚: 「技術展望・首都高速道路における長大橋耐震補強の基本方針と入力地震動」への討議, 土木学会論文集 A, Vol. 62, 2006, pp. 909-910, 査読有.
31. Morikawa, H. and Udagawa, S.: A study to estimate the phase velocities of microtremors using time-frequency analysis, *ICOSSAR*, 2005, pp. 3139-3144, 査読有.
32. 坂井公俊・盛川仁: 重力及び微動データの併合処理による2次元地盤構造の高精度推定のための基礎的研究, 土木学会地震工学論文集, Vol. 28, 2005, pp. 1-7, 査読有.
33. 野津厚, 菅野高弘: 港湾地域強震観測年報 (2004), 港湾空港技術研究所資料, No. 1109, 2005, 査読無.
34. 野津厚, 長尾毅: スペクトルインバージョンに基づく全国の港湾等の強震観測地点におけるサイト増幅特性, 港湾空港技術研究所資料, No. 1112, 2005, 査読無.

[学会発表] (計4件)

1. 安藤有司, 飛田哲男, 井合進, 小林伸禎, 石原慎太郎: 長時間地震動に対するケーソン式護岸の動的挙動, 第43回地盤工学研究発表会, 2008年7月9日~11日, 広島.
2. 上田恭平, 井合進, 飛田哲男: 自立式矢板護岸の動的解析法に関する一考察, 第43回地盤工学研究発表会, 2008年7月9日~11日, 広島.
3. 金子聡, 井合進, 飛田哲男: 新潟県中越沖地震における地盤応答の有効応力解析, 第43回地盤工学研究発表会, 2008年7月9日~11日, 広島.
4. 岡元良輔, 本田利器: 非線形応答特性値に基づく設計入力地震動の設定手法, 土木学会第60回年次学術講演会, 2005年9月7日~9日, 東京.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

野津 厚 (NOZU ATSUSHI)
 港湾空港技術研究所・地盤・構造部・主任研究官
 研究者番号: 60371770

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

盛川 仁 (HITOSHI MORIKAWA)
 東京工業大学・総合理工学研究科・准教授
 研究者番号: 60273468

本田 利器 (RIKI HONDA)
 東京大学・大学院工学研究科・准教授
 研究者番号: 60301248

一井 康二 (KOJI ICHII)
 広島大学・大学院工学研究科・准教授
 研究者番号: 70371771

飛田 哲男 (TETSUO TOBITA)
 京都大学・防災研究所・助教
 研究者番号: 00346058