

機関番号：42686

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2007～2010

課題番号：19360254

研究課題名（和文）軟弱地盤に建設する高い減衰性能を有した環境に貢献する複合基礎の開発

研究課題名（英文）Development of A Compositied Foundation Constructed at Soft Ground Site Taking into Account High Vibration Attenuation Performance and Global Environment

研究代表者

下村 幸男（SHIMOMURA YUKIO）

日本大学短期大学部・建設学科・教授

研究者番号：00060179

研究成果の概要（和文）：構造物の地震時応答を低減させ得る合理的な複合基礎の提示を目指し、植栽基盤としても利用可能な高減衰の地盤材料を開発すると共に応答シミュレーション解析を実施した。新しい地盤材料は15%という大ひずみ領域まで、応力-ひずみ関係がほぼ線形で明確な降伏点が現れず、拘束圧を負荷すると強度が増大することが判明した。また、シミュレーション解析から、提案する複合基礎の有効性が検証された。

研究成果の概要（英文）：Aiming to propose a rational hybrid foundation that is able to decrease the response of structures subjected to an earthquake, a new geomaterial with high damping performance that is able to be used as a planting base was developed, and the response simulation analysis of the foundation was executed. As a result, it is turned out that the stress-strain relation of the material in the range to large strain (approx. 15%) is linear and has not a clear yield point. In addition, strength of the material increases by the confining pressure load. Moreover, the effectiveness of the response decrease of the proposed hybrid foundation was verified through the simulation analysis.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	4,900,000	1,470,000	6,370,000
2008年度	5,500,000	1,650,000	7,150,000
2009年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
総計	13,000,000	3,900,000	16,900,000

研究分野：地震工学，耐震構造

科研費の分科・細目：建築学・建築構造・材料

キーワード：軟弱地盤，複合基礎，産業廃棄物，減衰性能，常時微動，H/Vスペクトル，植栽基盤，地震応答

1. 研究開始当初の背景

(1) 地球環境問題から長寿命建築の必要性が叫ばれており、免震・制震構造物の普及が望まれている。しかし日本の大都市の殆どは軟弱地盤上に建設されており、従来型の免震装置を装着した免震構造は杭地業と免震層の構築という二重の費用を負担せざるを得

ないため、なかなか普及していかないのが現状である。

(2) この現状を打破するため、申請者らは科学研究費補助金（課題番号15360303）を受け、軟弱地盤域の既存の構造物基礎の減衰性能及び防振性能向上に関する実験的研究を実施し、改良地盤上に作製した従来工法による

基礎に比べて、基礎側面のトレンチ部に廃タイヤを裁断したゴムチップを混入した砕石アスファルトを充填した改良型基礎の減衰性能が向上することを加振実験および地震観測から確認している。

(3) 免震材に新しく木片チップ、砕石の代替に再生骨材（コンクリート殻）を用い、これらにアスファルト乳剤を混合攪拌して製造する材料の配調合に関する研究を実施している。この研究は、産業廃棄物の再利用という観点と、開発する減衰材が植生にも優れており緑化という観点からも地球環境問題に対する貢献度が高い。

(4) 2001年の建築基準法の大改定以降、相互作用効果（基礎のインピーダンス関数と有効入力）が見直されてきている。基礎寸法が大きいほど、無次元振動数が高くなりインピーダンス関数虚部が大きくなる。さらに、入力損失効果も高まり有効入力が低減する。なお、上部建屋が同一の場合、地盤が軟弱なほど無次元振動数が高くなる。

2. 研究の目的

(1) 軟弱地盤域での合理的な複合基礎システムの提案を目指すものである。これは、産業廃棄物の積極的な再利用と建設残土の低減化、さらには緑化用の植栽ブロックの開発という三重の意味で、地球環境問題、特にCO₂削減に寄与する点大きい。現在、科学研究費補助金（課題番号18560560）で開発中の植栽用減衰ブロックは透水性に優れているが、保水性に劣る特性を有している。この保水性能を向上できれば、ヒートアイランド現象の緩和にも貢献できる。

(2) 提案する合理的な複合基礎が確立されれば、軟弱地盤域での安価な免震工法となり得る可能性が高い。さらに、建築物の長寿命化への貢献度も高い。研究開発中の減衰材に加え、新たに基礎底面下への敷設に適した減衰材を開発し、減衰性能に富み地震入力を低減し得る基礎の設計法を探るものである。

(3) 軟弱地盤の欠点である地盤剛性の低さを逆手に取り、上部建屋の下部構造としての基礎構造と、駐車スペースや緑化スペースを結合した大きな平面形状を持つ複合基礎の実現化を目指す。上部建屋の基礎構造直下に捨てコンの代わりに打設する新たに開発予定の地盤改良地業も兼ねた減衰材と駐車スペースや緑化スペース部の各減衰材による履歴減衰効果と複合基礎全体としての無次元振動数を高め、地震時応答の低減を図る。

3. 研究の方法

(1) 三軸試験機の整備

既設の三軸透水試験用三軸セル室に動力源、圧力系統および測定系統を追加導入し、

開発を目指す減衰材の要素試験用の繰返し三軸試験機として整備する。

(2) 軟弱地盤域の土質調査・常時微動測定

研究初年度に軟弱地盤域のボーリング柱状図ほかの原位置地盤調査図書等のデータを収集する。次年度にデータ収集結果を整理検討し、現地測定の可能なサイトを洗い出すと共に、携帯用振動計を新規導入し常時微動測定を実施し、下記事項について検討する。

① 土質調査結果と常時微動測定結果の相関性

② 軟弱地盤と呼ばれる地盤の特性の把握

③ 常時微動測定のみによる地盤の動特性の推定法の確立

(3) 新規開発減衰材の調配合と三軸試験

簡便な地盤改良法としてソイルコラムセメント等の柱状改良体によらず平面全体を改良する際に適用可能な高剛性で減衰性能に富んだ新規開発減衰材および植栽基盤としても利用できる透水性の高い減衰材の配調合法の確立を目指す。その材料として、ソイルセメント、コンクリート殻、アスファルト、廃タイヤを利用したゴムチップや木片チップ等について検討する。要素試験結果から得られる、等価ヤング係数や等価粘性減衰定数他の諸定数について動的相互作用面から検討し、再配調合を実施し最適な配調合法の確立を目指す。

(4) 複合基礎の動的相互作用解析

提案する複合基礎全体としての地震時の挙動について、研究代表者の自主開発した3次元薄層法に基づく解析ツールと導入済みの三次元動的解析ツール（TDAPⅢ）を用いて解析面から検討する。

4. 研究成果

(1) 繰返し三軸試験機の整備

三軸試験機の整備を行い、ダミー供試体を用いて試験機の性能を確認した。また、植栽用減衰ブロックを想定した供試体の調配合を行い、多くの試験体に対し三軸試験を実施した結果、つなぎ材にアスファルト乳剤を用いると高減衰が得られることが判明した。

(2) 軟弱地盤域の土質調査・常時微動測定

研究2年目に携帯用振動計2台を導入し、主に東京都墨田区内の小学校ほかの公共施設敷地内で常時微動測定を実施した。その結果、軟弱な2種地盤や3種地盤ではH/Vスペクトルのピーク振動数と土質柱状図に基づいて推定した1次振動数は良好な対応を示すことが確認できた。しかし合理的な複合基礎の設計には土質種別の把握も不可欠なため、戸建住宅で多用されるスウェーデン式サウンディング試験での土質判定法として、スクリー部の摩擦音を利用した土質判定の可能性の確認実験を実施した。その結果、集音マイクを取り付ける筐体部の1次振動数域での音圧レベルにより土質

の推定が可能ながことが判明した。図1に実験装置の概要を、図2に粒径と音圧レベルの関係を示す。なお、1700Hzは筐体部の1次振動数である。

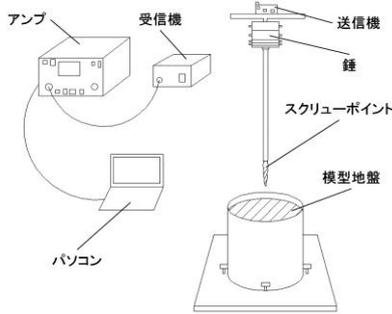


図1 実験装置の概要

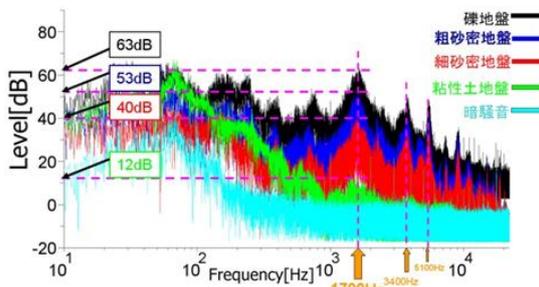


図2 粒径と音圧レベルの関係

(3) 新規開発減衰材の調配合と三軸試験

基礎直下に打設予定の高剛性の減衰材の可能性を繰返し三軸圧縮試験により検討した。その結果、リサイクル率が極めて低い再生微粒分 (RF) と高炉水砕スラグ (BS) を組み合わせることで、高減衰性を有する地盤材料を得ることが出来た。また、高炉水砕スラグの量によってヤング係数をコントロールできる可能性を見出すとともに、開発した地盤材料の拘束圧依存性も解明された。下記に、得られた主用成果を図表で示す。

表 1, 2 に供試体作成に用いた材料および A-D 供試体の配合表を示す。図 3 に供試体 A および C, 図 4 に供試体 B および D の等価ヤング率 E_{eq} および履歴減衰率 h のひずみ依存性を示す。両図には豊浦砂の結果を併せて図示している。両図より以下の事項が明らかになった。

- ① 豊浦砂は等価ヤング率 E_{eq} および履歴減衰率 h のひずみ依存性が高いが、今回試作した全ての供試体ではひずみ依存性が低い。
- ② 全て供試体共にひずみレベルに関わらず 15~22% と大きな h を示す。この値は、豊浦砂ではひずみレベルが 0.001 以上と大きなひずみレベルに達した時である。既往の研究も同様の傾向を示しており、この高い減衰はつなぎ材にアスファルト乳剤、混合材に RF を使用すると得られやすい。

- ③ 図 4 の供試体 B および D の E_{eq} に着目してみると、豊浦砂の E_{eq} より大きい値を示している。供試体 B, D は供試体 A, C に比べ WC の混合材が少なく RF または BS が多く含まれることから、RF または BS は高い E_{eq} が得られる混合材と判断される。

表1 使用材料

材料	説明	部位
木片チップ(WC)	柱・梁(針葉樹)を破碎したもの、アスペクト比4~25、最大長さ40mm	骨材
再生微粒分(RF)	コンクリートを破碎したもの、粒径5mm以下のもの	骨材
高炉水砕スラグ(BS)	高炉で鉄を精製する際、鉄以外の副産物を一気に冷却したガラス質の砂状のスラグ	骨材
アスファルト乳剤(EA)	ノニオン系乳化剤、常温で固化する	つなぎ材
水(WT)	上水道水	つなぎ材

表2 配合表

供試体名	WC/RF/BS	EA/WT	養生日数	つき固め回数
A	0.67/0.33/0	0.85/0.15	28日	30回 (3層)
B	0.33/0.67/0			
C	0.67/0.17/0.17			
D	0.33/0.33/0.33			

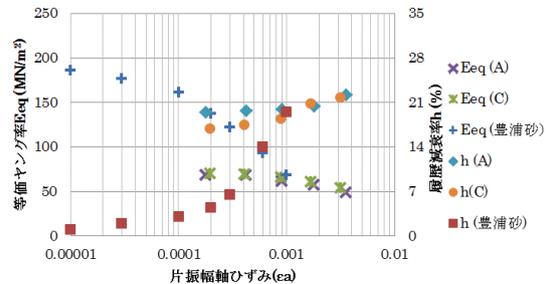


図3 E_{eq} , h と ϵ_a の関係(供試体 A および C)

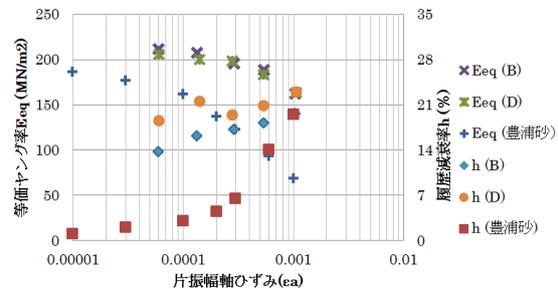


図4 E_{eq} , h と ϵ_a の関係(供試体 B および D)

植栽減衰ブロックおよび高剛性減衰材はつなぎ材にアスファルトを用いているため、拘束力が作用する地中での使用を考えて、最終年度に材料の圧密特性の検討を行った。圧密特性は実際の施工を考慮する上で重要な要因である。検討の結果、混合材の種類によらず不飽和の状態であれば24時間内ではほぼ1次圧密は終了することが確認された。また、材料の繰り返し変形試験やせん断試験には、最低で2時間程度の圧密を行えば試験結果に影響がないことが確認された。飽和状態については、現段階では地下水位以下の使用を想定していないため実施してい

ない。次に、高剛性が得られる高炉水砕スラグと微粒分を混合材とする供試体を対象にせん断試験を実施し、三軸圧縮強度特性の確認を行った。その結果、次の力学特性を有していることが判明した。

- ④ 15%という非常に大きな軸ひずみを供試体に与えても、明確な降伏点が現れなかった。このことは、設計の段階で過度な安全率を想定する必要がないことが示唆される。
- ⑤ 応力とひずみの関係は線形に近い形状が示された。これは通常地盤材料では見られないユニークな関係であり、非線形性の強い材料に比べ設計上の検討が容易である。
- ⑥ 大きな軸変形を受けた供試体の回復率（供試体の元の長さに対する回復した長さ）は93%という大きな回復力であった。このことは、脆性破壊を起こす地盤材料では見られない現象であり、大きなねばりを有する材料ということが言える。
- ⑦ 一軸圧縮試験と三軸圧縮試験の結果を比較した結果、軸ひずみ15%時の主応力差が約3倍もあることが示され、減衰ブロック材および高剛性減衰材に拘束圧を負荷すると強度が増大し易いことが分かった。

(4) 複合基礎の動的相互作用解析

実大規模のRC造構造物を想定した地震応答解析を実施した。その結果、開発を目指している減衰材の有効性が示唆される結果が得られたが、基礎外周部に配置計画していた入力低減基礎梁は、逸散減衰を低減させ、逆効果になる可能性のあることが判明した。以下に基礎周辺部に試作した減衰体を配置した実大構造物に対する地震応答解析を実施し、減衰体が構造物の応答に与える影響評価を実施した結果を示す。

① 建屋および地盤のモデル化

対象とした構造物は、一辺が25mの正方形平面を有する地上5階、地下1階のラーメン構造事務所ビルである。地上部の階高は3mとし、地下部分は5mの埋込み基礎とした。地下部分は剛体と仮定した。上部構造の諸定数を表3に示す。地盤及び基礎部分は軸対称モデルでモデル化している。基礎の等価半径 $R=14\text{m}$ であり、地盤は層厚10mの表層を有する2層地盤とした。表層地盤のせん断波速度 $V_s=100\text{m/s}$ 、支持地盤のせん断波速度 $V_s=200\text{m/s}$ である。

② 解析ケース

解析ケースとして、原地盤のままのCaseAを基準とし、表4に示すように、基礎直下に地盤改良を施したCaseB、基礎側面近傍部

$D=4\text{m}$ に提案したゴムチップ混入砕石アスファルトの減衰体を打設したCaseC、さらにその打設深さを支持層までにしたCaseDの4ケースに対する解析結果について示す。なお、各部の材料諸元は材料試験結果を参考にし表5に示すように設定した。

③ 地盤のインピーダンス関数・等価減衰定数水平、回転、水平-回転連成成分について、各ケースの比較を行った。水平 K_H 、回転 K_R のインピーダンス実部、虚部および等価粘性減衰定数 h_H, h_R を図6および7に図示する。各図の横軸は無次元振動数 $a_0=\omega b/V_s$ である。ここで ω は円振動数、 b は正方形基礎の一辺の半分(12.5m)、 V_s は支持地盤のせん断波速度(200m/s)である。縦軸は支持地盤のせん断弾性係数及び正方形基礎の一辺の半分の積で除した無次元化剛性である。

静的剛性には、基礎直下及び側方地盤のせん断波速度の大きさが影響しており、ケース4の静的剛性がケース2,3のそれよりも大きいことが分かる。この傾向は水平、回転成分どちらにも言えるが、回転剛性は基礎端部の影響が大きいため、回転成分の方が水平成分に比べて違いが顕著となっている。

CaseDのインピーダンス実部は、付加質量の影響が顕著であり、水平成分は無次元振動数 $a_0=0.7$ 、回転成分は $a_0=1.5$ 付近から急激に落ち込んでいる。

水平・回転成分の虚部はCaseDがCaseB, Cよりも全体的に大きくなっており、基礎側方に設置した減衰体の影響が現れている。

水平・回転インピーダンスから算定した等価減衰定数は、CaseDがCaseB, Cよりも大きい。特に回転成分は傾向が顕著であり、別の実施した基礎ブロックの地震観測記録から得られた減衰体は基礎の回転応答成分の低減に効果的であるという傾向と調和的な結果となっている。

④ 建屋応答

図8に自由地盤地表面に対する建屋質点6および2の水平の伝達関数を示す。基礎の側方に減衰体を設置したCaseDの応答倍率はCaseB, Cと比較すると、約30%、10%それぞれ低下しており、減衰体の応答低減効果が現れている。

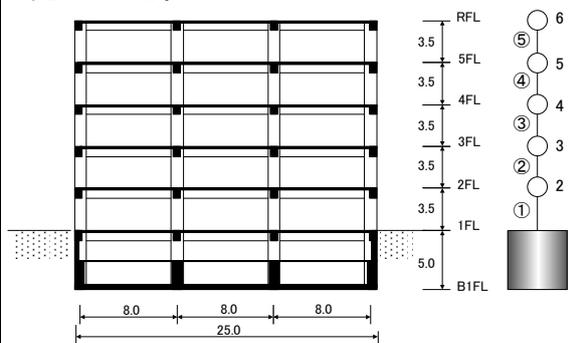


図5 解析モデル (上部構造)

表3 上部構造の諸定数

質点	部材	高さ (m)	重量 (kN)	せん断断面積 (m ²)	断面二次モーメント (m ⁴)
6	⑤	22.5	8750.0	0.3394	1280.0
5	④	19	8750.0		
4	③	15.5	8750.0	0.3394	1280.0
3	②	12	8750.0		
2	①	8.5	8750.0	0.3840	1280.0
基礎		-	28652.0	0.3840	1280.0

表4 解析ケース (地盤, 基礎部)

Case	a	b	c	d	e
A	I	II	II	II	II
B	I	II	III	II	II
C	I	II	III	IV	II
D	I	II	III	IV	IV

I: 支持地盤 II: 表層地盤
 III: 地盤改良部 IV: 減衰体

表5 地盤および地盤部の諸定数

	V _s (m/s)	ρ(ton/m ³)	v	h(%)
I 支持地盤	200	1.8	0.45	2.0
II 表層地盤	100	1.6	0.45	2.0
III 地盤改良部	130	1.7	0.45	2.0
IV 減衰体	165	1.7	0.35	20.0

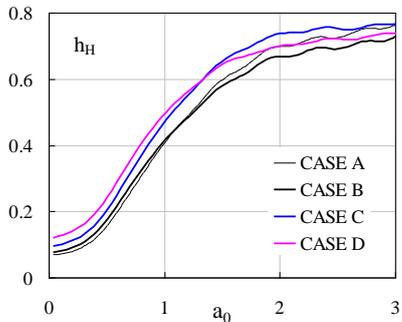
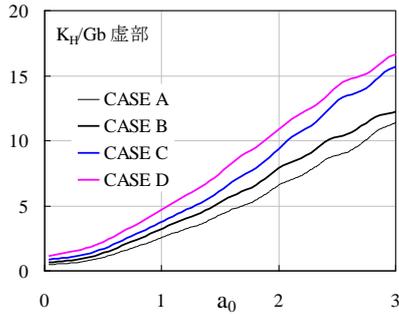
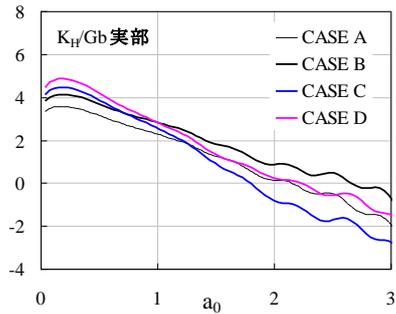


図6 水平インピーダンス関数・減衰定数

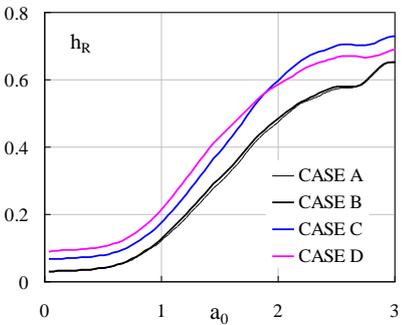
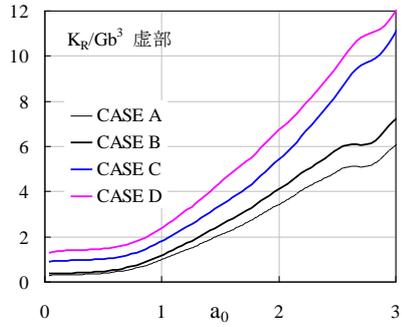
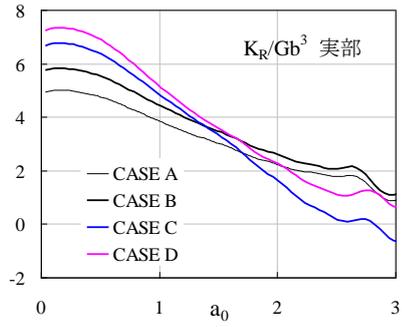


図7 回転インピーダンス関数・減衰定数

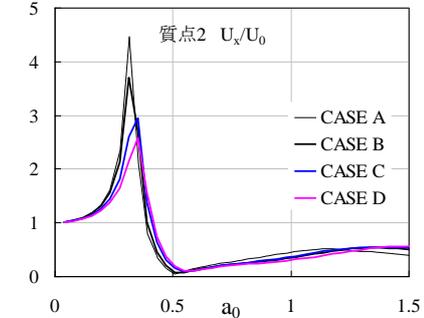
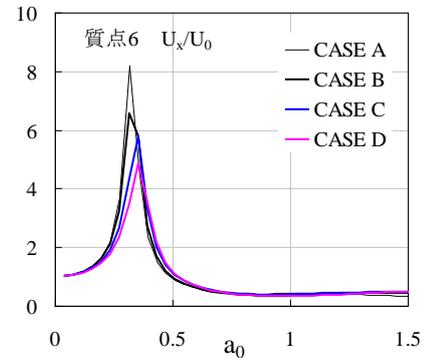


図8 自由地盤地表面に対する建屋質点の伝達関数

5. 主な発表論文等

(研究代表者, 研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 8 件)

- ① Noriaki Sako, Yoshio Ikeda, Yukio Shimomura and Masashi Kawamura, Development of A New Geomaterial for Base Isolation Foundations: Proceedings of the Fifth International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, CD, Paper No.1.29a, 2010. (査読有).
- ② Y. Ikeda, Y. Shimomura, M. Kawamura, and N. Sako, An Analytical Investigation for Attenuation Material with Vibration Reduction Performance, Transactions of the 18th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Division V, Paper No. 1843, pp.1-10, 2009. (査読有).
- ③ 酒匂教明, 川村政史, 下村幸男, 産業廃棄物および建設副産物を用いた高減衰性能を有する地盤材料の開発, 日本建築学会技術報告集, 第 14 巻 27 号, pp. 43-48, 2008. (査読有).
- ④ Y. Shimomura, Y. Ikeda, M. Kawamura and N. Sako, Proposal of New Foundation Construction Works with High Damping and Mitigation Performance; Part 1 Forced Vibration Tests of Two Types of Foundation Blocks and Simulation Analyses, Proc. of the 14th WCEE, DVD, Paper ID:04-01-0015, 2008. (査読有).
- ⑤ Y. Shimomura, Y. Ikeda, M. Kawamura and N. Sako, Proposal of New Foundation Construction Works with High Damping and Mitigation Performance; Part 2 Earthquake Observation of Blocks and Seismic Response Prediction of Full-Scales Foundation, Proc. of the 14th WCEE, DVD, Paper ID:04-01-0017, 2008. (査読有).
- ⑥ N. Sako, M. Kawamura and Y. Shimomura, Development of A Geomaterial with Vibration Damping Capability Against Earthquake Motion Using Industrial Wastes and Construction By-Products, Proc. of the 14th WCEE, Paper ID:04-01-0022, 2008. (査読有).
- ⑦ Y. Shimomura, N. Sako, Y. Ikeda, M. Kawamura and S. Ishimaru, An Experimental Study on Two Types of Foundation Block Supported on Soft

Soil, Scrap Tire Derived Geomaterials : Opportunities and Challenges, pp.197-208, 2007. (査読有).

- ⑧ N. Sako, M. Kawamura and Y. Shimomura, Development of a Geomaterials That has Mitigating Effects Against Vibrations and Suitable Characteristics for Use in Planting Basement, Proceedings of Protect 2007: Structures under Extreme Loading, CD, pp. 1-9, 2007. (査読有).

[学会発表] (計 7 件)

- ① 酒匂教明, 塩川博義, 下村幸男, 川村政史, 摩擦音を利用したスウェーデン式サウンディング試験に関する実験研究, 日本建築学会大会(東北)学術講演会, 2009年8月27日, 東北学院大学.
- ② 川村政史, 酒匂教明, 下村幸男, 木片チップ混合物-アスファルト系混合体の振動特性に関する実験研究, 日本建築学会大会(中国)学術講演会, 2008年9月19日, 広島大学.
- ③ 下村幸男, 池田能夫, 酒匂教明, 川村政史, 石丸辰治, 改良地盤上に支持された基礎ブロックの起振実験-その8 起振実験および地震観測結果の再考察-, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), 2007年8月30日, 福岡大学.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

下村幸男 (SHIMOMURA YUKIO)

日本大学短期大学部・建設学科・教授

研究者番号: 00060179

(2) 研究分担者

酒匂教明 (SAKO NORIAKI)

日本大学短期大学部・建設学科・講師

研究者番号: 00435273

仲村成貴 (NAKAMURA MASATAKA)

日本大学・理工学部・講師

研究者番号: 80328690

(平成 20 年度~平成 22 年度)

川村政史 (KAWAMURA MASASHI)

日本大学・生産工学部・教授

研究者番号: 80059849

(平成 19 年度)

(3) 連携研究者

川村政史 (KAWAMURA MASASHI)

日本大学・生産工学部・教授

研究者番号: 80059849

(平成 20 年度~平成 22 年度:連携研究者)