

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24年6月11日現在

機関番号：55401

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560530

研究課題名（和文） 骨格構造の破壊を伴う粘土地盤の長期過大沈下挙動の究明と予測理論の構築

研究課題名（英文） Study on long-term large settlement behavior of clay ground related to clay structure failure and construction of its prediction theory

研究代表者

森脇 武夫（MORIWAKI TAKEO）

呉工業高等専門学校・環境都市工学分野・教授

研究者番号：00166456

研究成果の概要（和文）：粘土地盤の地盤沈下が当初の予測を大きく超えて長期にわたって起こることがあり、社会基盤施設の建設・維持・管理の面で大きな問題になっている。そこで本研究ではこのような地盤沈下を起こすメカニズムを明らかにするために新しい実験装置を開発・製作した。この装置を用いて実験を行った結果、自然堆積粘土では骨格構造の破壊が沈下挙動に大きく影響を及ぼし、繰返し荷重が作用する場合は一定荷重の場合と比べて沈下量が大きくなることなどが明らかとなった。また、このような沈下現象を表現可能なモデルを構築した。

研究成果の概要（英文）：It is reported that the observed values of the consolidation settlement of clay ground were larger than the values predicted by the existing consolidation theories. In this study, the newly developed consolidation tests were carried out on the naturally deposited clays under constant loading and cyclic loading to evaluate the skeleton structure of clay. It was clarified that the change in the skeleton structure of clay is influenced by the loading pattern and the destruction of the skeleton structure is larger under the cyclic loading than under the constant loading as the consolidation time goes by. Furthermore, the new consolidation model was established to express these settlement behaviors.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・地盤工学

キーワード：地盤工学、国土整備、モデル化、地盤沈下、圧密

1. 研究開始当初の背景

粘土地盤の圧密沈下問題は、テルツァーギ以来、数多くの研究者によって研究され、多くの場合には工学的に満足できる精度で沈下予測が可能となっている。しかし、関西空港人工島の埋立工事に伴う洪積粘土地盤の

圧密沈下や、交通荷重および新潟平野や有明平野における季節的な地下水の汲み上げに伴う繰返し荷重を受ける沖積粘土地盤の長期沈下など、当初の予測を大きく上回る沈下が発生して社会問題になる事例も少なからず発生している。このような現象の起こる最

も大きな原因は、長年の堆積期間に形成された粘土の骨格構造が新たな载荷によって破壊され、これによって大きな沈下を生じるが、この骨格構造の変化を現在の圧密沈下予測法では考慮できていないことにある。

土の骨格構造を取り扱った研究は比較的古くからあるが、その大部分は骨格構造を定性的に評価したものである。近年、骨格構造の定量的評価が試みられ、渋谷ら(2001)や真島(2000)らなどによってベンダーエレメント試験によって粘土の骨格構造の程度を評価する試みがなされている。しかし、これらの成果は供試体全体をひとつのせん断波速度で表したものであり、圧密過程に場所的に変化するせん断波速度の分布を調べたものではない。

粘土の構成モデル(応力～ひずみ～時間関係)は様々なタイプのものが提案されている。しかし、骨格構造の程度を構成モデルに組み込み、圧密過程の構造変化を表現できるものはほとんど見当たらない。唯一、浅岡ら(2003)が弾塑性モデルに骨格構造の破壊を表現できるモデルを提案し、骨格構造の破壊に伴う遅れ圧密沈下が表現できることを報告している。しかし、このモデルは時間依存性を考慮できない弾塑性モデルがベースになっているため、残留沈下を支配する二次圧密現象や二次圧密中に骨格構造の剛性が回復する現象などを表現することができない。

2. 研究の目的

本研究では、前述の背景をもとに、圧密過程に粘土骨格の構造変化によって有効応力やひずみの地中分布がどのように変化するかを明らかにし、圧密過程に沈下量が急増するメカニズムや残留沈下が継続する理由を明らかにする。さらに得られた知見をもとに、骨格構造の変化を考慮できる二次圧密モデルを構築して、実問題への適用性を検討する。具体的な研究目的は以下の通りである。

(1) 粘土供試体中を伝播するせん断波速度を測定できるベンダーエレメントを取り付けた分割型圧密試験装置を製作し、圧密過程に粘土層の深度方向で生じる粘土骨格の構造変化を力学的な実験事実に基づいて定量的に解明し、骨格構造の破壊に伴って生じる粘土地盤の長期過大沈下挙動のメカニズムを明らかにする。

(2) 二次圧密を表現できる弾粘性モデルをベースとして、実験で得られた知見を基に、粘土骨格の構造変化と時間依存性挙動を表現できる粘土の構成モデルを構築する。構築した骨格構造の変化を考慮できる二次圧密モデルを用いて、構造変化が問題となるような繰返し荷重を受ける沖積粘土地盤の長期沈下や洪積粘土地盤の残留沈下を精度良く予測できる圧密解析法を確立する。

3. 研究の方法

(1) ベンダーエレメント付分割型圧密試験装置の製作

本研究では、粘土供試体中を伝播するせん断波速度を測定するためのベンダーエレメントを装着した3個の密封型圧密容器を製作し、これを用いて3層の分割型圧密試験装置を製作する。圧密容器は背圧が負荷できる密封型とし、その加圧板に送信側のベンダーエレメント、底板に受信側のベンダーエレメントを装着し、粘土供試体中を伝播してきたせん断波の伝達時間を測定できる波形発生受信測定システムを製作する。

本研究では、繰返し荷重を受ける粘土が骨格構造の破壊に伴って大きく圧密沈下し、それが長期間継続する様子を明らかにしようとしている。そこで、本研究ではパソコンを介した電空変換器によって空気圧を制御し、様々な波形と繰返し周期で圧密荷重を与えることのできる载荷システムを製作する。

分割型圧密試験では、非接触型の変位計を用いて供試体の圧密変位量を測定する。また、本研究では間隙水压計を圧密容器の底板に埋め込んで間隙水压を測定する。これらのセンサーによって測定されたデータをデータ収録システムを用いて収録する。

(2) 圧密過程の粘土骨格の構造変化の定量的評価

初期の骨格構造が異なる不攪乱自然粘土とそれを練り返した試料および高含水比で練り返し再圧密した試料に対して、骨格構造の破壊が小さいと考えられる過圧密領域、骨格構造が大きく崩壊する過圧密領域から正規圧密領域にまたがる領域、および骨格構造が崩壊した後に二次圧密期間中に骨格構造が回復する正規圧密領域において、ベンダーエレメント試験を併用した分割型圧密試験を行い、圧密過程のせん断波速度の変化を層別に測定する。このとき与える荷重の形態としては定荷重と繰返し荷重の2形態とする。

(3) 粘土骨格の構造変化を考慮できる粘土の構成モデルの構築

本研究では、一次圧密と二次圧密を区別することなく統一的に表現することが可能な吉国が提案した弾粘性モデルをベースに、これに骨格構造の変化を考慮できる機能を付加する。吉国の提案する弾粘性モデルでは過圧密領域と正規圧密領域との間にある圧縮曲線の屈曲点を弾性域と塑性域を分離する降伏点とは捉えず、粘性係数が急変する点と見なしている。

そこで本研究では、粘土の骨格構造の変化を粘性係数の変化と捉えて、骨格構造の変化に伴う粘性係数の変化の定式化を試みる。具体的には、弾粘性モデルにおける粘性係数は間隙比と圧密応力に応じて決まり、粘性係数

～間隙比～圧密応力の空間内に粘性係数平面が唯一存在するとしているが、本研究では粘土の骨格構造の程度によってこの粘性係数平面が変化すると考え、実験で得られた結果に基づいてこの粘性係数平面の移動の定式化を行い、骨格構造の変化を考慮できる弾粘性モデルを構築する。

4. 研究成果

(1) ベンダーエレメント付分割型圧密試験装置の製作

図-1 は本研究で制作したベンダーエレメント付きの密閉型圧密容器で、この圧密容器を3台連結して分割型圧密試験装置を製作した。本装置では、ファンクションジェネレータで作成された電圧波形が DA ボードから発信側ベンダーエレメントとデジタルオシロスコープに対して同時に送信され、受信側ベンダーエレメントで受信した電圧変化時刻歴データが発信側波形とともに GP-IB インターフェイスを介してデジタルオシロスコープに取り込まれ、発・受信波形の位相差（伝達時間 Δt ）をモニター上で計測する。この伝達時間 Δt と供試体高さ H からせん断波速度を $V_s = H / \Delta t$ によって算出し、せん断弾性係数を $G = \rho_t \cdot V_s^2$ として算出した。

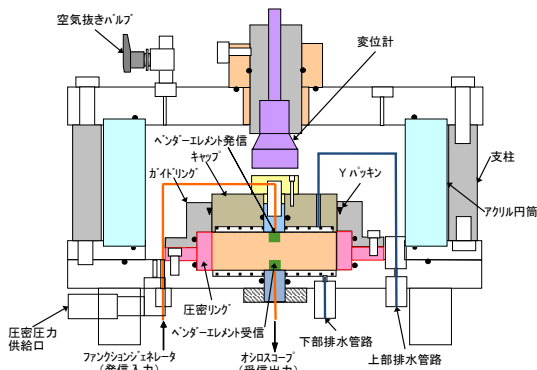


図-1 ベンダーエレメント付き圧密容器

(2) 圧密過程中的粘土骨格の構造変化の定量的評価

試験に用いた試料は、広島港の江波地区と五日市地区で採取された沖積粘土で、各粘土の物理特性は江波粘土：G.L. -11.0～-11.8m, $G_s=2.764$, $w_L=92.4\%$, $I_p=55.9$, 五日市粘土：G.L. 不明, $G_s=2.739$, $w_L=115.3\%$, $I_p=69.7$ である。

圧密試験は、荷重増分比1で、10kPa から80kPaまで24時間サイクルで段階荷重して最終段階を約1週間継続するケースと、320kPaまで24時間サイクルで段階荷重して最終段階を約1週間継続するケースを行った。また、最終段階以外は3つの供試体とも両面排水条件とし、最終段階では3つの供試体の排水経路を直列につないで供試体1の上面を排水

面、供試体3の下面を非排水面とする片面排水条件とした。

図-2 は、圧密時間が24時間でのせん断弾性係数と間隙比の関係を描いたものである。この図から、過圧密領域から正規圧密領域へ入る場合のせん断弾性係数は間隙比の減少（密度の増加）とともに単純に増加せず、一度減少してから増加していることが分かる。これは、圧密降伏応力付近で先行圧密圧力によって形成された骨格構造が壊されることによってせん断波の伝達速度が減少したためと考えられる。

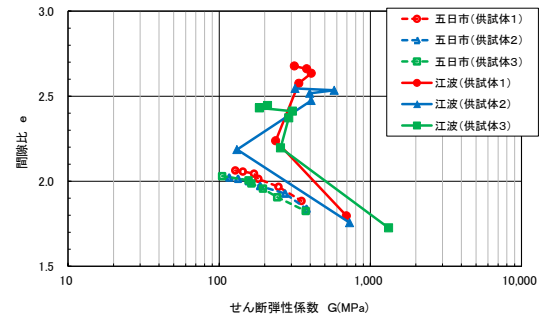


図-2 間隙比とせん断弾性係数の関係

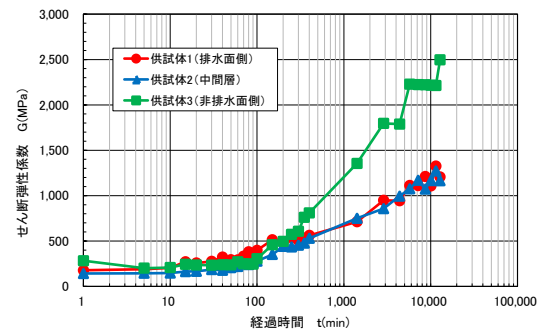


図-3 正規圧密状態でのせん断弾性係数の経時変化

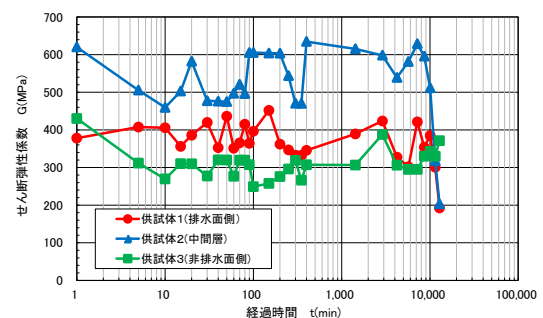


図-4 圧密降伏応力付近でのせん断弾性係数の経時変化

図-3 は、正規圧密領域である最終荷重段階における各層のせん断弾性係数の経時変化を示したものである。この図から、正規圧密領域ではせん断弾性係数は時間の経過（圧密の進行）とともに増加していることが分かる。一方、図-4 は、圧密降伏応力（100kPa）より

わずかに小さい圧密圧力（80kPa）が载荷された最終段階における各層ごとのせん断弾性係数の経時変化を示したものである。この場合にはせん断弾性係数は時間の経過とともにやや減少しており、その程度は排水面側ほど大きい傾向にある。これは、先行圧密圧力によって形成されていた骨格構造が圧密降伏応力に近い新たな荷重によって徐々に破壊され始めているためと考えられる。

図-5は、80kPaまで载荷した時の間隙比とせん断弾性係数の関係であり、繰返し荷重の排水面側の20kPaの値がやや大きいものの、排水面、非排水面ともに繰返し荷重を受けている供試体のほうが間隙比の変化に伴うせん断弾性係数の変化が大きいといえる。これは、繰返し荷重の方が有効応力の変化が継続して作用するため骨格構造が変化しやすいからだと考えられる。

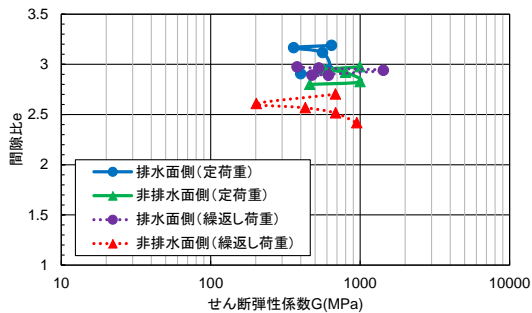


図-5 過圧密状態でのせん断弾性係数の繰返し荷重と定荷重との比較

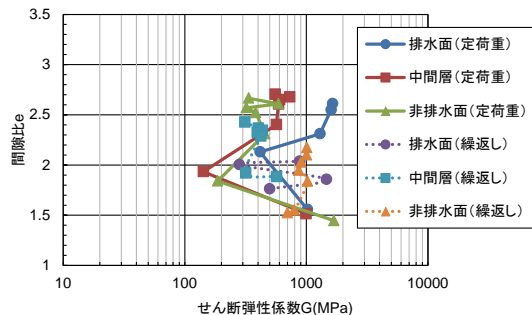


図-6 正規圧密状態でのせん断弾性係数の繰返し荷重と定荷重との比較

図-6は320kPaを载荷した場合の間隙比とせん断弾性係数の関係を示したものであり、320kPaの定荷重を载荷した時の排水面側の挙動と非排水面側の挙動の違いを示している。この図において、定荷重の場合は160kPaを载荷した後間隙比の減少に伴いせん断弾性係数が大きく増加しているのに対し、繰返し荷重を载荷した場合は160kPaを载荷しても間隙比の減少に伴いせん断弾性係数が増加していないことが分かる。これは、定荷重を载荷時は320kPaの荷重によって密度が増加して骨格構造が再構築されることからせん断弾性係数が増加しているといえる。それに

対し、繰返し荷重载荷時は平均圧密応力が定荷重より小さいために骨格構造が定荷重ほど再構築されずせん断弾性係数が増加しなかったと考えられる。

(3) 粘土骨格の構造変化を考慮できる粘土の構成モデルの構築

式(1)は、吉国(1994)が提案した非線形弾粘性レオロジーモデルを用いた一次元圧密方程式である。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{(1+e_0) \cdot k}{a_v \cdot \gamma_w} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{1+e_0}{a_v \cdot \gamma_w} \frac{\partial k}{\partial z} \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{dp_z}{dt} + \frac{\gamma'z + p_z - u}{a_v \cdot \eta} \quad (1)$$

この圧密方程式の右辺第1項と第2項は排水に伴う間隙水圧の減少分を表わす排水項、右辺第3項は圧密荷重すなわち全応力の増加に伴う間隙水圧の増加分を表した荷重項、右辺第4項は弾粘性圧密理論の最大の特徴である有効応力緩和項で、有効応力の緩和に伴う間隙水圧の増加分を表している。すなわち、弾粘性圧密理論における圧密現象は、排水項、荷重項、および有効応力緩和項によって消散、または発生する間隙水圧の大小関係に支配される間隙水圧の時間的な変化現象と捉えることができる。

式(1)を用いて圧密問題を解くためにはレオロジーパラメータである a_v と η を決定する必要があり、弾性成分を支配する圧縮係数 a_v と粘性係数 η は、次式によって定義されている。

$$a_v = 0.434 \cdot C_\gamma \cdot \frac{1}{\sigma_z'} \quad (2)$$

$$\log \eta = \frac{e_0 - e}{C_\alpha} + \frac{C_\beta - C_\alpha}{C_\alpha} \log \left(\frac{\sigma_{z0}'}{\sigma_z'} \right) + \log \eta_0 \quad (3)$$

なお、この式中の η_0 は (e_0, σ_{z0}') における粘性係数である。また、 C_α は段階载荷圧密試験における圧密曲線の二次圧密過程の傾きで、 C_β と C_γ は段階载荷圧密試験における圧縮曲線と除荷・膨潤曲線の傾きである。

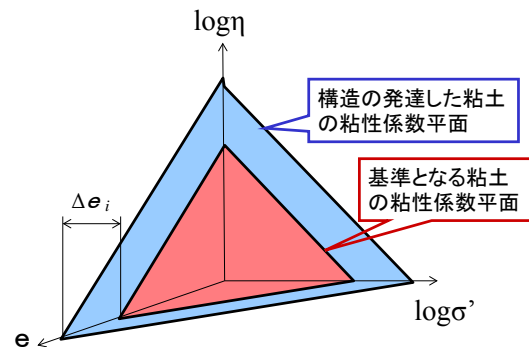


図-7 粘性係数平面

本研究では、骨格構造の変化を考慮できるように粘性係数を図-7のように設定し、その発展則を次式で規定した。

$$\Delta \log \eta = \frac{\Delta e_i}{C_\alpha} \left(1 - a \frac{\Delta e}{\Delta e_i} \right) \quad (4)$$

ここに、 Δe_i は骨格構造の発達によって生じた間隙比の増加分、 a は骨格構造の変化のしやすさを表す係数である。

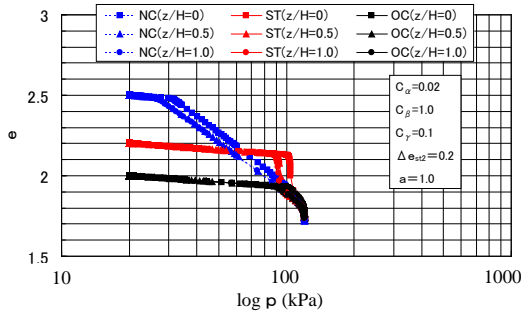


図-8 圧縮曲線の解析結果

図-8は、本研究で導入した粘性係数の発展則を用いた弾粘性モデルで解析した圧縮曲線（STと表示）である。解析条件は、層厚10mの片面排水条件の地盤が、圧密圧力20kPaから200kPaまで増加した場合で、自重の影響は無視している。また、図には骨格構造の変化を考慮しない弾粘性モデルで解析した正規圧密状態（NCと表示）とOCR=2の過圧密状態（OCと表示）の解析結果も併せて示してある。骨格構造の変化を考慮しないモデルの場合は過圧密状態から正規圧密状態に移行する際に正規圧密状態の圧縮曲線に一致するように湾曲しているが、骨格構造の変化を考慮できる本研究のモデルでは正規圧密状態の圧縮曲線を大きく飛び出してから急激に間隙比が減少するという自然堆積粘土の特徴をよく表現できている。

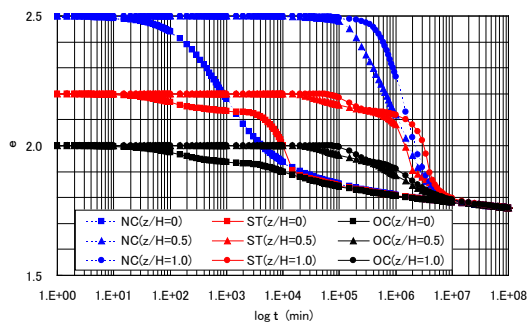


図-9 圧密曲線の解析結果

図-9は、本研究で導入した粘性係数の発展則を用いた弾粘性モデルで解析した圧密曲線と骨格構造の変化を考慮しない場合の解析結果を比較したものである。骨格構造の変

化を考慮しないモデルでは間隙比の減少量に違いはあるものの、典型的な熱伝導型の圧密曲線になっているが、骨格構造の変化を考慮できるモデルでは間隙比の減少が途中で停滞し、正規圧密状態より遅れる現象を表現できている。このように、本研究で導入した粘性係数の発展則を用いた弾粘性モデルでは自然堆積粘土の圧密挙動の特徴を再現することが可能となった。

(4) まとめ

- ① 粘土供試体中を伝搬するせん断波速度を測定できるベンダーエレメントを装着した密閉型圧密容器を3台製作するとともに、これらを連結することによって圧密過程中的間隙比、間隙水圧、せん断波速度などがそれぞれの層ごとに計測可能な分割型圧密試験装置を製作した。
- ② ベンダーエレメント付きの分割型圧密試験装置を用いて、不攪乱自然粘土供試体中を伝搬するせん断波速度を測定し、圧密過程中的に粘土骨格の構造変化を観測した。その結果、粘土の骨格構造の強固度を表すせん断弾性係数は、圧密圧力が増加し、間隙比が減少（密度が増加）すると過圧密領域では単純に増加するが、先行圧密圧力をまたぐ荷重を載荷した場合は間隙比が減少しても単純には増加せず排水面側から減少し、さらに正規圧密領域に入ると再び排水面側から増加していることが明らかとなった。これは、先行圧密圧力によって形成された骨格構造が圧密降伏応力付近で排水面側から破壊されるが、正規圧密領域に入ると新たに強固な骨格構造が排水面側から形成されるためであることが分かった。
- ③ 自然堆積粘土の不攪乱試料に対して、堆積時の骨格構造の破壊が小さいと考えられる過圧密領域、骨格構造が大きく崩壊する過圧密領域から正規圧密領域にまたがる領域、および骨格構造が崩壊した後に二次圧密期間中に骨格構造が回復する正規圧密領域において、分割型圧密試験を行い、圧密過程中的のせん断波速度の変化を層別に測定した。このとき与える荷重としては定荷重と繰返し荷重の双方とした。その結果、繰返し荷重が作用する場合は定荷重の場合と比べて骨格構造の破壊が進んで沈下量が大きくなるが、その程度は堆積時の骨格構造の影響を強く受ける過圧密領域で大きく、特に圧密降伏応力付近で顕著であることが明らかとなった。
- ④ 一次圧密と二次圧密を区別することなく統一的に表現することが可能な弾粘性モデルをベースに、これに骨格構造の変化を考慮できる機能を付加した弾粘性モデルを構築した。このモデルでは、圧密降伏応

力付近で骨格構造の破壊によって圧縮量が急増することを圧縮曲線および圧密曲線に反映させることが可能となった。

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)

[学会発表] (計3件)

- ①森脇武夫、脇岡宏行、自然堆積粘土の圧密に伴う骨格構造の変化に関する研究、平成24年度土木学会中国支部研究発表会発表概要集、Ⅲ-11、2012年6月9日、呉市。
- ②森脇武夫、金森悠、圧密に伴う不攪乱自然堆積粘土の骨格剛性の変化について、第46回地盤工学研究発表会発表講演集、pp.309-310、2011年7月5日、神戸市。
- ③森脇武夫、山崎裕也、ベンダーエレメント付き分割型圧密試験装置による粘土の圧密過程中的せん断弾性係数の測定、第45回地盤工学研究発表会発表講演集、pp.253-254、2010年8月20日、松山市。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

森脇 武夫 (MORIWAKI TAKEO)

呉工業高等専門学校・環境都市工学分野・教授

研究者番号：00166456