

氏名	岩田 秀樹
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博甲第1100号
学位授与の日付	平成21年3月23日
学位授与の要件	課程博士(学位規則第4条第1項)
学位授与の題目	海上空間の有効利用を目的とした新たな浚渫土固化処理法の開発および大型浮体内での流体共振特性の解明に関する研究
論文審査委員(主査)	斎藤 武久(理工研究域・准教授)
論文審査委員(副査)	石田 啓(理工研究域・教授), 松本 樹典(理工研究域・教授), 由比 政年(理工研究域・教授), 間瀬 肇(京都大学・教授)

In this paper, a new manufacturing technique of stabilized dredging soil and characteristics of fluid resonance in very large floating structures are discussed for an effective use of maritime space in harbors and ocean.

In relation to reclamation in harbors, we focus on a compressed-air mixture pipeline method in a pre-dredging soil disposal method in order to realize a large scale construction and a reduction of constructional period. A manufacturing technique of high quality stabilized dredging soil is newly presented as a compressed-air mixture pipeline method. In the technique, a simple drum style mixer without power-driven machinery is used at the process of mixing dredging soil with cement through a compressed-air mixture pipeline in order to improve the mixing of two materials.

On the other hand, concerning very large floating structures, we focus on narrow gaps which appear under construction of the structures or exist in the structural inside from the viewpoint of occurrence of fluid resonance in the gaps. Characteristics of resonant phenomena in the narrow gaps are investigated experimentally. And the appearance condition of fluid resonance in the gaps is newly derived by an energy conservation method which is used in the analysis of natural frequency of fluid in a U-tube with different diameters.

本研究は、港湾および沖合での海上空間の有効利用を目的に、2つの観点から検討を行ったものである。まず、港湾埋立工事に関して、浚渫土事前処理工法の中で、埋立工事のような大規模急速施工が求められる条件下では特に有効とされている管中混合固化処理に着目し、高品質な浚渫土固化処理土製造法の開発について提示した。また、沖合いでの大型浮体の建設技術に関して、建設の途中あるいは建設後に構造中に内在する可能性のある浮体要素間の微小な間隙の存在に着目し、この間隙内での特異な流体運動特性である流体共振特性に関する検討を行った。以下に本研究で得ることのできた主要な知見を要約する。

1. 管中混合固化処理にドラム型ミキサを適用した高品質な浚渫土固化処理土製造法の開発

浚渫土を管路で空気圧送する過程で固化材を投入し、目的とする場所へ、固化処理土を直接打設する際に、浚渫土と固化材の混合促進を目的とした、新たな圧送方法であるドラムミキシング工法について提案した。

本工法は、管路輸送中の浚渫土と固化材の混合の促進を達成するものであり、従来工法に対する有用性について実施工により確認した。また、本工法で使用する非動力型ミキサについて、ミキサの形状を変化させた系統的な実験結果から、最も効率的に固化処理土を製造するための適切な形状について定量的に考察した。さらに、送泥量 600m³/h で固化処理土を製造し、実用規模施工において製造された固化処理土の強度特性について確認した。なお、実験時のミキサの圧力損失、圧送元圧について調査し、現有の作業船仕様と対比し、実用上の問題の有無についても確認を行っている。以下に、高品質

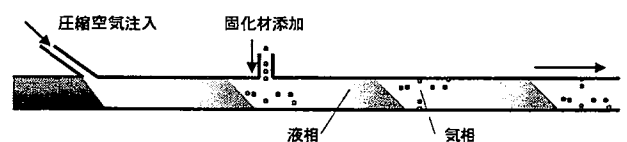


図-1 管中混合固化処理の概念

な浚渫固化処理土製造法の開発に関して得られた主要な知見について要約する。

(1) 浚渫土を管路で空気圧送する過程で固化材を投入し、目的とする場所に固化処理土を直接打設する管中混合固化処理において、浚渫土と固化材の混合促進を目的とした、新たな圧送方法であるドラムミキシング工法について

提案した。管中混合固化処理は、空気圧送時の気液二相流れの途中で固化材を添加することで、管路圧送中に泥土と固化材の混合を行い、目的の場所に固化処理土を直接打設する工法であるが、管中に投入した固化材が気相部に偏って完全な混合ができず、固化処理土の品質低下を招くことが指摘されていた（図-1 参照）。この様な現状を踏まえ、圧送する泥土と固化材の混合促進を実現するため、管路途中に中空円筒状のシンプルな構造の非動力型ミキサ（以下、ドラム型ミキサと略記する）を設置した（図-2 参照）。これにより、固化材は従来通り、ドラム型ミキサ流入前の空気圧送管路途中で、圧送される泥土の送泥量に対して定量的に添加された後、空気圧送の際に生じるプラグ流が、ドラム型ミキサ内に高速で流入した際に発生する衝突をとまなう乱流状態を利用して、泥土と固化材の混合を促進することが期待できる。この際、複数のプラグを同時に混練することになるので本工法では、固化材添加量の均等化が同時に期待できる。

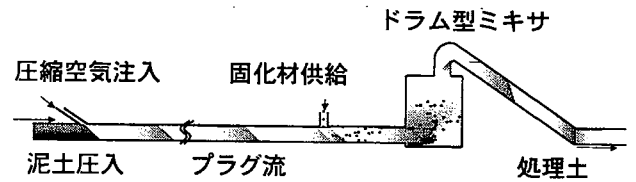


図-2 ドラムミキシング工法の概要

(2) ドラムミキシング工法における圧送方法の有用性を検討するために、現地規模への対応が可能な、送泥量 50 m³/h 級のプロトタイプ実験による浚渫固化処理土の製造を行い、処理土の強度特性について、ドラム型ミキサを設置しない従来工法を比較対象として考察した。強度特性は、実験で製造された固化処理土とあらかじめ室内配合試験で製作した供試体の一軸圧縮強度の比（現場/室内強度比と略記する）で評価した結果、従来工法の場合、強度比は 0.4~0.6 に留まり、強度のばらつきを示す変動係数 CV と共に圧送距離による変化が見られた。一方、ドラム型ミキサを設置した場合、強度比は圧送距離に関わらず、およそ 0.8 の水準に達し、一般的な施工機械による処理土の強度比の一般値 0.4~0.8 と同等もしくはそれ以上の値となることが分かった。さらに、処理土のばらつきは、圧送距離に関わらず変動係数 10% の水準に抑えることができていた。なお、排泥ピットには改良土が一定間隔で断続的に排出されていたことから、ミキサ内でいったん乱流状態となった後、ミキサ下流の圧送管路でプラグ流が再び形成されていることが確認できた。以上の結果は、ドラム型ミキサの設置により、浚渫土と固化材の混合が促進され、短い圧送距離でばらつきの少ない高い強度の処理土が得られることを示すものであり、施工性、経済性の観点から本工法の有用性を示唆するものである（図-3 参照）。

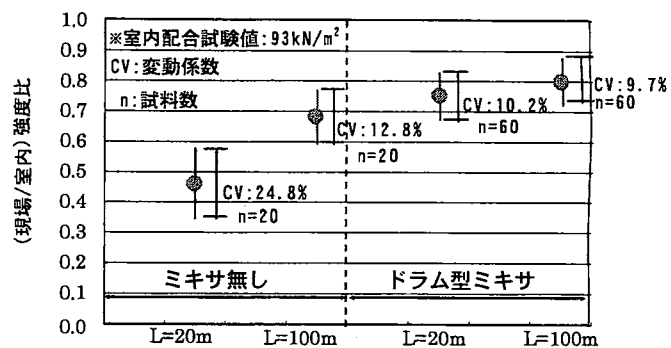


図-3 処理土の強度比（現場/室内）および変動係数特性（プロトタイプ実験）

(3) 本工法は、ミキサ内で発生する乱流により、泥土と改良材の混合促進を期待したものであるため、ミキサの形状により、ミキサ内の流動の状態が変化し、固化処理土の品質に影響を与えるものと考えられる。そこで、泥土と固化材から効率的に固化処理土を製造するためのミキサの適切な形状を検討するため、ミキサの高さ h 、直径 d および容積 V をパラメータとした異なる 5 種類のミキサを製作し、ミキサ形状検証実験を行った。実験はミキサタイプごとに実施し、実験中に採取した改良土の強度とばらつきについて比較した。なお、ミキサ形状を評価するパラメータとして、ミキサ高さ h をミキサ直径 d で除した値であるミキサ形状比 h/d とミキサ容積 V をプラグ流中の液相部代表体積 F で除した値であるミキサ容積比 V/F を定義した。実験ではミキサ形状比 h/d とミキサ容積比 V/F をパラメータとして固化処理土の強度特性を比較評価した。その結果、ミキサ形

状比は、1.56 の場合に処理土の強度が最も高く、変動係数が小さくなることが明らかとなった。ミキサ容積比については、3~30 の範囲で設定することにより比較的ばらつきの少ない処理土が製造できることが明らかとなった。以上のように、ミキサ内の流動状況が最もバランスした状態で浚渫土と固化材の混合が行われる最適なミキサ形状について定量的に把握することができた。

(4) 本工法の実用規模における有効性を確認するため、港湾埋立工事規模を想定した送泥量 600m³/h 級の実用規模施工実験を行った。ここでは、ミキサ形状検証実験で得られたミキサ形状をもとに設計製作したドラム型ミキサを使用した。実験結果より、現場/室内強度比は平均 0.83、変動係数 5.3%であり、プロトタイプ実験と同等の強度特性を示す固化処理土の製造に成功した。また、実験中の圧送元圧、管内圧力分布およびミキサの圧力損失について調査した結果、実験中の圧送元圧は約 130kPa、ミキサ圧力損失は、概ね 30kPa であったことから、汎用コンプレッサの仕様や作業船の圧送機仕様を考慮すれば、実用上問題のない値であることが確認された。

2. 大型浮体を構成する浮体要素間の間隙内における流体共振特性とその発生条件

沖合いでの大型浮体の建設において、建設の途中あるいは建設後に構造物中に内在する可能性のある浮体要素間の微小な間隙の存在に着目し、この間隙内での特異な流体運動特性である流体共振特性に関する検討を行った。流体共振発生条件に関しては、管径が非一様なU字管内の流体固有振動数の解析手法を応用し、入射波および浮体の幾何形状条件を含む形で流体共振発生条件の理論解を誘導した。さらに、実験結果との比較から、理論解の妥当性および精度向上について詳細な検討を行った。以下に、大型浮体を構成する浮体要素間の間隙内における流体共振特性とその発生条件に関して得られた主要な知見について要約する。

(1) 2つの矩形浮体要素から構成された大型浮体内の間隙を対象に、間隙内での流体共振の発生条件に関する理論解の誘導を行った。誘導に際して、既往の実験結果で得られている流体共振発生条件に関する定性的な特徴に着目した。具体的には、間隙内での流体共振の発生を入射波の無次元波数で整理した場合、喫水深および間隙幅の増加と共に、流体共振発生時の無次元波数は低周波側へシフトする特徴である。この特徴は、図-4(a)中の入射波側部、入射波側浮体下部および間隙部からなる領域(塗りつぶし部)をU字管に見立てた場合、

U字管内の流体の固有振動数がU字管を満たす流体長さの平方根に反比例することに類似している。以上の特徴を参考に、本研究では、まず、管径が非一様なU字管内の流体固有振動数の解析手法を応用し、間隙内の流体振動に関する固有振動数を誘導した。この際、対象領域を図-4(b)のように、入射波領域、浮体下部領域および間隙内部領域へと分割し、各領域における運動エネルギーおよび領域全体の位置エネルギーによるエネルギー保存則を用いた。結果として、入射波条件および浮体の幾何形状を含んだ形で固有振動数を誘導することに成功している。

(2) (1)で誘導した ω_g と入射波の角振動数との関係から、2つの矩形浮体要素の間隙内の流体共振の発生条

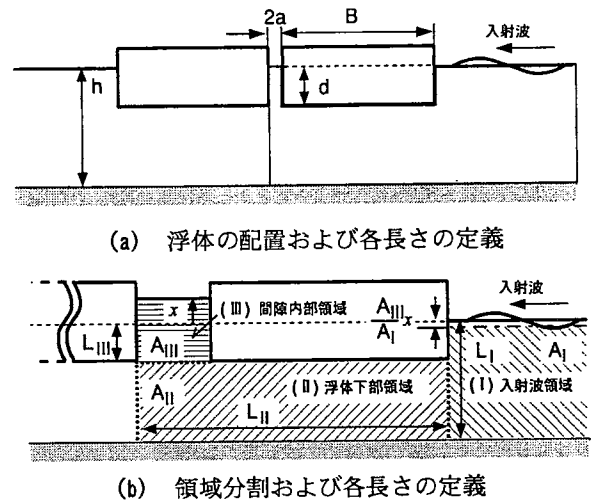


図-4 浮体の配置および領域分割

$$\omega_g = \sqrt{\frac{g(1 + \frac{A_{III}}{A_I})}{L_I \frac{A_{III}}{A_I} + L_{II} \frac{A_{III}}{A_{II}} + L_{III}}} \quad \dots (1)$$

$$\omega_g = \sqrt{\frac{g}{\frac{2aB}{h-d} + d}} \quad \dots (2)$$

$$kl \tanh kh = 1 \quad \dots (3)$$

件を、入射波条件、水深、浮体の喫水および浮体の幾何学形状を含む無次元の関係式として新たに誘導した(式(3)参照)。また、実験結果との比較から、この理論解の妥当性について検討した。結果、本研究で対象とした実験条件の範囲では、誘導した間隙内の固有振動数を用いて、間隙内での流体共振の発生がおおよそ予測できることが明らかとなった(図-5参照)。

(3) 上述の間隙が1つの場合から発展し、複数の間隙を構成する場合を想定し、間隙個数の増加に伴う、共振特性の変化と発生条件について検討した。検討の第一段階として、3つの矩形浮体要素間に2つの間隙を伴う場合を対象に、流体共振の有無およびその特性について実験的に考究した。結果、2つの間隙を伴う場合、流体共振の発生が既に確認されている1つの間隙の場合と同様な1次モードの流体共振の発生が確認された。さらに、間隙間で水面変動に位相差を伴う2次モードの流体共振が発生することが確認された。また、1次モードの流体共振は、間隙が1つの場合に比べ、入射波が低周波の場合に発生することが分かった。

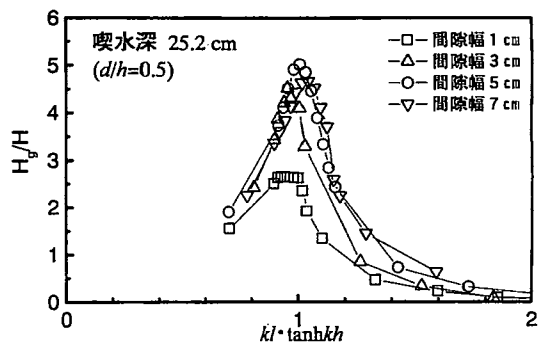


図-5 流体共振の発生条件 $k l \tanh kh$ を用いた間隙内の波高変化特性の整理

(4) (1)で適用した管径が非一様なU字管内の流体振動の解析法を、間隙が2つの場合に拡張し、間隙内の流体振動に関する固有振動数を誘導することに成功した。さらに、間隙が2つの場合においても、間隙が1つの場合と同様に、流体共振の発生条件に関する理論解を、入射波条件と浮体の幾何形状条件からなる無次元の関係式(1次モード: $k l_1 \tanh kh=1$, 2次モード: $k l_2 \tanh kh=1$)として誘導した。実験結果との対比から、本研究で対象とした実験条件の範囲では、新たに誘導された流体共振の理論解により、比較的良好に流体共振の発生を予測できることが明らかとなった。

(5) 流体共振の発生条件に関する理論解の精度向上を目的として、解析領域の検討、さらに、摩擦および局所的な形状損失といったエネルギー損失効果を取り込んだ理論解の誘導を再度試み、実験結果との比較から種々の効果の検討を行った。結果として、解析対象領域としては、U字管を想定した領域を対象とすることで、良好な精度が確保できることが確認できた。また、エネルギー損失の効果として、間隙角からの渦の放出を想定した局所的な形状損失効果を取り込むことにより、本研究で用いた理論解析手法の場合では理論解の精度がさらに向上することが明らかになった。

学位論文審査結果の要旨

提出学位論文に対して各審査委員が個別に審査を行った後、第1回論文審査委員会を開催し、審査方針を決定するとともに、論文内容の検討および基礎学力の確認を行った。さらに、平成21年1月30日に実施された口頭発表の後に、第2回論文審査委員会を開催し、慎重に審議した結果以下のように判断した。

本論文は、港湾および沖合いでの海上空間の有効利用を目的に、2つの観点から研究を行ったものである。まず、港湾の埋立工事に関連して、大規模急速施工が求められる条件下で高品質な浚渫固化処理土の製造を可能とする新たな工法を提案している。本工法は、従来のプラグ流による浚渫土と固化材の混合に、非動力ミキサを介した混合の促進を取り込むものであり、現地施工実験を含めた多くの実験から最適なミキサ形状が決定されている。また、沖合いに設置される大型浮体に関連して、浮体要素間で流体共振が発生することを新たに見出し、共振の発生に伴う要素間での流体運動特性を実験的に整理している。さらに、流体共振の発生回避の観点から、その発生条件を入射波および浮体の幾何形状条件からなる関係式として理論的に誘導することに成功している。以上の研究成果は、海上空間の有効利用を目的とした建設技術に関する貴重な学術的知見を与えるとともに工学的価値も高い。よって、本審査委員会は本論文が博士（工学）に値すると判断した。