

独立行政法人港湾空港技術研究所

# 港湾空港技術研究所 報告

---

REPORT OF  
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH  
INSTITUTE

---

Vol.51    No.3    December    2012

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

INDEPENDENT ADMINISTRATIVE INSTITUTION,  
PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

# 港湾空港技術研究所報告 (REPORT OF PARI)

第 51 卷 第 3 号 (Vol. 51, No. 3) , 2012 年12月 (December 2012)

## 目 次 (CONTENTS)

1. 鳥類の食性の探究による干潟生態系の保全と再生 .....桑江朝比呂, 三好英一 ..... 3 (Coservation and Restoration of Intertidal Flat Ecosystems by Exploring Shorebird Foraging Ecology .....Tomohiro KUWAE, Eiichi MIYOSHI)
2. 製鋼スラグ混合土の配合・混合条件がその力学特性に与える影響について .....平井壮, 水谷崇亮, 菊池喜昭, 川端雄一郎 ..... 77 (Study on Effect of Mixing Condition on Mechanical Properties of Mixture of Dredged Soil and Steel Slag .....So HIRAI, Taka-aki MIZUTANI, Yoshiaki KIKUCHI, Yuichiro KAWABATA)

## 製鋼スラグ混合土の配合・混合条件が その力学特性に与える影響について

平井 壮\*・水谷 崇亮\*\*・菊池 喜昭\*\*\*・川端 雄一郎\*\*\*\*

### 要 旨

浚渫土を地盤材料として活用するための一つの方法として、近年、浚渫土に製鋼スラグを加えて改質・固化する製鋼スラグ混合土の利用が検討されている。これまでの研究により、製鋼スラグ混合土を海域で使用した場合の環境安全性や底質の浄化作用が確認されている。また、製鋼スラグ混合土の力学特性についても研究が進められているが、実施工後に現地で採取した試料の強度が強度管理用に別途作製した試料の強度を下回った例も報告されるなど、製鋼スラグ混合土の強度に影響を与える要因等については未解明な点が多く残されている。

本研究では、製鋼スラグ混合土の配合・混合条件と強度の変化、またその変化の要因について検討した。はじめに、固化の進展状況と固化に影響を与える要因について調査した結果、浚渫土が製鋼スラグとの接触面から 1cm 程度の範囲で固化すること、固化には浚渫土中のシリカ・製鋼スラグ中の遊離石灰の溶出に関わる化学平衡が大きく影響することがわかった。このことから、高い強度を得るためには、最適な製鋼スラグの添加量が存在することが予想された。その後、配合条件を様々なに変化させた製鋼スラグ混合土の一軸圧縮試験を実施し、その結果を浚渫土と製鋼スラグの乾燥質量比で整理することで、高い強度を得るための最適な乾燥質量比が存在することを確認した。また、製鋼スラグ混合土の強度には、初期含水比（製鋼スラグを添加した直後の含水比）が大きく影響することがわかった。さらに、X 線 CT 装置を用いて製鋼スラグ混合土の供試体を観察し、製鋼スラグ混合土の混合状態と強度、破壊パターンとの関係を整理し、とりまとめた。

キーワード：浚渫土，製鋼スラグ，X 線 CT，混合条件，一軸圧縮強さ

---

\* 地盤研究領域基礎工研究チーム研究員  
\*\* 地盤研究領域基礎工研究チームリーダー  
\*\*\* 前 特別研究官（現 東京理科大学理工学部土木工学科教授）  
\*\*\*\* 構造研究領域構造研究チーム研究官  
〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 港湾空港技術研究所  
電話：046-844-5057 Fax：046-844-0618 e-mail：hirai-s87s3@pari.go.jp

## **Study on Effect of Mixing Condition on Mechanical Properties of Mixture of Dredged Soil and Steel Slag**

**So HIRAI\***

**Taka-aki MIZUTANI\*\***

**Yoshiaki KIKUCHI\*\*\***

**Yuichiro KAWABATA\*\*\*\***

### **Synopsis**

Mixture of dredged soil and steel slag (hereinafter referred to as "MDS") has been studied as one of the applications of dredged soil for geomaterial. Recent studies revealed that MDS had environmental safety and purifying effect for bottom sediment if it was employed as geomaterial in marine area. Mechanical properties of MDS have been studied; nevertheless the dominant factors affecting strength of MDS have not yet been clarified. It happened that the in-situ strength of MDS was smaller than the strength of MDS made at site for quality control with same materials.

In this study, several series of tests were conducted to evaluate the relationship between mixing condition and strength of MDS and to identify the dominant factor affecting the strength. Test results showed that dredged soil was solidified as far as about 1cm from the surface of a steel slag particle. Moreover, it was found that the chemical equilibration related with the elution of silica from dredged soil and calcium from steel slag was one of the factor affecting the strength of MDS. This result implied that the optimum mixing ratio between dredged soil and steel slag would be exist. The optimum mixing ratio was detected by the results of unconfined compression tests of MDS with various mixing ratio organized by dry mass ratio of dredged soil and steel slag. It was also found that the strength of MDS was significantly affected by the initial water content of MDS, which was the water content measured immediately after mixing. MDS specimens were observed by X-ray CT not only before, but also during and after the unconfined compression tests. Based on the observations, the failure process of MDS were discussed and marshalled.

**Key Words:** dredged soil, steel slag, X-ray CT, mixing condition, unconfined compressive strength

---

\* Member, Foundations Group, Geotechnical Engineering Division

\*\* Head, Foundations Group, Geotechnical Engineering Division

\*\*\* Formerly Director for Special Research

\*\*\*\* Researcher, Structural Mechanics Group, Structural Mechanics Division

3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone: +81-46-844-5057 Fax: +81-46-844-0618 e-mail: hirai-s87s3@pari.go.jp



## 目 次

要 旨 .....	77
1. はじめに .....	81
2. 既往の研究 .....	81
3. 実験材料 .....	82
3.1 浚渫土 .....	82
3.2 製鋼スラグ .....	82
4. 製鋼スラグ混合土の固化の進行状況 .....	83
4.1 模型実験 .....	83
4.2 模型地盤から採取した試料の調査 .....	85
4.3 固化要因検討のための針貫入試験 .....	88
4.4 まとめ .....	90
5. 製鋼スラグ混合土の配合・混合条件が強度に与える影響 .....	90
5.1 実験方法 .....	90
5.2 実験結果 .....	90
5.3 まとめ .....	96
6. 製鋼スラグ混合土の破壊の進行状況 .....	97
6.1 十分に攪拌した供試体の破壊状況 .....	97
6.2 不均質な供試体の破壊状況 .....	99
6.3 製鋼スラグ混合土の破壊状況のまとめ .....	101
7. 現地で製造した製鋼スラグ混合土の内部状況の観察 .....	102
8. 本研究のまとめ .....	104
9. おわりに .....	104
謝辞 .....	104
参考文献 .....	104

## 1. はじめに

近年、土砂処分場の確保が困難になってきていることから、浚渫土の利用拡大が大きな課題となっている。しかしながら、浚渫土は非常に軟弱であり、そのままの状態では利用が難しい。そこで、セメントなどを添加し、浚渫土を改質することで地盤材料として利用することが一般的である。

浚渫土の改質方法の一つとして、近年、浚渫土に製鋼スラグを混合し改質・固化する方法が研究されている<sup>1)</sup>。このようにして作製された改質土（固化土）を製鋼スラグ混合土という。改質に用いられる製鋼スラグは、鉄鋼を製造する際に転炉による製鋼工程で得られる副産物で、転炉系スラグと呼ばれるものである。製鋼スラグには遊離石灰が含まれており、浚渫土に含まれるシリカと反応して、カルシウムシリケート系水和物やカルシウムアルミネートが形成され固化するものと推定されている。

製鋼スラグは、内部摩擦角が大きく硬質で耐摩耗性が良いといった特性があり、これまで路盤材料やアスファルト混合物用骨材、サンドコンパクションパイルの中詰材などに単身で利用されてきたが、更なる用途の拡大が模索されている。製鋼スラグ混合土は、浚渫土の利用拡大を図る材料であるとともに、製鋼スラグの新たな利用方法の一つとしても期待されている地盤材料である。

本研究は、製鋼スラグ混合土の配合・混合条件と強度の変化、またその変化の要因を中心に検討するものである。

## 2. 既往の研究

製鋼スラグは、先述のとおり路盤材料やアスファルト混合物用の骨材などとして単身で使用されてきた。その後、高炉水砕スラグやセメントなど他の材料で土の改質を行う際の補助的な材料としての使用が検討された<sup>2)</sup>。さらに、浚渫土に製鋼スラグのみを添加しても土が固化することが知られるようになり、多くの関連研究が実施されている。

製鋼スラグは石灰、二酸化ケイ素、酸化鉄等様々な化学成分を含んでおり、アルカリ性が強いことなどから、製鋼スラグ混合土を海域で使用した場合に環境や生物に与える影響の検討が先行的に進められてきた<sup>3)~9)</sup>。その結果、海域で利用した場合でも十分な環境安全性を有する上、海域底質を浄化する効果があることなどが確認されている。

一方、製鋼スラグ混合土の力学特性については、木曾

ら<sup>10)</sup>により、養生 90 日程度までは製鋼スラグ混合土の強度が上昇を続けることや、製鋼スラグの添加量とともに製鋼スラグ混合土の強度が増加することが報告されている。また、製鋼スラグ混合土の強度発現は、カルシウムシリケート系の水和物と、カルシウム・アルミナ・塩素が水和したフリーデル氏塩の生成によってなされていると推定されている。さらに木曾ら<sup>11)</sup>は、数種の浚渫土やスラグを用いて混合土を作製し、一軸圧縮試験を実施した結果から、遊離石灰と可溶性シリカが製鋼スラグ混合土の強度に影響を与えるパラメータであるとしている。

また、JFE スチール<sup>12)</sup>は、製鋼スラグ中の遊離石灰の量が製鋼スラグ混合土の強度の支配要因であると考え、検討を進めている。その結果、製鋼スラグのかわりに水酸化カルシウムを浚渫土に加えると固化することを確認し、浚渫土を固化させるのに必要な水酸化カルシウムの量から製鋼スラグ混合土の強度を推定する方法を提案している。しかしながら、製鋼スラグには多くの化学的成分が含まれている上、海域で利用する場合は海水中の化学成分も反応に関連するため、水酸化カルシウムのみを浚渫土に加えた場合とは異なる反応が発生する可能性があり、今後十分な検討が必要である。さらに、JFE スチール<sup>12)</sup>では、製鋼スラグに含まれる細粒分（特に粒径 2mm 以下の粒子）の量、浚渫土の細粒分含有量などが製鋼スラグの強度に影響するとされているが、その理由については明らかになっていない。

製鋼スラグ混合土を海域で使用した場合、製鋼スラグ単身の場合と同様にアルカリ性が強く pH の上昇が予想されること、投入時の濁りが心配されることなどから、施工方法に関する検討も多く行われている<sup>13), 14), 15)</sup>。また、その結果を受けて、実海域での試験施工が実施されている<sup>16)~19)</sup>。いずれの方法でも、pH の大幅な上昇や海域の濁りは抑制され、所定の形状に製鋼スラグ混合土を打設することができたと報告されている。なお、武田ら<sup>16)</sup>では、施工後、原位置から採取した製鋼スラグ混合土の強度が、事前実施された室内試験の場合よりも低かったことが報告されている。連続ミキサーで混合し、トレミー管で海底に打設した製鋼スラグ混合土の場合、施工 3 ヶ月後に採取した製鋼スラグ混合土の強度が事前の室内試験の 28 日強度に対して 60~70%程度であった。

試験施工においては、製鋼スラグ混合土の混合状態は密度やフロー値で管理されているが、西田ら<sup>20)</sup>は体積比 12~27%の製鋼スラグ混合土について、混合土のフロー値がほぼ等しくても一軸圧縮強さが大きく変化することを報告している。製鋼スラグ混合土の品質管理手法については引き続き検討が必要であると考えられる。

さらに、製鋼スラグ混合土の長期安定性についても研究が進められている。五十嵐ら<sup>21)</sup>は目標強度を変化させた製鋼スラグ混合土を約1年曝露した結果について報告している。その結果、目標強度を高く設定した製鋼スラグ混合土では強度の低下は見られなかったとされているが、試験ケース数や曝露期間が限られており、十分なデータが得られているとは言い難い。

その他、最近では、津波堆積物に製鋼スラグを混合することで改質し、地盤材料として使用することも試みられている<sup>22), 23)</sup>。これは、回転式破碎混合工法を用いることで、津波堆積物に含まれる異物を分別しながら、製鋼スラグ混合土を作製しようというもので、津波堆積物の有効な処理方法の一法として提案されているものである。

以上で述べたとおり、製鋼スラグ混合土の力学特性についてはすでにある程度の知見が得られているものの、得られる強度が使用する浚渫土や製鋼スラグの特性（産地・組成など）に大きく影響されることが知られており、実施工後に実測された製鋼スラグ混合土の強度が、事前の室内配合試験で確認された目標強度を下まわった例も報告されているなど、製鋼スラグ混合土の配合・混合条件と力学特性・強度の関係には未解明な点が多く残されていると考えられる。

本研究は、製鋼スラグ混合土の配合・混合条件と強度の変化、またその変化の要因について検討するものである。特に、これまでの検討では確認されていない製鋼スラグ混合土の初期含水比（製鋼スラグ添加直後の含水比）や混合状態（製鋼スラグの分散状況）などに着目して、力学特性を調査する。まず、製鋼スラグ混合土の固化の進行状況について、その固化範囲の広がりや固化に影響を与える要因を精査する。次に配合や混合条件を変化させて作製した製鋼スラグ混合土の一軸圧縮試験を実施し、配合や混合条件が製鋼スラグ混合土の強度に与える影響について検討する。あわせて、X線CT装置を用いて製鋼スラグ混合土の混合状態を確認するとともに、製鋼スラグ混合土の破壊の進行状況を観察する。この際、製鋼スラグ混合土の混合状態と、先に得られた製鋼スラグ混合土の固化範囲を対比し、製鋼スラグ混合土の破壊パターンを整理する。さらに、現地で作製された製鋼スラグ混合土をX線CT装置で観察し、室内試験の結果と対比することでその混合状態を把握する。最後に、これらの結果を基に製鋼スラグ混合土の室内配合試験や現地における品質管理において注意すべき点を抽出、整理する。種々の検討結果を総合し、本研究で得られた知見をとりまとめる。

### 3. 実験材料

#### 3.1 浚渫土

本研究において使用した浚渫土の物理特性及び粒度分布を表-3.1、図-3.1に示す。使用した浚渫土は大阪湾で浚渫されたものである。なお、浚渫土中の貝殻を取り除くため、作業しやすい程度まで水道水を加えて軟らかくし、2mmのふるいを用いて粗粒分を取り除いた。

#### 3.2 製鋼スラグ

本研究では2種類の製鋼スラグを使用した。製鋼スラグの物理特性を表-3.2に示す。また、粒度分布は、浚渫土の粒度分布とともに図-3.1に示したとおりである。2種類の製鋼スラグでは、遊離石灰 (f-CaO) の含有量が異なっている。製鋼スラグはf-CaOによる膨張性等を抑制するため、出荷時にはエージング処理を行うのが一般的で

表-3.1 浚渫土の物理特性

一般		
土粒子密度		2.712 g/cm <sup>3</sup>
自然含水比		124.4 %
コンシステンシー特性		
液性限界		113.5 %
塑性限界		43.5 %
塑性指数		70.0
粒度		
礫分	(2 - 75mm)	0.0 %
砂分	(0.075 - 2mm)	3.0 %
シルト分	(0.005 - 0.075mm)	30.3 %
粘土分	(< 0.005mm)	66.7 %
最大粒径	(mm)	2 mm
分類		
地盤材料の分類名		粘土 (高液性限界)
分類記号		CH

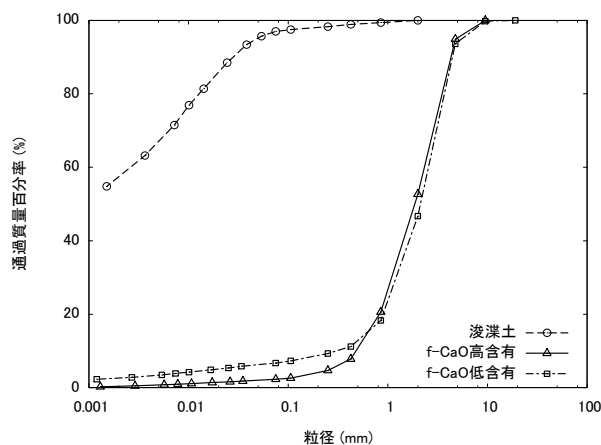


図-3.1 使用材料の粒径加積曲線

表-3.2 製鋼スラグの物理特性

製鋼スラグの種類	土粒子密度 (g/cm <sup>3</sup> )	最大間隙比	最少間隙比
f-CaO 高含有	3.410	1.257	0.766
f-CaO 低含有	3.351	1.182	0.610

ある。f-CaO 高含有の製鋼スラグは、出荷時のエージング処理を行っていないもので、3~5%の f-CaO を含んでいる。一方、f-CaO 低含有の製鋼スラグは通常どおり出荷時のエージング処理を行っており、f-CaO の含有量は 0.1~2.0%程度である。

#### 4. 製鋼スラグ混合土の固化の進行状況

先述のとおり、製鋼スラグ混合土は主として浚渫土に含まれるシリカと製鋼スラグに含まれる遊離石灰が反応することで固化すると考えられている。ここでは、まず、製鋼スラグ混合土の内部でどのように固化反応が進み、固化範囲が広がっていくのか、その過程と要因について調査する。

##### 4.1 模型実験

製鋼スラグ混合土の固化範囲の広がりを調査するため模型実験を実施した。模型実験では、固化範囲の観察を容易にするため、浚渫土と製鋼スラグを混合せず接触させるだけに留め、接触部分でどのような反応が進むかを確認することとした。製鋼スラグ混合土の固化範囲は、コーン貫入試験により確認した。

##### (1) 模型地盤の作製

模型実験は、幅 100cm、奥行き 50cm、高さ 50cm の土槽を用いて実施した。まず、土槽に製鋼スラグを投入し、厚さ 10cm となるよう敷きならし、製鋼スラグが水浸するように水道水を入れた。使用した製鋼スラグは f-CaO 高含有のものである。次に、製鋼スラグの表面に樹脂性のメッシュ (18 番) を敷き、その上に含水比を液性限界の 1.5 倍の 170% になるように水道水を加水し含水比調整した浚渫土を厚さ 10cm となるよう投入した。メッシュは、製鋼スラグの粒子間の間隙への浚渫土の混入を防止するために設置したものである。浚渫土の乾燥を防ぐため、実験期間を通して、浚渫土の表面にわずかに水をはった状態を維持した。模型地盤作製後の土槽の状況を図-4.1 に示す。

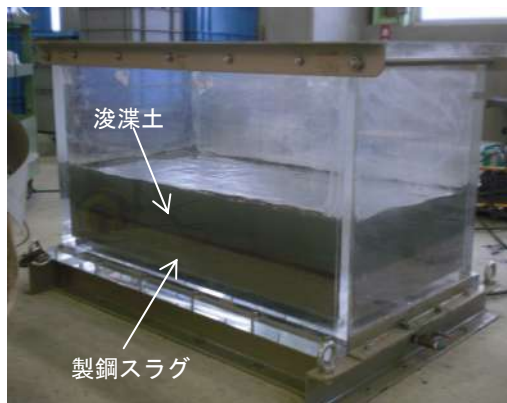


図-4.1 模型地盤作製後の土槽

##### (2) コーン貫入試験の方法

模型地盤作製当日と作製後 1~427 日の間で 10 回、計 11 回のコーン貫入試験を実施した。使用したコーンは、直径 11mm、先端角 30 度で、貫入速さは 4mm/min とした。コーンの貫入位置は、土槽平面内の 10cm 角の格子点 (壁面からも 10cm の離隔を確保) とし、毎回異なる位置で試験を実施した。

##### (3) 実験結果

図-4.2 にコーン貫入試験の結果を示す。模型地盤作製当日 (図-4.2 中の 0 日) では、地盤表面から浚渫土と製鋼スラグの境界面に向かって一様に貫入抵抗が増加しており、コーン貫入抵抗が大きく変化するような様子は見られない。しかしながら、模型地盤作製の 1 日後には、地盤表面からコーン貫入抵抗が一様に増加した後、浚渫土と製鋼スラグの境界面の上のごく狭い範囲で急増する様子が観察された。このような貫入抵抗の急増はその後にも観察され、急増開始点の深さは徐々に浅く、浚渫土と製鋼スラグの境界面から離れていく傾向が見られる。

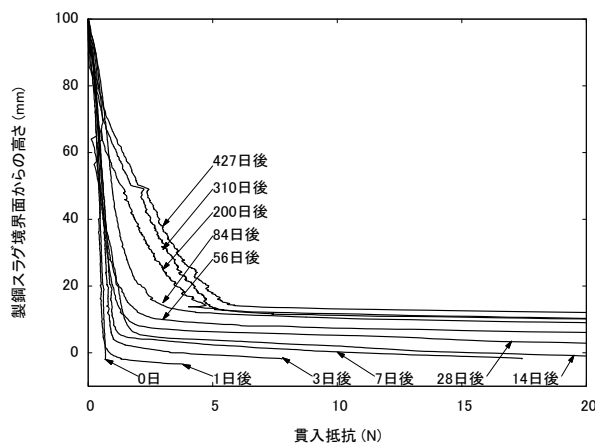


図-4.2 コーン貫入試験結果

コーン貫入抵抗の急増点に着目し、その高さを模型地盤作製からの日数で整理したのが図-4.3である。図-4.3より、貫入抵抗の急増点は地盤作製の7日後までに大きく変化して、浚渫土と製鋼スラグの境界面から5mm上方まで達している。その後も84日後までは急増点が一定の割合で浅くなり、84日後には境界面から13mm程度上方に到達する。地盤作製84日後以降はコーン貫入抵抗の急増点に大きな変化は見られず、浚渫土と製鋼スラグの境界面から13mm程度上方にとどまっている。

実験期間中に浚渫土の自重圧密も観察された（地表面がわずかに沈下）ため、コーン貫入抵抗の増加の原因が自重圧密による密度増加である可能性もある。そこで、別の土槽（幅30cm、奥行き30cm、高さ50cm）に含水比170%の浚渫土を厚さ20cm投入し、同条件のコーン貫入試験を実施して浚渫土の自重圧密がコーン貫入抵抗に与える影響を確認した。コーン貫入試験は浚渫土地盤作製の7、14日後に実施した。試験結果を図-4.4に示す。図-4.4には、浚渫土と製鋼スラグを投入した模型地盤で地盤作製の7、14日後に実施したコーン貫入試験の結果を

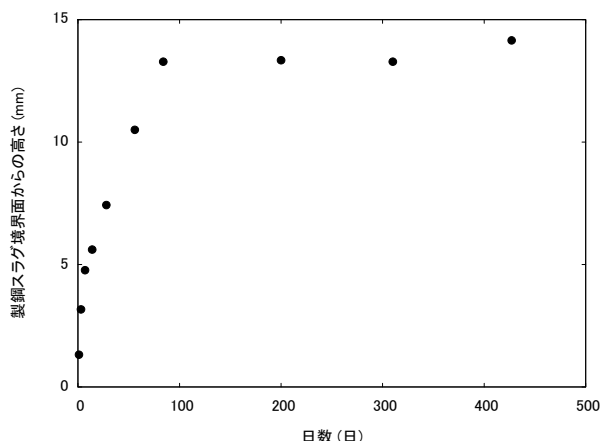


図-4.3 貫入抵抗急増点と日数との関係

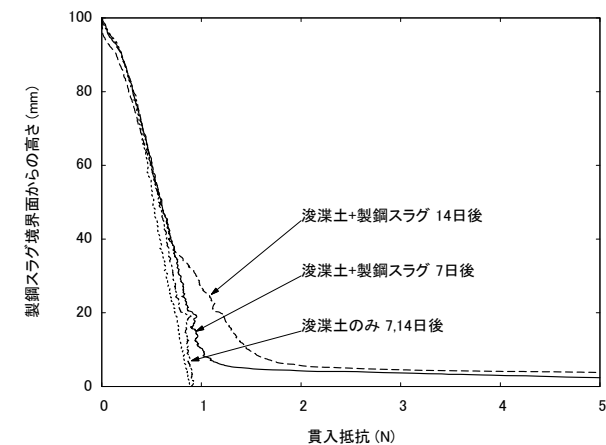


図-4.4 浚渫土のみの場合とのコーン貫入試験結果の比較

あわせて示している。

図-4.4より、浚渫土だけの場合でも日数の経過とともにコーン貫入抵抗がわずかに増加していることが確認できる。これは浚渫土が自重圧密し密度が増加したことによるものと考えられる。しかしながら、浚渫土と製鋼スラグを用いた場合のようなコーン貫入抵抗の急増点は観察されない。従って、浚渫土と製鋼スラグの境界面付近で見られたコーン貫入抵抗の増加は、この付近で固化が進行していることによるものと考えられる。また、図-4.4より、コーン貫入抵抗の急増点よりも浅い部分（14日後であれば高さの5mm～40mmの間）でも、浚渫土と製鋼スラグを用いた場合の方が、浚渫土のみの場合よりコーン貫入抵抗が大きくなっている。従って、コーン貫入抵抗の急増点より浅い部分でも、非常にゆるやかではあるが多少は浚渫土が固化している可能性がある。

(4) 模型地盤解体時の状況

模型地盤作製から427日後に模型地盤の解体を行った。この際、浚渫土の固化状況を観察したところ、図-4.5に示すように浚渫土の下部、浚渫土と製鋼スラグの境界面から12～13mm程度の範囲で、浚渫土が固化していることが確認された。これは、(3)で述べたコーン貫入抵抗の急増点の高さと一致していることから、コーン貫入抵抗の急増点の高さが固化範囲の進展状況を表しているものと考えられる。一方、それより上部、浚渫土と製鋼スラグの境界面から70mm程度までの範囲では、コーン貫入抵抗の増加は観察されている（図-4.2参照）ものの、浚渫土は固化しておらず、手で触れてわかるような浚渫土の強度の差は確認できなかった。

なお、解体時の浚渫土の層厚は98～99mmであり、自重圧密により1～2mm程度沈下したのと考えられる。また、浚渫土の下部に敷いた製鋼スラグは固化していなかった。

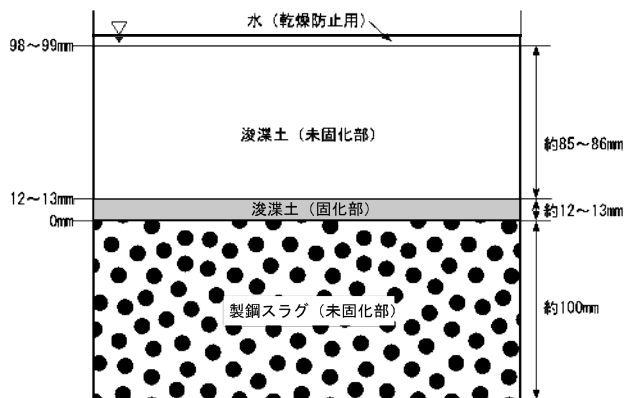


図-4.5 解体後の土槽断面

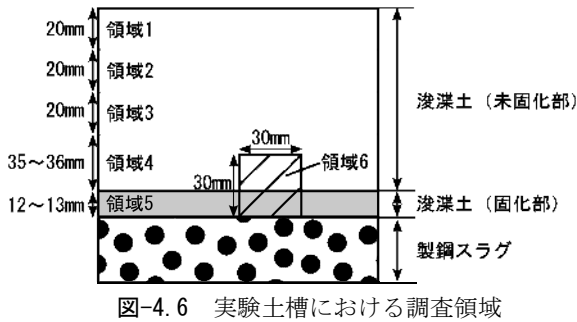


図-4.6 実験土槽における調査領域

表-4.1 調査項目と調査領域

調査項目	調査領域
(1) 含水比の調査	領域 1～5
(2) SEM による試料の観察	領域 1～5
(3) EPMA 分析	領域 6
(4) 針貫入試験	領域 5

#### 4.2 模型地盤から採取した試料の調査

4.1の模型実験では、浚渫土は最終的に接触面から12～13mmの範囲で固化した。固化の要因を調査するため、模型実験を解体した際に模型地盤の数箇所から試料を採取し、種々の分析を行った。試料は図-4.6に示す6つの領域から採取し、表-4.1に示す調査を実施した。以下、それぞれの調査結果について説明する。

##### (1) 含水比の調査

図-4.6に示す領域1～5から採取した試料について含水比を測定した。試料は、1つの領域につき平面的に位置の異なる3ヶ所から各1個、1領域あたり3個採取した。図-4.7に浚渫土の含水比の深度分布を示す。図-4.7より、高さ70～100mmの範囲（領域1,2）においては、浚渫土の含水比は初期の含水比から大きく変化していないことがわかる。また、高さ30～50mm付近（領域3,4）では浚渫土の含水比は160～165%となっており、初期含水比より5～10%程度低下している。模型地盤解体時に確認された圧密沈下量が1～2mmであり、これに対応する含水比の変化量は2.7～5.4%程度となることから、領域3,4における含水比の低下は自重圧密だけでは説明できず、また、図-4.2でも見られるようにある程度の強度増加も見られていることから、何らかの効果現象があるものと思われるが、領域5の変化に比べれば微小な変化であり、本研究で想定するような浚渫土の効果現象の範疇とは言えないようなものである。一方、浚渫土の固化が観察された領域5では、含水比が大きく低下している

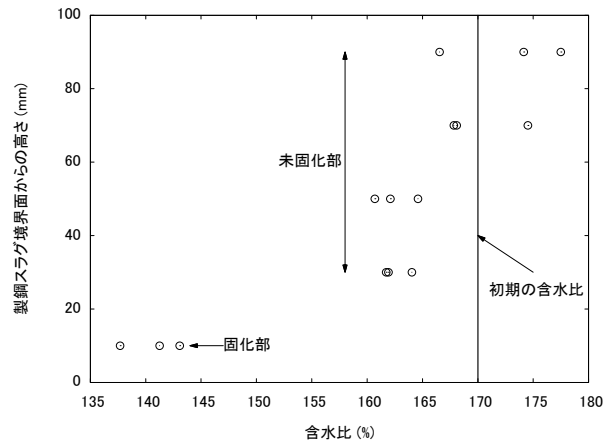


図-4.7 浚渫土の含水比の深度分布

ことがわかる。領域5から採取した試料の液性限界、塑性限界を調査したところ、それぞれ217.0%、79.4%であり、もとの浚渫土の液性限界、塑性限界（表-3.1）とは大きく異なる結果となった。このことから、固化に伴い浚渫土の物理特性も変化している可能性が考えられる。

##### (2) SEMによる試料の観察

領域1～5から採取された試料について、走査型電子顕微鏡（SEM）により試料の観察を行った。SEMは当所所有のものを用いた<sup>24)</sup>。観察の前処理として、凍結真空乾燥法により間隙水の除去を行った後、試料をおよそ1辺1cmの立方体に成形した。成形した試料の表面に金パラジウム合金を蒸着し、これを観察試料とした。

SEMによる観察結果を図-4.8に示す。図-4.8には、各領域から採取した試料について、画像中心を変えずに倍率500倍、2000倍で観察した画像を示している。また、図-4.8には実験前の浚渫土の観察結果もあわせて示している。

図-4.8より、未固化の領域1～2においては、試料表面に多くの空隙が見られ、実験前の浚渫土と同様な構造を有しているように思われる。同じく未固化部である領域3～4については、実験前の浚渫土より組織が少し緻密化しているようにも見えるが、大きな差異は観察されていない。一方、固化した領域5においては、明らかに浚渫土内の空隙が減少しており、組織が緻密化している。固化反応の際に析出した物質等により空隙が埋められたことが考えられる。浚渫土の組織が緻密化し、含水比が低下することで、製鋼スラグから溶出される成分がこの部分を通過しにくくなり、これが原因で模型実験の際に固化範囲の進展がある程度で収束した可能性がある。

固化部（領域5）の画像を良く観察すると、他の領域では見られないクラック状の空隙が観察されていること

がわかる。この原因として、浚渫土が固化する際に含水比が低下しクラックが発生した可能性が考えられる。また、別の原因として、試料が固化していることから、事前処理の際の試料の凍結乾燥に伴う収縮でクラックが生じた可能性もある。

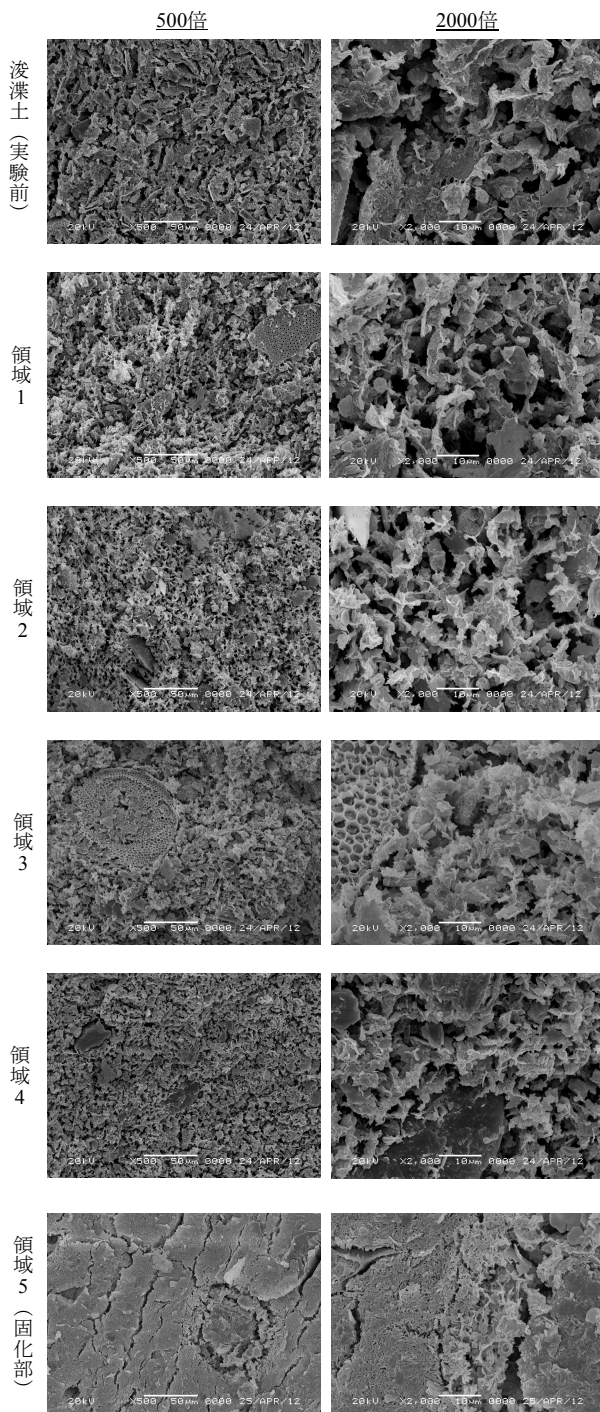


図-4.8 SEMによる浚渫土の観察結果

### (3) EPMA分析

固化部周辺に含まれる物質の濃度分布を測定するため、EPMA (Electron Probe Micro Analyser) による分析を実施した。測定に用いた試料は、以下のような手順で作製した。まず、模型実験終了後の地盤から、図-4.9 に示すように鋼製サンプラー (直径 75mm) を用いて未固化部と固化部を含む土塊を抜き取り、上部の未固化部の半分程度を取り除いた。さらに、そこから未固化部から固化部に貫通する小さなコアを抜き出し、この試料の断面を削り取るようにして縦 30mm、横 30mm の板状試料を成形した。これを乾燥させ、樹脂で包埋し、樹脂の硬化後に分析面を乾式研磨した。研磨した分析面に導電性を持たせるためにカーボン蒸着し、これを分析試料とした(図-4.6 中の領域 6 に対応)。

測定には日本電子(株)製の JXA-8100 を用いた。測定元素及び分析条件を表-4.2 に示す。分析結果は、すべての元素を酸化物とした場合の質量濃度(質量百分率, mass%) で表示している。

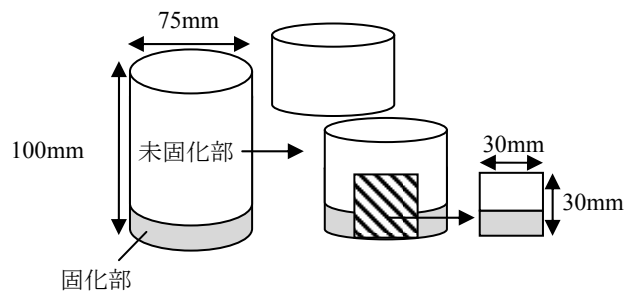


図-4.9 分析試料の採取位置

表-4.2 測定元素および分析条件

測定元素	Na,K,Al,Si,Ca
加速電圧	15kV
試料電流	$5.0 \times 10^{-8}$ A
測定時間	30msec/ピクセル
分光結晶	TAP : Na,Si,Al, PET : Ca,K
標準試料	Ca,Si : Wollastonite (CaO=48.00 mass%, SiO <sub>2</sub> =50.94 mass%) Al,Na,K : K-Feldspar (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> =20.44mass%, Na <sub>2</sub> O=7.07mass%, K <sub>2</sub> O=5.62mass%)
プローブ径	20μm, ピクセルサイズ : 35×35μm
ピクセル数	縦944×横944 (およそ33.0×33.0mm)



EPMA 分析で得られた元素分布分析結果を図-4.10 に示す。図-4.10 (a) ~ (e) の各画像において、画像の下部が固化した部分、上部が未固化部分に対応しており、画像の下端が模型実験における浚渫土と製鋼スラグの接触面となっている。各画像の中央やや下に画像を横切る大きなクラックが観察されているが、このクラックが固化部と未固化部の境界付近に対応している。

図-4.10 より、ナトリウムは試料全域で概ね一定の濃度分布を示しているのに対し、その他の元素では、画像下端に近い固化部で質量濃度が高いことがわかる。特に、カルシウムに関しては、未固化部でほとんど分布が観察されていないのに対し、固化部では高い濃度を示している。なお、図-4.10 (d) の右上にカルシウムが高濃度に凝集した部分が観察されているが、これは、浚渫土に含まれていた貝殻が反応したものであると考えられる。

図-4.10 の固化部分に着目すると、固化部の下半分と上半分で各元素の濃度分布に変化が見られることがわかる。固化部の下半分では、カルシウム以外の元素も高い濃度を示している。しかしながら、固化部の上半分ではカルシウムのみが未固化部よりも高い濃度を示しており、カルシウム以外の元素の濃度は未固化部とあまり大きな差が無いことがわかる。このことから、浚渫土の固化にカルシウムが大きな役割を果たしていること、一方で他の元素についても固化に何らかの関わりを持っていることが推察される。また、カルシウムは製鋼スラグから供給されたものと考えられる。

なお、先述のとおり、固化部の厚さは 12~13mm 程度であり、ここで述べている固化部の下半分は実寸で 7~8mm の厚みに相当している。

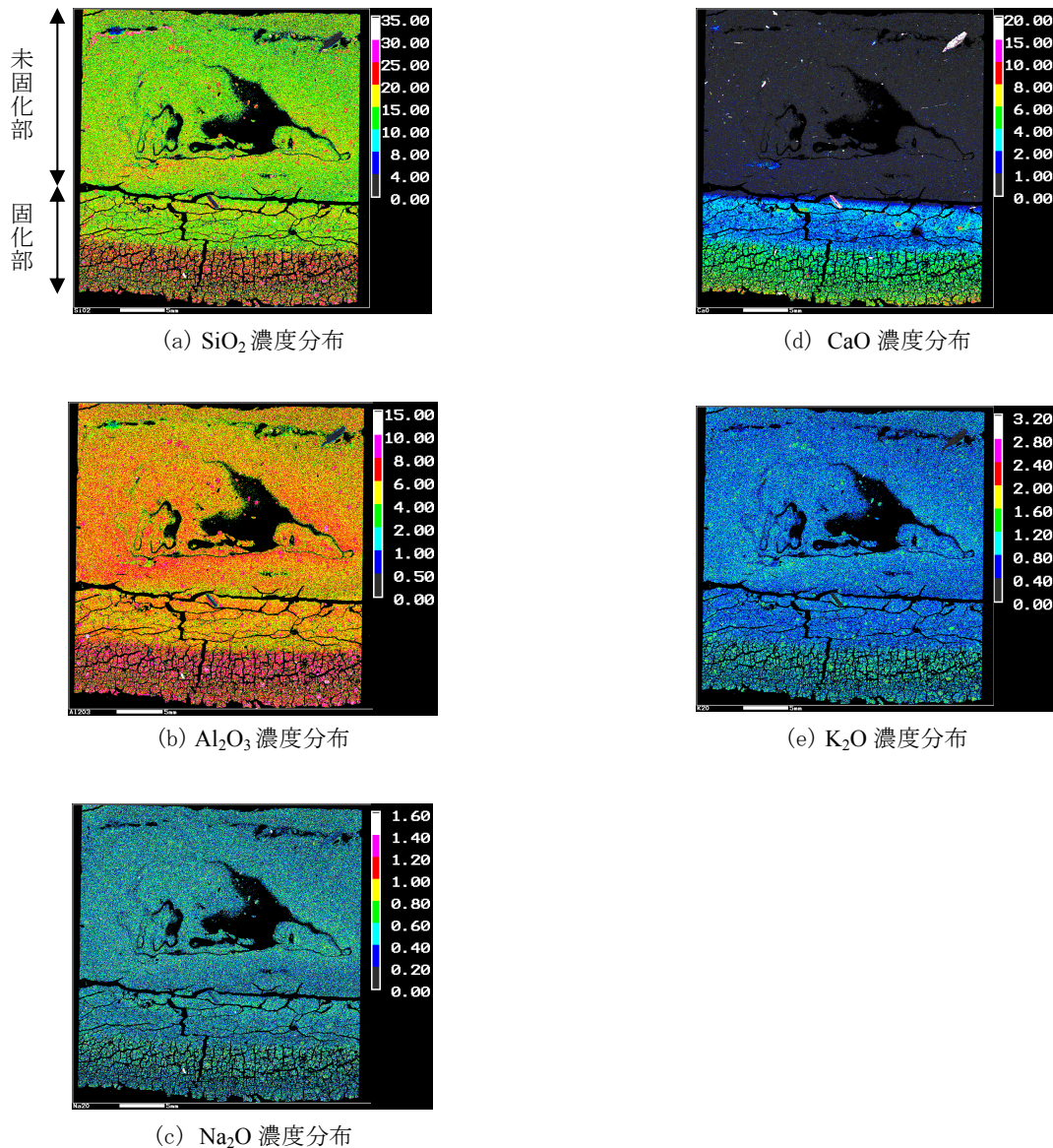


図-4.10 EPMA による元素分布分析結果



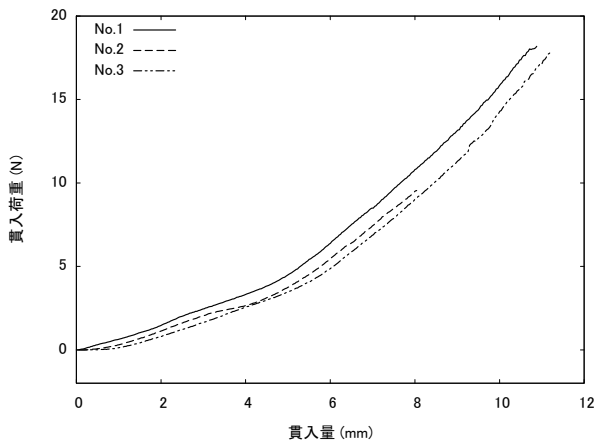


図-4.11 固化部における針貫入試験結果

#### (4) 針貫入試験

図-4.6 に示した領域 5 (浚渫土が固化した部分) について、針貫入試験を実施し、固化部内での強度の鉛直方向分布を調査することを試みた。針貫入試験は、針の貫入長さと同貫入抵抗の関係から針貫入勾配を求め、強度の指標とするものである。本来は針貫入勾配と一軸圧縮強さの関係などを別途求めておく必要があるが、ここでは強度の変化傾向の観察を目的としているため、針貫入勾配の変化傾向から強度の変化傾向を検討することとする。試験は地盤工学会基準の針貫入試験法(案)に準拠して実施した。貫入速度は 1mm/min とし、貫入位置を変えて 3ヶ所で試験を実施した。

図-4.11 に針貫入試験の結果を示す。図-4.11 の貫入量は固化した試料の上面からの距離を示しており、貫入量が大きくなるほど模型実験の際の浚渫土と製鋼スラグ境界面に近づくこととなる。試料の厚さは 12~13mm 程度である。実験 No.2 については、貫入途中で試料が割れてしまったため、それまでの計測結果のみを示している。

図-4.11 より、貫入量 5mm 程度を境に針貫入勾配(貫入量~貫入抵抗関係の傾き)が変化していることがわかる。貫入量 5mm 程度までは針貫入勾配がやや小さく、それ以降では針貫入勾配が大きくなっている。つまり、固化部において、固化部上面から 5mm 付近まではやや強度が小さく、そこから浚渫土と製鋼スラグの境界面までの 7~8mm の部分は強度が大きくなっている。

このような傾向は、EPMA 分析で観察された各元素の濃度分布の状況と良く一致するものである。カルシウム以外にケイ素やアルミニウム、カリウムでも高い濃度が観察された固化部の下半分に相当する 7~8mm の部分では針貫入試験によって得られる強度が大きく、それより

上部のカルシウムだけの濃度が高かった部分では針貫入試験で得られた強度がやや小さい。このようなことから、浚渫土の固化反応にはカルシウムが中心となって関与しているが、固化部の強度はカルシウム以外の元素の影響も受けているのではないかと考えられる。

#### 4.3 固化要因検討のための針貫入試験

ここまでの検討から、浚渫土の固化にはカルシウムが関与していること、固化部の強度にはその他の元素の影響も見られることなどが示唆された。そこで、浚渫土の固化に影響を及ぼす要因をさらに詳細に検討するため、浚渫土に化学的にカルシウム等の成分を混合し、固化させる実験を行った。実験では、水酸化カルシウム、塩化カルシウム、水酸化ナトリウムを用いて、溶液のカルシウムイオン濃度と pH を変化させた。また、蒸留水、塩化ナトリウム、海水を用いることで、他の元素が浚渫土の固化や強度に与える影響についても検討した。

供試体の作製方法は以下のとおりである。まず、含水比を液性限界の 1.5 倍である 170% に調整した浚渫土を試料容器(容積 100ml)に約 50g 投入する。その容器に、実験ケース毎にあらかじめ各成分を混合した溶液を 50ml 加える。溶液を加えた後、実験条件に応じて粉末状の水酸化カルシウムを添加する。その後、容器に蓋をして密封し、反応が平均化するように容器を振って、試料を攪拌した。攪拌後、試料を 40°C の恒温炉内にて 14 日間養生し、針貫入試験を実施した。針貫入試験の方法は 4.2(4) と同様である。1 試料あたり貫入位置の異なる 3ヶ所で 20mm 程度まで針貫入を行い、針貫入勾配を求めた。実験ケースを表-4.3 に示す。

図-4.12 に針貫入試験の結果得られた針貫入勾配を示す。実験 No.1 及び No.7~9 では浚渫土が固化しなかったため、針貫入試験は実施していない。

まず、No.1 と No.4 について着目する。これらの違いは水酸化カルシウムの投入の有無であるが、水酸化カルシウムを投入した No.4 が固化し、水酸化カルシウムを投入していない No.1 が固化しなかったことから、固化にはカルシウムが必要であることが確認できる。しかしながら供試体中にカルシウムが含まれている場合でも、水酸化カルシウムを用いた No.2~6 が固化したのに対し、塩化カルシウムを用いた No.7~9 では固化しなかった。No.2~6 の供試体には水酸化カルシウムを 2g (0.027mol) 添加しているが、水酸化カルシウムは溶解度が低く、溶液に完全に溶けることはない。溶液を蒸留水のみで作製した No.6 において、水の活量 1、完全解離と仮定すると、水酸化カルシウムから溶出するカルシウムイオン濃度は

表-4.3 実験条件一覧

ケース	溶液		水酸化カルシウム添加量
	溶媒	溶質	
No.1	蒸留水	水酸化ナトリウム (0.05mol/L) 塩化ナトリウム (0.5mol/L)	0g
No.2	蒸留水	水酸化ナトリウム (0.05mol/L)	2g
No.3	海水 (久里浜湾)	水酸化ナトリウム (0.05mol/L)	2g
No.4	蒸留水	水酸化ナトリウム (0.05mol/L) 塩化ナトリウム (0.5mol/L)	2g
No.5	蒸留水	塩化ナトリウム (0.5mol/L)	2g
No.6	蒸留水	-	2g
No.7	蒸留水	塩化カルシウム (0.01mol/L)	0g
No.8	蒸留水	塩化カルシウム (0.05mol/L)	0g
No.9	蒸留水	塩化カルシウム (0.10mol/L)	0g

0.023mol/l, 水素イオン濃度指数 pH は 12.7 程度となる。一方、塩化カルシウムは溶液として存在しており、溶液中のカルシウムイオン濃度は塩化カルシウム濃度と等しい。また、溶液の pH は 7 で中性が保持される。No.6 に含まれるカルシウムイオン濃度は No.7 と No.8 の中間となるが、No.6 は固化したのに対し、No.7, 8 は固化していない。このように、供試体中にカルシウムが含まれている場合でも周囲の状況によって固化の条件が異なる結果となった。このようなことから、4.1 の模型実験において、製鋼スラグから離れた位置の浚渫土が固化しなかった要因として、製鋼スラグから離れた位置では固化しやすい条件が整わなかったことが考えられる。

次に、図-4.12 において、溶液を蒸留水のみで作製した No.6 と、溶液に水酸化ナトリウムを加えた No.2 を比較すると、No.6 の方が針貫入勾配が大きく、供試体の強度が大きい結果となった。溶液に水酸化ナトリウムを加えると、水酸化物イオンが多く供給され、溶液の化学平衡により水酸化カルシウムが溶解しにくくなる。そのため、水酸化ナトリウムを加えた No.2 の方が蒸留水のみ No.6 よりも固化の程度が低くなり、針貫入勾配が小さくなったものと考えられる。

また、溶液に塩化ナトリウムを加えた No.5 では、蒸留水のみの場合 (No.6) より針貫入勾配がやや大きくなった。塩化ナトリウムを加えることで、各イオンの活量係数が小さくなり、そのため水酸化カルシウムの溶解度が

大きくなってカルシウムイオンの供給量が増加し<sup>25)</sup>、その結果固化反応が進んで強度が増加した可能性がある。一方、No.5 にさらに水酸化ナトリウムを加えた No.4 では、強度が低下することが予想されたが、図-4.12 からわかるとおり No.4, No.5 の間で針貫入勾配に大きな差は見られなかった。さらに、溶液に海水を加えた No.3 は、他に比べて非常に大きな針貫入勾配を示した。これらの供試体内では、各種のイオンが複雑に関係しあった形で化学平衡が保たれていると考えられ、本研究で実施した試験のみからでは十分な考察ができない。No.3 の結果から、配合試験に海水を用いると供試体の強度が増加する可能性があるものの、No.2 (蒸留水) との強度比がその

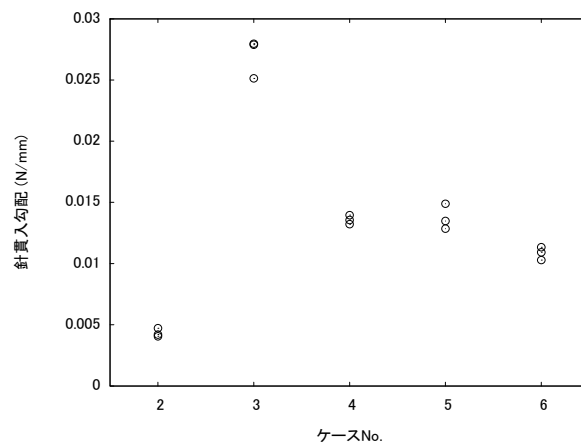


図-4.12 針貫入試験結果

まま製鋼スラグ混合土の強度比になるかどうかは未検討であるため、別途検討が必要である。

なお、ここでは浚渫土からのシリカの溶出特性について検討していないが、一般的に溶液の pH が高い方がシリカの溶出は進むと考えられている<sup>26)</sup>。一方のカルシウムは pH が高いと溶出しにくくなる。このようなことを考え合わせると、製鋼スラグ混合土の作製にあたっては、浚渫土中のシリカ、製鋼スラグ中の遊離石灰に含まれるカルシウムの量、それぞれの溶出特性（溶液の pH や化学平衡）の観点から、適切なバランスとなる製鋼スラグ添加量が存在することが予想される。

#### 4.4 まとめ

本章では、製鋼スラグ混合土において、浚渫土と製鋼スラグの接触部分から固化がどのように進展していくのかを観察するために模型実験を実施した。また、模型地盤から採取した試料を分析し、浚渫土の固化要因について検討を行った。その結果、以下のようなことが明らかになった。

- ・模型実験により、製鋼スラグと浚渫土の接触面から固化が始まり、固化範囲が広がっていくことが確認できた。固化範囲は実験初期に大きく広がり、地盤作製後7日で接触面から約5mmに及んだ。地盤作製後84日では、接触面から12～13mmにまで固化範囲が広がったが、それ以降は固化範囲の進展は止まり、その後大きな変化は見られなかった。製鋼スラグ混合土の混合状態と力学特性の検討においては、ここで観察された固化範囲の広がり一つの指標となると考えられる。
- ・SEMによる観察結果から、固化部分では土の組織が緻密化していることが確認できた。また、固化部分の含水比は、初期の浚渫土の含水比よりも大きく低下していた。固化部分において、水和反応により水が使われるとともに、生成された物質により間隙が埋められたものと考えられる。
- ・EPMA分析の結果、固化部ではカルシウムが高い濃度を示し、製鋼スラグ混合土の固化にカルシウムが関与していることが確認された。一方、針貫入試験の結果から、固化部においても強度の高い領域と低い領域が存在し、EPMA分析によると強度の高い領域ではカルシウム以外にもケイ素、アルミニウム、カリウムなどが高い濃度を示していることから、これらの元素が固化部の強度に影響することが考えられる。
- ・種々の溶液を用いて浚渫土の固化を試みたところ、カルシウム等の含有量だけではなく、化学的平衡によっても固化の状況が変化することが確認された。

## 5. 製鋼スラグ混合土の配合・混合条件が強度に与える影響

製鋼スラグ混合土は、浚渫土と製鋼スラグの体積比で管理されるのが一般的である。浚渫土に対して混合する製鋼スラグの体積比が大きくなると製鋼スラグ混合土の強度は大きくなるとされている。

ここでは、前章で得られた固化範囲の進展や固化に影響する成分などを念頭に、配合・混合条件と強度の関係を改めて精査する。本章の実験は表-5.1に示す4シリーズに分けられる。基本的な実験方法はすべての実験シリーズで共通である。

### 5.1 実験方法

供試体は、直径5cmのプラスチックモールドに事前に含水比調整をした所定量の浚渫土、製鋼スラグを順に投入し、スプーンを用いてモールド内で攪拌して作製した。攪拌後、モールドを机上で軽くタッピングして試料中の空気を抜き、モールドを密封後、プラスチックコンテナに収め、室温20°Cの室内で養生した。使用した浚渫土・製鋼スラグはすでに3章で示したとおりである。供試体が所定の材齢に達した後、1条件あたり3本の供試体に対して一軸圧縮試験（JIS A 1216）を実施した。

### 5.2 実験結果

#### (1) 製鋼スラグの添加量が強度に与える影響 (series1)

まず、製鋼スラグ混合土の含水比と製鋼スラグの添加率を様々に変化させて一軸圧縮試験を行い、試験結果を整理することで製鋼スラグの添加量と製鋼スラグ混合土の強度の関係を精査する。実験に用いた供試体の配合条件は表-5.2のとおりである。製鋼スラグはf-CaO高含有のものを用いた。また、スプーンによる攪拌回数は100回とした。後で述べるとおり、100回攪拌することで供試体がほぼ均質な混合状態となることが確認されている。表中の製鋼スラグ混合土の初期含水比とは、浚渫土に製

表-5.1 実験シリーズ

	検討内容
series1	製鋼スラグの添加量が強度に与える影響
series2	製鋼スラグに含まれる遊離石灰 (f-CaO) が強度に与える影響
series3	製鋼スラグの細粒分の影響
series4	製鋼スラグ混合土の混合条件が強度に与える影響

表-5.2 供試体の配合条件

	浚渫土		製鋼スラグ	実質体積比 (%)	乾燥質量比 (%)	製鋼スラグ混合土の 初期含水比 (%)
	乾燥質量 (g)	含水比 (%)	乾燥質量 (g)			
ケース 1	89.4	169.7	38.3	6.0	43	119
ケース 2	73.5	208.2	55.1	8.9	75	119
ケース 3	64.6	236.2	64.6	10.5	100	119
ケース 4	51.9	297.3	77.9	13.0	150	119
ケース 5	39.1	392.8	91.3	15.6	233	119
ケース 6	113.8	122.9	48.8	7.8	43	86
ケース 7	93.7	150.5	70.3	11.6	75	86
ケース 8	82.4	171.6	82.4	13.8	100	86
ケース 9	66.3	214.8	99.5	17.2	150	86
ケース 10	50.1	283.7	116.9	20.9	233	86

鋼スラグを添加した直後の含水比である。

実験結果を図-5.1 に示す。図-5.1 には、供試体の材齢が 28 日の場合の結果のみ示しているが、材齢 7 日、14 日の場合も同様な分布傾向となった。図-5.1 は、供試体の実質体積比と一軸圧縮強さの関係を表している。実質体積比とは、供試体中の浚渫土（水を含む）の体積  $V_c$  に対する、製鋼スラグの実質の体積  $V_s$  の比  $V_s/V_c$  であり、従来、製鋼スラグ混合土の配合を考える際に用いられてきた指標である。

図-5.1 において、浚渫土の含水比が近い実験（ケース 1 と 8、ケース 2 と 9、ケース 4 と 10）に着目すると、浚渫土の含水比が同じであれば、実質体積比が大きいほど一軸圧縮強さが大きいことがわかる。この関係が従来着目されてきた関係性で、同じ浚渫土に対して添加する製鋼スラグの量を増加させれば製鋼スラグ混合土の強度は増加するとして配合設計に用いてきた。しかしながら、浚渫土の含水比が異なる場合、実質体積比の増加に伴う一軸圧縮強さの増加率（図-5.1 中に示した 3 本の直線の

傾き）は大きく異なることがわかる。これは、実施工で使用する浚渫土の含水比が変化した場合に、配合試験の結果に基づいて定めた目標強度が得られない可能性があることを示唆している。

ここで、浚渫土の含水比が同じで、製鋼スラグの添加量が異なるケース、例えばケース 1 と 8 を比較すると、添加量の少ないケース 1 に比べ、添加量の大きいケース 8 では製鋼スラグ混合土の初期含水比が小さくなっている（表-5.2 参照）。そのため、図-5.1 中に示した 3 本の直線には、製鋼スラグの添加量の影響と、製鋼スラグ混合土の初期含水比の影響が混在していると考えられる。

そこで、製鋼スラグ混合土の初期含水比に着目して実験結果を見直したのが図-5.2 である。図-5.2 は図-5.1 と同様に実質体積比と一軸圧縮強さの関係を示しているが、図中の線は製鋼スラグ混合土の初期含水比が等しい実験結果をつないだものである。この図を見ると、初期含水比が低いケース 6~10 の方が初期含水比が高いケース 1~5 よりも概ね大きな一軸圧縮強さを示しているこ

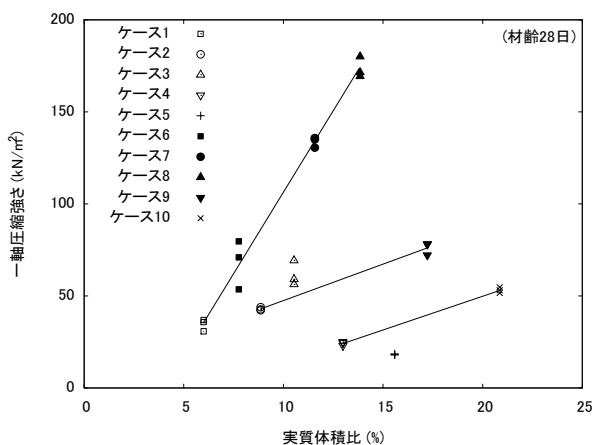


図-5.1 浚渫土と製鋼スラグの実質体積比と一軸圧縮強さ

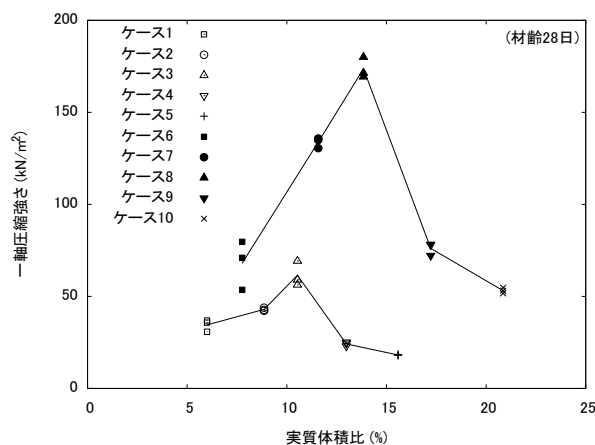


図-5.2 浚渫土と製鋼スラグの実質体積比と一軸圧縮強さ（初期含水比に着目して整理した場合）

とがわかる。また、実質体積比が小さい範囲では、実質体積比の増加とともに一軸圧縮強さが大きくなる傾向を示すが、実質体積比がある値を越えると一軸圧縮強さが低下してしまうことがわかる。

本研究で実施している配合は、製鋼スラグが最も多い場合でも体積比 20%程度である。後で述べる X 線 CT 装置による供試体の観察結果などから、この程度の添加量であれば製鋼スラグ混合土中で製鋼スラグ同士の接触が問題になることはなく、製鋼スラグ混合土の挙動は粘着力で支配される（いわゆる c 材となる）と考えられ、配合条件により破壊モードが大きく変化することはないと思われる。

また、製鋼スラグ混合土の固化は、浚渫土中のシリカと製鋼スラグ中の遊離石灰を中心とした反応によって発生すると考えられているが、前章の検討結果より、溶液の pH やシリカ・カルシウムの溶出特性に関係する化学平衡などが固化反応に影響を与えることがわかる。つまり、固化反応を促進させるためには、シリカと遊離石灰の量のバランスの他、シリカ・カルシウムの溶出や反応に関係する化学平衡の影響を考える必要があり、いずれか 1 つの成分を増加させても固化が進むとは限らない。このようなことが原因で、実質体積比を増加させ製鋼スラグの添加量を増やしても、あるところで一軸圧縮強さが飽和し、それ以降はむしろ強度が低下する結果になったものと考えられる。

一方、供試体中の製鋼スラグは含水比にして高々 5%程度しか水を含まないため、製鋼スラグ混合土の初期含水比を一定としたまま製鋼スラグの添加量を増加させると、製鋼スラグ混合土中の浚渫土部分の含水比が大きくなってしまふ。4 章の実験結果などから製鋼スラグ混合土中の浚渫土は固化していると考えられるが、固化する前の含水比が固化強度にどの程度影響するかについて、本研

究では検討していない。浚渫土の含水比が高いと固化強度が低くなる懸念がある。図-5.3 に浚渫土の含水比と一軸圧縮強さの関係を示す（図-5.3 の横軸は混合前の浚渫土の含水比であり、製鋼スラグ混合土中の浚渫土部分の含水比とは異なる。しかしながら、供試体中の製鋼スラグの含水比が 5%程度であることから両者に大きな差はないものと考えられる）。図-5.3 中に破線で示したように、浚渫土の含水比によって一軸圧縮強さの上限があるようにも見受けられる。今後、このような課題について引き続き検討していく必要がある。

ここで、製鋼スラグ混合土の固化がシリカや遊離石灰の量のバランスや化学平衡によって支配されているとすれば、製鋼スラグ混合土の配合を体積比を基に検討するのではなく、浚渫土と製鋼スラグの実質的な量を表す指標に基づいて整理する方が望ましいと思われる。そこで、浚渫土と製鋼スラグの実質的な量の比を表す指標として、それぞれの乾燥質量の比を用いて実験結果を整理すると図-5.4 のようになる。図-5.4 には図-5.1~5.3 と同様に供試体の材齢が 28 日の場合の実験結果のみ示しているが、材齢 7 日、14 日の場合もほぼ同様な分布傾向となった。

図-5.4 より、製鋼スラグ混合土の初期含水比が一定の場合、乾燥質量比 100%で一軸圧縮強さが最大となっていることがわかる。製鋼スラグ混合土の初期含水比が変化すると一軸圧縮強さの値は大きく変化するものの、乾燥質量比 100%で一軸圧縮強さが最大となる傾向は変化しない。つまり、本研究で使用した浚渫土と製鋼スラグの組み合わせにおいては、乾燥質量比 100%が高い強度を得るための最適な配合であると言える。このように、実質体積比を用いるよりも乾燥質量比を用いる方が製鋼スラグ混合土の強度特性を把握しやすいことがわかる。

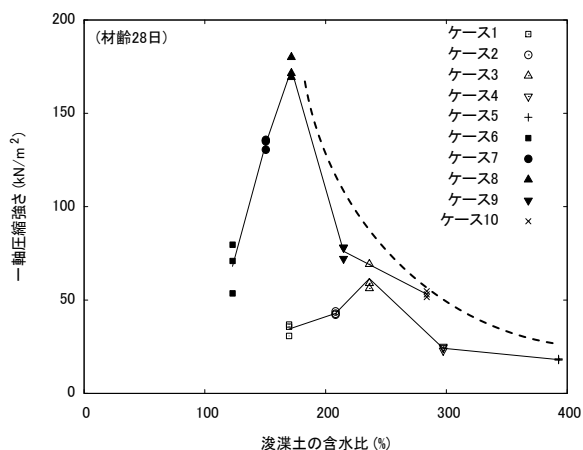


図-5.3 混合前の浚渫土の含水比と一軸圧縮強さ

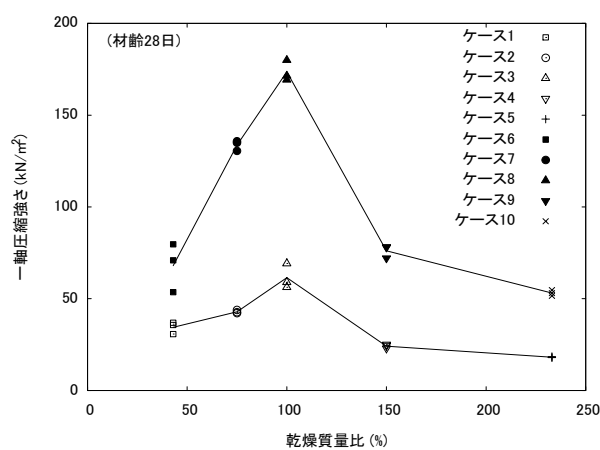


図-5.4 浚渫土と製鋼スラグの乾燥質量比と一軸圧縮強さ

(2) 製鋼スラグに含まれる遊離石灰 (f-CaO) が強度に与える影響 (series2)

(1)の結果より、浚渫土に添加する製鋼スラグを増加させても必ずしも一軸圧縮強さが大きくなるとは限らないことがわかった。本実験では、製鋼スラグの添加量は一定とし、製鋼スラグの成分が変化した場合の影響を検討するため、f-CaO 低含有と f-CaO 高含有の2種の製鋼スラグを用いて供試体を作製し、その強度を比較した。使用した浚渫土・製鋼スラグは3章に示したとおりである。供試体の攪伴回数は100回とし、均質な供試体を作製した。浚渫土と製鋼スラグの配合は、(1)の検討の結果、最も大きな一軸圧縮強さが得られた乾燥質量比100%とした。また、製鋼スラグ混合土の初期含水比は86%とした。

実験の結果得られた一軸圧縮強さと材齢の関係を図-5.5に示す。図-5.5より、いずれの材齢においても、f-CaO 高含有の製鋼スラグを用いた方が一軸圧縮強さが大きい結果となった。しかしながら、材齢7、14日ではその差は非常に小さく、また材齢28日においても一軸圧縮試験結果のばらつきが大きいことを考慮すると、それほど大きく差があるものとは言えない。3.2で述べたとおり、f-CaO 高含有の製鋼スラグは f-CaO 低含有の製鋼スラグと比較して少なくとも1.5倍程度の f-CaO を含んでいるものと思われる。しかしながら、今回用いた2種類の製鋼スラグによる実験では、一軸圧縮試験結果にあまり大きな差は見られず、f-CaO 含有率の影響を確認することはできなかった。

(3) 製鋼スラグの細粒分の影響 (series3)

製鋼スラグの細粒分が多いと、比表面積が大きくなることから、一般的に種々の化学反応が活性化されると予

想される。また、製鋼スラグの細粒分には、やや多くの f-CaO が含まれているとの報告もある<sup>27)</sup>。従って、製鋼スラグに含まれる細粒分の違いは、製鋼スラグ混合土の強度に大きく影響する可能性がある。そこで、75 $\mu$ m ふるいを用いて製鋼スラグ (f-CaO 高含有) を水洗し、粒径75 $\mu$ m 以上の成分と75 $\mu$ m 未満の成分に分離して、それぞれを用いて供試体を作製し、一軸圧縮強さの変化を調査した。なお、製鋼スラグの粒度分布は図-3.1に示したとおりであり、75 $\mu$ m 以下の成分は約3%となっている。

供試体は乾燥質量比43%、製鋼スラグ混合土の初期含水比119%とした。この条件は図-5.4からわかるとおり、あまり大きな強度が得られない条件となっている。作製した供試体は、ふるい分けを行う前の全粒径の製鋼スラグを用いたもの、ふるい分け後の75 $\mu$ m 以上の成分のみを用いたもの、75 $\mu$ m 未満の成分のみを用いたものの3種である。供試体の材齢と一軸圧縮強さの関係を図-5.6に示す。図-5.6より、全粒径の製鋼スラグを用いた場合と、75 $\mu$ m 以上の成分を用いた場合では、一軸圧縮強さに大きな差はないことが確認できる。このことから、配合設計時と実施工場で製鋼スラグの細粒分の含有量が多少変化したとしても、その変化が数%程度の範囲であれば製鋼スラグ混合土の強度に大きな影響を与えないと考えられる。一方、製鋼スラグの75 $\mu$ m 未満の細粒分のみを用いて作製した供試体は、他の場合よりも大きな一軸圧縮強さを示し、材齢の増加に伴う一軸圧縮強さの増加も顕著である。

そこで、粒径75 $\mu$ m 未満の製鋼スラグを用い、乾燥質量比を10、20%とさらに小さくして供試体を作製することを試みた。製鋼スラグ混合土の初期含水比は119%とした。なお、この配合条件で、全粒径の製鋼スラグを用

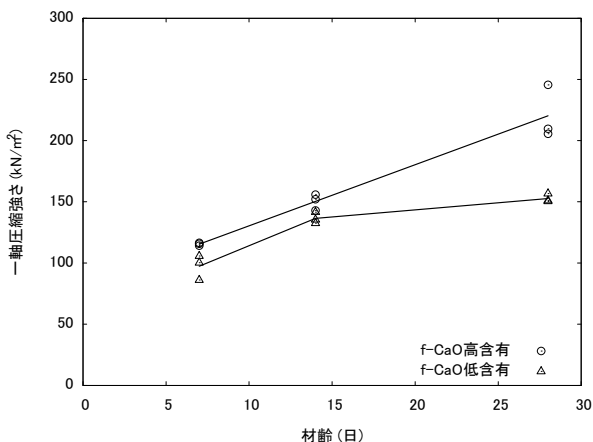


図-5.5 製鋼スラグ種別の一軸圧縮試験結果

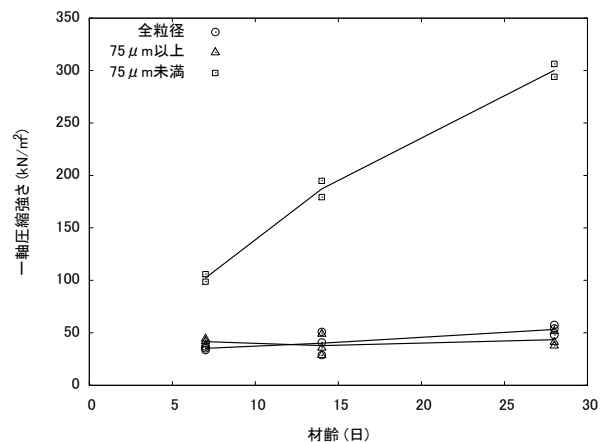


図-5.6 粒径の異なる製鋼スラグを混合した場合の一軸圧縮強さの変化

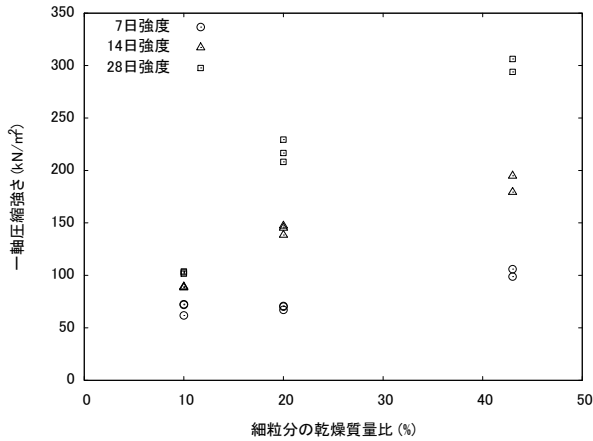


図-5.7 製鋼スラグ混合土の細粒分の乾燥質量比と一軸圧縮強さ

いて製鋼スラグ混合土を作製した場合、材齢 28 日でも供試体が自立しないことが確認されている。

実験結果を図-5.7 に示す。図-5.7 より、細粒分の乾燥質量比の増加に伴って、一軸圧縮強さが大きくなっていることがわかる。また、細粒分のみを製鋼スラグを用いることで、乾燥質量比を小さくしても十分な一軸圧縮強さが得られることがわかる。また、供試体毎の一軸圧縮強さのばらつきも小さく、安定した強度が得られている。このようなことから、製鋼スラグの添加量をできるだけ少なくしたい場合には、製鋼スラグの細粒分のみを使用

して強度増加を図ることも可能であると考えられる。

(4) 製鋼スラグ混合土の混合条件が強度に与える影響 (series4)

ここでは、製鋼スラグ混合土の均質性、特に製鋼スラグの分布状況が異なる場合に、製鋼スラグ混合土の強度がどのような変化をするかについて検討する。ここまでの検討では、供試体を作製する際のスプーンでの攪拌回数を 100 回とし、十分に混合した供試体を作製したが、ここでは攪拌回数を 15 回、30 回、100 回の 3 通りに変化させ、それぞれの場合における製鋼スラグの分布状況ならびに一軸圧縮強さを調査した。配合条件は、乾燥質量比 100%、製鋼スラグ混合土の初期含水比 86% である。

a) X 線 CT 装置による供試体内部の観察

攪拌回数の異なる供試体を作製した直後に、X 線 CT 装置で供試体を撮影し断面画像を取得した。得られた水平断面・鉛直断面画像を図-5.8 に示す。図-5.8 には、撮影した断面位置もあわせて示している。画像では密度の高い部分が白く、密度の低い部分が黒く表示されている。この供試体の場合、密度の高い白い部分は製鋼スラグの粒子であると考えられる。また、供試体中の黒い部分は供試体中に含まれている気泡に対応している。その他のグレーの部分の部分が浚渫土を示している。図-5.8 から、攪拌

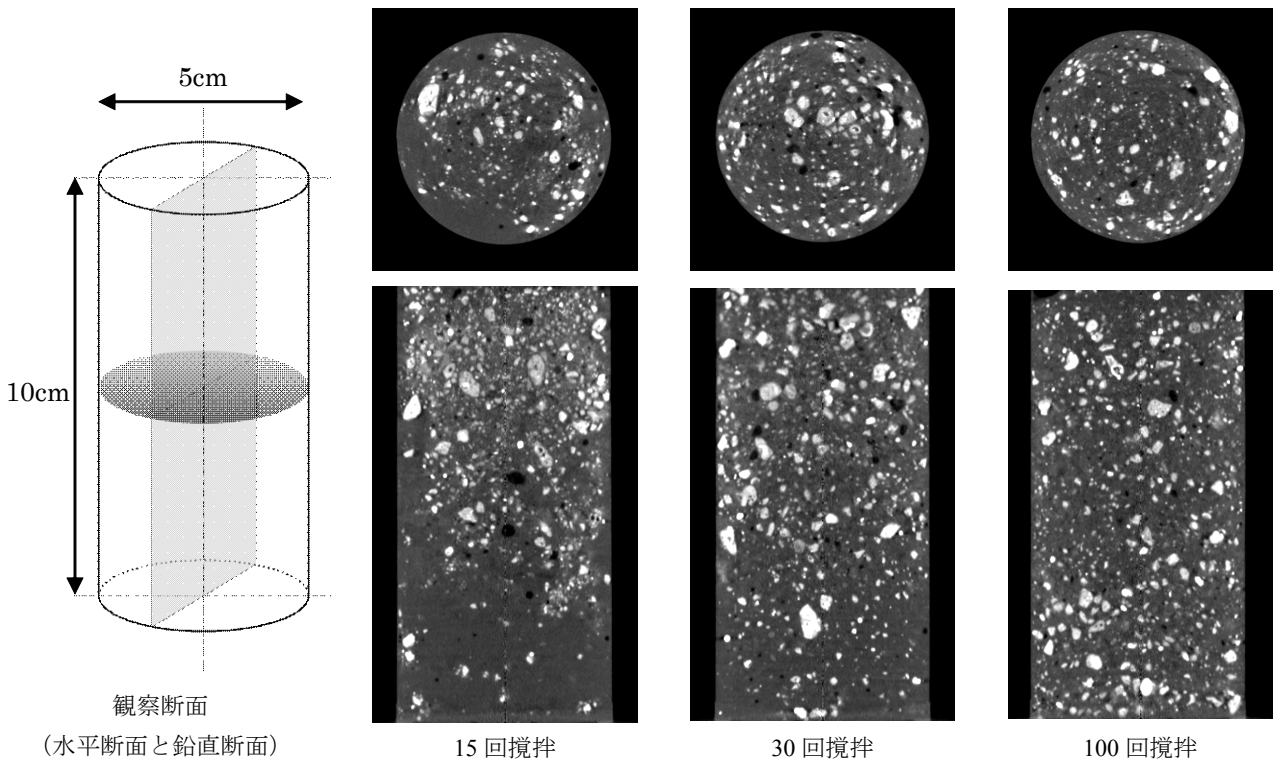


図-5.8 攪拌回数を変化させた場合の製鋼スラグ混合土の断面画像

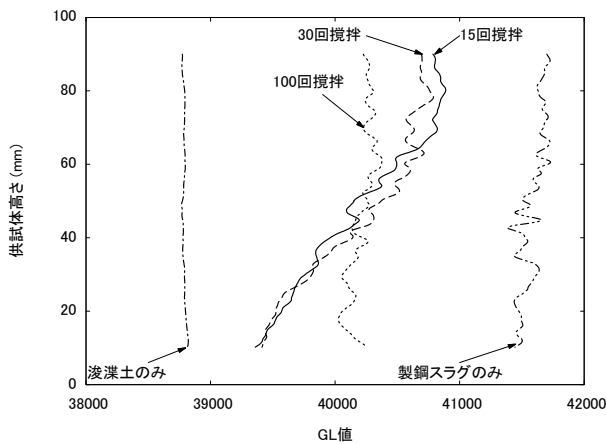


図-5.9 GL値の鉛直方向分布

回数が 15 回の場合、製鋼スラグが供試体の上部に集まっており、供試体下部にはあまり分布していない。一方、攪拌回数が 100 回の場合、製鋼スラグが供試体内で比較的均等に分布していると考えられる。攪拌回数が 30 回の場合はその中間的な状況で、供試体下部でやや製鋼スラグが少ないように見受けられる。

このような供試体の不均質性をもう少し定量的に確認するため、X 線 CT 画像の輝度の鉛直方向分布を求め、その変動傾向を調査する。X 線 CT 装置で得られる 3 次元画像は水平断面をつみ上げたような形で取得されており、本研究では供試体の高さ方向に 512 枚の水平断面として画像データを取得している。そこで、各水平断面の輝度の平均値を求め、その平均値とその水平断面の高さの関係をプロットすることで、供試体の X 線 CT 画像の輝度の鉛直方向分布を示すと図-5.9 のような関係が得られる。図-5.9 では、輝度を GL 値と呼ばれる値で示しており、GL 値が大きい方が画像が白く（密度が高い）、GL 値が低くなると画像が黒い（密度が低い）ことを表している<sup>28)</sup>。また、図-5.9 では、比較のため、浚渫土のみの供試体、製鋼スラグのみの供試体を作製し、X 線 CT 装置で断面画像を撮影して同様な処理を行った結果をあわせて示している。

図-5.9 より、攪拌回数が 15 回の場合には、供試体の上部で GL 値が高く、下部にいくほど GL 値が低い状況が確認できる。図-5.8 で確認したとおり、供試体の上部に製鋼スラグが集中してしまっていることに対応している。攪拌回数が 30 回の場合、図-5.8 の画像では製鋼スラグはある程度均等に入っており、供試体下部でやや少ないというように見えているが、図-5.9 で確認するとその混合状況はむしろ攪拌回数 15 回の場合に近く、供試体

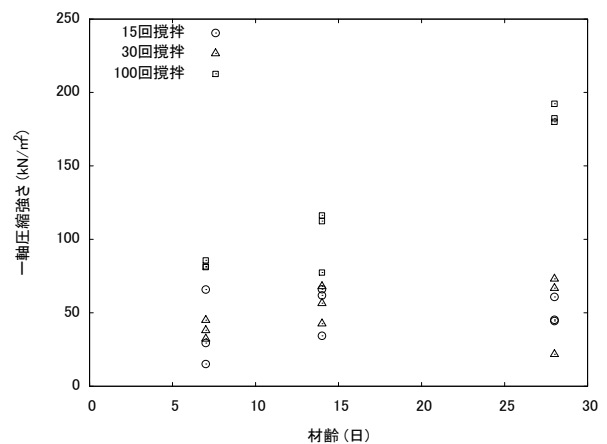


図-5.10 攪拌回数が異なる製鋼スラグ混合土の材齢と一軸圧縮強さ

がかなり不均質であることが確認できる。一方、図-5.9 によると、攪拌回数が 100 回の場合には鉛直方向の GL 値の変動は小さく、供試体の均質性が確保されていることがわかる。

#### b) 一軸圧縮試験の結果

材齢 7, 14, 28 日の供試体について、一軸圧縮試験を実施した結果を図-5.10 に示す。図-5.10 より、攪拌回数が 100 回の供試体は他の場合と比較して一軸圧縮強さが大きく、材齢とともに一軸圧縮強さが増加していく傾向が見られる。また供試体毎の強度のばらつきも小さい。これに対し、攪拌回数が 15 回、30 回の場合、一軸圧縮試験が可能である程度には固化が進んでいるものの、いずれの材齢においても供試体毎の一軸圧縮強さのばらつきが大きく、材齢が進んでも一軸圧縮強さが伸び悩む傾向にある。材齢 28 日において、攪拌回数 15 回、30 回の場合の一軸圧縮強さは、100 回の場合の一軸圧縮強さの 1/3 程度となっている。これは、a) で確認した製鋼スラグ混合土の不均質性によるものであり、後で述べる製鋼スラグ混合土の破壊状況などから、供試体の強度は製鋼スラグの分布状況に大きく依存するためと考えられる。

#### c) 製鋼スラグの分布状況の評価

4.1 の模型実験の結果によると、浚渫土の固化範囲は、模型地盤作製後 7~14 日で浚渫土と製鋼スラグの接触面から 5mm 程度、28 日後で 7mm 程度であった（図-4.3 参照）。そこで、攪拌回数が少なく不均質な供試体と、十分に攪拌した均質な供試体について、浚渫土から製鋼スラグまでの距離の分布状況を計算により求めることを試みた。



検討の対象としたのは、乾燥質量比 43%、製鋼スラグ混合土の初期含水比 119%の供試体である（計算時間を短縮するため、製鋼スラグの添加量が少ない配合条件のものを対象とした）。均質な状態を得るため 3 分間攪拌を継続した供試体 2 本と、15 回攪拌で作製した供試体 3 本である。なお、3 分間の攪拌で、攪拌回数は約 100 回であった。

計算手順は以下のとおりである。まず、X 線 CT 装置で取得した供試体の 3 次元画像から製鋼スラグの粒子を抽出する。粒子の抽出は、画像処理ソフトウェア ImageJ を用いて自動的に行った。抽出された粒子の個数は供試体毎に異なっており、7000~25000 個である。一方、製鋼スラグの添加量と粒度分布から、製鋼スラグの粒子がすべて球であると仮定して供試体に含まれる粒子数を求めると  $3.5 \times 10^{12}$  個、X 線 CT 画像の解像度 0.12mm より大きい粒子に限ると約 200000 個である。計算上は粒径 0.63mm 以上の粒子の個数が約 23000 個となり、抽出した粒子の個数に対応する。このことから、X 線 CT 画像から抽出できた製鋼スラグは粒径が 0.63mm 程度以上のもののみであり、それより小さい製鋼スラグの粒子の存在は無視していると考えられる。

次に、供試体内の任意の 1 点に着目し、着目点から最寄りの製鋼スラグ粒子までの離隔を求める。この時、簡単のため、製鋼スラグの粒子の大きさは無視し、製鋼スラグの重心までの離隔を求めた。このため、着目点が製鋼スラグの粒子内にある場合でも、最寄りの製鋼スラグ重心までの離隔が計算される。着目点を変化させながら同様な計算を行い、離隔の頻度分布を求める。ここでは、直径 5cm、高さ 10cm の円筒供試体の中心部分に、縦横 3cm、高さ 8cm の立方体状の範囲を設定し、この範囲内に含まれる縦、横、高さともに 1mm 毎の格子点を着目点として計算を行った。供試体の中心部分だけを計算したのは、X 線 CT 装置で取得する 3 次元画像の周辺部では画像のゆがみや輝度変化のノイズが大きく、画像の精度が低いためである。頻度分布を求めるために計算した着目点数は 77841 点である。このようにして得られた供試体中の各点から最寄りの製鋼スラグ重心までの離隔の頻度分布を図-5.11 に示す。

3 分間攪拌した供試体の場合、離隔の最頻値は 1mm 程度であり、離隔が大きい場合でも 3~4mm 程度におさまっていることがわかる。製鋼スラグ粒子の 80%以上が粒径 1mm 以上である（図-3.1 参照）ことを考慮すると、供試体の各地点から製鋼スラグ表面までの距離は、ほとんどの場合、数 mm 以下におさまっていると考えられることができる。

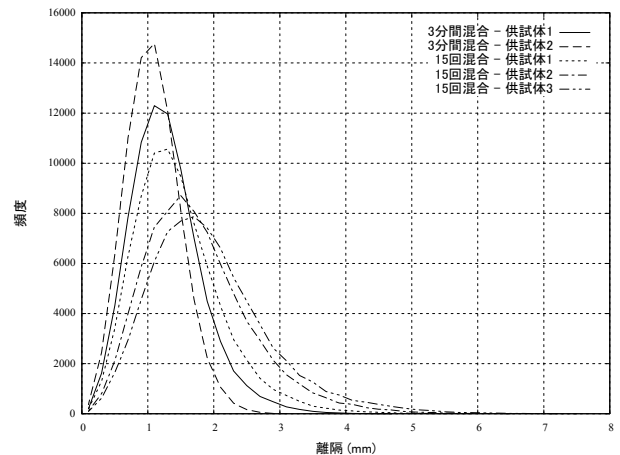


図-5.11 乾燥質量比43%、初期含水比119%の製鋼スラグ混合土中の任意の点から製鋼スラグ粒子の中心までの離隔の頻度分布

一方、15 回攪拌の供試体の場合、離隔の最頻値は 1~2mm とそれほど大きくはないが、ばらつきの範囲が大きく、離隔が最大で 5mm 程度まで達していることが図-5.11 からわかる。しかしながら、製鋼スラグ粒子の粒径を考慮していないこと、また、模型実験で確認したとおり、反応物質が十分にあれば 7~14 日の養生中に固化範囲が 5mm 程度まで及ぶことなどから、15 回攪拌であっても浸漬土部分は十分に固化するものと考えられる。配合条件は異なるものの、b) で示したとおり、15 回攪拌の供試体でも一軸圧縮試験が実施できる程度までは固化している。このようなことから、本研究で実施した程度の範囲であれば、製鋼スラグ混合土の攪拌が不十分な場合でも固化が進まないということはなく、固化はするが固化部分の強度が相対的に低いことや、製鋼スラグ混合土の不均質性により供試体の強度が低下している可能性があると考えられることができる。

### 5.3 まとめ

本章では、配合や混合条件を様々に変化させて作製した製鋼スラグ混合土に対して一軸圧縮試験を実施し、配合・混合条件が強度に与える影響について検討した。その結果、以下のようなことを確認した。

- 製鋼スラグ混合土で大きな強度を得るためには、最適な浸漬土と製鋼スラグの乾燥質量比が存在し、それ以上の製鋼スラグを添加すると強度はむしろ低下する。この乾燥質量比は、製鋼スラグ混合土の初期含水比によらない。また、初期含水比が低いほど製鋼スラグ混合土の強度は増加する。

- ・遊離石灰含有率の異なる製鋼スラグを用い、作製した製鋼スラグ混合土の強度を比較すると有意な差は見られなかった。これは、製鋼スラグ混合土の強度を得るための適切なバランスとなる製鋼スラグ添加量が存在するためと考えられる。
- ・製鋼スラグの細粒分の変化により、製鋼スラグ混合土の強度は変化する。従って、配合試験の際に使用する製鋼スラグと実施工で使用する製鋼スラグの粒度分布に、大きな差異が無いことを確認する必要がある。一方で、製鋼スラグの細粒分を積極的に用いることで、製鋼スラグ混合土の強度増加を図ることも可能であると考えられる。
- ・製鋼スラグ混合土の攪拌が不十分な場合、強度が低下したり供試体毎のばらつきが大きくなったりすることが確認された。しかしながら、4章の模型実験の結果やX線CT装置の観察の結果などから、今回の検討の範囲においては製鋼スラグ混合土の攪拌が不十分でも固化反応が進まないということではなく、固化はするが固化部の強度が相対的に低いことや、供試体の不均質性に起因して供試体の強度が低下している可能性がある。

## 6. 製鋼スラグ混合土の破壊の進行状況

5章の検討結果より、製鋼スラグ混合土の強度には固化反応の進展状況だけではなく、固化部の強度や供試体内の不均質性も影響している可能性が示唆された。ここでは、一軸圧縮試験中の供試体の断面画像をX線CT装置により取得し、供試体内部における破壊の進行状況を調査する。

### 6.1 十分に攪拌した供試体の破壊状況

まず十分に攪拌し、均質に作製した供試体の破壊状況を観察する。観察の対象としたのは、浚渫土の含水比を液性限界の1.5倍に調整し、製鋼スラグを乾燥質量比で43, 100, 233%添加して作製した供試体で、製鋼スラグ混合土の初期含水比はそれぞれ119, 86, 52%である。供試体作製時には3分間攪拌を継続し、均質な供試体を作製している。一軸圧縮試験を実施した供試体の材齢はいずれも14日である。

図-6.1に各供試体の一軸圧縮試験で得られた軸荷重～軸変位関係を示す。一軸圧縮試験の試験結果は軸荷重・軸ひずみから圧縮応力と圧縮ひずみを求めて図示すべきであるが、ここでは図-6.2～6.4に示した画像との対比を容易にするため、軸荷重～軸変位関係を中心に説明する。図-6.1中で、一定の軸変位毎に軸荷重が低下し

ているが、これはX線CT装置による画像取得のため載荷を停止したことによるものである。

それぞれの実験で得られた供試体の水平断面画像、鉛直断面画像を図-6.2～6.4に示す。観察断面の位置は図-5.8と同様である。

図-6.2に示した乾燥質量比43%の供試体の場合、軸荷重が最大となるのは、軸変位2.9mm付近であり、図-6.2の2枚目と3枚目の間にあたる。水平断面画像では製鋼スラグの粒子を中心とした放射状のノイズが見られるため判別が難しいが、良く観察すると、2枚目の軸変位2.7mmの際には見られないクラックが3枚目の水平断面や鉛直断面の中央部、右下部に見られる。4枚目の軸変位3.5mmの画像では、これらのクラックがさらに進展し、また拡幅していることがわかる。クラックは浚渫土（画像のグレー部分）の中央から発生している。

次に、図-6.3に示した乾燥質量比100%の場合、軸荷重が最大となるのは軸変位2.7mm付近であり、図-6.3の2枚目に相当する。図-6.3の鉛直断面画像では軸変位2.4～3.0mmまではクラックの発生が確認できず、軸変位4.0mmの画像で突然大きなクラックが発生しているように見える。しかしながら、軸変位3.0mmの水平断面画像を見ると、画像の下部、気泡で供試体が少し欠けているように見える部分からわずかにクラックが発生している様子を確認できる。気泡付近とその左上にある製鋼スラグの表面部分が弱面となってクラックが発生したようにも見えるが、この画像からでは発生状況は不明瞭である。

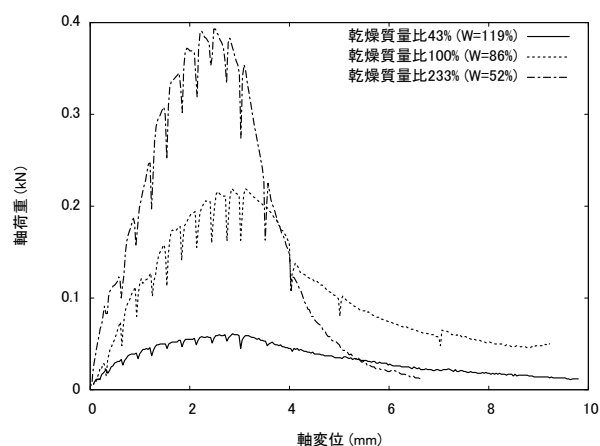
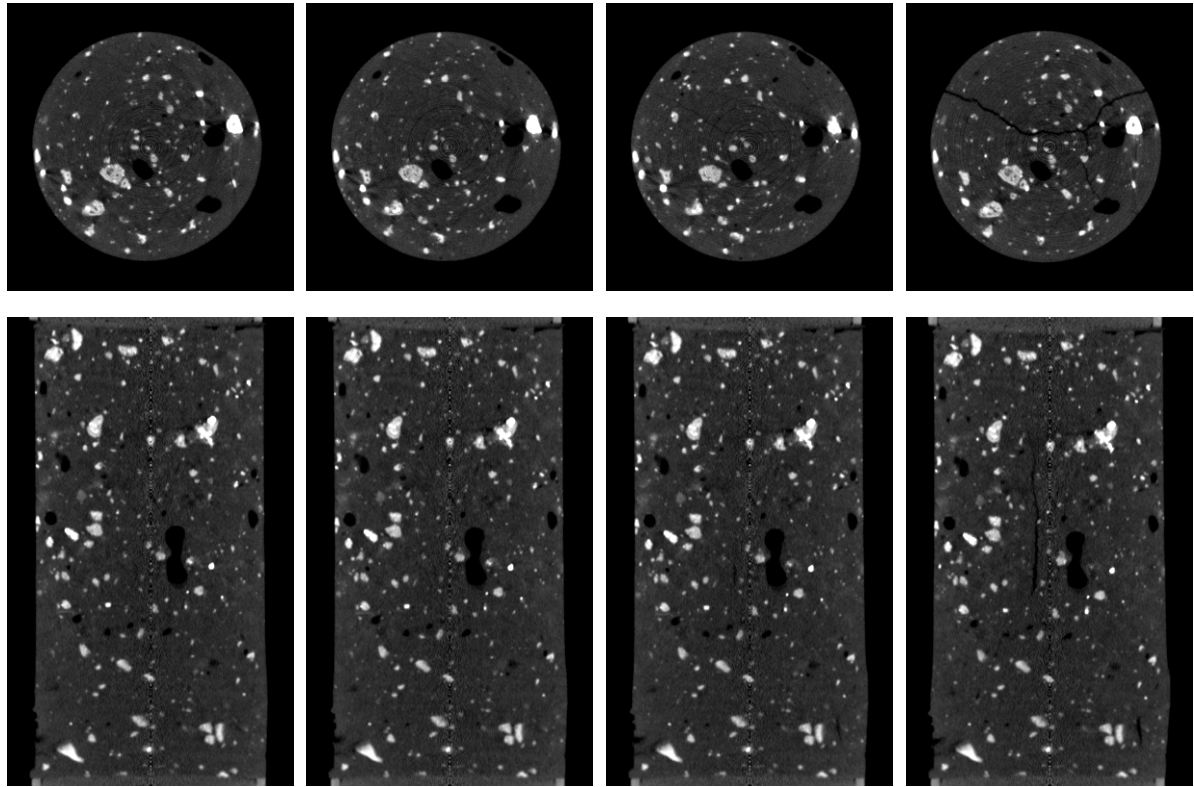
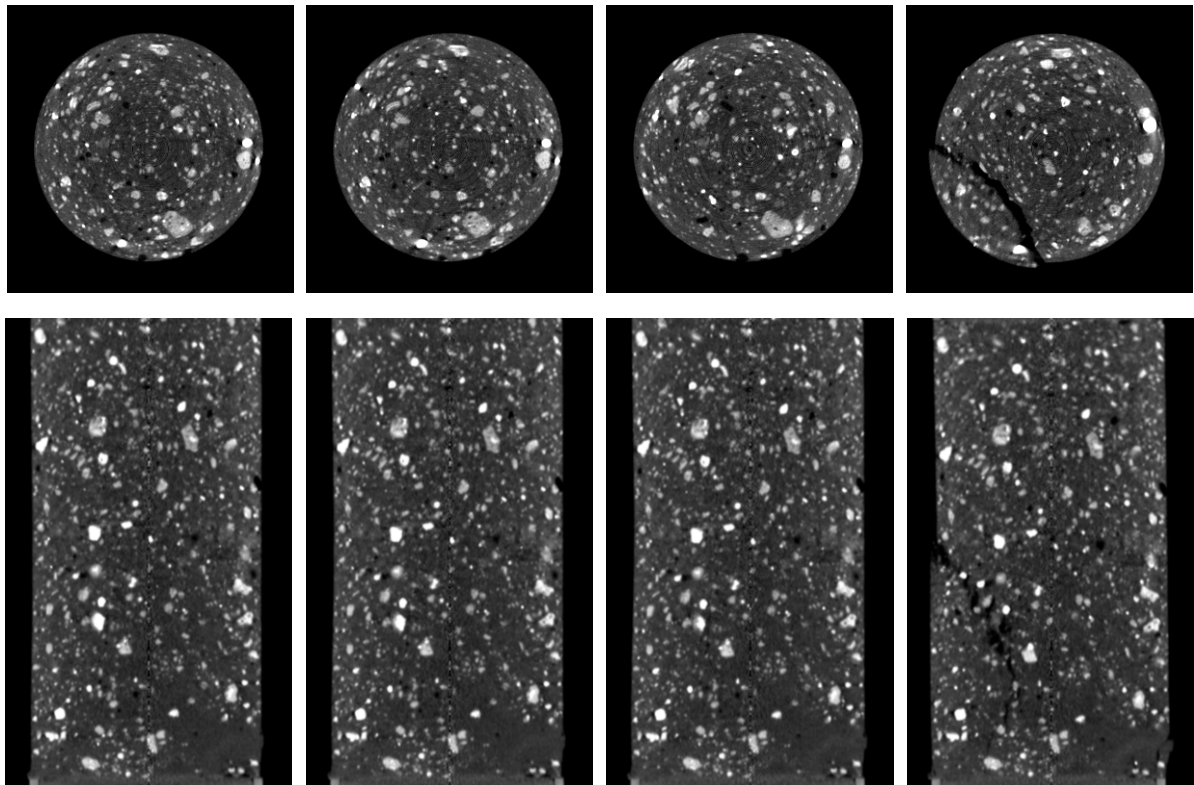


図-6.1 3分間攪拌により作製した製鋼スラグ混合土の一軸圧縮試験結果



軸変位: 2.4mm                      2.7mm                      3.0mm                      3.5mm

図-6.2 乾燥質量比 43%で 3 分間攪拌して作製した混合土の一軸圧縮試験時の断面画像



軸変位: 2.4mm                      2.7mm                      3.0mm                      4.0mm

図-6.3 乾燥質量比 100%で 3 分間攪拌して作製した混合土の一軸圧縮試験時の断面画像

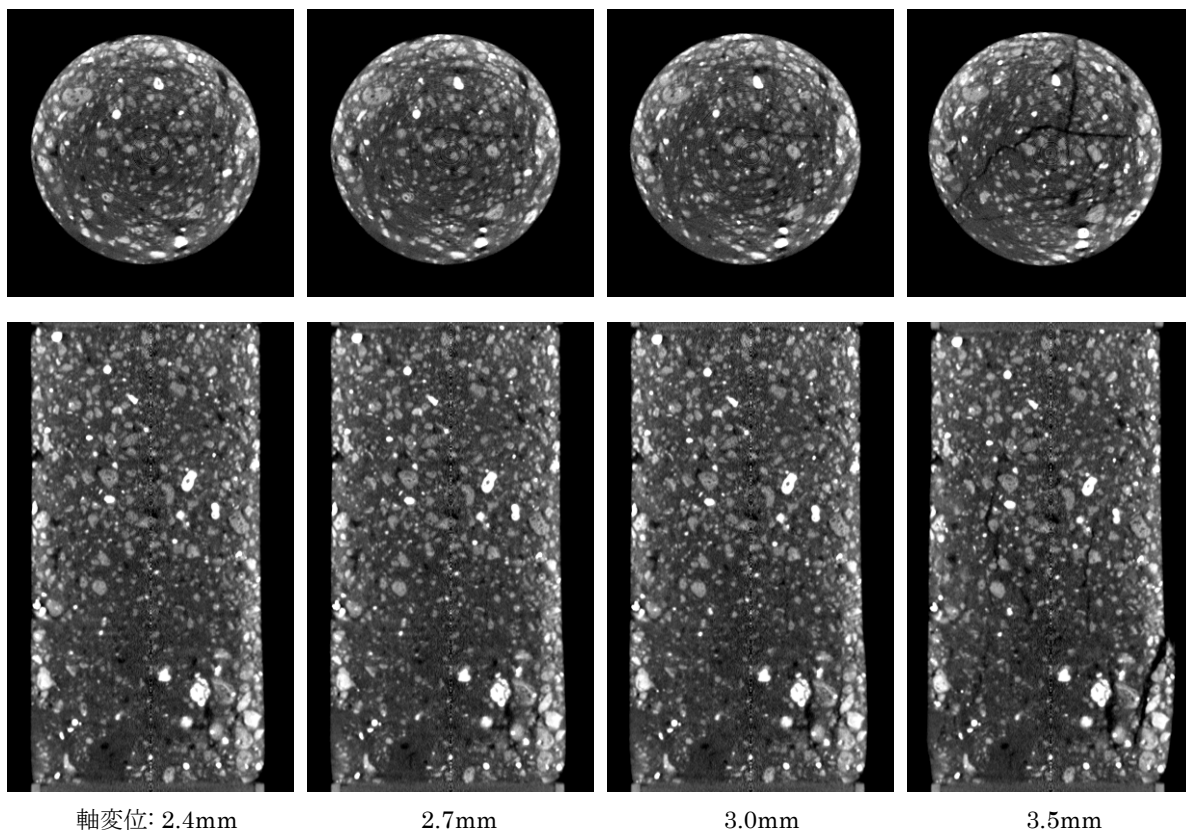


図-6.4 乾燥質量比 233%で 3 分間攪拌して作製した混合土の一軸圧縮試験時の断面画像

図-6.4 に示した乾燥質量比 233%の供試体では、軸荷重が最大となるのは軸変位 2.8mm 付近であり、図-6.4 の左から 2 枚目と 3 枚目の間にあたる。図-6.4 でも図-6.3 の場合と同様、鉛直断面画像ではクラックの発生が確認しにくい。軸変位 3.0mm の水平断面を見ると、中央付近から右向きと上向き、さらに左下方向へクラックが発生している。このクラックは供試体中の製鋼スラグの間を縫うように、また、製鋼スラグの表面付近から浚渫土が剥離するように発生しており、図-6.2 の場合とは傾向が異なるようである。なお、図-6.4 および後に述べる図-6.8 に示した供試体の浚渫土と製鋼スラグの実質体積比は約 34%であり、製鋼スラグ粒子が接触することにより破壊時の挙動が他の供試体と異なっている可能性がある。

### 6.2 不均質な供試体の破壊状況

次に、攪拌が不十分で供試体が不均質な場合として、配合条件は 6.1 と同様で攪拌回数を 15 回とした供試体の破壊状況を観察する。

図-6.5 に一軸圧縮試験で得られた軸荷重～軸変位関係を示す。製鋼スラグの添加量が多い乾燥質量比 233% の場合には、図-6.1 の 3 分間攪拌の場合と同程度の最大

軸荷重が得られている。他の 2 つの場合(乾燥質量比 43, 100%) には、3 分間攪拌の場合よりも最大軸荷重が小さく、最大軸荷重を示す軸変位も小さい。図-6.6～6.8 にこれらの実験で得られた水平断面、鉛直断面画像を示す。

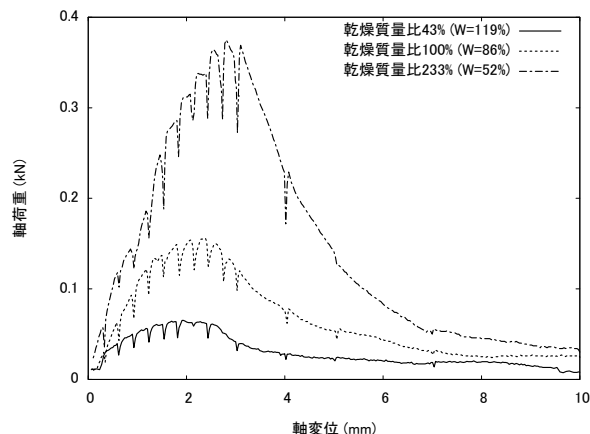


図-6.5 15回攪拌により作製した製鋼スラグ混合土の一軸圧縮試験結果

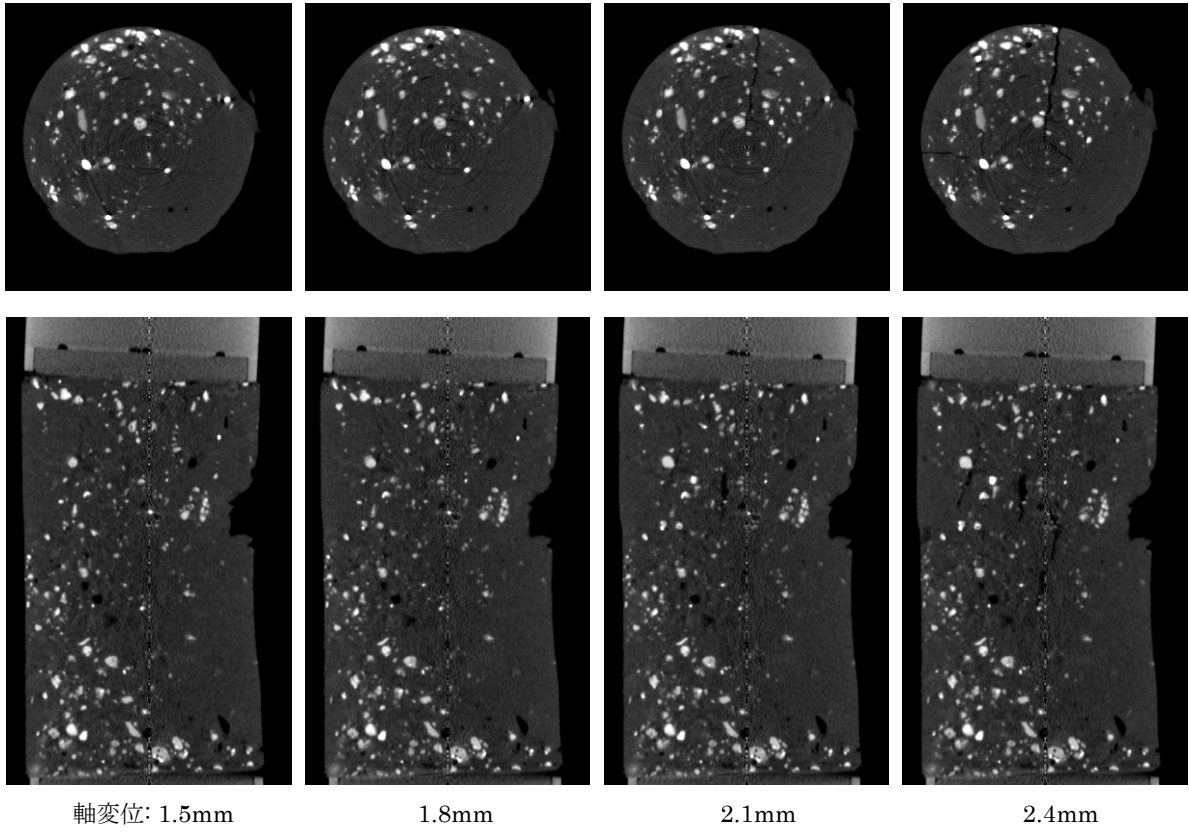


図 6.6 乾燥質量比 43%で 15 回攪拌して作製した混合土の一軸圧縮試験時の断面画像

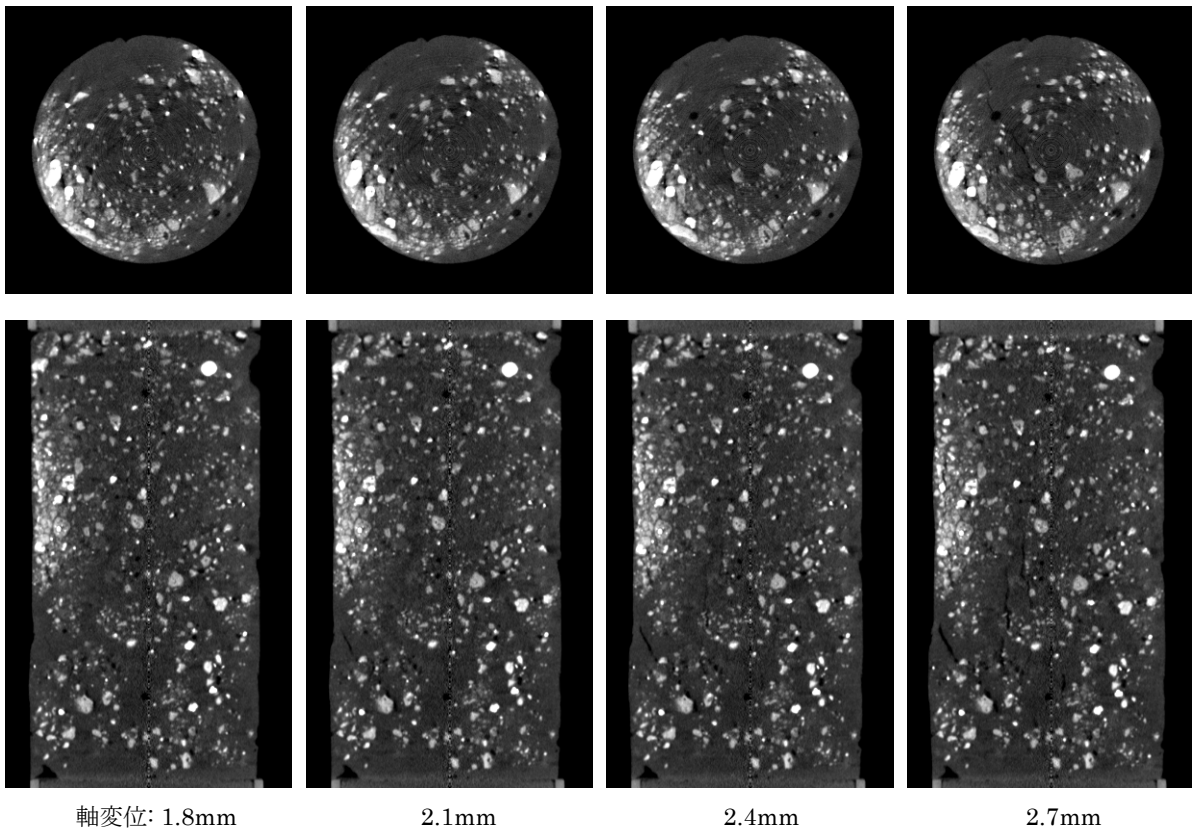


図-6.7 乾燥質量比 100%で 15 回攪拌して作製した混合土の一軸圧縮試験時の断面画像

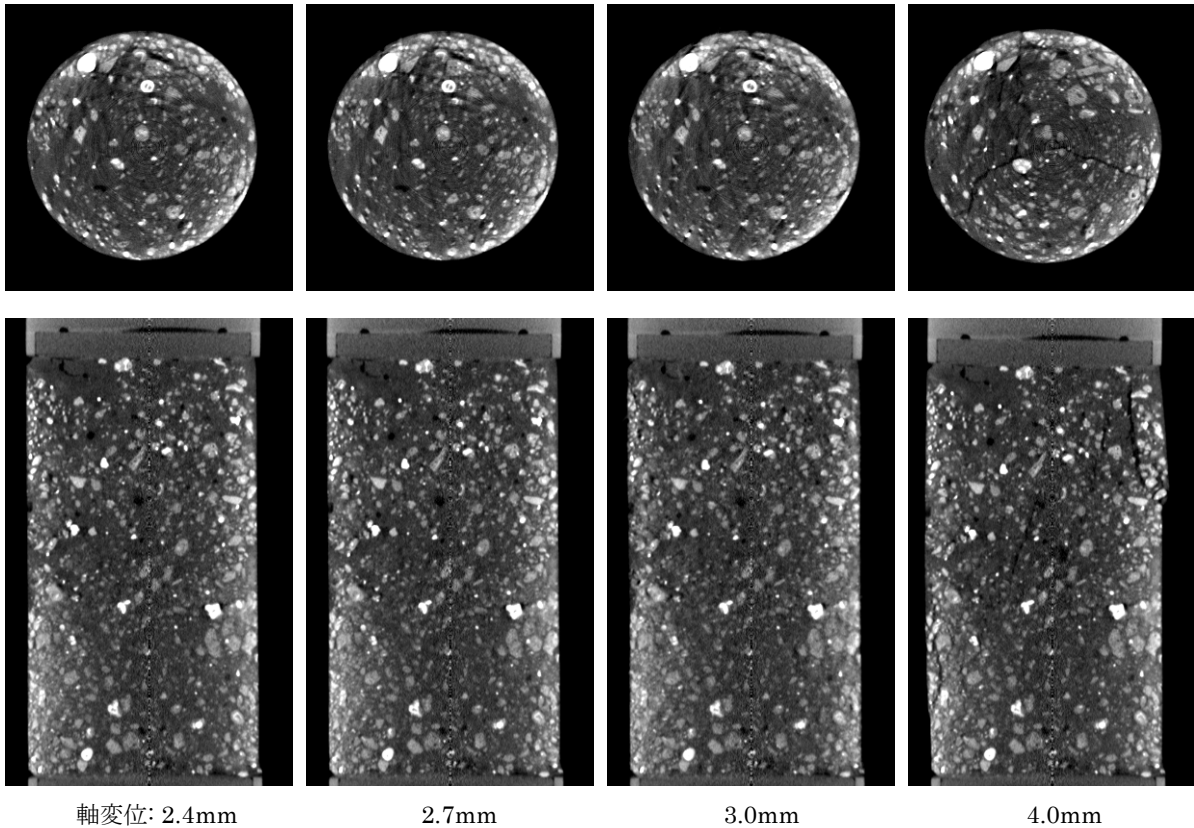


図-6.8 乾燥質量比 233%で 15 回攪拌して作製した混合土の一軸圧縮試験時の断面画像

図-6.6 に示した乾燥質量比 43%の供試体の場合、供試体の右半分には製鋼スラグの粒子があまり分布しておらず、供試体は初期からやや右に傾いていた。最大軸荷重は軸変位が約 1.7mm の時点で記録され（図-6.6 の左から 2 枚目付近）、その後、供試体にクラックが発生している様子が観察される。この時、クラックは供試体の中央部、製鋼スラグが比較的多い供試体の左側と比較的少ない右側の境界付近に発生している。また、製鋼スラグが比較的多い左側の中にも、浚渫土の中央部分から発生しているクラックが存在する。

次に、図-6.7 の乾燥質量比 100%の場合を見ると、軸荷重が最大となる軸変位 2.3mm よりも前の軸変位 2.1mm の段階ですでに小さなクラックが発生していることが確認できる。クラックの発生位置は浚渫土の中央であり、このクラックがその後供試体の圧縮に伴って進展・拡幅していく。配合条件・攪拌条件は異なるものの、クラックの発生状況としては図-6.2 で見られたものと同様な傾向を示しているようである。

最後に、製鋼スラグの混合量が多い乾燥質量比 233%の場合、軸変位が 2.6mm の時点で最大軸荷重を記録しているが、図-6.8 によると、軸変位が 3.0mm の段階でもまだクラックは確認できない。軸変位が 4.0mm の段階で

ようやくクラックの発生が確認できる。このクラックは製鋼スラグの表面から剥れるようにして発生しており、同じ配合条件で 3 分間攪拌した供試体（図-6.4）と同様の傾向を示している。このケースでは、製鋼スラグの添加量が多いため、攪拌回数が少なくても供試体全体に製鋼スラグが均等に分布している。そのため、強度・破壊状況とも 3 分間攪拌したケースとほぼ同様な結果になったものと思われる。

### 6.3 製鋼スラグ混合土の破壊状況のまとめ

6.1, 6.2 の観察結果から、製鋼スラグ混合土の破壊状況をまとめると、概ね以下のようなパターンに分類されることが考えられる。

#### ① 製鋼スラグ混合土が著しく不均質な場合

製鋼スラグが多く分布する領域と、製鋼スラグが分布していない領域で供試体の強度に大きな差が発生するため、強度の大きい部分に応力集中が発生するなどして、その境界付近でクラックが発生する。供試体の強度は、製鋼スラグの分布状況に大きく依存するため、供試体毎の強度のばらつきが大きくなるものと推測される。



② 製鋼スラグの添加量が少ない場合・部分的に少ない領域ができてしまった場合

製鋼スラグが少ない部分であっても、浚渫土は固化しているものと考えられる。しかしながら、製鋼スラグから遠い部分の浚渫土は相対的に固化後の強度が低いと思われ、クラックはこういった浚渫土の中央部分から発生し、供試体の圧縮に伴って進展・拡幅していく。このような状況では、供試体の強度が主として浚渫土部分の固化後の強度に支配されているものと思われる。

③ 製鋼スラグの添加量が多く供試体内に均等に分布している場合

浚渫土部分が十分に固化し、製鋼スラグ混合土は高い剛性を持つ。最大軸荷重を越えるまではクラックの発生は見られず、最大軸変荷を越えた後に急にクラックが発生する脆性的な挙動を示す。クラックは製鋼スラグの表面から固化した浚渫土が剥離するようにして発生する。このような状況では、供試体の強度が主として浚渫土と製鋼スラグの付着力によって支配されているものと思われる。

②と③のどちらのパターンが表れるかは、固化した浚渫土の強度と、浚渫土と製鋼スラグの付着力のどちらが大きいかに依存すると考えられる。

7. 現地で製造した製鋼スラグ混合土の内部状況の観察

堺泉北港堺2区で実証実験工事の際に作製された製鋼スラグ混合土について、X線CT装置による内部状況の観察を実施した。製鋼スラグ混合土の配合条件は、浚渫土400m<sup>3</sup>に対し製鋼スラグ100m<sup>3</sup>という体積管理で決定

されている。製鋼スラグは新日本製鐵（株）製の粒径20mm以下のものが使用されている。混合方法はバックホーによる混合攪拌で、攪拌時間は2時間である。供試体は2時間攪拌後に現地で直径100mm、高さ200mmのプラスチックモールドに取り分け、10日程度現地保管し固化した後に運搬した。バックホーによる攪拌状況及び供試体の外観を図-7.1に示す。

X線CT装置による観察は、供試体をモールドに入れたままの状態で行った。観察した供試体は2本である。撮影断面は図-7.1に示したとおりで、水平断面を1断面、鉛直断面を2断面（互いに直交する断面）とした。ただし、装置の都合により、鉛直断面の高さ方向の観察範囲は供試体中央部の10cm分とした。得られた画像を図-7.2に示す。

図-7.2より、製鋼スラグの粒子は比較的均等に分布しており、混合状態は良好である。スラグ粒子と浚渫土の境界面に剥離等は見られず、付着状況も良好であると思われる。供試体1の鉛直断面の中央部を見ると、製鋼スラグの粒子がやや少なく、浚渫土が集まっているようにも見受けられるが、細かい製鋼スラグの粒子が混入しており、粒子間の距離も狭いことから、固化が発生しないような状況ではないと考えられる。なお、図に示した断面以外にもいくつかの断面を観察したが、全体的に同様な傾向であった。

図-7.2を見ると、モールドの供試体の間には隙間があいており、製鋼スラグによる吸水や固化に伴う体積収縮が発生している可能性がある。特に供試体2では供試体中央部までクラックが発生している。クラックはどちらかと言えば製鋼スラグが多く分布している領域を中心に発生しているようである。今回観察した製鋼スラグ混合土については、現地においてフロー値の測定が困難なほ

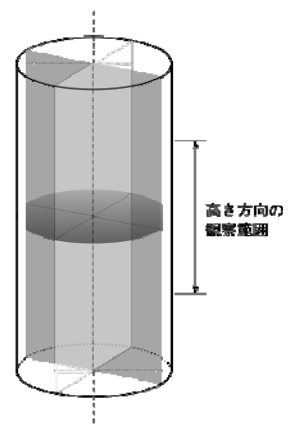


図-7.1 製鋼スラグ混合土の攪拌状況、供試体の外観及び観察位置

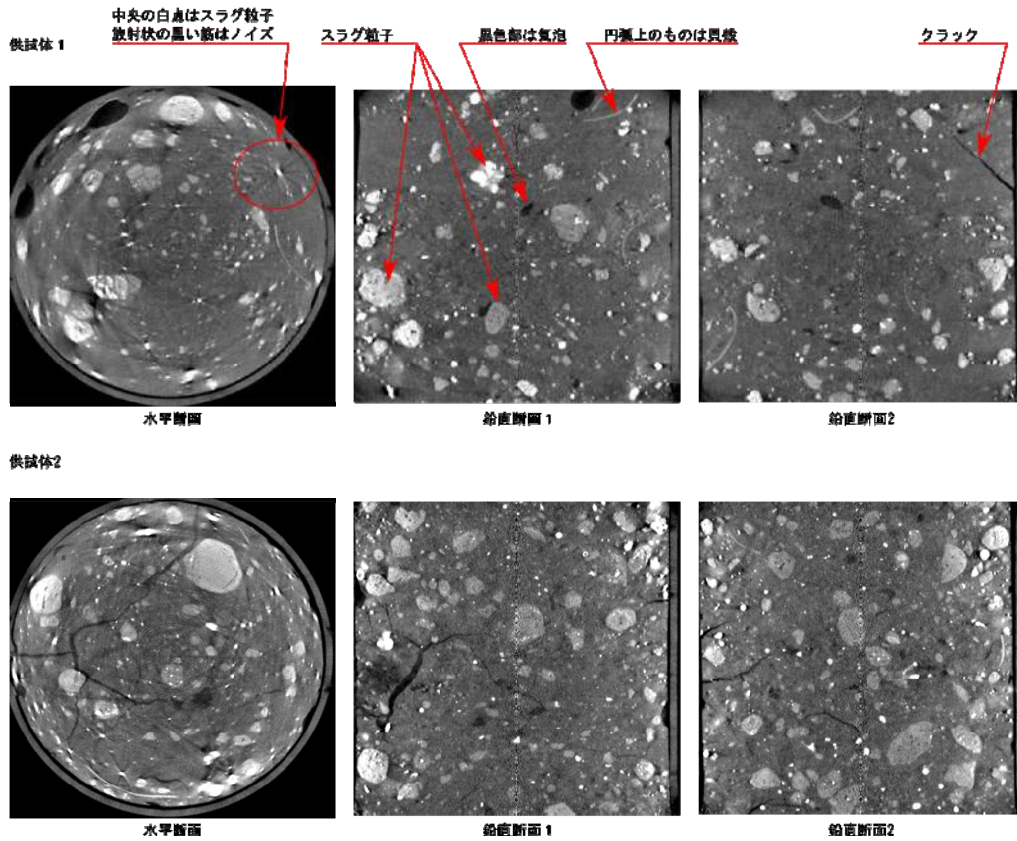


図-7.2 現地で作製された製鋼スラグ混合土の X 線 CT 装置による観察結果

どかたかったとのことで、製鋼スラグ混合土の初期含水比が低かったことがクラックの発生原因となっている可能性もある。このようなクラックは他の一軸圧縮試験用の供試体作製時にも確認されており、水中養生の条件下でもクラックが進展することが観察されている。原位置においてこのようなクラックが連続的に発生した場合、これが弱面となって地盤の強度が低下する要因にもなり得る。打設順や打ち継ぎ部の処理などでクラックが連続しないよう工夫する必要があると思われる。

混合状態をより明確にするため、5.2(4)と同じ手法で供試体 1, 2 の GL 値の鉛直方向分布を求めた。結果を図-7.3 に示す。X 線 CT 装置の都合で一度に取得できる画像の高さが 10cm に制限されるため、ここでは、供試体（高さ 20cm）を上部と下部の 2 回に分けて撮影している。また、X 線 CT 装置による観察の際、撮影範囲の端部では十分な画像の精度が得られないため、図-7.3 では供試体の上下端及び中央部のデータが得られていない。

図-7.3 より、供試体 1 と供試体 2 で若干の差はあるものの、概ね近い GL 値となっている。また、各供試体の上下方向の GL 値の変化は高々 1000 程度の範囲におさまっている。実験室内で作製した均質な供試体の場合（図-5.8）と比較すると少し変動幅が大きいが、使用した製

鋼スラグの最大粒径が大きいことを考慮すれば、製鋼スラグの粒子は十分に均等に分布していると言って良いと思われる。

以上、断面画像の観察結果及びその輝度分布の分析結果より、今回作製された製鋼スラグ混合土は十分に攪拌されており、均質な状態になっているものと考えられる。

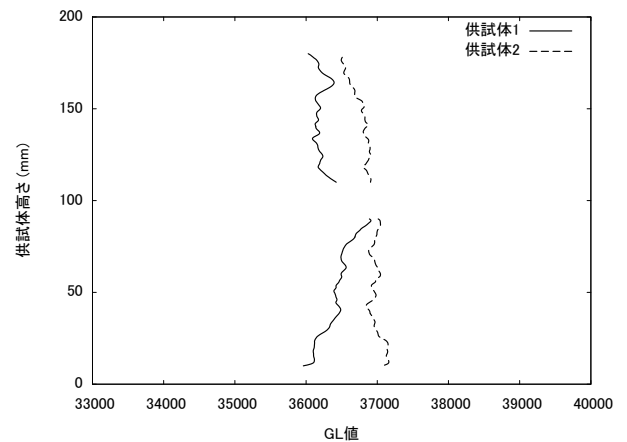


図-7.3 現地で作製された供試体の GL 値の鉛直方向分布



## 8. 本研究のまとめ

これまで述べてきた検討の結果から、本研究で得られた製鋼スラグ混合土の力学特性に関する知見をまとめると以下ようになる。

製鋼スラグ混合土の強度は、添加する製鋼スラグの量だけではなく、製鋼スラグ混合土の初期含水比（製鋼スラグを添加・攪拌した直後の含水比）、浚渫土に含まれるシリカと製鋼スラグに含まれる遊離石灰の量のバランス、シリカとカルシウムの溶出に影響する化学平衡などの要因に支配されている。そのため、これらの総合的な関係から、大きな強度を得るための最適な製鋼スラグ添加量が存在する。この添加量を把握するためには、配合試験において、製鋼スラグ混合土の初期含水比を一定にし、浚渫土と製鋼スラグの乾燥質量比に対して一軸圧縮強さを整理することが有効である（図-5.4 参照）。配合試験の際に、いくつかの初期含水比に対してこのような関係を把握しておくことで、実施工で使用する浚渫土の含水比が多少変化してもすぐに配合の見直しを行うことが可能であり、実施工で所定の強度が得られないという問題を回避できる可能性が高まる。なお、現地で得られる浚渫土の粒度分布が大きく変化すると想定される場合については、あらかじめ粒度分布を変化させた配合試験を行うなどの検討をしておく必要がある。

製鋼スラグ混合土の強度には、製鋼スラグの細粒分含有率も影響を与える。従って、配合試験で用いた製鋼スラグと実施工で用いる製鋼スラグの粒度分布に大きな違いがないことを確認しておく必要がある。逆に、製鋼スラグの細粒分を利用することで製鋼スラグ混合土の強度増加を図ることも可能である。

製鋼スラグ混合土の破壊状況は、製鋼スラグの配合や混合状況によりいくつかのパターンにわけられる。製鋼スラグ混合土が著しく不均質な場合、供試体の強度は製鋼スラグの分布状況に大きく依存するため、供試体毎の強度のばらつきが大きくなるものと推測される。しかしながら、製鋼スラグからある程度離れたところでも浚渫土が固化することや、現地で作製された供試体を観察したところ比較的良く攪拌されていたことなどから、現在行われているような攪拌方法で作製された場合には、長期的には著しい不均質は生じにくいと思われる。製鋼スラグ混合土が比較的均質な場合、その破壊パターンは固化した浚渫土の強度と、浚渫土と製鋼スラグの付着力の大小関係により、浚渫土部分からクラックが発生するパターンと、浚渫土が製鋼スラグ粒子の表面から剥離することによってクラックが発生するパターンにわけられる。

## 9. おわりに

製鋼スラグ混合土は、使用する浚渫土や製鋼スラグにより発揮される強度が変化する。本研究により、製鋼スラグ混合土の固化を支配する要因や、製鋼スラグ混合土の配合条件の考え方、製鋼スラグ混合土の破壊パターンなどが明確になってきた。得られた知見を配合設計や現地での施工管理に活用することで、従来よりも高度な製鋼スラグの品質管理が可能となるものと思われる。一方で、固化を支配する化学反応の特定や、浚渫土・製鋼スラグの特性が変動した際の製鋼スラグ混合土の強度の変化など、まだ十分な知見が得られていない課題も残されている。引き続き、残された課題の解明に取り組み、製鋼スラグ混合土の利用拡大に資するよう努力していきたい。

(2012年8月10日受付)

## 謝辞

本研究は、国土交通省近畿地方整備局神戸港湾空港技術調査事務所からの受託研究の成果を中心にとりまとめたものである。さらに、本研究の一部は、科研費（24686052）の助成により実施したものである。ここに記して謝意を表す。また、大阪港湾・空港整備事務所の関係各位には、現地で作製された製鋼スラグ混合土をご提供頂くなど多大なるご支援を頂いた。SEMによる観察にあたっては土質研究チーム田中政典専門研究員および研修生の柳沢昭彦氏にその方法をご指導いただいた。関係各位に感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 社団法人日本鉄鋼連盟：転炉系製鋼スラグ海域利用の手引き，2008年。
- 2) 岩本二郎・坂田和也・澤孝平・友久誠司：鉄鋼スラグを混合した建設泥土の強度特性について，第59回土木学会年次学術講演会講演概要集，論文番号3-539，2004。
- 3) 鶴谷広一・中川雅夫・木曾英滋・古川恵太：鉄鋼スラグの干潟材料への適用性に関する水槽実験，海岸工学論文集，Vol.52，pp.986-990，2005。
- 4) 木曾英滋・堤直人・渋谷正信・中川雅夫：海域施肥時のコンブ等の生育に関する実海域実験—転炉系製鋼スラグ等を用いた藻場造成技術開発（1）—，第20回海洋工学シンポジウム講演論文集，2008。

- 5) 加藤敏明・相本道宏・三木理・中川雅夫：製鋼スラグ等の海域施肥試験における海域Fe濃度分布に関する検討—転炉系製鋼スラグ等を用いた藻場造成技術開発（2）—，第20回海洋工学シンポジウム講演論文集，2008.
- 6) 堤直人・加藤敏朗・本村泰三・中川雅夫：海域施肥時のコンブ等の生育に及ぼす施肥原料成分の影響に関する水槽実験結果—転炉系製鋼スラグ等を用いた藻場造成技術開発（3）—，第20回海洋工学シンポジウム講演論文集，2008.
- 7) 金山進・相馬明郎・田中裕一・辻井正人・木曾英滋・中川雅夫：浚渫土と転炉系製鋼スラグの混合材の海域適用によるpHの影響予測，海洋開発論文集，Vol.24，pp.333-338，2008.
- 8) 新日本製鐵株式会社・JFEスチール株式会社：転炉系製鋼スラグ製品による沿岸域の環境改善技術，閉鎖性海域における水環境改善技術実証試験結果報告書，平成21年度環境技術実証事業，環境省，2010.
- 9) JFEスチール株式会社・JFEミネラル株式会社：製鋼スラグを用いた藻場造成・水質改善技術，閉鎖性海域における水環境改善技術実証試験結果報告書，平成21年度環境技術実証事業，環境省，2010.
- 10) 木曾英滋・辻井正人・中川雅夫・伊藤公夫・永留健：転炉系製鋼スラグの混合による浚渫土改良，第63回土木学会年次学術講演会講演概要集，論文番号2-074，2008.
- 11) 木曾英滋・辻井正人・伊藤公夫・中川雅夫・五明美智男・永留健：転炉系製鋼スラグの混合による浚渫土の固化改良技術，海洋開発論文集，Vol.24，pp.327-332，2008.
- 12) JFEスチール株式会社：改質浚渫土の強度推定方法及び浚渫土の改質方法，特開2012-31618，公開特許公報，2012.
- 13) 田中裕一・川崎隆広・山田耕一・辻井正人・木曾英滋・中川雅夫：転炉系製鋼スラグの原位置混合打設工法の開発，第63回土木学会年次学術講演会講演概要集，論文番号2-076，2008.
- 14) 川崎隆広・田中裕一・山田耕一・辻井正人・木曾英滋・中川雅夫：転炉系製鋼スラグ海域利用のための施工技術開発—トレミー管内混合工法—，第63回土木学会年次学術講演会講演概要集，論文番号2-077，2008.
- 15) 武田将英・五明美智男・永留健・辻井正人・木曾英滋・中川雅夫：混合材料の鉛直管内落下特性—粘性土と転炉系製鋼スラグを例として—，海洋開発論文集，Vol.24，pp.339-344，2008.
- 16) 武田将英・五明美智男・永留健・辻井正人・木曾英滋・中川雅夫：浚渫土と転炉系製鋼スラグの連続式混合固化改質の実海域試験施工，第63回土木学会年次学術講演会講演概要集，論文番号2-075，2008.
- 17) 武田将英・五明美智男・永留健・辻井正人・木曾英滋・中川雅夫：浚渫土と転炉系製鋼スラグの混合固化改良の実海域試験—連続式混合投入施工—，海洋開発論文集，Vol.24，pp.351-356，2008.
- 18) 永留健・御手洗義夫・赤司有三・中川雅夫：沿岸海域におけるカルシア改質土の適用例，地盤工学会誌，No.60，Vol.2，pp.38-41，2012.
- 19) 和田真郷・鶴ヶ崎和博・赤野博・中川雅夫・辻井正人・木曾英滋：浚渫泥土と転炉系製鋼スラグの攪乱混合土砂を用いた実海域試験施工—バッチ式混合投入施工—，海洋開発論文集，Vol.24，pp.345-350，2008.
- 20) 西田浩太・田口博文・永留健・赤司有三・上野雅明：配合の異なるカルシア改質土が水中環境へ及ぼす影響と強度特性，第46回地盤工学研究発表会発表講演集，論文番号1061，2011.
- 21) 五十嵐ひろ子・御手洗義夫・永留健・渡部要一・森川嘉之，水谷崇亮：異なる曝露条件で養生したカルシア改質土の長期安定性，第47回地盤工学研究発表会発表講演集，論文番号310，2012.
- 22) 赤司有三・中川雅夫・横尾正義・武藤弘・西山秀雄：「高速回転式カルシア改質工法」による津波堆積土の改質，第47回地盤工学研究発表会発表講演集，論文番号308，2012.
- 23) 飯室賢一朗・聖生守雄・赤司有三・福永和久・橋本耕作：「高速回転式カルシア改質工法」による津波堆積土からの異物分別，第47回地盤工学研究発表会発表講演集，論文番号309，2012.
- 24) 姜敏秀・渡部要一・土田孝：SEMおよびポロシメーターを利用した土の微視的構造の観察とその評価，港湾空港技術研究所資料，No.1032，2002.
- 25) 橋本勝文・大即信明・西田孝弘，セメント系改良地盤のCa溶脱に伴う強度低下に関するCl<sup>-</sup>の影響を考慮した長期予測，土木学会論文集C，Vol.64，No.2，pp.226-237，2008.
- 26) 川端雄一郎・山田一夫・松下博通：岩石学的分析に基づいた安山岩のASR反応性評価および膨張挙動解析，土木学会論文集E，Vol.63，No.4，pp.689-703，2007.
- 27) 堤直人・田中誠・田崎智晶・天田克己・久末治・山本充・山田祐輝・遠藤公一：製鋼スラグの迅速炭酸化処理技術の開発，新日鉄技報第388号，pp.99-109，

2008.

- 28) 菊池喜昭・水谷崇亮・永留健・畠俊郎：マイクロフォーカスX線CTスキャナの地盤工学への適用性の検討，港湾空港技術研究所資料，No.1125，2006.

港湾空港技術研究所報告 第51巻第3号

2012. 12

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所  
横須賀市長瀬3丁目1番1号  
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社シーケン

Copyright © (2011) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

## CONTENTS

1. Conservation and Restoration of Intertidal Flat Ecosystems by Exploring Shorebird Foraging Ecology  
..... Tomohiro KUWAE, Eiichi MIYOSHI ..... 3
2. Study on Effect of Mixing Condition on Mechanical Properties of Mixture of Dredged Soil and Steel Slag  
..... So HIRAI, Taka-aki MIZUTANI, Yoshiaki KIKUCHI, Yuichiro KAWABATA ..... 77

