

砂防ソイルセメントに関する一考察 - 圧縮強度の評価を中心として -

A CONSIDERATION OF SABO SOIL CEMENT

- MAINLY ON EVALUATION OF COMPRESSIVE STRENGTH -

松井 宗廣¹・瀧口茂隆²・松下 一樹³・福井 健太郎⁴・原田 哲夫⁵

Munehiro MATSUI, Shigetaka TAKIGUTI, Kazuki MATSUSHITA, Kentaro FUKUI, and Tetsuo HARADA

¹朝日航洋株式会社 (〒350-1165 川越市南台 3-1-1)

E-mail: munehiro-matsui@aeroasahi.co.jp

²国土交通省総合政策局政策課 (〒100-8918 千代田区霞が関 2-1-3)

E-mail: takiguchi-s2hg@mlit.go.jp

³国土交通省都市局都市安全課 (〒100-8918 千代田区霞が関 2-1-3)

E-mail: matsushita-k2jd@mlit.go.jp

⁴砂防エンジニアリング株式会社 (〒350-0033 川越市富士見町 31-9)

E-mail: k_fukui@saboeng.co.jp

⁵長崎大学大学院工学研究科 (〒852-8521 長崎市文教町 1-14)

E-mail: tharada@nagasaki-u.ac.jp

Key Words: INSEM, Weathered Granite Soil, Compressive strength

1. はじめに

広島市周辺では深層風化したマサ土が広く分布し土砂災害に対して脆弱な自然環境下にあるため、過去から甚大な土砂災害が繰り返されてきた。繰り返す土砂災害に対処するため、砂防事業が精力的に実施されてきたが1999年6月に犠牲者20名を超える土砂災害が発生し、土砂災害に対する警戒避難体制強化を目的とした法律¹⁾が制定されるとともに同災害を契機に国土交通省直轄の広島西部山系砂防事業が開始された。しかし、その後も2014年8月に犠牲者70名を超える土砂災害が発生し、一層の事業進捗が必要とされている一方、事業区域内では宅地開発が進展し人家等の保全対象が土石流危険溪流の谷出口付近にまで密集して存在しているため、砂防堰堤等の建設工事においては建設資材の搬入、掘削土砂の場外搬出を極力少なくするなど社会環境への配慮が特に必要である²⁾。

このような社会条件から、近年、全国の砂防現場で

活発に利用されてきている現地発生土砂を用いた砂防ソイルセメント工法の積極的な活用が望まれる。同工法にはセメント粉体と現地発生土砂を攪拌混合した材料を締固める工法 (IN-situ Stabilized Excavation Materials 工法, 以下略して INSEM 工法) とセメントミルクと現地発生土砂を攪拌混合してスラリー状の材料を打設する工法 (IN-situ Mixing, 以下略して ISM 工法) がある³⁾。前者は汎用機械により施工できるが、後者はセメントミルクと現地発生土砂を攪拌混合するための専用機械によることが効率的である一方、同機械は汎用的でないため、現在のところ砂防分野においては前者の施工実績が多い。両工法の品質についてみると一般に後者はセメント使用量がより多く、安定的に高強度を得易いという特徴があるが、前者は少ないセメント使用量で設計条件を満たすことが多いため、土砂の性状や水の量に影響を受け易く、安定した強度を得にくい傾向がある。そこで本研究では広島西部山系砂防事業区域内に広く分布す

る現地発生土砂（マサ土）を用いて INSEM 工法の配合検討において未だ十分に解明されていない圧縮強度と含水比，吸水率，有機不純物との関係等について試験研究を行ったものである。

2. 試験概要

一般に INSEM の品質は圧縮強度により評価されている。品質管理に用いる圧縮強度は INSEM をモールド ($\phi 15 \times h 30 \text{cm}$) に投入し電動ハンマにより締め固めて作成した供試体（以下，供試体）から得られる試験値によっている。一方，INSEM 工法の実施工では振動ローラにより締め固めて施工されるので，両者は異なった作成方法であることから本来，両者の圧縮強度を同等と考えて評価することは適切でない。本研究の特徴は，この点に着目し実施工と同じ方法で現地試験施工を行い，得られた試験体（以下，コアという）による圧縮強度試験値と供試体による圧縮強度試験値の両者を比較検証し実証性を高めたことにある。具体には供試体は施工当日の INSEM 材料を用いて作成，一方，コアは試験施工した INSEM を一定期間養生後コアカッターにより採取し，供試体とコアの両者の圧縮強度試験を行いその値を比較検証した。吸水率，有機不純物と圧縮強度との関係，セメント混合後の体積変化の関係については供試体による試験結果である。なお，本研究では全ての試験ケースにつき 3 供試体ずつ作成した。以下に示す試験値はその平均値を示している。

(1) 使用材料

現地発生土砂は広島西部山系砂防事業管内で採取した宮内，四季が丘，大町の 3 地区のマサ土である。土砂の基本性状と粒度分布を表-1，図-1 に示す。室内試験での供試体作成は直径 15cm，高さ 30cm のモールドを用いているため，現地発生土砂は粒径 40mm 以下を用いた。なお，セメントは高炉 B 種 (JIS R 5211)，含水比調整には水道水を用いた。

(2) 試験方法

a) 圧縮強度と含水比の関係

圧縮強度と含水比との関係についてはセメント使用量，含水比を変化させて室内試験を行った。セメント使用量は締め固め後の INSEM の体積 1m^3 に対して 100, 150, 200kg/m^3 （以下，これらを単位セメント量と呼ぶ）の 3 パターンを設定した。含水比は各単位セメント量を攪拌混合した INSEM 材料の締め固め試験（B-c 法）⁴⁾を行い，最大乾燥密度が得られた含水比（以下，INSEM・Wopt という，なお，土砂のみの最適含水比は以下，単に Wopt という）を中心に，

表-1 現地発生土砂の基本性状

| 試験名 | 試験項目 | 四季が丘地区 | 宮内地区 | 大町地区 |
|---|----------------------------|--------|------|-------|
| 締め固め試験 JIS A 1210 (Bc法) | 最大乾燥密度(g/cm^3) | 1.933 | 1.93 | 1.933 |
| | 最適含水比(%) | 12.6 | 12.6 | 12.1 |
| 密度・吸水率試験 ($0 < d < 5 \text{mm}$) JIS A 1109 | 絶乾状態の密度(g/cm^3) | 2.38 | 2.33 | 2.4 |
| | 表乾状態の密度(g/cm^3) | 2.48 | 2.44 | 2.48 |
| | 吸水率(%) | 4.06 | 4.87 | 3.53 |
| 密度・吸水率試験 ($5 \leq d < 80 \text{mm}$) JIS A 1110 | 絶乾状態の密度(g/cm^3) | 2.44 | 2.5 | 2.38 |
| | 表乾状態の密度(g/cm^3) | 2.52 | 2.56 | 2.48 |
| | 吸水率(%) | 3.31 | 2.52 | 4.22 |

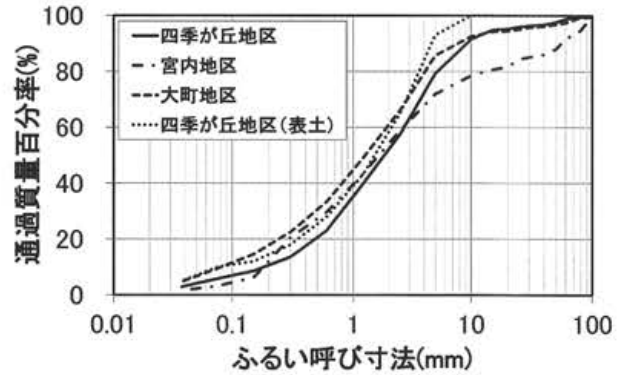


図-1 現地発生土砂の粒度分布

−4, −2, +2, +3, +4%の 6 パターンを設定した。以上のパターンについて 3 地区のマサ土を用いて合計 54 ケースにつき，以下の方法により供試体を作成し圧縮強度を計測した。

i) 攪拌混合機を用いて現地発生土砂とセメントを攪拌混合し，INSEM 材をモールド ($\phi 15 \times 30 \text{cm}$) に 3 層に分けて投入した。

ii) 1 層ごとに電動ハンマ（消費電力；1,050W，全負荷打撃数； $3,000 \text{min}^{-1}$ （打撃/分），30 分間のはつり量 65kg）により 1 層につき 10 秒間締め固めた。

iii) 封緘養生後，材齢 28 日の圧縮強度を計測した。

一方，現地施工は 3 地区のマサ土を用いて単位セメント量 150kg/m^3 ，含水比は INSEM・Wopt として，振動ローラ（3t 級）で無振動 2 回 + 有振動 6 回，転圧速度 1km/h ，1 層の敷均し厚さ 30 cm で 3 層施工し，2 層目をコアカッターにより採取 ($\phi 15 \text{cm}$) し封緘養生後，材齢 28 日で圧縮強度を計測した。

b) 圧縮強度と土砂の吸水率

圧縮強度と吸水率との関係については大町と宮内の 2 地区については吸水率の大きい材料により，四季が丘については吸水率の小さい材料により粒度調整しそれぞれの地区のマサ土と同等の粒度分布を持つ材料を調整し，これらを用いて 3 供試体ずつ作成した。材料を調整し同等の粒度分布としたのは粒度分布の違いによる影響を排除するためである。3 地区のマサ土と粒度調整材料の粒度分布を図-2 に，吸水

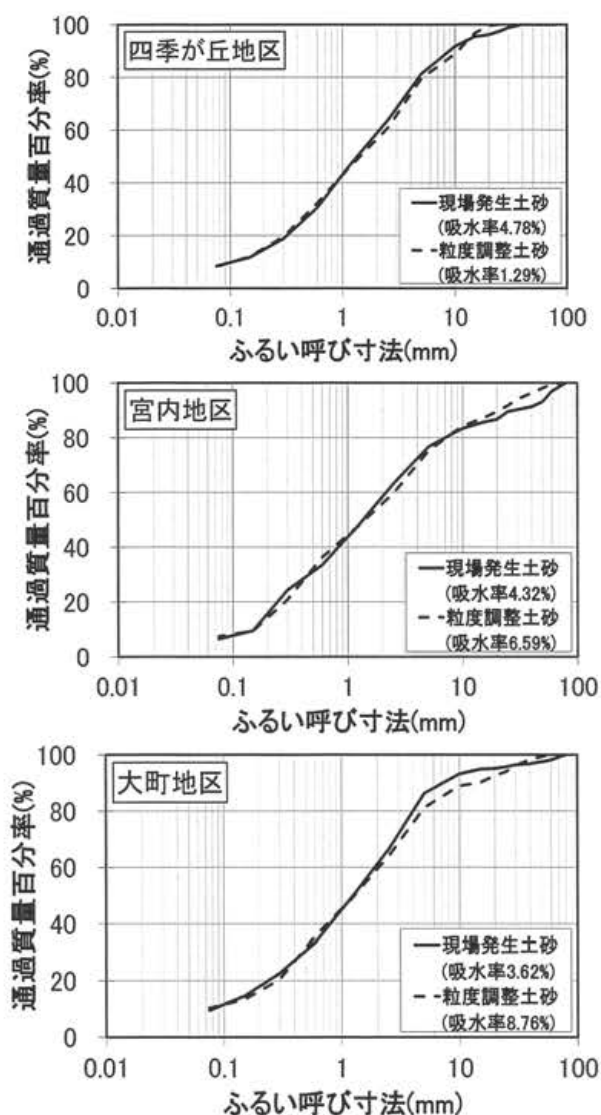


図-2 粒度調整土砂の粒度分布

率等を表-2 に示す。粒度調整材料の吸水率は用いる材料の比率により、吸水率を加重平均した値である。なお、表-2 に示す現地発生土砂の吸水率が表-1 に示

す値と異なるのは土砂採取位置が完全に同一ではないためである。

単位セメントは 175kg/m^3 、含水比はそれぞれの材料の INSEM・Wopt とし、a)と同様の方法により3層に分けて電動ハンマで締め固め、封緘養生後材齢28日の圧縮強度を計測した。

c) セメント混合後の INSEM の体積変化

セメント混合後の INSEM の体積変化については大町地区のマサ土を用いて単位セメント量 175kg/m^3 、含水比は Wopt, Wopt $\pm 2\%$ の合計3ケースにつき、土砂のみを締め固めた場合の体積と以下の方法より比較することにより体積変化を計測した。

- i) 締め固め後にモールド ($\phi 15 \times h 30\text{cm}$) 高さの80% (24cm)程度となる土砂の乾燥重量を計量する。
- ii) 単位セメント量 175kg/m^3 に相当するセメントを投入し攪拌混合する。
- iii) ①の方法と同様の方法に電動ハンマで3層に分けて締め固めた後、モールド上端から締め固められた INSEM の上面までの距離を計測することにより締め固め後の体積を計測した。

d) INSEM の圧縮強度と有機不純物

INSEM の圧縮強度と有機不純物については宮内、四季が丘の2地区のマサ土を用いて強熱減量値が一般的なマサ土 (2~3%) に比較して小枝や枯葉を含むため高い値を示す四季が丘地区の表土を混合して圧縮強度の低下率を計測した。用いた表土の粒度分布を図-1 に示す。表土の添加割合は土砂の乾燥重量比で5,10,25%の3パターンとし、単位セメント量は 150kg/m^3 、含水比は夫々の材料の INSEM・Wopt とし、①と同様の方法により電動ハンマで3層に分けて締め固め、封緘養生後材齢28日の圧縮強度を計測した。

表-2 粒度調整土砂の配合率と吸水率

| 粒度調整土砂 | 四季が丘 | 宮内 | 大町 | 碎石 | 陸砂 | 玉砂利 | 珪砂 | 発生土砂A | 発生土砂B | 土砂 | 吸水率 |
|-------------------------|--------|------|------|--------|-------|--------|------|--------|--------|-------|-------|
| 絶乾密度(g/cm^3) | 2.45 | — | — | 2.71 | 2.51 | 2.54 | 2.63 | 2.57 | 1.66 | 2.65 | |
| 吸水率(%) | 4.8 | 4.32 | 3.62 | 0.58 | 2.52 | 1.82 | 0.57 | 2.14 | 20.84 | 0.78 | |
| 産地 | 広島 | 広島 | 広島 | 栃木県鍋山 | 茨城県結城 | 茨城県結城 | 東北 | 福島 | 宮城 | 岐阜県 | |
| 粒径 | — | — | — | 5~20mm | 5mm以下 | 10mm以下 | 5号 | 5~80mm | 80mm以下 | 0~5mm | |
| 四季が丘地区 | 現地発生土砂 | 100% | — | — | — | — | — | — | — | — | 4.80% |
| | 粒度調整土砂 | — | — | — | 10% | 10% | 30% | — | — | 50% | 1.30% |
| 宮内地区 | 現地発生土砂 | — | 100% | — | — | — | — | — | — | — | 4.32% |
| | 粒度調整土砂 | — | — | — | — | 25% | 25% | 15% | 10% | 25% | 6.59% |
| 大町地区 | 現地発生土砂 | — | — | 100% | — | — | — | — | — | — | 3.62% |
| | 粒度調整土砂 | — | — | — | — | 40% | 25% | — | — | 35% | 8.76% |

3. 試験結果及び考察

(1) INSEM の圧縮強度と含水比

圧縮強度と含水比の関係に関する試験結果を図-3に示す。同図から、いずれのケースでも圧縮強度がピークを示す含水比（以下、ピーク強度含水比）が存在し、単位セメント量が多くなるほど圧縮強度の最大値（以下、ピーク圧縮強度）は大きく、ピーク強度含水比は右方向（含水比が大きい方向）にシフトするとともに、セメント量の増加に伴い圧縮強度～含水比曲線はシャープな山型を示す傾向が強まる。INSEM の配合検討においてはこのような圧縮強度～含水比曲線を考慮した検討が必要である。一般のコンクリートでは圧縮強度とセメント水比（C/W）には直線関係がある⁵⁾とされ、この関係を把握して配合検討を行うが、INSEM についてはピーク圧縮強度付近までは直線関係が見られるもののピーク強度含水比を超えると強度が低下する。

砂防の代表的構造物である砂防堰堤では高さ 10m を超えるものでも安定計算上、最大の圧縮強度は基礎面の最下流端に生じ、その値は 0.7N/mm^2 程度である。従って、安全率を 4.0 とすると 3N/mm^2 程度以上の強度があれば良い。3 地区とも単位セメント量 100kg/m^3 のケースではいずれの含水比でもこの条件は満たさないが、単位セメント量 150kg/m^3 以上のケースでは含水比が 9～12% の範囲内であれば圧縮強度は 3N/mm^2 以上が得られる。従って、本結果から実現場では宮内地区の様な土砂が生じる可能性を考慮して配合検討にあたっては含水比を 9～12% とするのが合理的である。

(2) INSEM の配合検討に用いる含水比

表-3 に INSEM・Wopt, ピーク強度含水比, 現地発生土砂の最適含水比を示す。同表から、全体の傾向として、現地発生土砂の最適含水比 > INSEM・Wopt > ピーク強度含水比という結果となり INSEM・Wopt の値がピーク強度含水比により近い値となった。3 つの含水比が異なるのは土砂の最適含水比と INSEM・Wopt は、JIS に規定された方法⁴⁾により締固め最大乾燥密度が得られる含水比であるのに対して、ピーク強度含水比は INSEM に混合されたセメントが水和反応により硬化してピーク圧縮強度が得られる含水比であり、含水比の持つ意味が異なるため当然と言える。配合検討においてはこの様に異なった意味を持つ含水比を混同して扱わないよう留意すべきである。INSEM の配合検討にあたっては、一般に現地発生土砂の最適含水比を中心値としてその $\pm 2\%$ 程度含水比

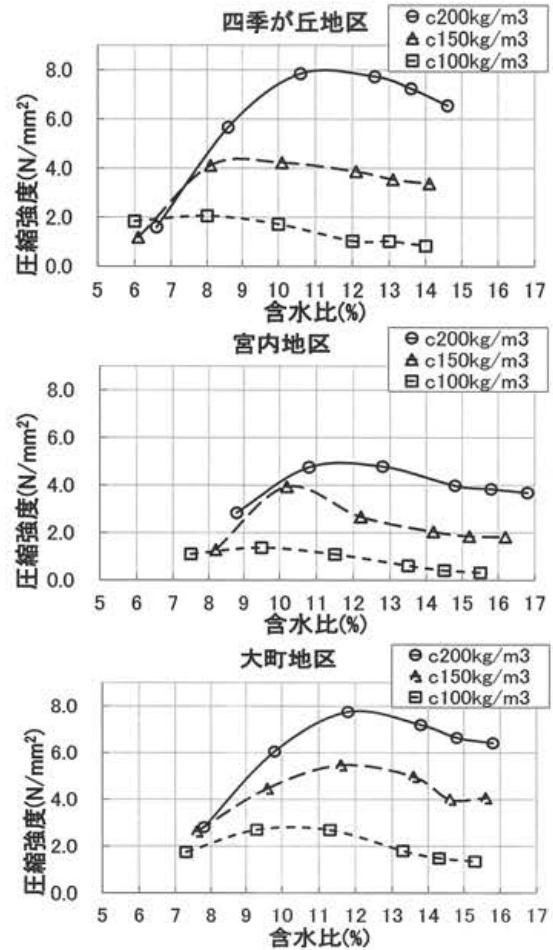


図-3 圧縮強度と含水比の関係

表-3 土砂の自然含水比と INSEM の最適含水比

| 地区名 | 単位セメント量 | INSEM Wopt | ピーク強度含水比 | 現地発生土砂 | |
|--------|-----------------------|------------|----------|--------|----------------|
| | | | | 最適含水比 | 自然含水比 |
| 四季が丘地区 | c100kg/m ³ | 10.0% | 8.0% | 12.6% | 9.8 ~10.5% |
| | c150kg/m ³ | 10.1% | 9.0% | | |
| | c200kg/m ³ | 10.6% | 11.0% | | |
| 宮内地区 | c100kg/m ³ | 11.3% | 9.5% | 12.6% | 11.3 ~12.2% |
| | c150kg/m ³ | 11.6% | 10.5% | | |
| | c200kg/m ³ | 11.7% | 12.0% | | |
| 大町地区 | c100kg/m ³ | 11.5% | 10.0% | 12.1% | 9.9 ~11.2% |
| | c150kg/m ³ | 12.2% | 11.5% | | |
| | c200kg/m ³ | 12.8% | 12.5% | | |

を変化させてピーク強度含水比を見出す試験計画とされている。しかし、本試験結果からピーク強度を求めるための試験計画においては INSEM・Wopt $\pm 2\%$ とするのが合理的である。

(3) 供試体とコアの圧縮強度

単位セメント量 150kg/m^3 , 含水比 INSEM・Wopt とした場合のコアと現地施工した INSEM 材料を採取しモールドと電動ハンマにより作成した供試体の圧

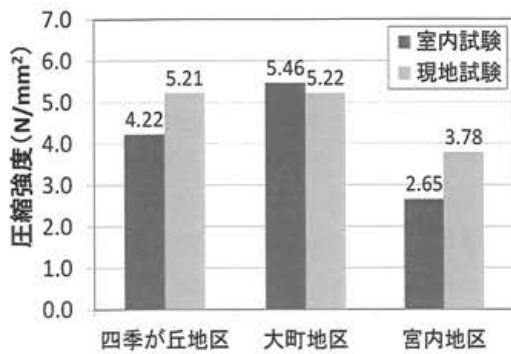


図-4 現地試験と室内試験の圧縮強度の比較

圧縮強度試験を行い両者の値を比較検証した結果を図-4に示す。本結果から現地施工によるコアの圧縮強度は供試体に比較して同等程度以上の強度が得られる結果となった。これは現地施工での振動ローラによる締固めエネルギーの方が電動ハンマによる供試体作成における締固めエネルギーより高いことが影響していると考えられるがその詳細については今後検討が必要である。

(4) INSEMの圧縮強度と土砂の吸水率との関係

粒度分布はほぼ同様であるが吸水率が異なる土砂を用いたINSEMの圧縮強度を図-5に示す。同図より、いずれの場合でも、土砂の吸水率が大きくなると圧縮強度が小さくなる傾向が確認できる。圧縮強度の低下傾向は強度発現が大きい四季が丘、大町の2地区の現地発生土砂でより顕著で、これらの2地区に比較すると宮内地区の圧縮強度の低下割合は顕著ではない。これは宮内地区の発現強度が他の2地区に比べて低いことが影響している可能性がある。

図-5より、圧縮強度と吸水率の関係を最小二乗法により求めると(1)式となる。

$$Y = -0.8358X + 8.9378 \quad (1)$$

ここにY:圧縮強度(N/mm²), X:吸水率(%)である。

一般に吸水率は骨材の品質を表わし、骨材内部の空隙の量を示している⁶⁾。骨材内部に空隙があることは、骨材自体が密実でなく強度も小さくなるため、その様な材料を用いたINSEMやコンクリート構造物も強度が小さくなる。

図-3において宮内の圧縮強度が他の2地区に比較して小さいことは使用材料の約70%程度と多くの割合を占める5mm以下の材料の吸水率が4.87%で、他の2地区の吸水率(四季が丘:4.06%, 大町:3.53%)に比較して大きいことが影響している可能性が考えられる。圧縮強度の要求性能を3N/mm²以上とした場合、図-5より吸水率は7%程度以下の必要がある。

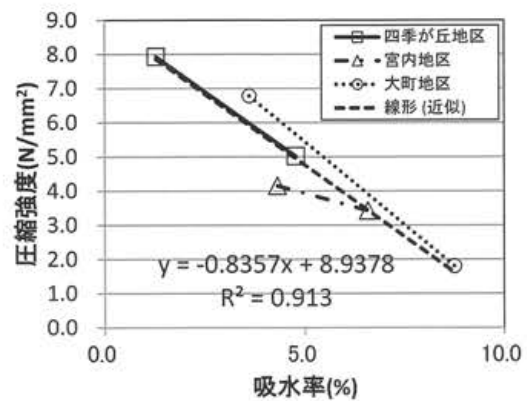


図-5 圧縮強度と土砂の吸水率との関係

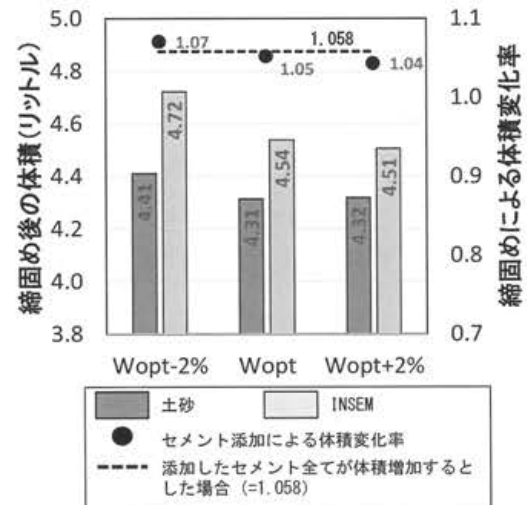


図-6 セメント添加によるINSEM材の体積変化

(5) セメント添加後のINSEMの体積変化

INSEMの配合検討においてはセメントを添加しても締め固められたINSEMの体積は変化しないとされている³⁾。セメント添加後のINSEMの体積変化を図-6に示す。図-6には添加したセメントが全て体積増加するとした場合の計算値による変化率(1.058)を破線で示した。この験結果から、締め固め後のINSEMの体積は土砂のみを同条件で締め固めた場合に比較して1.04~1.07の範囲で増加することが確認できた。増加傾向についてみると含水比が少ないほど体積の変化率は大きい傾向となった。本試験では、単位セメント量として175kg/m³を投入しているので、具体の配合検討を考えた場合、単位セメント量175kg/m³、含水比Woptで締め固めた1m³のINSEMの場合では体積の5.2%、すなわち52ℓ少ない土砂量に対して単位セメント量175kg/m³を投入していることとなる。これは配合検討上の現地発生土砂の量に対して単位セメント量が多く配合されていることとなり、3.(1)のセメント使用量の増加と強度増加の関係から圧縮強度が大きくなる方向であることから強度的には安全側となるがINSEMを大量に施工する場合において

表-4 表土の添加率と圧縮強度の関係

| 試料名 | 表土添加率 % | 強熱減量 % | 圧縮強度 N/mm ² |
|--------|---------|--------|------------------------|
| 宮内地区 | 0 | 3.6 | 3.92 |
| | 5 | 3.8 | 2.70 |
| | 10 | 4 | 2.22 |
| | 25 | 4.1 | 1.45 |
| 四季が丘地区 | 0 | 2.3 | 4.02 |
| | 5 | 2.6 | 3.02 |
| | 10 | 2.8 | 2.85 |
| | 25 | 3.1 | 2.38 |

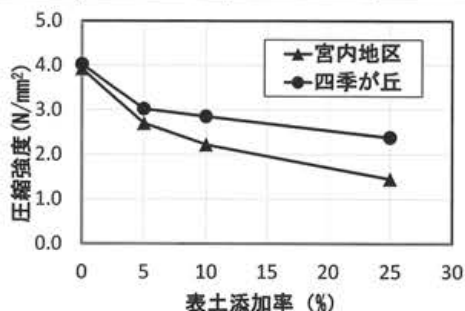


図-7 表土添加率と圧縮強度の関係

は無視できないこととなる点に留意する必要がある。

(6) INSEM の圧縮強度と有機不純物

表土の粒度分布は図-1, 表土の添加割合毎の強熱減量値と材齢 28 日の圧縮強度を表-4, INSEM の圧縮強度と表土の添加率の関係を図-7 に示す。なお, 表土の強熱減量値は 4.8% である。有機不純物はフミン酸やタンニン酸を含みセメント中の石灰分と化合して有機酸石灰塩となり INSEM 中の水和反応に影響を与え, 強度を低下させるとされている⁷⁾が, 本試験においても図-7 において表土の割合が多くなり, 有機不純物の量が増えるほど圧縮強度が低下する結果となった。有機不純物を多く含む土砂は腐食土や有機質ローム等が該当し, 粗骨材より細骨材に含まれていることが多い⁸⁾とされており INSEM の施工においてこのような材料, 並びに腐食土等を多く含むと考えられる表土等を用いる場合は強度発現しにくくなるためセメント量の増加や高有機質土用の系固化材の使用等による対応が必要となることを想定しておく必要がある。

4. 結論

広島地区のマサ土の現地発生土砂を用いて INSEM の基本的事項について検討を行った結果, 以下の結果を得た。

(1) INSEM のピーク強度含水比を求める配合検討においては, 本研究結果から含水比を 9~12% とす

るのが合理的である。

(2) ピーク強度含水比は現地発生土砂の最適含水比 (Wopt) より INSEM 材の最適含水比 (INSEM・Wopt) がより近いことから INSEM・Wopt を中心値として検討すべきである。

(3) 砂防堰堤等の要求性能として, 圧縮強度>3N/mm² とすると単位セメント量 100kg/m³ のケースはどの地区の現地発生土砂も不適合となる。

(4) 振動ローラによって締め固められるコアは供試体の圧縮強度と同等程度以上となるため, 供試体強度により施工管理することは妥当である。

(5) 現地発生土砂の吸水率が大きくなると圧縮強度は低下し, 圧縮強度の要求性能を>3N/mm² とした場合, 吸水率は 7% 程度以下である必要がある。

(6) 単位セメント量 175kg/m³ の場合, セメント添加により INSEM の体積は 4~7% 増加するので大量に施工する場合は体積変化を考慮するべきである。

終わりに, 本研究が砂防分野でのマサ土を用いた INSEM の有効活用検討のための一助となれば幸いです。

謝辞: 現地施工のためのヤード選定, 試験データの提供等, 多くの労をとって頂いた国土交通省中国地方整備局太田川河川事務所の関係各位に心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 一般社団法人・全国治水砂防協会: 改訂版土砂災害防止法令の解説, 2016.
- 2) 網川浩章, 川本洋次郎, 伊藤 健, 大塚尚志, 青戸生治, 川邊健作: 広島西部山系砂防事業におけるハード対策について, 平成 28 年度砂防学会研究発表会概要集: pp. A-10-11, 2016.
- 3) 財団法人砂防・地すべり技術センター: 砂防ソイルセメント設計・施工便覧, pp. 9-12, 2011.
- 4) 一般社団法人・地盤工学会: 土質試験の方法と解説, pp. 252-253, 2000.
- 5) 一般社団法人・セメント協会: セメントの常識, pp. 29, 2009.
- 6) 栗津清蔵, 浅賀榮三, 渡辺和之, 高際浩治: 絵ときコンクリート (改訂 2 版), オーム社, pp. 41-64, 2008.
- 7) 重倉裕光: 骨材中の有害物がコンクリートに及ぼす影響, コンクリート工学, pp. 104, 1981.
- 8) 田村博: コンクリート用骨材の現状と展望, 3. 骨材とコンクリート構造物の耐久性-有害不純物の影響-, 材料, 第 40 巻, 第 458 号, pp. 1504-1509, 1991.

(2016. 5. 31 受付)