

# 粗粒材料の締固め特性に関する研究 (その1)

——砂分含有率が粗粒材料の締固め特性に及ぼす影響——

日笠山 徹 巳 西 林 清 茂

## Study on Compaction of Coarse-grained Materials (Part 1)

——Relation between Sand-content and Compaction of Coarse-grained Materials——

Tetsumi Higasayama Kiyoshige Nishibayashi

### Abstract

Recently, there has been an increase in earthworks utilizing coarse-grained materials mainly composed of coarse crushed-rocks and gravels. When very coarse crushed-rocks are used in earthworks, the ground fill is apt to be poorly compacted, resulting in numerous voids and ground sinkage. Therefore, it is very effective to solve this problem by densely compacting the ground fill. In this report, the authors have clarified the relationship between sand-content and compaction of coarse-grained materials, the ground structure in a large compaction test. The authors, furthermore, have performed static settlement tests of coarse-grained materials in order to examine the relationship between the characteristics of settlement under static load and the sand-content and saturation condition.

### 概 要

近年、粒径の大きな岩砕や礫などを主体とした粗粒材料を用いた土工が増加している。粒径大の材料で地盤を造成した場合、締固め不足となりやすく、陥没や長期沈下などの沈下の問題となる空隙を地盤内に残すことになる。粗粒分を細粒分で十分充填し、密な構造とすることは、これらの問題を解決することに効果的であることが知られている。その場合の粗粒分と細粒分の混合比が粗粒材料の締固め特性に及ぼす影響を大型締固め試験で確認するとともに、配合比と粗粒材料の締固め時の骨格構造を明らかにした。また、配合比や気中、水中の載荷条件が静的圧縮特性に及ぼす影響を、モールドを用いた静的圧縮試験で求めた。その結果、粒度が偏った配合では、気中と水中載荷では異なった沈下性状を示すため、気中で圧縮され一見安定した状態でも水浸の影響を受け、沈下が促進されることが予想される。したがって、粗粒材料の締固めでは粗粒分を間詰めする砂分を十分締固められる範囲で密度を高めることが重要であることなどがわかった。

### 1. はじめに

岩砕や礫などを主体とした粗粒材料は、宅地造成、道路を始め、ロックフィルダム材、護岸材、河川の堤体材などの他に、最近では、大規模人工島における埋立材や種々の土地造成の盛立材として広範囲に利用されている。粒径の大きな岩砕材料を用いて地盤を造成する場合、粒径の大きな粗粒分主体の岩砕で片押しなどの盛立方式や水中埋立方式を採用した時に緩い地盤となり、構造物の荷重で沈下したり、降雨浸透によって細粒分が流出し、結果的に陥没や沈下その他の悪影響を引き起こすことがある<sup>1)</sup>。この原因は、施工時の締固め不足が挙げられることは当然としても、粒径の大きな粗粒分が主体である時の空隙が空隙として残り、圧縮性や透水性に問題を残す(図-1参照)。したがって、粗粒分の空隙を細粒分で十分充填して密な構造とし、圧縮性、透水性の改善を行うことが効果的であることも経験的に知られている。その場合、粗粒分と細粒分の混合比が混合材の締固め特性や静的圧縮特性に影響を及ぼすことが考えられる。

そこで、実際の土工で使用される粒径10～30cmの岩砕そのものを試験試料とするには、装置の問題で無理なため、実際の岩砕から採取した礫分(2～53mm)と砂分(0～2mm)を用い、それぞれ粗粒分と細粒分とみなし、両者を人工的に混合した混合材料を対象とした締固め試験(突固め法、振動法)と静的圧縮試験を実施

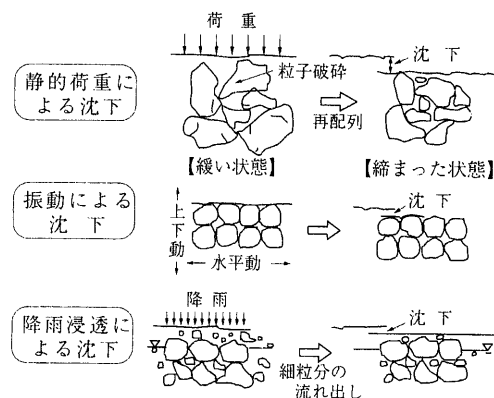


図-1 岩砕地盤の沈下要因

し、両者の配合比が締固め特性や静的沈下特性に及ぼす影響について実験的研究を行った。

## 2. 締固め特性に関する試験

### 2.1 使用材料および粒度分布

使用した材料は、表-1に示した産地の異なる3種類の岩砕であり、最大粒径は、モールドの大きさ(直径30cm)を考慮し、53mmとした。試料は、自然乾燥状態の岩砕材料を分粒することで得られた砂分(0~2mm)と礫分(2~53mm)を種々の混合比で、再度粒度調整することによって作製した。その混合比として式(1)のような砂分含有率  $P_s$  を定義し、図-2の粒径加積曲線に示す、0、25、30、40、50、75、100%の7種類とした。

$$P_s = \frac{\text{砂分 (0~2 mm) の重量}}{\text{全重量}} \times 100 (\%) \quad \dots\dots(1)$$

### 2.2 試験方法

直径30cm、高さ30cmの鋼製モールド(カラー込み:37.5cm)を用いて、下記の試験を行った。

(1) 最小密度試験 角スコップでモールド内へ試料を置くようにモールド上端まで入れ、平坦になるように調整し、直接試料上部の高さを測定し容積を求めた。

(2) 振動締固め試験(以後、「振動法」と称す) 振動締固め試験は、砂礫材料の相対密度試験として、池見・工藤らの提唱したバイブレータ法<sup>2)</sup>に準じた。すなわち、試料を5層に分けて最小密度を求めた時と同じように入れ、バイブレータの下に厚さ9mmの鉄板を取り付けて1層当たり5分間締固め、5層締固め後、直接試料上部の高さを測定し容積を求めた。

(3) 大型突固め試験(以後、「突固め法」と称す) 大型突固め試験は、「土質工学会基準(JSF T 711)突固めによる土の突固め試験方法」の第1法( $E_c = 5.6 \text{ cm} \cdot \text{kgf/cm}^3$ )<sup>3)</sup>に準じ、自動突固め装置を用いて行った。すなわち、ランマー重量10kgf、落下高45cm、突固め層数5層、1層当たりの打撃数53回とした。

### 2.3 混合材料の密度の定義

本文における乾燥密度および諸定数の定義を以下に示す。

$$\text{混合材料の乾燥密度: } \rho_d = W/V \quad \dots\dots(2)$$

砂分密度 (全体積から礫分の体積を除いた)  
体積に対する砂分の密度

$$: \rho_s = W_s / (V - W_g / G_g / \rho_w) \quad \dots\dots(3)$$

混合材料の粒子間隙隙比

$$: e = G_D \cdot \rho_w / \rho_d - 1 \quad \dots\dots(4)$$

ここで、

W : 混合材料の重量 (=  $W_s + W_g$ )

V : 混合材料の体積 (モールドの体積)

$W_s$  : 砂分の重量       $W_g$  : 礫分の重量

$G_g$  : 礫分の比重       $G_D$  : 混合材料の合成比重

$\rho_w$  : 水の密度

なお、礫分の比重  $G_g$  は、粒度階ごとに粗骨材の比重および吸水率試験方法 (JIS A 1110) により絶対比重を求

め、混合比に応じて合成した値<sup>4)</sup>を採用した。混合材料の合成比重  $G_D$  も、土粒子の密度試験 (JIF T 111) から得られた砂分の比重と礫分の比重を混合比に応じて合成した値を用いた。

### 2.4 試験結果および考察

図-3に混合材料の砂分含有率と締固め密度(実測値)および砂分密度(算定値)の関係を示す。岩砕A、B、Cの3種類ともに砂分含有率に対し、振動法や突固め法による締固め時の密度は、砂分含有率が0%から増えるにつれて増加し、30~40%でピークに達しそれ以上では減少する。

混合材料の締固め時の骨格構造を砂分含有率と砂分密度の関係からみると、砂分含有率が100~75%の範囲では、砂分密度は最大密度状態を示しているが、礫分の増加(砂分含有率の減少)とともに減少し、50%以下になると急激に低下している。これは、砂分が50%以下では礫分が最大密度状態となり、礫同士が接する状態になるため締固めエネルギーが砂分に伝わらなくなるためである。

この関係を模式的に図化すると図-4のようになる。“礫分が最大密度状態でその空隙を最大密度状態の砂分

表-1 試験材料

	岩砕A	岩砕B	岩砕C	備考
母岩の種類	変斑レイ岩	花崗閃緑岩	砂岩	
岩級区分	中硬岩	硬岩	硬岩	電研式判定法
P波速度 km/s	3.1	4.4	4.9	コア超音波測定
絶対乾比重				土粒子の密度試験
0~2 mm	2.925	2.664	2.664	
2~9.5 mm	2.831	2.577	2.577	
9.5~26.5 mm	2.801	2.558	2.550	
26.5~53 mm	2.801	2.569	2.560	粗骨材の比重試験

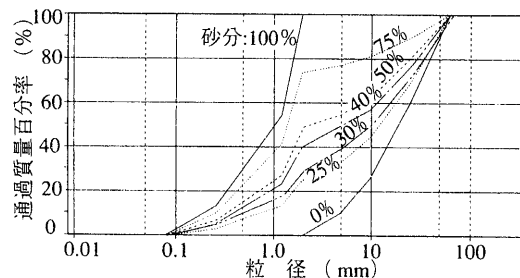


図-2 試験粒度

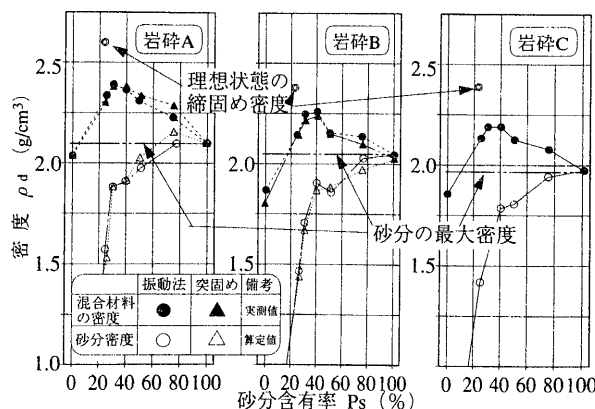


図-3 砂分含有率と締固め密度

が埋める”と仮定した理想的な混合材料の最大密度は、実際上困難であり、実際の締固め密度は図-4の実曲線のような形で最大密度をもたらす配合比がでてくる。混合材料の中の砂分に着目すると、礫分により骨格構造が作られる範囲では砂分に伝わる締固めエネルギーが減少し、礫分の空隙に存在する砂分が急激に緩い状態となる。この状態では、礫分の粒子破碎やゆすり込み時に礫粒子の再配列を誘発し、強度や長期的な沈下面で問題が残る<sup>5)</sup>。一方、砂分が多くなり締固めエネルギーが及ぶようになると、砂分も密な状態となり、礫分の間詰めとして十分機能することになる。したがって、粗粒材料では、単に最大密度に着目するのではなく、砂分を十分締固められる範囲で密度を高められる配合(たとえば図-4の斜線部)が骨格構造的に安定であると考えられる。

### 3. 静的圧縮特性に関する試験

#### 3.1 使用材料

静的圧縮試験に用いた試料は、岩砕Cであり、モールドの大きさ(直径15cm)を考慮し、最大粒径26.5mmとした。また、締固め試験と同様に砂分含有率 $P_s$ が0, 15, 20, 30, 40, 50, 75, 100%となるように粒度調整を行った。

#### 3.2 試験装置および試験方法

図-5のように、直径15cm、高さ17.5cmの鋼製モールドに所定の配合比に粒度配合された試料を最小密度状態になるように投入し、5tfの荷重計を介して20tfジャッキで載荷を行った。気中載荷は図-5の水槽を外し、水中載荷は水を張った水槽に試料を詰めたモールドを約24時間水浸させた後、載荷試験を行った。

載荷方法は、初期載荷荷重を $P_1=15\text{kgf}$ 、荷重増加率を $\Delta P_i/P_i=1$ とし、15, 30, 60, 125, 250, 500, 1,000, 2,000, 4,000kgfの9段階の多段階載荷法とした。同一荷重の載荷時間は、沈下が収束するまでとし、予備試験の結果を踏まえ、所定の荷重到達後最長10分を目安にした。

#### 3.3 試験結果および考察

図-6に載荷時間と沈下量の関係の一例として、気中条件の $P_s=15$ および100%の場合を示す。また、各載荷荷重における最終沈下量と間隙比の関係を気中載荷と水中載荷の場合に分けて、代表例を図-7に示す。

図-6では各段階においても載荷と同時に沈下が生じており、今回試験した粗粒材料の静的圧縮沈下は瞬時沈下が主体である。図-7では砂分含有率の違いにより最終間隙比が異なり、同じ砂分含有率でも気中と水中載荷条件でも、大きく異なる。そこで、砂分含有率と気中、水中の載荷試験における最終間隙比の関係を図-8に示す。なお、締固め試験によって得られた最小間隙比および理想状態の最小間隙比も合わせて示した。

試験結果から、

① 静的圧縮試験では、砂分含有率と最終間隙比との間には、砂分含有率40%付近をピークに下に凸の曲線の関係がある。この関係は、締固め試験による結果と同様

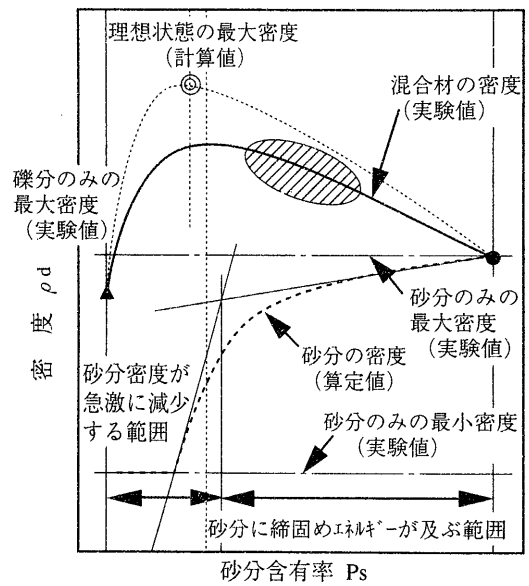


図-4 砂分含有率と密度の概念図

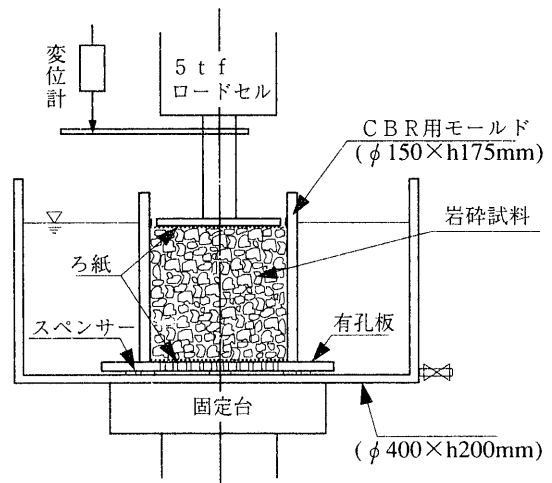


図-5 載荷装置

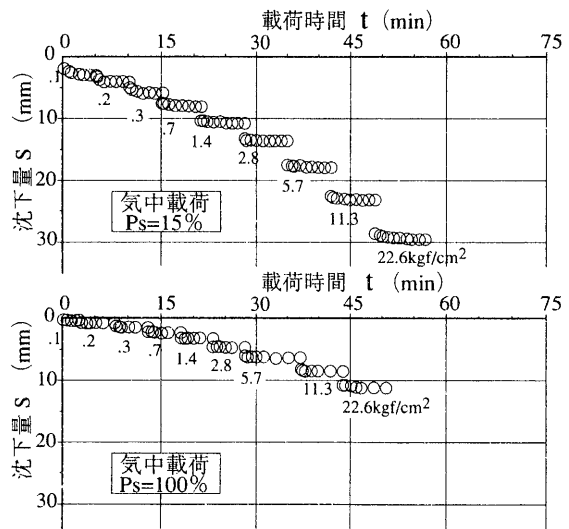


図-6 載荷時間と沈下量

な傾向である。

② 気中載荷と水中載荷を比較すると、最終間隙比は各砂分含有率でも水中が気中よりも小さく、同一荷重でも最終間隙比が小さい。礫分が多い領域では、気中載荷条件では礫分が空隙を残したまま骨格構造を形成し、荷重に対抗するため沈下は進まないが、水中では水の影響により粒子間の滑りが促進され、粒子再配列が載荷とともにスムーズに進んだものと考えられる。砂分が多い領域でも、同様な現象が砂粒子の間でも起こったものと考えられる。

③ 気中載荷と水中載荷の最終間隙比の差  $\Delta e$  を砂分含有率で整理する (図-9 参照) と、砂分含有率が0から増加すると  $\Delta e$  は減少し、40%をピークに増加に転ずる。これから砂分や礫分が偏って多い時には、静的に圧縮され一見安定したかに思える状態でも、水中状態では異なった沈下性状を示し、施工後の降雨などの浸水の履歴により大きく沈下することになる。

4. 考察

締め試験および静的圧縮試験の結果より、次のように考察できる。

① 砂分含有率が0~30%の範囲では、礫分が骨格構造を成し、礫間に存在する砂分に締めエネルギーが及ばないため、砂分の間詰め効果も少ない。また、気中条件の圧縮試験では礫分が堅固な骨格構造を成しているが、水中ではその骨格構造を保てず気中に比べて大きく沈下する。なお、砂分・礫分とも理想的に締められた場合の配合比を算定すると、この領域に最大密度が存在するにもかかわらず、現実には理想的な締めは不可能であり、実際試験では得られない。

② 砂分が30~50%の範囲では、礫分が骨格構造の中心を成しているが、砂分にも締めエネルギーが及ぶようになり、混合材料としての締め密度の最大値もこの領域に現れる。圧縮試験では砂分の間詰め効果も期待でき、水中と気中での最終間隙比の差が小さい。

③ 砂分50~100%の範囲では、礫分に代わって砂分が骨格構造を形成するようになり、締めエネルギーも砂分の締めが中心であり、密な状態になる。しかし、圧縮試験では、水中と気中での最終間隙比の差が砂分が多いほど大きい。

以上のように、粗粒材料では、礫分と砂分の配合により締め密度が変化し、最大密度の配合比が存在するが、材料の骨格構造や水中条件での圧縮特性を検討すると、砂分が十分締められる範囲で密度を大きくする方が、変形・強度および長期沈下の面で安定である。したがって、このことは粒径の大きな粗粒材料を用いた施工において、粒度配合や粒度設計を実施する際の指針となる。

参考文献

1) 西林, 細谷, 柴田: 岩砕埋立地盤の特性に関する研究(そ

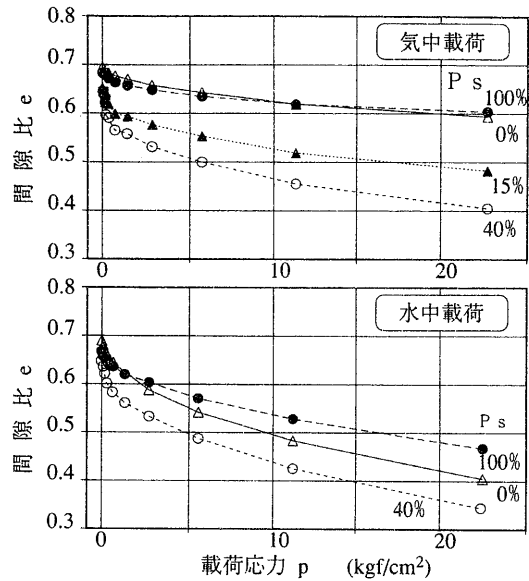


図-7 載荷応力と間隙比

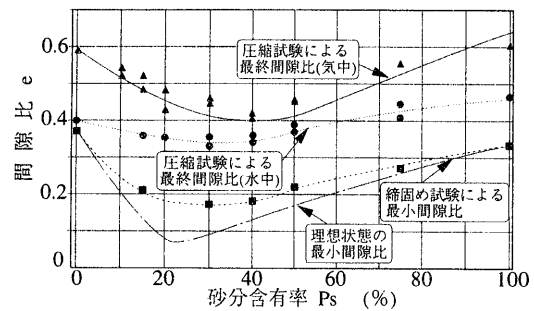


図-8 砂分含有率と間隙比

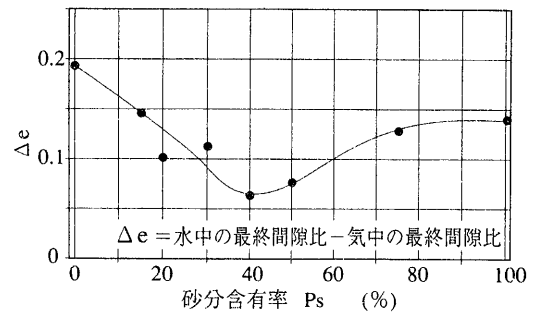


図-9 砂分含有率と  $\Delta e$

の1), 大林組技術研究所報, No. 39, p. 6~10, (1989)  
 2) 池見, 工藤, 国生: 砂礫材料の相対密度試験について, 第19回土質工学研究発表会, p. 127~128, (1984)  
 3) 土質工学会: 土質試験の方法と解説, p. 201, p. 400, (1990)  
 4) 西林, 細谷, 日笠山, 柴田: 岩砕埋立地盤の特性に関する研究 (その4), 第25回土質工学研究発表会, p. 1807~1810, (1990)