

平成 26 年度 修士論文

全粒度再生骨材を用いた超硬練りコンク
リートの配合設計方法に関する研究

首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 都市基盤環境学域

学修番号 13885439 李 偉利

指導教員 上野 敦

第1章 序論.....	4
1.1. 研究背景.....	5
1.1.1. 再生骨材の性状およびコンクリート用再生骨材の利用促進.....	5
1.1.2. 再生細骨材の利用現状.....	5
1.1.3. 震災瓦礫処理及び復興における資材不足.....	6
1.1.4. 超硬練りコンクリート.....	6
1.2. 研究の目的.....	6
1.3. 本論文の構成.....	7
第2章 既往の研究.....	10
2.1. 超硬練りコンクリート.....	11
2.1.1. 超硬練りコンクリートの概要.....	11
2.2. 超硬練りコンクリートの各種係数.....	11
2.3. 超硬練りコンクリートの配合設計.....	12
2.4. 再生骨材.....	13
2.4.1. 再生骨材の分類.....	13
2.4.2. 低品質全粒度再生骨材.....	14
2.5. 締固め性試験.....	15
2.5.1. 振動機の一般理論.....	15
2.5.2. 締固めエネルギー.....	17
2.5.3. 締固め完了範囲の判断.....	17
2.5.4. 超硬練りコンクリートにおける締固め性の評価方法.....	18
2.6. 乾燥収縮特性.....	19
2.6.1. コンクリート内部の水分.....	19
2.6.2. 乾燥収縮のメカニズムと影響する要因.....	20
2.6.3. 乾燥収縮に影響する要因.....	21
2.7. 本研究における検討の方向性.....	21
第3章 全粒度再生骨材および混合骨材を用いた超硬練りコンクリートの配合設計方法の検討.....	24
3.1. 全粒度再生骨材のみを用いた超硬練りコンクリートの配合設計.....	25
3.2. 従来手法による混合粗骨材を用いた超硬練りコンクリートの配合上の課題.....	27
3.3. 混合骨材を用いた超硬練りコンクリートの簡易配合設計方法.....	29
3.3.1. ...高細骨材含有率全粒度再生骨材に対応する超硬練りコンクリートの配合設計.....	32
3.3.2. 高粗骨材含有率の全粒度再生骨材超硬練りコンクリートの配合設計 ..	34

3.4.	全粒度再生骨材の表面水補正方法	36
第4章	新たな配合設計に基づいて全粒度再生骨材および混合骨材を用いた超硬練り コンクリートの締固め性に対する影響	39
4.1.	はじめに	40
4.2.	試験方法	40
4.2.1.	使用器具	40
4.2.2.	超硬練りコンクリート練混ぜ手順	40
4.2.3.	締固め性試験手順	40
4.2.4.	評価指標	41
4.2.5.	最終評価	42
4.3.	配合設計	42
4.3.1.	使用材料	42
4.3.2.	示方配合	42
4.4.	締固め性試験結果	44
4.4.1.	充填率 96%に達成するまでの締固めエネルギー E96	44
4.4.2.	締固め効率 Ce	47
4.4.3.	初期充填率 Ci	48
4.4.4.	達成可能充填率 Cf	49
4.5.	締固め性試験のまとめ	50
4.5.1.	AR シリーズについて	50
4.5.2.	AG シリーズについて	51
第5章	全粒度再生骨材および混合骨材を用いた超硬練りコンクリートの圧縮強度お よび乾燥収縮特性	53
5.1.	はじめに	54
5.2.	試験方法および配合	54
5.2.1.	試験手順	54
5.2.2.	使用材料	56
5.2.3.	示方配合	56
5.3.	圧縮強度測定試験	57
5.3.1.	試験体作製方法	57
5.3.2.	圧縮強度測定方法	57
5.3.3.	試験結果の整理	58
5.3.4.	圧縮強度試験結果まとめ	58
5.4.	ヤング係数測定試験	59
5.4.1.	試験体の準備	59

5.4.2.	測定方法	59
5.4.3.	試験結果の整理	59
5.4.4.	ヤング係数測定試験の結果まとめ	59
5.5.	乾燥収縮ひずみ測定試験	61
5.5.1.	試験体作製.....	61
5.5.2.	乾燥収縮ひずみ測定方法	61
5.5.3.	乾燥収縮ひずみ試験結果の整理.....	62
5.5.4.	各シリーズの乾燥収縮ひずみ結果まとめ.....	62
5.6.	質量変化率	63
第 6 章	結論	67
謝辞		

第1章 序論

1.1. 研究背景

1.1.1. 再生骨材の性状およびコンクリート用再生骨材の利用促進

建設副産物として発生するコンクリート塊は年々増加し、資源リサイクル社会の形成および天然資源である骨材資源の消費抑制のためには、解体コンクリート塊の産物として、再生骨材の有効利用が望まれている。しかし、再生骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみの増大や、強度・ヤング率の低下の傾向が強くなる問題がある。このように、コンクリートの品質に影響することから、再生骨材は幅広く利用されていないのが現状である。一方で、破碎、磨砕、分級等の高度処理によって、高品質の再生骨材を入手することも可能であるが、コストの増加、二次副産物の増大などの欠点の克服が課題となっている。

現在、解体土木構造物・建築物から発生するコンクリート塊の大半は路盤材として利用され、図 1.1 に示すように、道路建設の減少、寿命限度を迎えつつある構造物群から発生するコンクリート塊の増加や最終処分場の逼迫という、将来のコンクリート廃棄物問題を鑑みると、路盤材として利用されているコンクリート塊をコンクリート用骨材として再利用する必要がある。

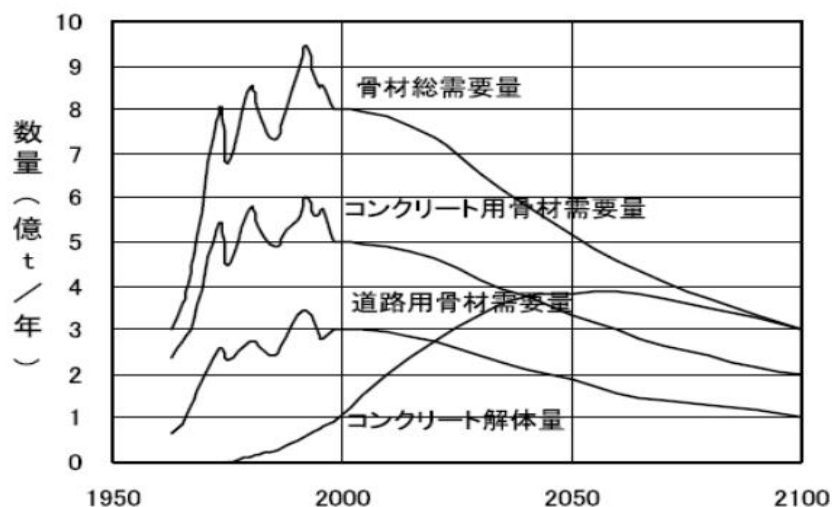


図 1.1 コンクリート廃棄量と骨材需要の推計¹⁾

1.1.2. 再生細骨材の利用現状

再生粗骨材については実際の構造物へ適用されつつあるが、再生細骨材の適用は進んでいない。これは、再生細骨材が再生粗骨材と比べてセメント分を除去し難いこと、再生細骨材の高品質化により副産微粉の発生量が増大す

ること等による。コンクリートへの適用が難しいとされている。さらに、再生骨材を用いたコンクリートの耐久性は、再生粗骨材よりも再生細骨材の影響を顕著に受けて低下するという報告も多い。このため、コンクリート用再生細骨材としての利用拡大を検討する必要がある²⁾。

1.1.3. 震災瓦礫処理及び復興における資材不足

東日本大震災で被災した岩手、宮城、福島 の 3 県では、倒壊した建物などから出たコンクリートや木材などの瓦礫の総量が計 2778 万トンに上ると推定されている³⁾。莫大なコンクリート破砕物などの災害廃棄不燃物の処理により、被災地を苦しめた一方で、2012 年の夏ごろから、深刻な建設資材不足が発生している。不足している資材のうち、特に深刻なのは、骨材用の砂、砂利やコンクリートである。廃棄物の積極的な再生利用が求められている。

1.1.4. 超硬練りコンクリート

単位水量を大幅に減らし、スランプ 0cm とした超硬練りコンクリートは、ダムを用途とする RCD 用コンクリートや、舗装を用途とする RCCP 用コンクリート、工場製品における即時脱型用コンクリート等に使用されている。超硬練りコンクリートでは、骨材に対してペースト体積が相対的に少ないことから、強力な締固めを行い、密実なコンクリートを作製する必要がある。しかし、適切な配合、使用材料および施工条件等が満たされない場合、硬化したコンクリートに空隙が残存し、強度および耐久性に悪影響を及ぼす。また、コンクリートの単位水量を増加させることで、締固め性を向上させることは可能であるが、施工性を損なってしまうことがあるため、超硬練りコンクリートは、施工性と締固め性をともに満足し、適切な配合を選定する必要がある⁴⁾。

1.2. 研究の目的

再生骨材は一般に吸水率が大きく、再生骨材を用いたコンクリートは所要の施工性を確保するための水量が増加しやすいために、乾燥収縮が大きく、強度発現も普通骨材を使用したものに比べて劣りやすいなどの欠点がある。これらの問題の改善には、単位水量を低減し、セメントペースト相の体積を減らすことが有効だと考えられる。このような配合のコンクリートの極端な例として、超硬練りコンクリートが挙げられる。

原田ら⁵⁾の研究結果により、再生粗骨材を用いた超硬練りコンクリートの乾

燥収縮ひずみ低減効果が明らかになったが、超硬練りコンクリートのフレッシュ性状および硬化性状に及ぼす全粒度再生骨材の影響と、異なる全粒度再生骨材の置換率の影響を検討するものはなかった。また、震災復興を考えると、被災地の支援のためには、迅速な道路網の確保および廃棄不燃物の処理が課題と思われる。被災地からの廃棄コンクリートを破碎し、その産物として、再生骨材を全量で緊急舗装 RCCP 用コンクリートに利用することができれば、被災地の道路網の迅速な復旧に寄与することが期待できる。

以上のことから、本研究では下記の 3 点に着目する。

- ①粗骨材、細骨材および微粒分があらかじめ混合状態にある低品質全粒度再生骨材を用いることにより、超硬練りコンクリートの施工性と締固め性を共に満足することを前提として、配合設計方法を提案する。
- ②全粒度再生骨材超硬練りコンクリートにおいて、力学的な性能が低下することが予想されるので、一部の全粒度再生骨材を一般粗骨材（碎石）に置換することにより、混合骨材の s/a を適切な範囲に制御し、硬化体の性能を向上させることが考えられる。コンクリート製造ときの各骨材個別の単位体積質量の実測実験を省けるように、混合骨材を用いたときの新たな簡易配合設計方法を提案する。
- ③全粒度再生骨材を用いた超硬練りコンクリートおよび混合骨材を用いた超硬練りコンクリートに加えて、有スランプ舗装用コンクリートを作製し、各コンクリートの強度、ヤング率および乾燥収縮ひずみなどの特性を比較し、全粒度再生骨材および混合骨材を用いた超硬練りコンクリートに関する配合特性の影響および異なる再生骨材の置換率による硬化体の特性変化を検討する。本研究で提案した配合設計方法により作製した超硬練りコンクリートにおいて、実用上の問題がないことを検討する。

1.3. 本論文の構成

本研究は、上述のような背景から、可能な限り簡易な材料準備により、再生骨材を用いて RCCP を構築するための配合設計方法に関して基礎的な検討を行ったものである。材料準備の簡便さ、また、副産廃棄物の削減の観点から、再生骨材は、コンクリート塊を破碎したものを全量用いることとした。このため、本研究では、通常の場合と異なり、全粒度の再生骨材が既混合されている状態で使用

することとし、配合理論を構築すること、硬化後の品質改善の観点から、通常の碎石を粗骨材として混合使用する配合設計方法を構築することを目的としている。

本論文は、全 6 章で構成されている。

「第 1 章 序論」は、本研究の背景および目的について述べたものである。現在の日本国内においての再生骨材の利用状況および超硬練りコンクリートについて整理し、本研究の流れを示している。

「第 2 章 既往の研究」は、通常の超硬練りコンクリート、再生粗骨材を混合使用した超硬練りコンクリートの配合設計方法および超硬練りコンクリートにおける締固め性の評価方法に関する既往の研究をとりまとめたものである。そして、本研究で解決すべき配合設計上の課題について整理している。

「第 3 章 全粒度再生骨材および混合骨材を用いた超硬練りコンクリートの特殊配合設計」は、全粒度再生骨材を使用した超硬練りコンクリートの配合設計方法および全粒度再生骨材コンクリートに普通粗骨材および普通細骨材を混合使用する場合の配合設計理論を検討したものである。

「第 4 章 全粒度再生骨材を用いた超硬練りコンクリートの締固め性に対する再生骨材混合率の影響」は、前章で構築した配合設計方法の適用性の検討を行ったものである。超硬練りコンクリートでは、硬化後の品質に対する締固め性の影響が顕著となる。このため、全粒度再生骨材を用いた超硬練りコンクリートの締固め性に対する全粒度再生骨材の混合率の影響を評価した。

この結果、全粒度再生骨材を用いた超硬練りコンクリートの締固め性改善の観点からの配合調整が、本研究で構築した方法より可能であることを示している。また、普通粗骨材を混合使用した場合のコンクリートの締固め性に対する影響を検討し、配合設計で変数として扱うことができる。全粒度再生骨材の混合率の調整によって、粗骨材を混合使用する場合でも締固め性向上のための配合調整が可能であることを示している。

「第 5 章 全粒度再生骨材および普通粗骨材を混合使用した超硬練りコンクリートの乾燥収縮特性および圧縮強度」は、全粒度再生骨材および普通粗骨材を混合使用した超硬練りコンクリートの硬化後の特性について述べたものである。本研究で提案した配合設計方法によって作製した RCCP 用超硬練りコンクリートの強度、ヤング率および乾燥収縮ひずみについて検討を行い、実用上の問題がないことを示している。

「第 6 章 結論」は、本研究で得られた知見をとりまとめたものである。

参考文献

- 1) 北海道開発土木研究所：再生骨材の最近の動向について、北海道開発土木研究所月報、No632、2006 年 1 月
- 2) 小川秀夫・名和豊春・山本正義：磨砕処理した再生細骨材の品質がモルタルの諸特性に及ぼす影響、Vol.63 No.3、 503-517、 2007. 9 土木学会論文集 E
- 3) 國府勝郎・近藤拓也・上野敦：RCCP 用コンクリートの締固め性試験方法に関する研究、セメント・コンクリート論文集、Vol.46、pp.964-969、1992
- 4) 久田 真：震災がれきの処分と有効利用に関する調査研究、2012.6
- 5) 原田駿平・上野敦：再生粗骨材を用いた超硬練りコンクリートの特性に関する研究、首都大学東京平成 22 年度修士論文、2010.4

第2章 既往の研究

2.1. 超硬練りコンクリート

2.1.1. 超硬練りコンクリートの概要

超硬練りコンクリートは、単位水量を $100\sim130\text{kg/m}^3$ とした。スランプ 0cm の極めて硬いコンクリートであり、主な用途は、ダム工事、舗装工事や工場製品である。通常のコンクリートよりもコンクリート中の空隙の影響を受けやすく、締固めの良否が耐久性に大きく影響を及ぼす¹⁾。

ダム工事においては、振動ローラによって超硬練りコンクリートを締固める RCD (Roller Compacted Dam-Concrete) 工法で使用される。主な特徴は、極めて貧配合なコンクリートを使用できること、ダンプトラックやベルトコンベアによる運搬や振動ローラによる締固めが可能であり、大量のコンクリートが面的に打設できることがある。

舗装工事においては、振動ローラ、タイヤローラを用いて超硬練りコンクリートの転圧、締固めを行う RCCP (Roller Compacted Concrete Pavement) 工法で用いられる。RCCP は第一次オイルショックによるアスファルトの不足と価格高騰によってアスファルト舗装の代替として急速に発展した。RCCP は、アスファルト舗装用の舗設機械を使用し、版厚を自由に変えることができ、必ずしも型枠を必要としない、といった特長を有する。しかし、一層 15~25cm の RCCP を一度に施工するには、十分な締固めと平坦性を得るための高度な施工技術が必要となる。

工場製品では、ダム工事や舗装工事とは異なり、型枠の転用や出荷を早めるために、低い水セメント比の超硬練りコンクリートが使用されている。強固な鋼製型枠にコンクリートを詰め、振動や加圧振動による締固めが施される。さらに、ブロック等の製造では、生産性の向上を目的に、締固め成形直後に、型枠の一部または全部を取り外す即時脱型工法が採用されている。しかし、製品の品質や生産性を大きく左右する締固め性能を評価する方法が確立されておらず、各工場が使用する材料や機械を用いて、製品の仕上がりや強度等を確認しながら、コンクリートの配合を決めているのが現状である。今後、締固めの理論やコンシステンシーの評価法を確立し、標準化を推進していく必要がある²⁾。

2.2. 超硬練りコンクリートの各種係数

超硬練りコンクリートは、粗骨材空隙体積に対するモルタル体積の比（記号：Km）を通常の有スランプコンクリートの細骨材率と同様に扱い配合設計を行う。式(2.2.1)は、粗骨材空隙体積に対するモルタル体積の比 Km を表し、式(2.2.2)は、細骨材空隙体積に対するペースト体積の比（記号：Kp）を示している³⁾。

$$Km = \frac{V_{mortar}}{v_g \cdot G} \quad (2.2.1)$$

$$Kp = \frac{V_{paste}}{v_s \cdot S} \quad (2.2.2)$$

式 (2.2.3) の v_g および式 (2.2.4) の v_s は、表乾状態での粗骨材と細骨材の単位質量あたりの空隙体積を示している。

$$v_g = \frac{1}{T_g} - \frac{1}{\rho_g} \quad (2.2.3)$$

$$v_s = \frac{1}{T_s} - \frac{1}{\rho_s} \quad (2.2.4)$$

Km : 粗骨材空隙体積に対するモルタル体積の比

Kp : 細骨材空隙体積に対するペースト体積の比

V_{paste} : モルタルの単位体積 (L/m^3)

V_{mortar} : ペーストの単位体積 (L/m^3)

v_g : 粗骨材の単位質量あたりの空隙体積 (L/kg)

v_s : 細骨材の単位質量あたりの空隙体積 (L/kg)

G : 粗骨材の単位量 (kg/m^3)

S : 細骨材の単位量 (kg/m^3)

T_g : 吸水率を考慮した粗骨材の単位体積質量 (kg/L)

T_s : 吸水率を考慮した細骨材の単位体積質量 (kg/L)

ρ_g : 粗骨材の表乾密度 (g/cm^3)

ρ_s : 細骨材の表乾密度 (g/cm^3)

2.3. 超硬練りコンクリートの配合設計

超硬練りコンクリートの配合において、未知数は Km 、 Kp 、 W 、 C 、 S および G の 6 つである。このうち 3 つを仮定することで配合設計を行うことができる。実務的には、 Km 、 W を決定し、また w/c を仮定することで C を決定する。

条件として、 Km 、 $Kp \geq 1$ でなければならないということがある。粗骨材および細骨材を別々の使用する通常の超硬練りコンクリートの配合設計手順は以下に示すとおりである。あらかじめ Km 、 W 、 W/C を決定する。

○ あらかじめ Km を設定し、 G を求める。

$$Km = \frac{V_{mortar}}{v_g \cdot G} = \frac{\frac{W}{\rho_w} + \frac{C}{\rho_c} + \frac{S}{\rho_s}}{v_g \cdot G} = \frac{1000 - \frac{G}{\rho_g}}{v_g \cdot G}$$

$$1000 = \frac{W}{\rho_w} + \frac{C}{\rho_c} + \frac{S}{\rho_s} + \frac{G}{\rho_g}$$

$$G = \frac{1000\rho_g}{v_g \cdot \rho_g \cdot Km + 1} \quad (2.3.1)$$

○ また、あらかじめ W および w/c を設定し、 C を求める。

$$C = \frac{W}{w/c} \quad (2.3.2)$$

○ W 、 C 、 G が求められたので、 S を導出する。

$$S = \left[1000 - \left(\frac{W}{\rho_w} + \frac{C}{\rho_c} + \frac{G}{\rho_g} \right) \right] \rho_s \quad (2.3.3)$$

○ Kp および s/a を求める。

$$Kp = \frac{\frac{W}{\rho_w} + \frac{C}{\rho_c}}{v_s \cdot S} \quad (2.3.4)$$

$$s/a = \frac{Km \cdot v_g \cdot \rho_g}{Km \cdot v_g \cdot \rho_g + Kp \cdot v_s \cdot \rho_s + 1} \quad (2.3.5)$$

2.4. 再生骨材

2.4.1. 再生骨材の分類

鉄筋コンクリート建築物が建設されてから解体されるまでの年数を推計した調査によると、日本では、築後 40 年が経過した構造物が最も多くなっている。今後、解体工事・改修工事から排出されるコンクリート塊量が飛躍的に増加することは避けられない⁴⁾。

この対策としては、平成 13 年に、建設リサイクル法が施工され、建設業が再資源化を推進すべき指定副産物として、コンクリート解体材が指定されたこともあって、再生コンクリートの利用促進を図ることを目的に、再生骨材の JIS 規格化が推進された。その結果、2005 年には再生骨材の製造において高度な処理が施され、コンクリート用砕石の品質基準の範疇に入る再生骨材 H（高品質）が、翌 2006 年には簡易コンクリートを用途とした再生骨材 L（低品質）が JIS 化された。さらに、翌 2007 年には、高度処理までは行わないまでも、モルタル

やペーストの付着をある程度認めた中程度の処理を施した再生骨材 M（中品質）の JIS 規格が制定されるに至っている。表 2.4.1 に再生粗骨材の JIS 規格値を示し、表 2.4.2 に再生細骨材の JIS 規格値を示す⁵⁾。

表 2.4.1 再生粗骨材の品質規格値⁶⁾

項目	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率(%)	すりへり減量 (%)	微粒分量(%)
再生粗骨材 H	2.5 以上	3.0 以下	35 以下	1.0 以下
再生粗骨材 M	2.3 以上	5.0 以下	—	1.5 以下
再生粗骨材 L	—	7.0 以下	—	2.0 以下

表 2.4.2 再生細骨材の品質規格値⁶⁾

項目	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率(%)	すりへり減量 (%)	微粒分量(%)
再生細骨材 H	2.2 以上	3.5 以下	—	7.0 以下
再生細骨材 M	2.3 以上	7.0 以下	—	7.0 以下
再生細骨材 L	—	13.0 以下	—	10.0 以下

2.4.2. 低品質全粒度再生骨材

本研究で使用するのは、廃コンクリートを破碎し、粗、細骨材および微粒分が混在している低品質な全粒度再生骨材である。全粒度再生骨材中の各骨材の質量比および再生粗骨材、再生細骨材それぞれの物性を測定するため、最初に骨材の微粒分量試験（JIS A 1103:2003）を行い、再生粗骨材、再生細骨材、微粒分を分け、それぞれの物性試験を実施した。表 2.4.3、表 2.4.4 に、それぞれ絶乾状態の全粒度再生骨材中の各骨材の質量比、再生粗、細骨材の物性を示す。

表 2.4.3 絶乾状態の全粒度再生骨材の中での各骨材の質量比

骨材種類	再生粗骨材	再生細骨材	微粒分
各骨材質量割合	42.06%	54.79%	3.15%

表 2.4.4 再生粗、細骨材の物性

	表乾密度 (g/cm ³)	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	単位容積 重量 (kg/l)	実積率 (%)	F. M.
再生粗骨材	2.57	2.43	5.63	1.39	57.42	6.92
再生細骨材	2.46	2.27	8.34	1.33	58.48	3.43

2.5. 締固め性試験

本節では、コンクリートの締固めに用いる振動機の機構について述べ、超硬練りコンクリートにおける締固め性の評価方法を示す。

2.5.1. 振動機の一般理論^{7)、8)}

振動機の遠心力は振動機内部の偏心重錘の回転によって励起される。偏心距離 r_0 、質量 m 、回転数 R (rpm) で回転するときの起振力を式 (2.5.1) に示す。

$$X = m\alpha = mr_0\omega^2 \quad (2.5.1)$$

ここで、

$$\omega = 2\pi f$$

$$f = \frac{R}{60} = \frac{1}{T_0}$$

$$\alpha = r_0\omega^2 = 4\pi^2 f^2 r_0$$

$$\left\{ \begin{array}{l} X : \text{起振力(N)} \\ r_0 : \text{重錘の偏心距離(m)} \\ \omega : \text{角速度(rad/s)} \\ f : \text{振動数(1/s)} \\ T_0 : \text{周期(s)} \\ \alpha : \text{加速度(m/s}^2\text{)} \end{array} \right.$$

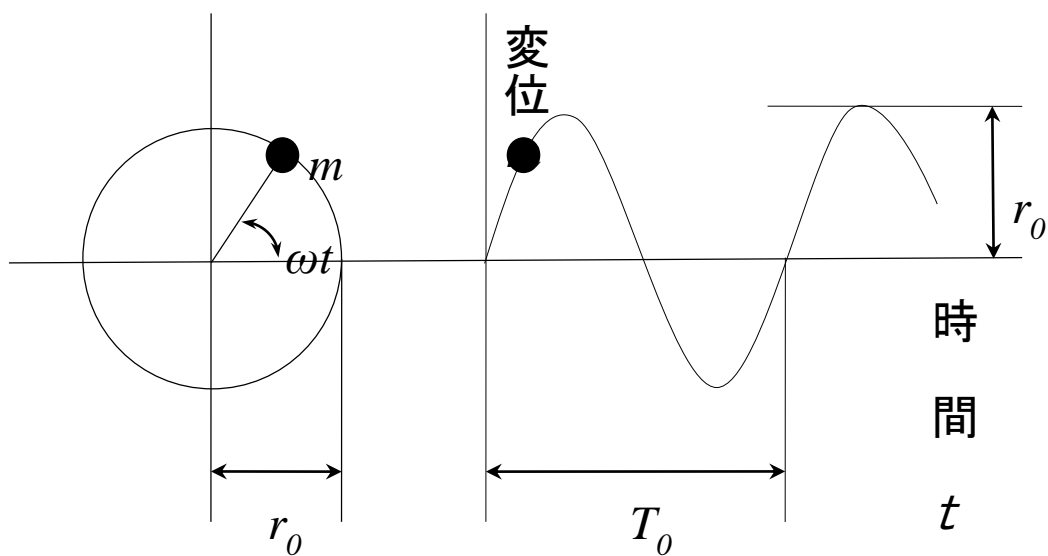


図 2.5.1 単振動

偏心重錘（回転体）の高速回転によって加速度 α が発生する。任意の y 方向の振動に着目すると、図 2.5.1 に示すように単振動となり、振動の振幅は式 (2.5.2)、速度は式 (2.5.3)、加速度は式 (2.5.4) でそれぞれ示される。

$$y = r_0 \sin \omega t = r_0 \sin 2\pi f t \quad (2.5.2)$$

$$\frac{dy}{dt} = v = r_0 \omega \cos \omega t \quad (2.5.3)$$

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = \alpha = -r_0 \omega^2 \sin \omega t = -\omega^2 y \quad (2.5.4)$$

ここで

$$\left\{ \begin{array}{l} t: \text{時間(s)} \\ y: \text{変位(m)} \\ v: \text{速度(m/s)} \end{array} \right.$$

式 (2.5.4) からわかるとおり、加速度の大きさは変位に比例し、加速度は常に変位より位相が π だけ進んでおり、その方向は変位と逆に原点に向かっているといえる。

一定加速度のもとでは、振動数を小さくすれば振幅は増加する。また、一定振幅のもとでは振動数を大きくすることにより、加速度は増加する。

2.5.2. 締固めエネルギー

加振機による締固めは運動エネルギーと位置エネルギーの作用によるものであり、運動エネルギーの減少は加速度を生み出し、空隙周辺の粒子を移動させることによって相対密度を増加させる。また、運動エネルギーの増加は逆に加速度を減少させることになり、慣性力を漸減させる。塑性体であるコンクリートの締固めは不可逆性を有することから、最大慣性力が減少する過程においては、仕事量は0であると考えられ、構成粒子の移動は起こらない。そして次にまた、運動エネルギーが減少した時には締固めエネルギーは再び増加することになる。このようにして、加振機の運動エネルギーは1周期で2回変化し、運動エネルギーの減少量が締固めのエネルギーとなり、締固めの仕事量となっている。この波状の締固めエネルギーを整理したものが式(2.5.5)である。

$$\begin{aligned}
 E &= 2ft \int_{1/4\text{cycle}} f dy \\
 &= 2ft \int_0^{\pi/2\omega} f dy \\
 &= ft\rho_0 r^2 \omega^2 \\
 E &= \frac{\rho_0 \cdot \alpha_{\max}^2 t}{4\pi^2 f}
 \end{aligned} \tag{2.5.5}$$

ここで、

$$\left\{ \begin{array}{l}
 E : \text{締固めエネルギー (J/l)} \\
 \alpha_{\max} : \text{最大加速度 (kg/m}^3\text{)} \\
 f : \text{振動数 (s}^{-1}\text{)} \\
 \rho_0 : \text{試料の単位容積質量 (g/cm}^3\text{)} \\
 t : \text{締固め時間 (s)}
 \end{array} \right.$$

2.5.3. 締固め完了範囲の判断⁹⁾

コンクリートを締め固めるにはエネルギーが必要であり、一般には内部振動機をコンクリート中で振動させることにより、そのエネルギーは与えられる。振動機による振動をコンクリートに与え続けると、そのエネルギーは累積されるが、振動機から距離が遠い程、累積されるエネルギーは小さくなるので、振動機からの距離によるエネルギーの分布は図2.5.2のように示すことができる。累積されたエネルギーが、コンクリートの締固めを完了するのに必要なエネルギー以上となる範囲を締固め完了範囲とする。

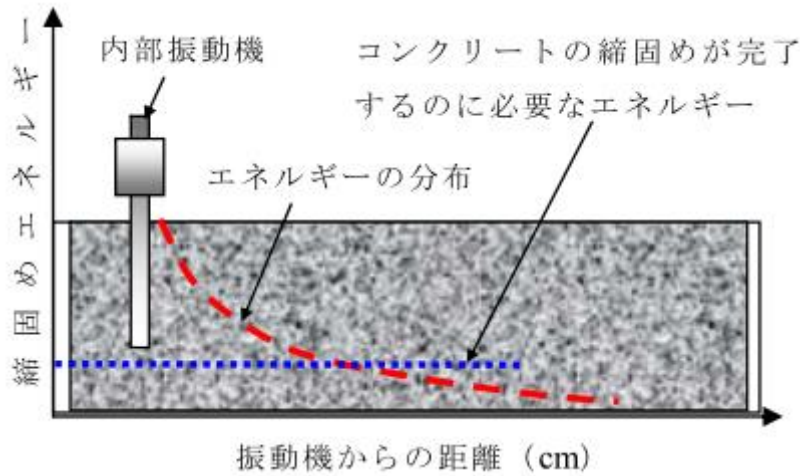


図 2.5.2 締固めエネルギー分布の概念図

2.5.4. 超硬練りコンクリートにおける締固め性の評価方法

本研究におけるコンクリートの締固め性の評価にあたっては、第一に、現場におけるコンクリートの締固め挙動を再現することと考え、第二に、締固め性をコンクリートの密度から、コンクリートの示方配合の理論密度に至る過程の容易さの程度と捉えることとする。超硬練りコンクリートの締固め性試験方法は、JSCE-F 508-2007 に規定されている¹⁰⁾。

また、締固めにおいて加速度が一定以上であるときには締固めによる充填率の変化量が同一であることがわかっているので、締固めエネルギーと充填率の関係を式 (2.5.6)、締固めの効率を示す指標として締固めエネルギー1J/ℓにおける近似曲線の傾きを式 (2.5.7) で示す。また、締固め関数の模式図を図 2.5.3 に示す。

$$\gamma = C_i + (C_f - C_i) [1 - \exp(-bE^d)] \quad (2.5.6)$$

$$\begin{aligned} C_e &= \frac{d\gamma}{dE} \\ &= bd(C_f - C_i)E^{d-1} \exp(-bE^d) \end{aligned} \quad (2.5.7)$$

ここで、

E : 締固めエネルギー(J/ℓ)

γ : 締固めエネルギーEにおける充填率 (%)

C_i : 初期充填率 (%)

Cf：達成可能充填率（％）

Ce：締固め効率、締固め仕事量 1（J/ℓ）における締固め関数の勾配

b および d：実験係数

また、充填率が 98%になったときを実務的に締固め終了と判断し、そのときの締固めエネルギー(E98)および係数 Ci、Cf、Ce を用いて、締固め性を評価する。

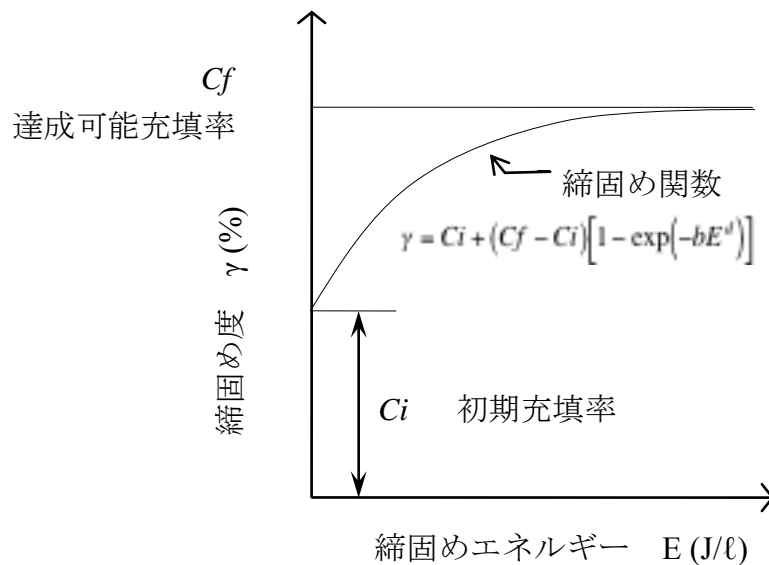


図 2.5.3 締固め関数の模式図

2.6. 乾燥収縮特性

2.6.1. コンクリート内部の水分

セメント硬化体は、多孔体構造であり、穴の大きさはマクロなものからミクロなものまでさまざまである。以下にさまざまな大きさの穴に存在する水分について整理する^{11)、12)}。

a. 空隙水

セメント硬化体中には、凍結防止などを目的として空気を連行したことによって、もしくは、練混ぜの際に空気が混入することによって、100 μm～3mm の空隙が存在する。空気連行による空隙は、50～500 μm で、4%程度存在するとされている。連行空気は独立気泡であり、一般に水の出入りは許さない。一方、エントラップトエアは、不定形で、水の出入りが自由な、自由水の存在できる範囲の空隙である。

b.毛細管水

水で満たされた空間が水和進行にともなって水和物で充填され、残存した空隙を満たしている水のことをいう。毛細管空隙は、10nm～5000nm の大きさで不規則な形状を示す。粗大な毛細管中の水は、固体表面の吸着力に影響されない自由水として存在するが、50nm 程度以下の微細空隙水は容積変化に関与する。毛細管空隙のセメント硬化体中に占める割合は、水セメント比および材齢によって変わる。

c.ゲル水

主要セメント水和物である $C\cdot S\cdot H$ ゲルの空隙を満たす水をゲル水と呼ぶ。ゲル空隙の大きさは 10nm 程度以下の微細空隙で、水を $C\cdot S\cdot H$ の層間に単分子として保持され、相対湿度 11%程度の乾燥で脱水し、 $C\cdot S\cdot H$ もわずかに構造変化を受ける。

d.吸着水

セメント硬化体表面は、内部に比べて高いエネルギー状態にあるために活性が高く、水分子を容易に吸着し、多分子層を形成する。水分子間の結合力は、固体表面からの距離に応じて減少する。旧茶吸着水は、相対湿度 30%で失われ、体積変化の原因となる。

e.化学的結合水

セメントの水和物中の化合物で、乾燥度合いに関係なく、ほぼ一定のもので、水和生成物の加熱、分解によってのみ脱水することができる。

2.6.2. 乾燥収縮のメカニズムと影響する要因

コンクリートの乾燥収縮は、細孔中に存在する水分の移動であるとされる¹³⁾。

a.毛細管張力説

毛細管空隙中の水はメニスカスをつくる。その表面張力により硬化体に応力が生じる。空隙の径が小さいと応力は大きく、相対湿度 90～45%でこの効果は重要になる。

b.表面エネルギー説

結合力が飽和していないため、固体粒子の表面には張力がはたらいっている。吸着された水はこれを緩和している。水が除かれると粒子は収縮する傾向を示す。最後の吸着水が除かれる相対湿度 20%以下で効果は最大となる。

c.分離圧説

くさび状のセメントゲル粒子間の隙間にある水は、2つの粒子を分離させる作用をしている。乾燥によりこれが除かれると、隙間は閉じて収縮する。

d.層間水の移動

メカニズムは、分離圧説と同様である。ただし、セメントゲル粒子内の層間で起こる。

2.6.3. 乾燥収縮に影響する要因

a. セメントペースト

コンクリートの乾燥収縮は、セメント硬化体の乾燥収縮に起因する。このため、セメントペーストの体積の増減は、乾燥収縮ひずみに大きな影響を与える。

b. 単位水量

一般に、単位水量が大きいほど乾燥収縮ひずみも大きくなる。これは、コンクリートの乾燥収縮はセメントペースト相が収縮することに起因するためである。単位水量を大きくすることは、同一セメント比であればセメントペースト体積を増加させる。また、同一セメント量であればセメントペースト体積を増加させるだけでなく、セメントペーストの水セメント比を大きくしてしまう。このため、いずれの場合も、コンクリートの乾燥収縮ひずみを大きくする。

c. 水セメント比

水セメント比が大きくなるにつれて乾燥収縮ひずみが若干大きくなる傾向がある。水セメント比の低減による組織の緻密化は、ペースト部分からの水分の逸散を減少させ、コンクリートの乾燥収縮ひずみを抑制するが、同時に細孔の小径化により、強力な乾燥を受けた場合は、より大きな収縮を生じる要因となる。しかし、単位水量や骨材特性と比較すると、水セメント比が乾燥収縮に与える影響は小さいといえる。

d. 骨材

コンクリート中の骨材は、収縮の要因となるセメントペースト量の割合を少なくすることにより、コンクリートの収縮を低減する。また、コンクリート中の骨材も多孔材料であり、乾燥により収縮すると考えられるが、通常その収縮量は小さいため、骨材粒子はセメントペーストの収縮を物理的に拘束することになる。一般に、骨材中の空隙が多いほど、骨材のヤング率が小さいほど、コンクリートの乾燥収縮は大きくなるといわれている。

2.7. 本研究における検討の方向性

この節では、2.1～2.7 節に示した既往研究を参考に、本研究における検討の方向性をまとめる。

「2.1.超硬練りコンクリート」および「2.2.超硬練りコンクリートの各種係数」では、超硬練りコンクリートについて、既往の知見を示した。そして、超硬練りコンクリートの配合設計に使われる各種係数も紹介した。この方法は、本研究において、低品質全粒度再生骨材を用いた超硬練りコンクリートを検討する上で参考とし、これを変形して、新しい配合設計方法を検討する。

「2.3.超硬練りコンクリートの配合設計」では、まず、従来の超硬練りコンクリートの配合設計の手順を示した。本研究では、従来の手順に基づいて、全粒度再生骨材を用いた超硬練りコンクリートの独特な配合設計を検討し、更に、粗細骨材の含有率が変動しやすいという特徴を有する全粒度再生骨材を用いた超硬練りコンクリートの配合設計を制御できるように、新たな K_m 、 K_p 法による設計方法を検討する。また、現場配合における全粒度再生骨材の表面水補正に対応するため、再生粗細骨材の吸水率および湿分に基づく補正法を検討する。

「2.5.再生骨材」および「2.6.締固め性試験」では、まず、2.5 節において、日本の建設業での再資源化の推進の現状および今回の研究に使用する全粒度再生骨材の物性を示した。2.6 節では、土木学会規準に規定されている、超硬練りコンクリートの締固め性試験方法¹⁰⁾の理論と、超硬練りコンクリートの締固め性の評価方法について整理した。

「2.7.コンクリートの乾燥収縮」では、コンクリートの乾燥収縮のメカニズムを示し、本研究において、再生粗骨材を用いた超硬練りコンクリートの乾燥収縮性状を検討する上で、参考とした。

参考文献

1. 國府勝郎、牛島栄、森博嗣：超硬練りコンクリート研究委員会報告、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.20、pp.29-38、1998
2. 原田駿平・上野敦：再生粗骨材を用いた超硬練りコンクリートの特性に関する研究、平成 22 年度修士論文
3. 國府勝郎、上野敦：締固め仕事量の評価に基づく超硬練りコンクリートの配合設計、土木学会論文集、No.532、V-30、pp.109-118、1996.2
4. 北海道開発土木研究所：再生骨材の最近の動向について、北海道開発土木研究所月報、No632、2006 年 1 月
5. 秋吉善忠：低品質再生骨材を用いたコンクリートの耐久性に関する基礎的研究、大分大学大学院工学研究科 博士後期課程 博士論文
6. 骨材の品質と有効利用に関する研究委員会報告書：日本コンクリート工学協会、p.14、2007.7
7. 梁俊：締固めエネルギーに基づくフレッシュコンクリートの締固め性評価手法、東京都立大学博士論文、pp.28-30、2006.3
8. 國府勝郎、近藤拓也、上野敦：RCCP 用コンクリートの締固め性試験方法に関する研究、セメント・コンクリート論文集、Vol.46、pp.964-969、1992
9. 梁俊：締固め完了エネルギーによるコンクリートの締固め性の評価方法、大成建設技術センター報 第 44 号(2011)
10. 土木学会：JSCE -F 508-2007 超硬練りコンクリートの締固め性試験方法、コンクリート標準示方書規準編、2010.11
11. 岩崎訓明：コンクリート配合の原点、セメント・コンクリート、No.564、pp.20-27、1994
12. T.C.Powers：The Properties of Fresh Concrete、pp.14-21、1968
13. 上野敦：博士論文 副産物を用いたコンクリートの品質向上に関する研究、pp.124-127、2005.2

第3章 全粒度再生骨材および混合骨材 を用いた超硬練りコンクリート の配合設計方法の検討

3.1. 全粒度再生骨材のみを用いた超硬練りコンクリートの配合設計

物性実験から測定した絶乾状態の全粒度再生骨材の各骨材の質量比 X_1' 、 X_2' 、 X_3' を、あらかじめ式 (3.1.1) に示したように、表乾状態の全粒度再生骨材の各骨材の質量比 X_1 、 X_2 、 X_3 に換算する。微粒分は、粒子が小さいので、吸水率 q_f を 0 とした。

$$\left\{ \begin{array}{l} X_1 = \frac{X_1' \cdot (1 + q_{g1})}{X_1' \cdot (1 + q_{g1}) + X_2' \cdot (1 + q_{s1}) + X_3'} \\ X_2 = \frac{X_2' \cdot (1 + q_{s1})}{X_1' \cdot (1 + q_{g1}) + X_2' \cdot (1 + q_{s1}) + X_3'} \\ X_3 = \frac{X_3'}{X_1' \cdot (1 + q_{g1}) + X_2' \cdot (1 + q_{s1}) + X_3'} \end{array} \right. \quad (3.1.1)$$

ここで、

$$\left\{ \begin{array}{l} X_1' : \text{絶乾状態全粒度再生骨材の粗骨材の質量比 (\%)} \\ X_2' : \text{絶乾状態全粒度再生骨材の細骨材の質量比 (\%)} \\ X_3' : \text{絶乾状態全粒度再生骨材の微粒分の質量比 (\%)} \\ q_{g1} : \text{全粒度再生骨材中の粗骨材の吸水率 (\%)} \\ q_{s1} : \text{全粒度再生骨材中の細骨材の吸水率 (\%)} \end{array} \right.$$

全粒度再生骨材中の再生粗骨材、再生細骨材および微粒分の含有比を用いると、配合設計上の未知数は K_m 、 K_p 、 W 、 C 、 S_I および G_I の 6 つとなる。本研究では、全粒度再生骨材を用いるので、 G_I 、 S_I 、 f は A が決まれば決定される。このため、 K_m 、 W/C を設定して配合計算を行う。

$$\left\{ \begin{array}{l} G_I = X_1 \cdot A \\ S_I = X_2 \cdot A \\ f = X_3 \cdot A \end{array} \right. \quad (3.1.2)$$

ここで、

$$\left\{ \begin{array}{l} A : \text{全粒度再生骨材の単位量 (kg/m}^3\text{)} \\ G_I : \text{再生粗骨材の単位量 (kg/m}^3\text{)} \\ S_I : \text{再生細骨材の単位量 (kg/m}^3\text{)} \\ f : \text{微粒分の単位量 (kg/m}^3\text{)} \\ X_1 : \text{表乾状態全粒度再生骨材の粗骨材の質量比 (\%)} \\ X_2 : \text{表乾状態全粒度再生骨材の細骨材の質量比 (\%)} \\ X_3 : \text{表乾状態全粒度再生骨材の微粒分の質量比 (\%)} \end{array} \right.$$

○ Km を設定し、 G_1 を求める。

$$\begin{aligned}
 Km &= \frac{V_{mortar}}{v_{g1} \cdot G_1} \\
 V_{mortar} &= \frac{C}{\rho_c} + \frac{W}{\rho_w} + \frac{S_1}{\rho_{s1}} + \frac{f}{\rho_f} \\
 1000 &= \frac{W}{\rho_w} + \frac{C}{\rho_c} + \frac{S_1}{\rho_{s1}} + \frac{G_1}{\rho_{g1}} + \frac{f}{\rho_f} \\
 G_1 &= \frac{1000 \cdot \rho_{g1}}{v_{g1} \cdot \rho_{g1} \cdot Km + 1} \tag{3.1.3}
 \end{aligned}$$

ここで、

$$\left(\begin{array}{l} v_{g1} : \text{再生粗骨材の単位質量あたりの空隙体積 (L/kg)} \\ \rho_{g1} : \text{再生粗骨材の表乾密度 (g/cm}^3\text{)} \\ \rho_{s1} : \text{再生細骨材の表乾密度 (g/cm}^3\text{)} \\ \rho_f : \text{微粒分の表乾密度 (g/cm}^3\text{)} \end{array} \right)$$

○ 式 (3.1.2) によって、 A 、 S_1 、 f を導出する。

$$\left(\begin{array}{l} A = G_1 / X_1 \\ S_1 = X_2 \cdot A \\ f = X_3 \cdot A \end{array} \right)$$

○ モルタルの体積を求める。

$$\begin{aligned}
 V_{mortar} &= 1000 - \frac{G_1}{\rho_{g1}} \\
 V_{mortar} &= \frac{C}{\rho_c} + \frac{W}{\rho_w} + \frac{S_1}{\rho_{s1}} + \frac{f}{\rho_f} \tag{3.1.4}
 \end{aligned}$$

○ W/C を設定し、 C' 、 W を求める。また、微粒分をセメント粒子として扱うことにする。これによって、

$$\frac{W}{C} = \frac{W}{C' + f}$$

C : 微粒分およびセメント粒子の単位量 (kg/m^3)

C' : セメント粒子の単位量 (kg/m^3)

ここで、 $\frac{W}{C' + f}$ を X とする。

$$W = X \cdot (C' + f) \tag{3.1.5}$$

式 (3.1.4) と式 (3.1.5) から、 C' を求める。また、微粒分の密度 ρ_f を再生細骨材の密度 ρ_{s1} と同じと仮定する。

$$\begin{aligned}\rho_f &= \rho_{s1} \\ V_{mortar} &= \frac{C}{\rho_C} + \frac{X \cdot (C' + f)}{\rho_W} + \frac{S_1}{\rho_{S1}} + \frac{f}{\rho_{S1}} \\ C' &= \frac{\rho_C \cdot \rho_W \cdot \left(V_{mortar} - \frac{S_1}{\rho_{S1}} - \frac{f}{\rho_{S1}} \right) - \rho_C \cdot X \cdot f}{\rho_W + \rho_C \cdot X} \\ W &= X \cdot (C' + f)\end{aligned}$$

○ Kp を求める。

$$Kp = \frac{\frac{C'}{\rho_C} + \frac{f}{\rho_{S1}} + \frac{W}{\rho_W}}{v_{S1} \cdot S_1}$$

v_{S1} : 再生細骨材の単位質量あたりの空隙体積 (L/kg)

3.2. 従来手法による混合粗骨材を用いた超硬練りコンクリートの配合上の課題

混合粗骨材を用いた超硬練りコンクリートは、普通粗骨材および再生粗骨材が混ざった混合粗骨材を使用した特殊な超硬練りコンクリートである。前章の2.3 節「超硬練りコンクリートの配合設計」に示した手順で配合設計を行うが、再生粗骨材の混合率の変化につれ、混合粗骨材の物性も変化するので、従来、下記の三点により混合粗骨材の物性を把握する。

(1) 普通粗骨材と再生粗骨材を混合した場合には、粗骨材を混合した状態における吸水率（以降、混合吸水率） $q_{gmixture}$ を式 (3.2.1) で求める必要がある。

$$\begin{aligned}q_{gmixture} &= \frac{m_s - m_d}{m_d} \\ &= \frac{\left\{ (100 - \alpha) \rho_{gg} + \alpha \cdot \rho_{gr} \right\} - \left\{ (100 - \alpha) \frac{\rho_{gg}}{(1 + q_{gg})} + \alpha \cdot \frac{\rho_{gr}}{(1 + q_{gr})} \right\}}{\left\{ (100 - \alpha) \frac{\rho_{gg}}{(1 + q_{gg})} + \alpha \cdot \frac{\rho_{gr}}{(1 + q_{gr})} \right\}} \quad (3.2.1)\end{aligned}$$

ここで、

$$\left\{ \begin{array}{l} m_s : \text{混合骨材の表乾質量 (kg)} \\ m_d : \text{混合骨材の絶乾質量 (kg)} \\ \rho_{gg} : \text{普通骨材の表乾密度 (kg/m}^3\text{)} \\ \rho_{gr} : \text{再生骨材の表乾密度 (kg/m}^3\text{)} \\ q_{gg} : \text{普通骨材の吸水率 (\%)} \\ q_{gr} : \text{再生骨材の吸水率 (\%)} \\ \alpha : \text{再生骨材混合率 (\%)} \end{array} \right.$$

(2) 普通粗骨材と再生粗骨材を混合する場合には、 ρ_g は混合密度でなければならないため、以下の式 (3.2.2) で求める。

$$\rho_{g \text{ mixture}} = \frac{(100 - \alpha) \times \rho_{gg} + \alpha \times \rho_{gr}}{100} \quad (3.2.2)$$

(3) 普通粗骨材と再生粗骨材を混合する場合には、粗骨材を混合した状態における単位体積質量 $T_{g \text{ mixture}}$ を実測しなければならないため、図 3.2.1 に示したよう、まず実験する予定の体積混合率を設定し、一つずつの体積混合率において、各骨材の必要質量を計量し、計量した骨材を混合し、改めて各再生骨材混合率で混合した粗骨材の単位体積質量 $T_{g \text{ mixture}}$ を実測し、混合粗骨材の単位質量あたりの空隙体積 v_g を求める必要がある。この手順では、正確な配合設計が可能となる反面、非常に煩雑である。

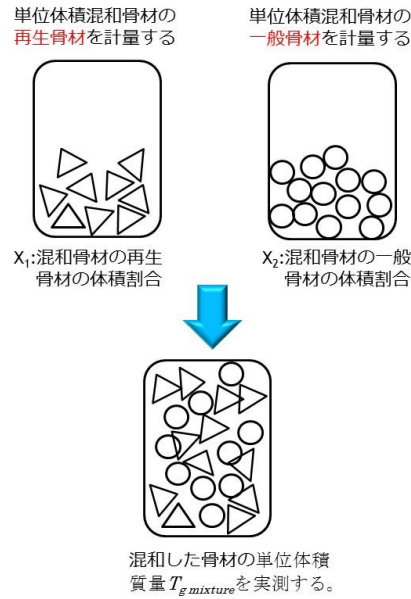


図 3.2.1 混合粗骨材の単位体積質量 $T_{g \text{ mixture}}$ の実測方法

3.3. 混合骨材を用いた超硬練りコンクリートの簡易配合設計方法

本実験の目的は、全粒度再生骨材を用いた超硬練りコンクリートを利用し、迅速に道路網を確保することである。廃棄コンクリートを破碎し、その産物の再生骨材を全量で緊急舗装 RCCP 用コンクリートに利用することが望まれる。

3.1 節に示した全粒度再生骨材超硬練りコンクリートにおいて、力学的な性能が低下することが予想されるので、図 3.3.1 に示すように、一部の全粒度再生骨材を普通粗骨材に置換することにより、混合骨材として使用し、コンクリートの性能を向上させることとする。従来の混合粗骨材超硬練りコンクリートの配合設計には、3.2 節に示した混合骨材に関する三つの物性のデータが必要である。吸水率 $q_{g\ mixture}$ および密度 $\rho_{g\ mixture}$ は、理論計算で算出できるが、単位体積質量 $T_{g\ mixture}$ については、理論計算ができず、実測実験を行う必要があり、非常に手間がかかる。迅速に被災地を支援するために、単位体積質量 $T_{g\ mixture}$ の実測実験を省けるよう、新たな簡易配合設計方法を検討する。

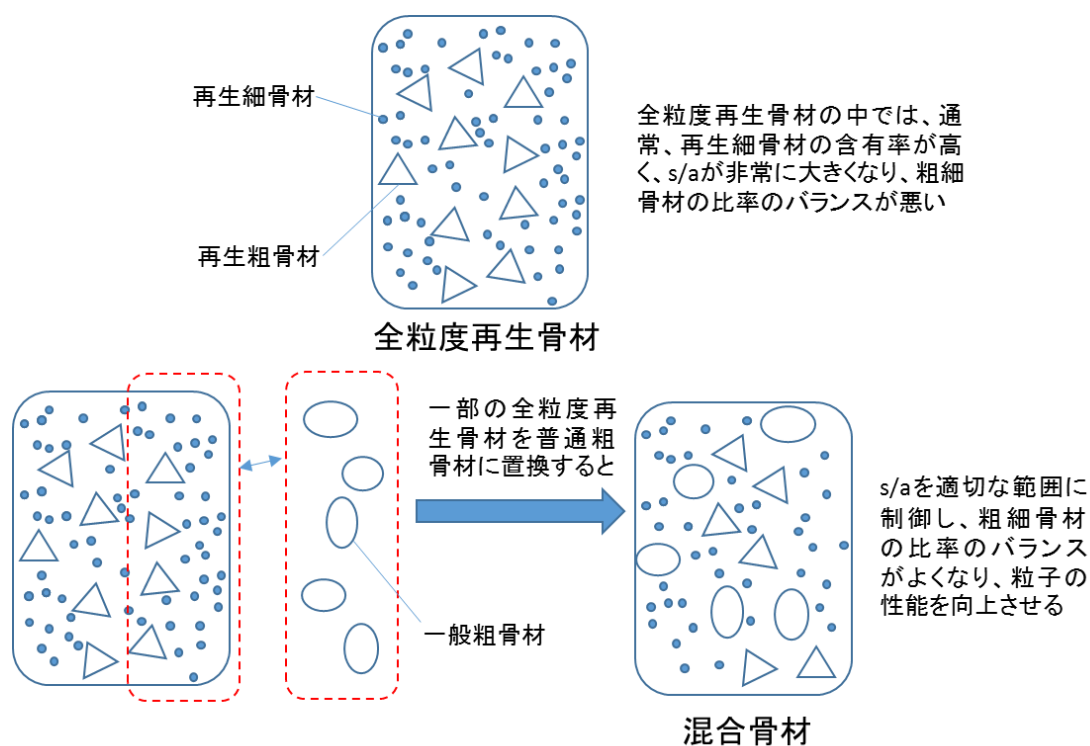


図 3.3.1 混合骨材の見取図

従来の超硬練りコンクリート配合設計では Km 法により、下記の式 (3.3.1) で粗骨材単位量を求める。

$$\begin{aligned}
Km &= \frac{V_{mortar}}{v_g \cdot G} = \frac{\frac{W}{\rho_w} + \frac{C}{\rho_c} + \frac{S}{\rho_s}}{v_g \cdot G} = \frac{1000 - \frac{G}{\rho_g}}{v_g \cdot G} \\
1000 &= \frac{W}{\rho_w} + \frac{C}{\rho_c} + \frac{S}{\rho_s} + \frac{G}{\rho_g} \\
G &= \frac{1000 \rho_g}{v_g \cdot \rho_g \cdot Km + 1} \quad (3.3.1)
\end{aligned}$$

ここで、

$$\left(\begin{array}{l} Km : \text{粗骨材空隙体積に対するモルタル体積の比} \\ V_{paste} : \text{モルタルの単位体積 (L/m}^3\text{)} \\ v_g : \text{粗骨材の単位質量あたりの空隙体積 (L/kg)} \\ G : \text{粗骨材の単位量 (kg/m}^3\text{)} \end{array} \right)$$

この理論では単位体積の超硬練りコンクリートの中で、粗骨材空隙体積に対するモルタル体積の比 **Km** を仮定し、粗骨材単位量を制御するものである。式 (3.3.1) の v_g は、表乾状態での粗骨材と細骨材の単位質量あたりの空隙体積を示している。

$$v_g = \frac{1}{T_g} - \frac{1}{\rho_g} \quad (3.3.2)$$

ここで、

$$\left(\begin{array}{l} T_g : \text{吸水率を考慮した粗骨材の単位体積質量 (kg/L)} \\ \rho_g : \text{粗骨材の表乾密度 (g/cm}^3\text{)} \end{array} \right)$$

上記の式 (3.3.2) により、吸水率を考慮した混合粗骨材の単位体積質量が必要なので、単位体積質量を実測する手間を省けるように、新たな係数 y_1 、 y_2 を提出する。

y_1 : 単位体積超硬練りコンクリートの中で再生骨材超硬練りコンクリートの体積比

(下記、再生粗骨材超硬練りコンクリートの体積比と呼ぶ)

y_2 : 単位体積超硬練りコンクリートの中で超硬練り一般骨材コンクリートの体積比

(下記、普通粗超硬練りコンクリートの体積比と呼ぶ)

ここで

$$y_1 + y_2 = 100\%$$

混合粗骨材を用いた超硬練りコンクリートの理想的な状態は図 3.3.1 の左に示した。理想的な状態で配合設計を行うためには、混合粗骨材の単位体積質量が不可欠であるが、図 3.3.1 の右に示されたように、理想的な状態から再生粗骨材のみを含有するコンクリートおよび普通粗骨材のみを含有するコンクリートに分けるという状態を仮定すると、式 (3.3.3) により、再生粗骨材の混合率から、再生粗骨材の単位量および碎石の単位量を算出することができる。

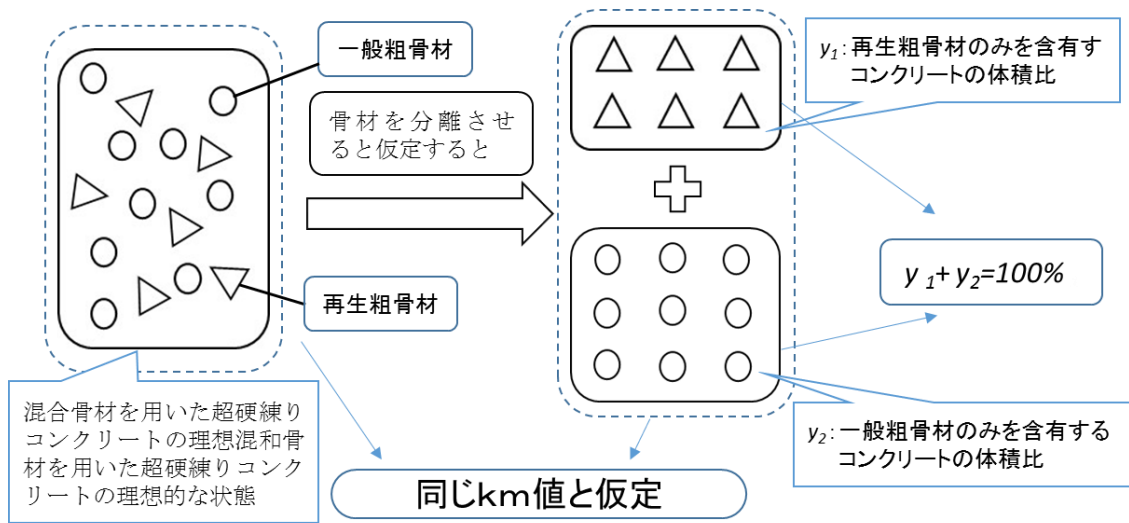


図 3.3.1 理想状態→仮定状態の説明図

$$\left\{ \begin{array}{l} G_1 = \frac{y_1 \cdot 1000 \cdot \rho_{g1}}{v_{g1} \cdot \rho_{g1} \cdot Km + 1} \\ G_2 = \frac{y_2 \cdot 1000 \cdot \rho_{g2}}{v_{g2} \cdot \rho_{g2} \cdot Km + 1} \end{array} \right. \quad \text{式 (3.3.3)}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{g1} = \frac{1}{T_{g1}} + \frac{1}{\rho_{g1}} \\ v_{g2} = \frac{1}{T_{g2}} + \frac{1}{\rho_{g2}} \end{array} \right.$$

ここで、

- y_1 : 再生超硬練りコンクリートの体積比 (%)
- y_2 : 一般超硬練りコンクリートの体積比 (%)
- G_1 : 混合粗骨材中の再生粗骨材の単位量 (kg/m^3)
- G_2 : 混合粗骨材中の一般粗骨材の単位量 (kg/m^3)
- v_{g1} : 再生粗骨材の単位質量あたりの空隙体積 (L/kg)
- v_{g2} : 一般粗骨材の単位質量あたりの空隙体積 (L/kg)
- T_{g1} : 吸水率を考慮した再生粗骨材の単位体積質量 (kg/L)
- T_{g2} : 吸水率を考慮した一般粗骨材の単位体積質量 (kg/L)
- ρ_{g1} : 再生粗骨材の表乾密度 (g/cm^3)
- ρ_s : 一般粗骨材の表乾密度 (g/cm^3)

3.3.1. 高細骨材含有率全粒度再生骨材に対応する超硬練りコンクリートの配合設計

今回使用する全粒度再生骨材中の細骨材含有率は約 54.8%であり、細骨材率が非常に高い。このため、全粒度再生骨材の一部を普通碎石によって置換することによって、Km、Kp 法による配合設計の自由度を増し、配合の制御が可能となると考えられる。2つの粗骨材を混合するため、あらかじめ単位体積の超硬練りコンクリートの中で、再生骨材のみを含有するコンクリートの体積比 y_1 および一般骨材のみを含有するコンクリートの体積比 y_2 を仮定する。

$$y_1 + y_2 = 100\%$$

超硬練りコンクリートの配合において、未知数は Km、Kp、W、C、S および G の 6 つである。その中で、

$$G_1 + G_2 = G \quad (3.3.4)$$

ここで、

- G_1 : 混合粗骨材中の再生粗骨材の単位量 (kg/m^3)
- G_2 : 混合粗骨材中の一般骨材の単位量 (kg/m^3)

G_1 を決めることができると、全粒度再生骨材の使用量を決められ、細骨材も算出できる。実務的には、Km、 y_1 、Kp 決定するのが良いと考えられる。

条件として、Km、 $Kp \geq 1$ でなければならないことがある。なお、コンクリートの空気量を 0%であると仮定する。

○ あらかじめ Km 、 y_l を設定し、混合粗骨材の再生粗骨材の単位量 G_l 及び混合粗骨材の碎石の単位量 G_2 を求める。

$$G_1 = \frac{y_1 \cdot 1000 \cdot \rho_{g1}}{v_{g1} \cdot \rho_{g1} \cdot Km + 1}$$

$$G_2 = \frac{y_2 \cdot 1000 \cdot \rho_{g2}}{v_{g2} \cdot \rho_{g2} \cdot Km + 1}$$

○ 式 (3.1.1) によって、 A 、 S_l 、 f を導出する。

$$\begin{cases} A = G_1 / X_1 \\ S_1 = X_2 \cdot A \\ f = X_3 \cdot A \end{cases}$$

○ モルタルの体積を求める。

$$V_{mortar} = 1000 - \frac{G_1}{\rho_{G1}} - \frac{G_2}{\rho_{G2}}$$

$$V_{mortar} = \frac{C}{\rho_C} + \frac{W}{\rho_W} + \frac{S_1}{\rho_{s1}} + \frac{f}{\rho_f} \quad (3.3.5)$$

○ W/C を設定し、 C' 、 W を求める。また、微粒分をセメント粒子として扱うことにする。これによって、

$$\frac{W}{C} = \frac{W}{C' + f}$$

C : 微粒分およびセメント粒子の単位量 (kg/m^3)

C' : セメント粒子の単位量 (kg/m^3)

ここで、 $\frac{W}{C' + f}$ を X とする。

$$W = X \cdot (C' + f) \quad (3.3.6)$$

式 (3.3.5) と式 (3.3.6) から、 C' を求める。また、微粒分の密度 ρ_f を再生細骨材の密度 ρ_{s1} と同じと仮定する。

$$\rho_f = \rho_{s1}$$

$$V_{mortar} = \frac{C}{\rho_C} + \frac{X \cdot (C' + f)}{\rho_W} + \frac{S_1}{\rho_{s1}} + \frac{f}{\rho_{s1}}$$

$$C' = \frac{\rho_c \cdot \rho_w \cdot \left(V_{mortar} - \frac{S_1}{\rho_{S1}} - \frac{f}{\rho_{S1}} \right) - \rho_c \cdot X \cdot f}{\rho_w + \rho_c \cdot X}$$

$$W = X \cdot (C' + f)$$

○ K_p を求める。

$$K_p = \frac{\frac{C'}{\rho_c} + \frac{f}{\rho_{S1}} + \frac{W}{\rho_w}}{v_{S1} \cdot S_1}$$

3.3.2. 高粗骨材含有率の全粒度再生骨材超硬練りコンクリートの配合設計

今回の実験に使用する全粒度再生骨材は細骨材の含有率が非常に高いものである。しかし、粗骨材の含有率が高い全粒度再生骨材にも対応できるように、配合設計の論理を構成するのがより汎用的である。

細骨材率が低い全粒度再生骨材に対して、全粒度再生骨材の一部を普通の砕砂で置換する。2つの細骨材を混合する場合には、未知数 K_m 、 K_p 、 W 、 C 、 S_1 、 S_2 および G 、7つの中で3つを仮定することで配合設計を行うことができる。

○ あらかじめ K_m を仮定し、 G_1 を求める。

$$G_1 = \frac{1000 \cdot \rho_{S1}}{v_{g1} \cdot \rho_{g1} \cdot K_m + 1}$$

○ 式 (3.1.1) によって、 A 、 S_1 、 f を導出する。

$$\begin{cases} A = G_1 / X_1 \\ S_1 = X_2 \cdot A \\ f = X_3 \cdot A \end{cases}$$

ここで、

S_1 : 混合細骨材の再生細骨材の単位量 (kg/m^3)

○ モルタルの体積を求める。

$$V_{mortar} = 1000 - \frac{G_1}{\rho_{g1}}$$

○ W 、 W/C を設定し、混合細骨材の再生細骨材の単位量 S_2 の単位量を求める。

$$V_{mortar} = \frac{S_1}{\rho_{s1}} + \frac{S_2}{\rho_{s2}} + \frac{C}{\rho_C} + \frac{W}{\rho_w} + \frac{f}{\rho_f} \quad (3.3.7)$$

ここで、

S_2 : 混合細骨材の砕砂の単位量 (kg/m^3)

また、微粒分をセメント粒子として扱うことにする。これによって、

$$\frac{W}{C} = \frac{W}{C' + f}$$

C : 微粒分およびセメント粒子の単位量 (kg/m^3)

C' : セメント粒子の単位量 (kg/m^3)

ここで、 $\frac{W}{C' + f}$ を X とする。

$$W = X \cdot (C' + f) \quad (3.3.8)$$

式(3.3.7)と式(3.3.8)から、 S_2 を求める。微粒分の密度 ρ_f を再生細骨材の密度 ρ_{s1} と同じと仮定する。

$$\begin{aligned} \rho_f &= \rho_{s1} \\ V_{mortar} &= \frac{S_1}{\rho_{s1}} + \frac{S_2}{\rho_{s2}} + \frac{C}{\rho_C} + \frac{X \cdot (C' + f)}{\rho_w} + \frac{f}{\rho_{s1}} \\ S_2 &= \frac{V_{mortar} - \left(\frac{S_1}{\rho_{s1}} + \frac{C}{\rho_C} + \frac{X \cdot (C' + f)}{\rho_w} + \frac{f}{\rho_{s1}} \right)}{\rho_{s2}} \\ W &= X \cdot (C' + f) \end{aligned}$$

○ Kp を求める。

$$Kp = \frac{\frac{C'}{\rho_C} + \frac{f}{\rho_{s1}} + \frac{W}{\rho_w}}{v_{s1} \cdot S_1 + v_{s2} \cdot S_2}$$

ここで、

v_{s1} : 細骨材の単位質量あたりの空隙体積 (L/kg)

v_{s2} : 砕砂の単位質量あたりの空隙体積 (L/kg)

3.4. 全粒度再生骨材の表面水補正方法

現場で示方配合どおりのコンクリートができるよう、現場における材料の状態に応じて、湿潤状態にある骨材の表面水率の補正が必要である。

従来、現場配合の表面水率の補正が、吸水率および湿分に基づく骨材の表面水率を求めて行う。計算は、次による¹⁾。

$$H = \frac{1}{(q + 1) \cdot (1 - P)} - 1 \quad (3.4.1)$$

ここで、

H ：表面水率（％）

q ：骨材の吸水率（％）

P ：骨材の湿分（％）

この論理を既混合の全粒度再生骨材に適用できるようにする。その方法は以下のとおりである。

○再生骨材の平均吸水率 q の計算は、次による。

$$q = \frac{m - m_d}{m_d}$$
$$= \frac{[X'_1 \cdot (1 + q_{g1}) \cdot m_d + X'_2 \cdot (1 + q_{s1}) \cdot m_d + X'_3 \cdot m_d] - m_d}{m_d}$$

$X'_1 + X'_2 + X'_3 = 1$ によって、

$$q = X'_1 \cdot q_{g1} + X'_2 \cdot q_{s1} \quad (3.4.2)$$

ここで、

$$\left\{ \begin{array}{l} q : \text{再生骨材の平均吸水率（％）} \\ m : \text{表乾状態全粒度再生骨材の質量（g）} \\ m_d : \text{絶乾状態全粒度再生骨材の質量（g）} \\ X'_1 : \text{絶乾状態全粒度再生骨材の粗骨材の質量比（％）} \\ X'_2 : \text{絶乾状態全粒度再生骨材の細骨材の質量比（％）} \\ X'_3 : \text{絶乾状態全粒度再生骨材の微粒分の質量比（％）} \\ q_{g1} : \text{全粒度再生骨材中の粗骨材の吸水率（％）} \\ q_{s1} : \text{全粒度再生骨材中の細骨材の吸水率（％）} \end{array} \right.$$

○全粒度再生骨材の湿分 P は、実測する。すなわち、上記の吸水率および実測の湿分に基づいて、骨材の表面水率が得られる。

$$m_w = H \cdot m \quad (3.4.3)$$

m_w : 試料の表面水の質量 (g)

参考文献

- 1.骨材の含水率試験方法及び含水率の基づく表面水率の試験方法（JIS A 1125:2013）

第4章 新たな配合設計に基づいて全粒度再生骨材および混合骨材を用いた超硬練りコンクリートの締固め性に対する影響

4.1. はじめに

本章は、前章で提案した全粒度再生骨材および全粒度再生骨材の一部を普通砕石によって置換した混合骨材を用いた超硬練りコンクリートの配合設計理論について、締固め性試験の結果に基づいて配合調整への適用の可能性について検討したものである。

各材料の単位量の変更により、全粒度再生骨材を用いた超硬練りコンクリートの締固め性および前章で導入した、再生粗骨材のみを含有する RCCP の体積比 y_1 の変化により、混合骨材を用いた超硬練りコンクリートの締固め性に及ぼす影響が明確ではない。このため、全粒度再生骨材の利用による超硬練りコンクリートの締固め性に及ぼす影響を検討する。そして、本論文で提案した新しい配合設計方法が、締固め性向上の観点からの配合調整に適用できるかを検討した。

4.2. 試験方法

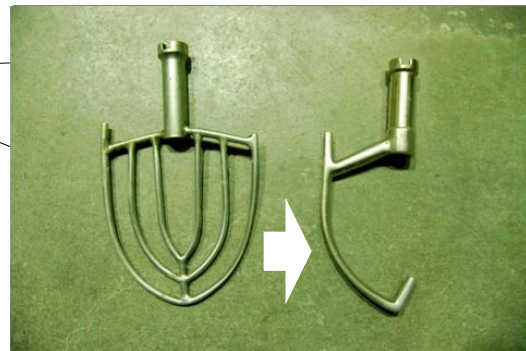
JSCE-F 508-2007¹⁾に従い、超硬練りコンクリートの締固め性試験を行った。

4.2.1. 使用器具

締固め性試験装置一式、はかり、ハンドスコップ、定規、突き棒など。

4.2.2. 超硬練りコンクリート練混ぜ手順

- ① 水、セメント、再生骨材（一般骨材）を計量。
- ② セメント、骨材をミキサに投入
- ③ 練混ぜ用羽根を変える
- ④ 低速で 60s 練混ぜ
- ⑤ 30s の間に注水
- ⑥ 低速で 60s 練混ぜ
- ⑦ フネで突き落とし
- ⑧ 低速で 60s 練混ぜ
- ⑨ STOP→排出
- ⑩ 円柱型枠分（100x100）を三本分量り取る



4.2.3. 締固め性試験手順

- ① 試料の採取

練上がった超硬練りコンクリートを、材料分離に注意しながら、試料をミキサのバケツからフネに落とし、スコップで軽く混ぜる。

② 試料の計量

事前に配合ごとに超硬練りコンクリートの単位容積質量を計算し、軽く混ぜた試料を、 $\phi 10 \times 20 \text{cm}$ の体積で充填率 100%になるように正確に量り取る。このとき、材料分離が生じないように注意しながら試料を投入する。試験は乾燥する前に直ちに開始し、残りの試料は湿布をかけ乾燥を防ぐ。

③ 試料の投入

試料は 3 層に分け型枠に詰める。試料はハンスコップを使い、容器中に落下させることのないように静かに入れる。各層とも、粗骨材が集中することのないように注意する。

④ 突き棒による突き固め

各層とも試料投入後、全面にわたり突き棒で 15 回均等に突く。試料を詰めた後、定規などを用いて表面が平らになるように軽く均す。

⑤ 試験準備

試料の入った型枠を振動台に固定し、上載板を静かに試料表面まで降ろす。

⑥ 試験開始

パソコンでデータを入力した後、振動を開始する。作用させる加速度数 5G ($=5 \times 9.8 \text{m/s}^2$)、振動数 75Hz、振動時間 3 分。

⑦ 締固め性の評価

試験開始後はすべてパソコンの画面表示に従って行う。結果は振動開始後約 1 分以内に表示される。(PC-9801RA 使用時)

4.2.4. 評価指標

$$\begin{aligned}\gamma &= Ci + (Cf - Ci)[1 - \exp(-bE^d)] \\ Ce &= \frac{d\gamma}{dE} \\ &= bd(Cf - Ci)E^{d-1} \exp(-bE^d)\end{aligned}\tag{4.2.1}$$

ここで、

$$\left\{ \begin{array}{l} E: \text{締固めエネルギー}(\text{J}/\ell) \\ \gamma: \text{締固めエネルギー} E \text{ における充填率 } (\%) \\ Ci: \text{初期充填率 } (\%) \\ Cf: \text{達成可能充填率 } (\%) \\ Ce: \text{締固め効率、締固め仕事量 } 1 (\text{J}/\ell) \text{ における締固め関数の勾配} \\ b \text{ および } d: \text{実験係数} \end{array} \right.$$

4.2.5. 最終評価

最終的には 4 つの係数による検討および式(4.2.1)に示す締固め曲線を得ることにより、本研究で提案した全粒度再生骨材および全粒度再生骨材の一部を普通砕石によって置換した混合骨材を用いた超硬練りコンクリートの配合設計理論に基づいて製作する供試体の締固め性を検討する。

4.3. 配合設計

4.3.1. 使用材料

セメントは、密度 3.16g/cm^3 の普通ポルトランドセメントを使用した。セメントの物性は、表 4.3.1 に示すとおりである。再生細骨材、再生粗骨材および砕砂、砕石の物性は、表 4.3.2 に示すとおりである。

表 4.3.1 セメントの物性

密度 (g/cm^3)	比表面積 (cm^2/g)	凝結			安定性 (パット法)	圧縮強さ(N/mm^2)		
		水量 (%)	始発(h- min)	終結(h- min)		3day	7day	28day
3.16	3310	27.4	2-21	3-25	良	30.7	45.8	62.2

表 4.3.2 骨材の物性

種類	記号	岩種 など	産地	表乾 密度 (g/cm^3)	絶乾 密度 (g/cm^3)	吸水率 (%)	単位容 積重量 (kg/l)	実積率 (%)	F.M.
再生細骨材	RS	-	-	2.46	2.27	8.34	1.33	58.5	3.43
再生粗骨材	RG	-	-	2.57	2.43	5.63	1.39	57.4	6.92
砕砂	S	砂岩	相模原	2.63	2.59	1.40	1.71	65.9	2.92
砕石	G	砂岩	相模原	2.64	2.61	1.05	1.55	59.5	6.41

4.3.2. 示方配合

各シリーズのコンクリートの配合を表 4.3.3、表 4.3.4 および表 4.3.5 に示す。本試験に検討された三種類の超硬練りコンクリートが合計 8 配合であり、1 つ

の配合ごとに三本の供試体を作製した。各シリーズの配合の記号説明が図 4.3.1 に示された。

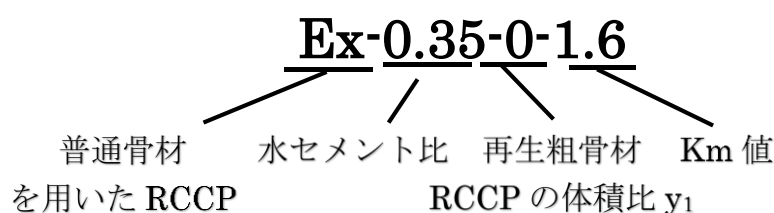
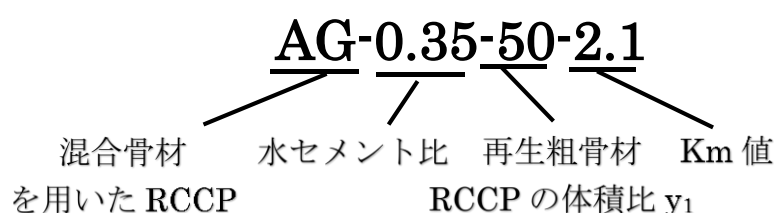
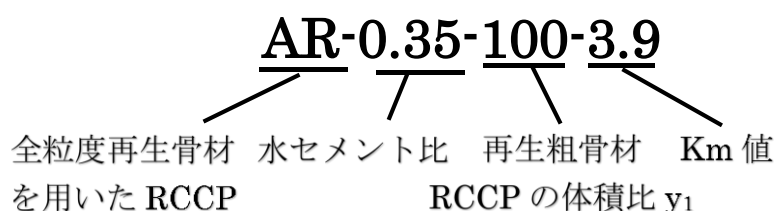


図 4.3.1 各シリーズ配合の記号説明

一種類目 **AR** シリーズは、全粒度再生骨材超硬練りコンクリートであり、**Km** 値を高く設定したことが特徴である。細骨材率 s/a を 58.8%、**Km** を 3.9 とし、締固め性の結果に基づいて、水セメント比を 0.30、0.35、0.40 で調整させ、3 水準を設計した。

二種類目 **AG** シリーズは、全粒度再生骨材の一部を普通碎石によって置換した超硬練りコンクリートであり、あらかじめ再生超硬練りコンクリートの体積比 y_1 及び一般超硬練りコンクリートの体積比 y_2 を仮定する。水セメント比 35%、 y_1 を 35% および 50% として 2 つの体積比を選定し、締固め性の結果に基づいて、体積比ごとに **Km** 値を調整し、合わせて 4 水準の配合を設計した。

三種類目 **Ex** シリーズは、一般骨材超硬練りコンクリートであり、単位水量 120kg/m^3 、**Km** を 1.6、水セメント比を 0.35 とし、配合設計を行っている。

表 4.3.3 AR シリーズ超硬練りコンクリート示方配合

記号	km	kp	s/a	W/C	単位量(kg/m ³)					
					RS	RG	f	A合計	W	C
AR0.30-100-3.9	3.90	1.45	58.8%	30.0%	919	688	49	1655	149	449
AR0.35-100-3.9	3.90	1.45	58.8%	35.0%	919	688	49	1655	161	411
AR0.40-100-3.9	3.90	1.45	58.8%	40.0%	919	688	49	1655	171	379

表 4.3.4 AG シリーズ超硬練りコンクリート示方配合

記号	km	kp	s/a	W/C	単位量(kg/m ³)							
					RS	RG	f	A合計	G	y ₁	W	C
AG0.35-35-1.6	1.6	1.93	33.7%	35.0%	557	417	30	1003	818	35%	142	375
AG0.35-35-1.8	1.8	2.38	33.7%	35.0%	524	392	28	943	768	35%	165	443
AG0.35-50-2.1	2.1	1.61	42.0%	35.0%	686	514	36	1237	541	50%	145	379
AG0.35-50-2.3	2.3	1.93	42.0%	35.0%	651	487	35	1172	512	50%	165	438

表 4.3.5 Ex シリーズ超硬練りコンクリート示方配合

記号	km	kp	s/a	W/C	用量(kg/m ³)			
					S	G	W	C
Ex0.35-0-1.6	1.60	1.50	38.2%	35.0%	775	1259	120	343

4.4. 締固め性試験結果

4.4.1. 充填率 96%に達成するまでの締固めエネルギー E96

本研究には、充填率 96%に達するまでの締固めエネルギー（E96）を用いて各配合の超硬練りコンクリートの締固め性を評価している。締固めエネルギー E96 が低いほど、より良好な締固め性を示している。E96 が 200 J/l を超える場合は、締固め性が低いと判断した。各シリーズのコンクリートの締固めエネルギー E96 を、それぞれ表 4.4.1～表 4.4.3 に示す。また、シリーズごとにまとめたグラフを図 4.4.1～図 4.4.3 に示す。

AR シリーズにおける E96 を表 4.4.1 に示す。水セメント比 w/c が 30%、Km 値が 3.9 の全粒度再生骨材を用いた RCCP を作製した。この配合の E96 は全て 200 J/l を超え、締固め不能という状態である。締固め性試験結果を踏まえ、Km、Kp を一定値とし、水セメント比 w/c を 30% から 35% までに修正した。RCCP の締固め性は改善され、E96 が 112 J/l に減少した。さらに、Km、Kp 値を一定とし、水セメント比 w/c を 35% から 40% までに配合修正した。結果として E96 が 77 J/l までに低下し、より良好な締固め性を示している。

AG シリーズの四配合における E96 を表 4.4.2 に示す。再生超硬練りコンクリ

ートの体積比 y_1 を 35%、50% とし、あらためて y_1 が 35% の場合に K_m を 1.6、50% の場合に K_m を 2.1 として混合骨材を用いた RCCP を作製した。 y_1 が 50%、 K_m 値が 2.1 の場合には、良好な締固め性を示したことに對し、 y_1 が 35%、 K_m 値が 1.6 の場合には、E96 が 126J/ℓ という高い値を測定した。締固め性を改善するため、締固め性試験の結果に基づいて配合修正をした。 y_1 が 35% の場合には、 K_m を 1.8 に調整し、 y_1 が 50% の場合には、 K_m を 2.3 に調整した。修正した結果は、 K_m 値が 1.6 の場合には、E96 が 30 J/ℓ までに抑えられ、 K_m 値の修正により、混合骨材を用いた RCCP の締固め性が改善することがわかる。

表 4.4.1 AR シリーズにおける E96(J/ℓ)

	一本目 E96	二本目 E96	三本目 E96	平均値 (不可除き)
AR0.30-100-3.9	不可	不可	不可	不可
AR0.35-100-3.9	69	155	不可	112
AR0.40-100-3.9	26	127	不可	77

表 4.4.2 AG シリーズにおける E96(J/ℓ)

	一本目 E96	二本目 E96	三本目 E96	平均値 (不可除き)
AG0.35-35-1.6	126	不可	不可	126
AG0.35-35-1.8	20	30	40	30
AG0.35-50-2.1	42	33	90	55
AG0.35-50-2.3	8	11	15	22

表 4.4.3 Ex シリーズにおける E96(J/ℓ)

	一本目 E96	二本目 E96	三本目 E96	平均値 (不可除き)
G0.35-0-1.6	64	120	133	106

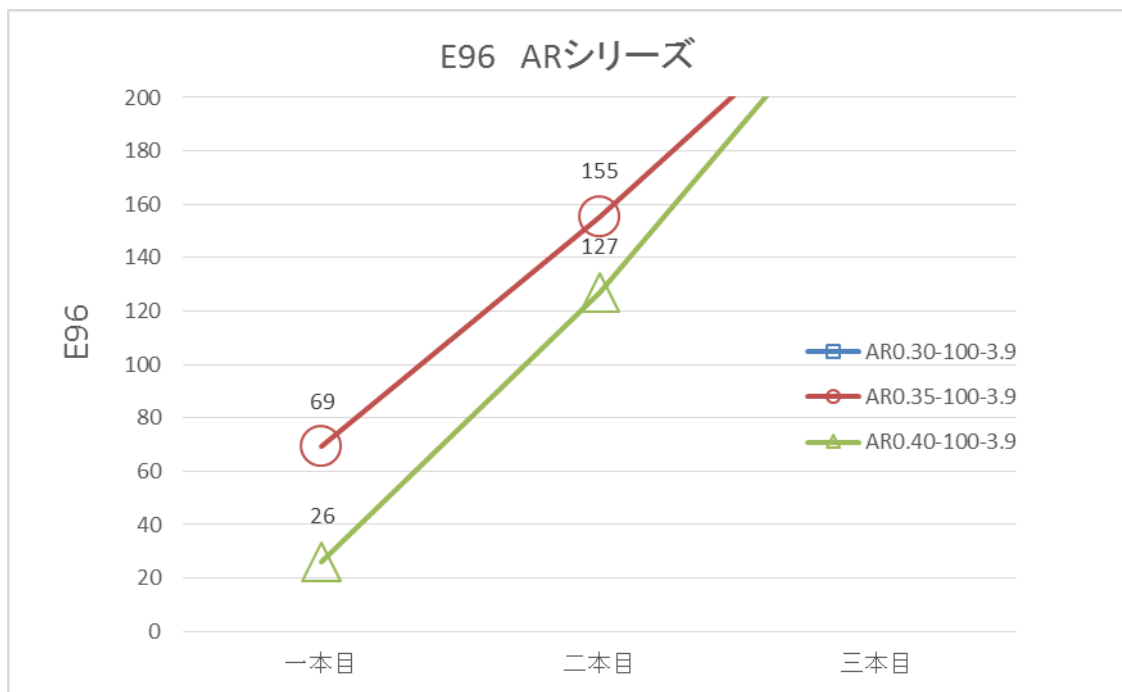


図 4.4.1 AR シリーズにおける E96

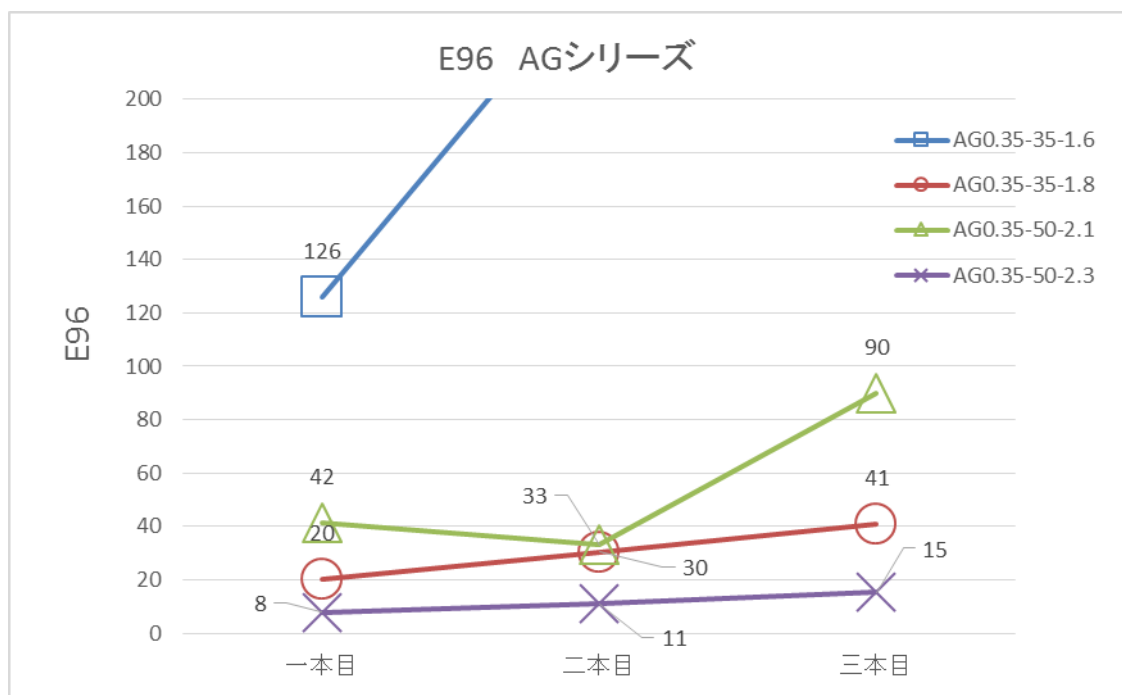


図 4.4.2 AG シリーズにおける E96

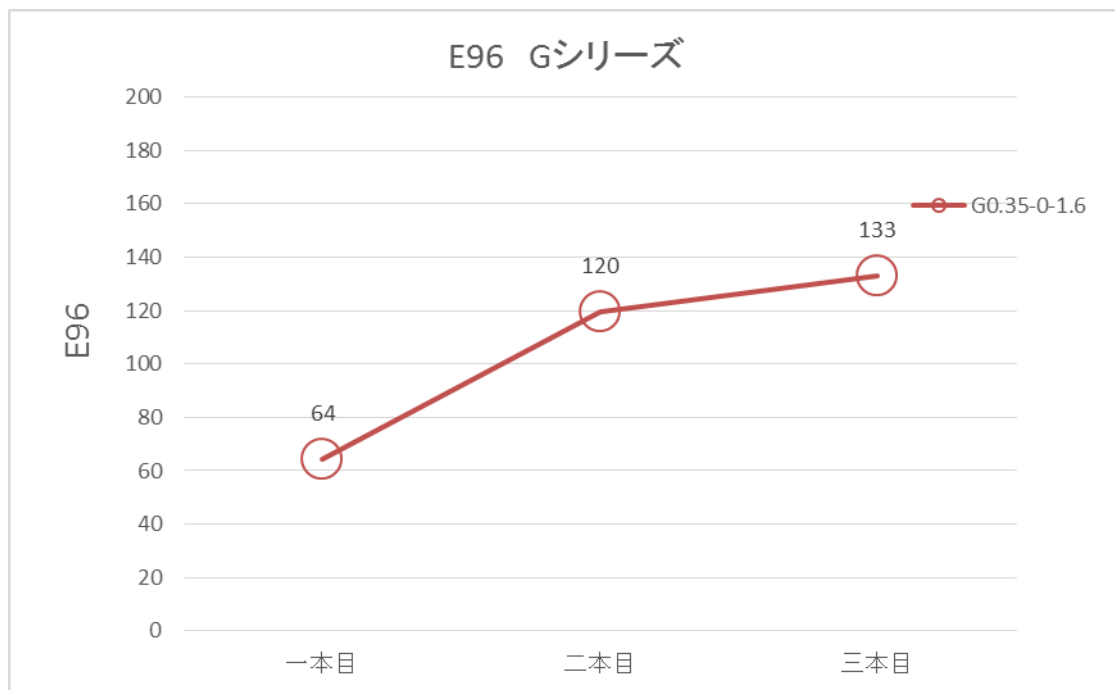


図 4.4.3 Ex シリーズにおける E96

4.4.2. 締固め効率 Ce

締固め効率 C_e は、締固め関数の任意のエネルギーにおける曲線の勾配を示している。この係数が大きい値であるほど締固めが効率的に行われていることを表している。締固め性試験における締固め効率 C_e を表 4.4.4 におよび図 4.4.4 に示す。単位水量が増加すると締固め効率 C_e は増大することがわかる。

表 4.4.4 各シリーズにおける締固め効率 C_e

	ARシリーズ			AGシリーズ				Exシリーズ
	AR0.30- 100-3.9	AR0.35- 100-3.9	AR0.40- 100-3.9	AG0.35- 35-1.6	AG0.35- 35-1.8	AG0.35- 50-2.1	AG0.35- 50-2.3	Ex0.35- 0-1.6
C_e	0.1856	0.5208	1.0776	0.3566	1.0295	1.2382	1.8795	0.4099

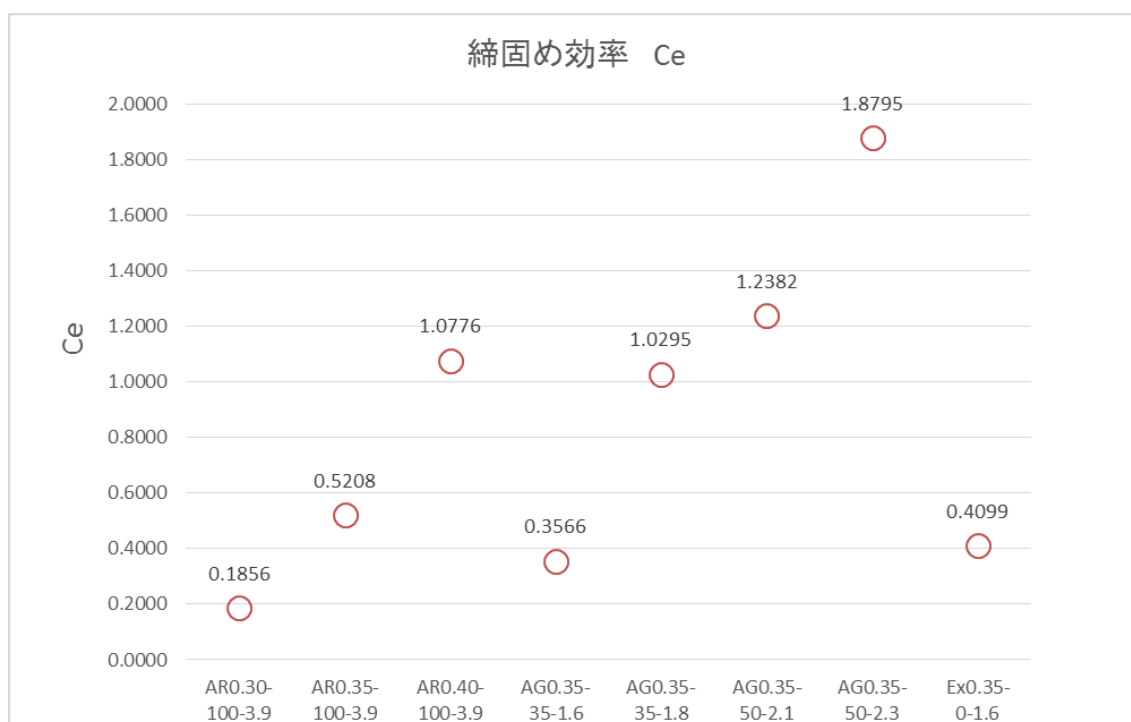


図 4.4.4 各シリーズにおける締固め効率 C_e

4.4.3. 初期充填率 C_i

C_i は締固め前の締固め性、すなわち試料投入直後充填性を示す指標である。表 4.4.5 および図 4.4.5、締固め性試験での初期充填率 C_i をまとめた。AR シリーズにおいて、 w/c の上昇により、初期充填率 C_i が増加している傾向が見られる。AG シリーズにおいて、 K_m の増大にしたがって、初期充填率 C_i が増加している傾向がみられる。初期充填率 C_i の高い配合が、より低い締固めエネルギー E96 を示している。しかし、初期充填率 C_i は、ホップ付きの型枠に試料を投入する方法は統一化されているものの、突き棒による締固めや試料投入時の材料分離などの過程において、人的誤差の影響が小さいとはいえないため、この係数による締固め性の評価は難しいと考えられる。

表 4.4.5 各シリーズにおける初期充填率 C_i

	ARシリーズ			AGシリーズ				Exシリーズ
	AR0.30-100-3.9	AR0.35-100-3.9	AR0.40-100-3.9	AG0.35-35-1.6	AG0.35-35-1.8	AG0.35-50-2.1	AG0.35-50-2.3	Ex0.35-0-1.6
$C_i(\%)$	73.70	74.61	77.63	73.99	79.96	74.72	80.67	79.54

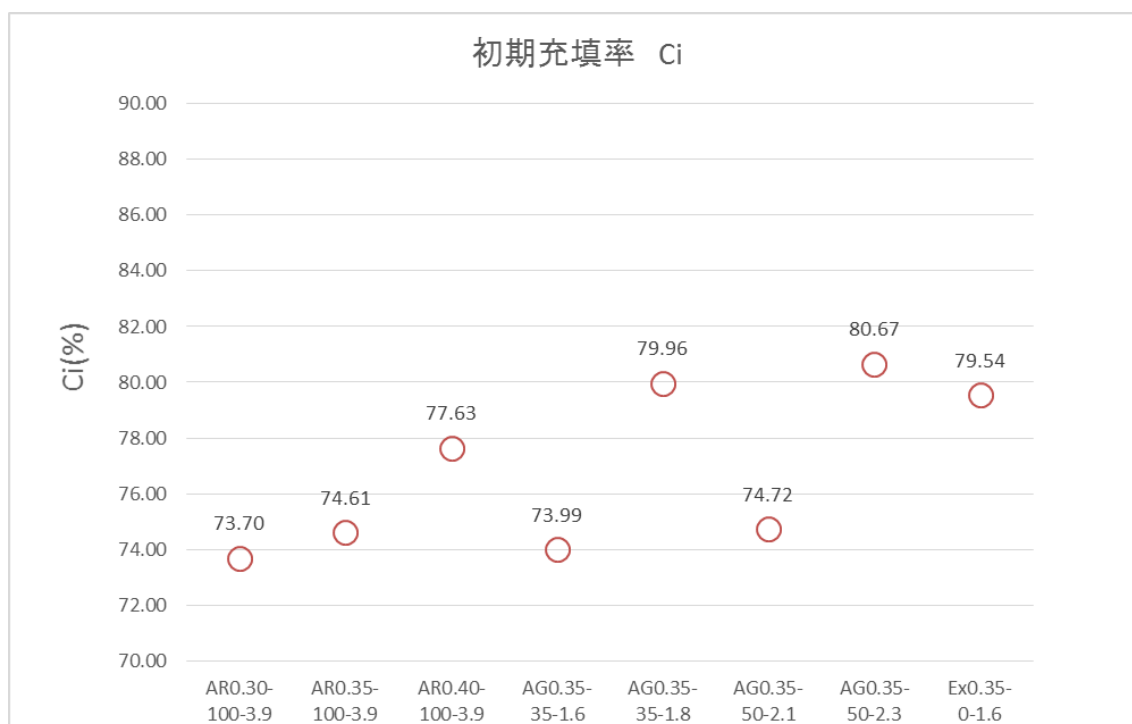


図 4.4.5 各シリーズにおける初期充填率 C_i

4.4.4. 達成可能充填率 C_f

式(4.2.1)の締固め性関数において、締固めエネルギー無限大としたときに達成可能と推定される充填率を、達成可能充填率 C_f (%)としている。表 4.4.6 および図 4.4.6、締固め性試験における達成可能充填率 C_f をまとめた。既往の研究¹⁾より、単位水量 110kg/m^3 以上、 K_m および K_p が 1 以上であるような、ある程度の水量でペーストおよびモルタルが確保された配合においては、達成可能充填率 C_f は 98%以上に達成すると考察されている。しかし、本実験の 8 配合の中で、AR シリーズ全 3 配合および AG シリーズの 2 配合の平均達成可能充填率 C_f が 98%を下回っている。このことから、二つの考察が得られる。

一つ目に、実積率の低い再生粗骨材（実積率 57.4%）を 100%使用する AR シリーズでは、粗骨材粒子間の空隙体積が大きくなるため、達成可能充填率 C_f が低くなると考えられるが、水セメント比の増加により、用水量が増え、モルタル体積一定のもとで、モルタル相の流動性が向上し、より高い達成可能充填率 C_f が得られる。

二つ目に、混合粗骨材を使用する AG シリーズでは、再生粗骨材混合率が低い場合（混合率 35%）において、粗骨材粒子間の空隙体積が少ないが、モルタル体積が不足する場合（ $K_m 1.6$ ）は、高い達成可能充填率 C_f が得られない。一

方、再生粗骨材混合率 50%の場合において、粗骨材粒子間の空隙体積が大きくなっても、十分なモルタル体積が確保できる（Km2.1）場合は、高い達成可能充填率 Cf が得られる。

表 4.4.6 各シリーズにおける達成可能充填率 Cf

	ARシリーズ			AGシリーズ				Exシリーズ
	AR0.30- 100-3.9	AR0.35- 100-3.9	AR0.40- 100-3.9	AG0.35- 35-1.6	AG0.35- 35-1.8	AG0.35- 50-2.1	AG0.35- 50-2.3	Ex0.35- 0-1.6
Cf(%)	86.36	95.36	96.07	94.28	100.15	97.82	99.79	98.09

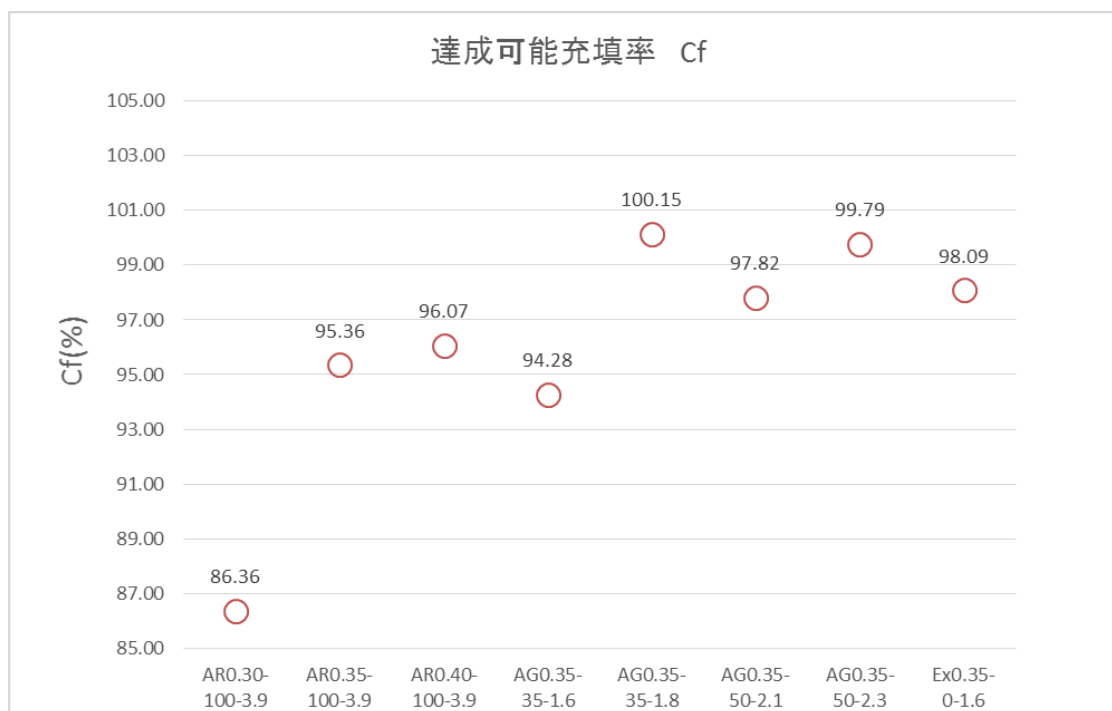


図 4.4.6 各シリーズにおける達成可能充填率 Cf

4.5. 締固め性試験のまとめ

4.5.1. AR シリーズについて

AR シリーズ全粒度再生骨材を用いた RCCP において、w/c が 0.35 程度以上であれば、前章で提案した配合設計方法で良好な締固め性が確保できる。

4.5.2. AG シリーズについて

AG シリーズ混合骨材を用いた RCCP において、本研究で提案した配合設計方法で、再生骨材コンクリート含有率 y_1 を変化させても、締固め性試験の結果に基づいて K_m を調整することで、締固め性を改善できる。また、表 4.5.1 に再生粗骨材のみ含有する RCCP の体積比 y_1 と締固め可能な最小 K_m 値の関係をまとめた。

表 4.5.1 再生骨材コンクリートの体積比 y_1 と最小 K_m 値の関係

再生超硬練り コンクリートの体積比 y_1	0%	35%	50%	100%
K_m 値	1.6	1.6→1.8	2.1	3.9

あらゆる再生超硬練りコンクリートの体積比 y_1 に対する締固めできる最小 K_m 値を推測するため、前節の締固め性試験結果により、上記の 4 点に基づいて近似曲線図を作製した。結果は図 4.5.1 にまとめた。

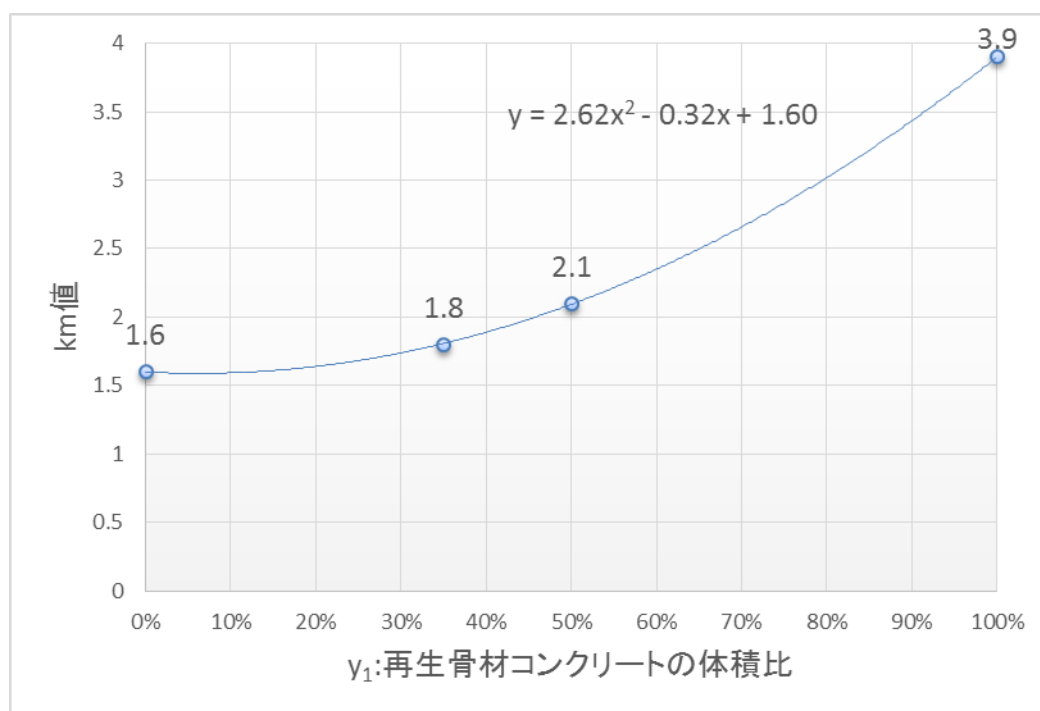


図 4.5.1 再生骨材コンクリートの体積比 y_1 と締固め可能な最小 K_m 値の関係

参考文献

- 1) 土木学会：JSCE -F 508-2007 超硬練りコンクリートの締固め性試験方法、コンクリート標準示方書規準編、2010.11
- 2) 國府勝郎、上野敦：締固め仕事量の評価に基づく超硬練りコンクリートの配合設計、土木学会論文集、No.532、V-30、pp.109-118、1996.2

第5章 全粒度再生骨材および混合骨材 を用いた超硬練りコンクリート の圧縮強度および乾燥収縮特性

5.1. はじめに

本章は、全粒度再生骨材および混合骨材を用いた超硬練りコンクリートの硬化後の特性について述べたものである。前章で提案した配合設計方法により作製した超硬練りコンクリートの強度、ヤング率および乾燥収縮ひずみについて検討を行い、実用上の問題がないことを検討するため、これまで述べてきた各シリーズの超硬練りコンクリートおよびスランプ 5cm の一般の舗装用コンクリートについて、圧縮強度および乾燥収縮特性を比較した。

圧縮強度測定方法¹⁾は、JIS A 1108 に規定のコンクリートの圧縮強度試験方法に従った。圧縮強度に加え、硬化体のヤング率も測定した。ヤング率測定方法²⁾は、JIS A 1149 に規定するコンクリートの静弾性係数試験方法に従った。乾燥収縮ひずみの測定方法³⁾は、JIS A 1129-2 に規定のコンタクトゲージ法に従った。

圧縮強度および乾燥収縮ひずみ試験を行う 4 シリーズの配合について、AR シリーズは、全粒度再生骨材超硬練りコンクリートであり、 K_m を 3.9、水セメント比を 0.35 として設計した。AG シリーズは、全粒度再生骨材の一部を普通砕石によって置換した超硬練りコンクリートであり、再生超硬練りコンクリートの体積比 y_1 を 35%、50%、水セメント比 35% として、体積比ごとに 2 つの K_m 値を選定し、計 4 水準を設計した。Ex シリーズは、一般骨材のみを用いた超硬練りコンクリートであり、単位水量 120kg/m^3 、 K_m を 1.6、水セメント比を 0.35 とした。N シリーズは、一般骨材を用いた有スランプの舗装用コンクリートであり、単位粗骨材かさ容積（粗骨材の単位量を単位容積質量で除した係数）を 0.73、水セメント比を 0.50、単位水量を 160kg/m^3 として設計した。

5.2. 試験方法および配合

5.2.1. 試験手順

(1) 使用器具

コンタクトゲージゲージ（ダイヤルゲージの目量 0.001mm ）、ゲージプラグ、データロガー、はかり、ハンドスコップ、定規、突き棒など

(2) 練混ぜ手順

● 超硬練りコンクリート

200ミキサ内へセメント、細骨材および粗骨材を投入→低速で空練り 60s→練混ぜながら水を 30s で注ぐ→低速で練混ぜ 60s→ミキサを停止させて材料をかき落とす→低速で 60s 練混ぜ→排出

● 一般舗装用コンクリート

一般舗装用コンクリートの練混ぜにおいては、容量 50ℓの強制式パン型ミキサを用い、1 バッチの練り量を 35ℓとした。

ミキサ内へセメントと粗骨材、細骨材を投入→空練り 60s→練混ぜながら水を 30s で注ぐ→練混ぜ 60s→ミキサを停止させて材料をかき落とす→練混ぜ 60s→排出

(3) 供試体作製

型枠にコンクリートを投入し、供試体を作製する。超硬練りコンクリートと一般コンクリートで方法が異なる。

● 超硬練りコンクリート

① 試料の採取および計量

φ 10×20cm の円柱型枠に充填率 100%となる容積に、各配合におけるコンクリート密度を乗じて求められた質量分のコンクリートを計量する。このとき、材料の分離により粒径に偏りが生じないように注意しながら試料を採取する必要がある。

② 試料の投入

量りとした試料を、粒径に偏りが生じないように注意しながらハンスコップで型枠へ投入する。このとき、できるだけ試料が充填されるように突き棒で適宜突く。

③ 振動台上での締固め

振動台式振動機の上に型枠を乗せ、上面を定規で均しながら試料の締固めを行う。

● 一般舗装用コンクリート

JIS A 1132「コンクリートの強度試験用供試体の作り方」に従う。

5.2.2. 使用材料

セメントは、密度 3.16g/cm^3 の普通ポルトランドセメントを使用した。セメントの物性は、表 5.2.1 に示すとおりである。再生細骨材、再生粗骨材および砕砂、碎石の物性は、表 5.2.2 に示すとおりである。

表 5.2.1 セメントの物性

密度 (g/cm^3)	比表面積 (cm^2/g)	凝結			安定性 (パット法)	圧縮強さ(N/mm^2)		
		水量 (%)	始発(h- min)	終結(h- min)		3day	7day	28day
3.16	3310	27.4	2-21	3-25	良	30.7	45.8	62.2

表 5.2.2 骨材の物性

種類	記号	岩種 など	産地	表乾 密度 (g/cm^3)	絶乾 密度 (g/cm^3)	吸水率 (%)	単位容積 重量 (kg/l)	実積率 (%)	F.M.
再生細骨材	RS	-	-	2.46	2.27	8.34	1.33	58.5	3.43
再生粗骨材	RG	-	-	2.57	2.43	5.63	1.39	57.4	6.92
砕砂	S	砂岩	相模原	2.63	2.59	1.40	1.71	65.9	2.92
碎石	G	砂岩	相模原	2.64	2.61	1.05	1.55	59.5	6.41

混和剤は、N シリーズの有スランプコンクリートのみに使用し、超硬練りコンクリートには使用していない。リグニンスルホン酸ポリオール複合体を主成分とする AE 減水剤を用いた。使用量はセメントの質量に対して 0.35% の一定とした。アルキルエーテル系陰イオン界面活性剤の AE 助剤を使用し、目標空気量になるように調整を行った。

5.2.3. 示方配合

各シリーズコンクリートの配合は、表 5.2.3～表 5.2.6 に示すとおりである。

表 5.2.3 AR シリーズ超硬練りコンクリート示方配合

記号	km	kp	s/a	W/C	単位量(kg/m ³)					
					RS	RG	f	A合計	W	C
AR0.30-100-3.9	3.90	1.45	58.8%	30.0%	919	688	49	1655	149	449
AR0.35-100-3.9	3.90	1.45	58.8%	35.0%	919	688	49	1655	161	411
AR0.40-100-3.9	3.90	1.45	58.8%	40.0%	919	688	49	1655	171	379

表 5.2.4 AG シリーズ超硬練りコンクリート示方配合

記号	km	kp	s/a	W/C	単位量(kg/m ³)							
					RS	RG	f	A合計	G	y ₁	W	C
AG0.35-35-1.6	1.6	1.93	33.7%	35.0%	557	417	30	1003	818	35%	142	375
AG0.35-35-1.8	1.8	2.38	33.7%	35.0%	524	392	28	943	768	35%	165	443
AG0.35-50-2.1	2.1	1.61	42.0%	35.0%	686	514	36	1237	541	50%	145	379
AG0.35-50-2.3	2.3	1.93	42.0%	35.0%	651	487	35	1172	512	50%	165	438

表 5.2.5 Ex シリーズ超硬練りコンクリート示方配合

記号	km	kp	s/a	W/C	用量(kg/m ³)			
					S	G	W	C
Ex0.35-0-1.6	1.60	1.50	38.2%	35.0%	775	1259	120	343

表 5.2.6 N シリーズ舗装用コンクリート示方配合

記号	sl (cm)	w/c (%)	air (%)	単位粗骨材 かさ容積	s/a (%)	用量(kg/m ³)				減水剤 (%)	AE 助剤
						W	C	S	G		
N	5	50%	4.5%	0.73	37%	160	320	672	1143	0.35	4.0A

5.3. 圧縮強度測定試験

5.3.1. 試験体作製方法

圧縮強度試験では、φ 10×20cm の円柱型枠を、1 配合につき 3 本作製した。締固め、成形の後、温度 20℃の室内で湿潤状態に保ち、24 時間後に脱型を行った。脱型後は温度 20℃の水中に浸漬し、材齢 27 日まで養生を行った。

5.3.2. 圧縮強度測定方法

圧縮強度測定方法は、「JIS A 1108 コンクリートの圧縮強度試験方法」に準拠して行った。養生が終わった直後の状態で試験を行った。

5.3.3. 試験結果の整理

圧縮強度は、次の式によって算出し、四捨五入を行って有効数字 3 けたに丸める。

$$f_c = \frac{P}{\pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2}$$

ここに、

f_c : 圧縮強度 (N/mm²)

P : 最大荷重 (N)

d : 供試体の直径 (mm)

5.3.4. 圧縮強度試験結果まとめ

各シリーズの圧縮強度試験結果は、図 5.3.1 および表 5.3.1 に示すとおりである。

図 5.3.1 に示すように、Ex シリーズの普通骨材を用いた超硬練りコンクリートの圧縮強度は、N シリーズの舗装用一般コンクリートと比較してほぼ倍の値となった。AR シリーズの全粒度再生骨材を用いた RCCP および AG シリーズの混合骨材を用いた RCCP の圧縮強度は、普通骨材のみで作製した Ex シリーズと比較して低下する傾向が顕著であるが、粗骨材の置換により、AG シリーズの圧縮強度では AR シリーズと比較に粗骨材の混合使用による強度の改善が示されている。

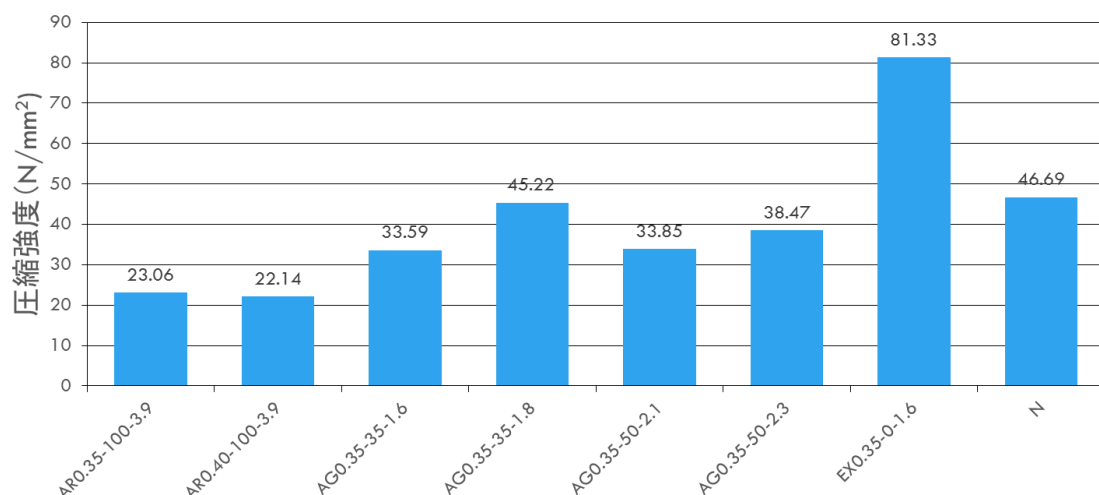


図 5.3.1 圧縮強度試験結果

表 5.3.1 圧縮強度試験結果

記号	AR0.35- 100-3.9	AR0.40- 100-3.9	AG0.35- 35-1.6	AG0.35- 35-1.8	AG0.35- 50-2.1	AG0.35- 50-2.3	EX0.35-0- 1.6	N0.35
f_{ck} (N/mm ²)	23.06	22.14	33.59	45.22	33.85	38.47	84.10	46.69

5.4. ヤング係数測定試験

5.4.1. 試験体の準備

前記の圧縮強度試験と同一な試験体を使用する。

5.4.2. 測定方法

従来、供試体の表面にひずみゲージを貼り付けて縦ひずみを測定するが、本研究の試験対象とした超硬練りコンクリートの表面が凸凹なので、ひずみゲージが適用ではない。そのため、本研究はコンプレッソメーターを利用して縦ひずみを測定する。

5.4.3. 試験結果の整理

各供試体ごとに応力—ひずみ曲線を作成し、各供試体の静弾性係数は、次の式によって算出し、四捨五入を行って有効数字 3 けたに丸める。

$$E_c = \frac{S_1 - S_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} \times 10^{-3}$$

ここに、 E_c : 各供試体の静弾性係数 (kN/mm²)

S_1 : 最大荷重の 1/3 に相当する応力 (N/mm²)

S_2 : 供試体の縦ひずみ 50×10^{-6} のときの応力 (N/mm²)

ε_1 : 応力によって生じる供試体の縦ひずみ

ε_2 : 50×10^{-6}

5.4.4. ヤング係数測定試験の結果まとめ

圧縮強度に基づくコンクリートのヤング係数 E_c は、表 5.4.1 に示した値とした。

表 5.4.1 一般コンクリートでの弾性係数の設定方法

f_{ck} (N/mm ²)	18	24	30	40	50	70	80	90
E_c (kN/mm ²)	22	25	28	31	33	37	38	40

各シリーズのコンクリートにおける実測のヤング係数 E_c および表 5.4.1 に基づいて各シリーズの供試体の圧縮強度から算出したヤング係数 E_c' を図 5.4.1 および表 5.4.2 に示す。

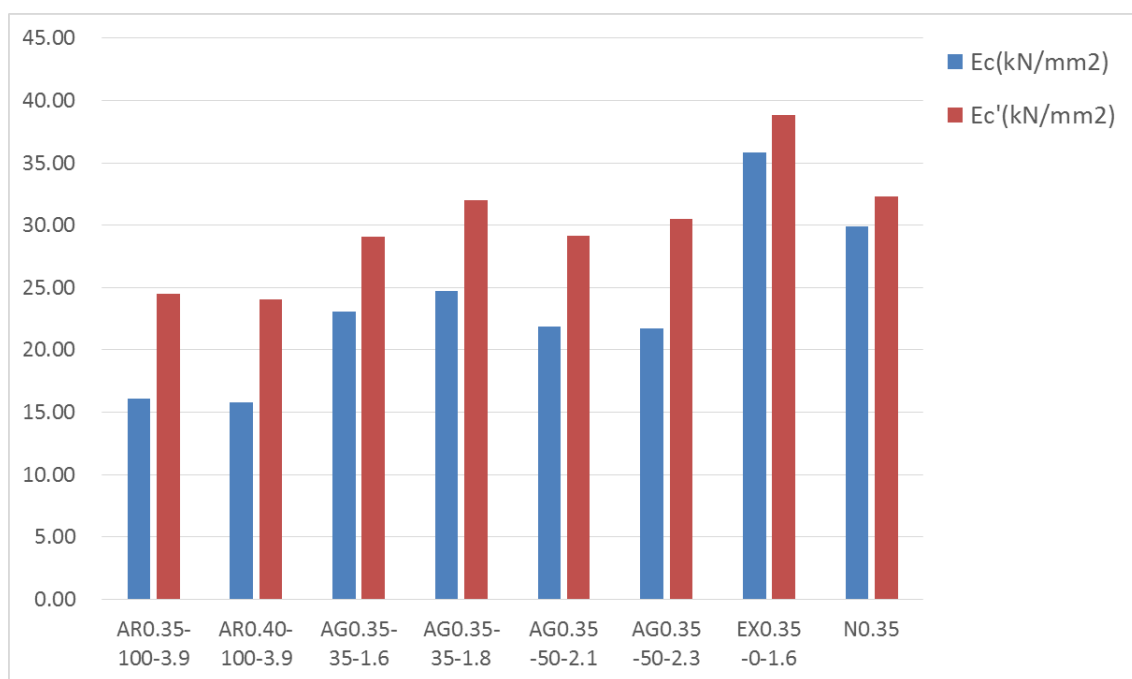


図 5.4.1 各シリーズの実測ヤング係数と計算上のヤング係数

表 5.4.2 各シリーズの実測ヤング係数と計算上のヤング係数

記号	AR0.35-100-3.9	AR0.40-100-3.9	AG0.35-35-1.6	AG0.35-35-1.8	AG0.35-50-2.1	AG0.35-50-2.3	EX0.35-0-1.6	N0.35
f_{ck} (N/mm ²)	23.06	22.14	33.59	45.22	33.85	38.47	84.10	46.69
E_c (kN/mm ²)	16.08	15.77	23.11	24.76	21.91	21.76	35.81	29.90
E_c' (kN/mm ²)	24.53	24.07	29.08	32.04	29.16	30.54	38.82	32.34
E_c/E_c'	66%	66%	79%	77%	75%	71%	92%	92%

図 5.4.1 に示したように、普通骨材を用いたコンクリートの N シリーズおよび Ex シリーズ 2 シリーズ以外に、ほかの再生骨材を用いたシリーズにおける実測ヤング係数と計算上のヤング係数の比が、全体に低いことがわかる。AR シリーズの全粒度再生骨材を用いた RCCP の実測ヤング係数は、実測ヤング係数と計算上のヤング係数の比が 66% となっている。全粒度再生骨材の一部を普通粗骨材に置換することにより、AG シリーズの混合骨材を用いた RCCP のヤング係数は向上し、4 配合の実測ヤング係数と計算上のヤング係数の比が全て 70%

を超える。また、AG シリーズの 4 配合において、再生粗骨材のみを含有する RCCP 体積比 y_1 が高いほど、実測ヤング係数と理論ヤング係数の比が低下することを察知した。体積比 y_1 が 35% の場合、 E_c/E_c' の平均値が 78% に対し、体積比 y_1 が 50% の場合、 E_c/E_c' の平均値が 73% までに低減した。

5.5. 乾燥収縮ひずみ測定試験

5.5.1. 試験体作製

乾燥収縮試験では、 $\phi 10 \times 20 \text{cm}$ の円柱型枠を、1 配合につき 3 本作製した。締固め、成形の後、温度 20°C の室内で湿潤状態に保ち、24 時間後に脱型を行った。脱型後は温度 20°C の水中に浸漬し、材齢 7 日まで養生を行った。水中養生 7 日後は、基長の設定および基準質量の測定を行い、温度 20°C 、相対湿度 60% の恒温恒湿室に保管した。供試体同士は 25mm 以上の間隔をあけ、かつ供試体下面からの乾燥を妨げないよう底を上げて気中に開放し、配置した。

試験体の基長の設定は、水中養生 7 日後に行い、200mm とした。ゲージプラグは、両側の中心線上で、それぞれの標点間の距離がほぼ基長と等しくなるように取付けた。ゲージプラグの貼付けは、大きな空隙の無い供試体表面をサンドペーパーで目粗して、接着剤を用いて接着した。

5.5.2. 乾燥収縮ひずみ測定方法

乾燥収縮ひずみ測定方法は、「JIS A 1129-2 モルタル及びコンクリートの長さ変化測定方法」の「コンタクトゲージ方法」に準拠して行った。コンタクトゲージ法のひずみの精度は、ダイヤルゲージの目量が 0.001mm であり、基長を 200mm としているため、 $0.001/200=5 \times 10^{-6}$ である。

標準尺を水平な台上に置き、標準尺のゲージプラグにコンタクトゲージを軽く押し当て、ダイヤルゲージの目盛りを読む。これを X_{i1} とする。

次に、試験体の長さ測定を行う。測定は試験体の両側面で行うため、試験体をゲージプラグが取り付けである方を上面にして水平な台上に置き、試験体のゲージプラグにコンタクトゲージを軽く押し当て、ダイヤルゲージの目盛りを読む。また、反対の側面についても、同様の操作を行う。この両側面 2 回の測定値の平均を X_{i2} とする。

恒温恒湿室にて乾燥させた期間が、4、7、14、21、28、42、56、70、84、98 日のときに、長さ変化の測定を行った。

5.5.3. 乾燥収縮ひずみ試験結果の整理

乾燥収縮ひずみは、下記の式によって算出した。また、有効数字を 3 桁としている。

$$\varepsilon = \frac{(X_{01} - X_{02}) - (X_{i1} - X_{i2})}{L_0}$$

ここに、

ε : 乾燥収縮ひずみ、 L_0 : 基長(mm)

X_{01} 、 X_{02} : それぞれ基準とした材齢における、標準尺
および試験体の測定値

X_{i1} 、 X_{i2} : それぞれ材齢時点 i における、標準尺
および試験体の測定値

5.5.4. 各シリーズの乾燥収縮ひずみ結果まとめ

各シリーズの乾燥収縮ひずみの経時変化は、図 5.5.1 および表 5.5.1 に示すとおりである。

図 5.5.1 に示すとおり、Ex シリーズの普通骨材を用いた超硬練りコンクリートの乾燥収縮ひずみは、N シリーズの舗装用一般コンクリートと比較して顕著に小さいことがわかる。AR シリーズの全粒度再生骨材を用いた RCCP および AG シリーズの混合骨材を用いた RCCP の乾燥収縮ひずみは、N シリーズと比較して大きくなることがわかった。その中で、AR シリーズの乾燥収縮ひずみが顕著に大きくなり、粗骨材を置換した AG シリーズの乾燥収縮ひずみが AR シリーズと比較して顕著に抑制されることがわかる。

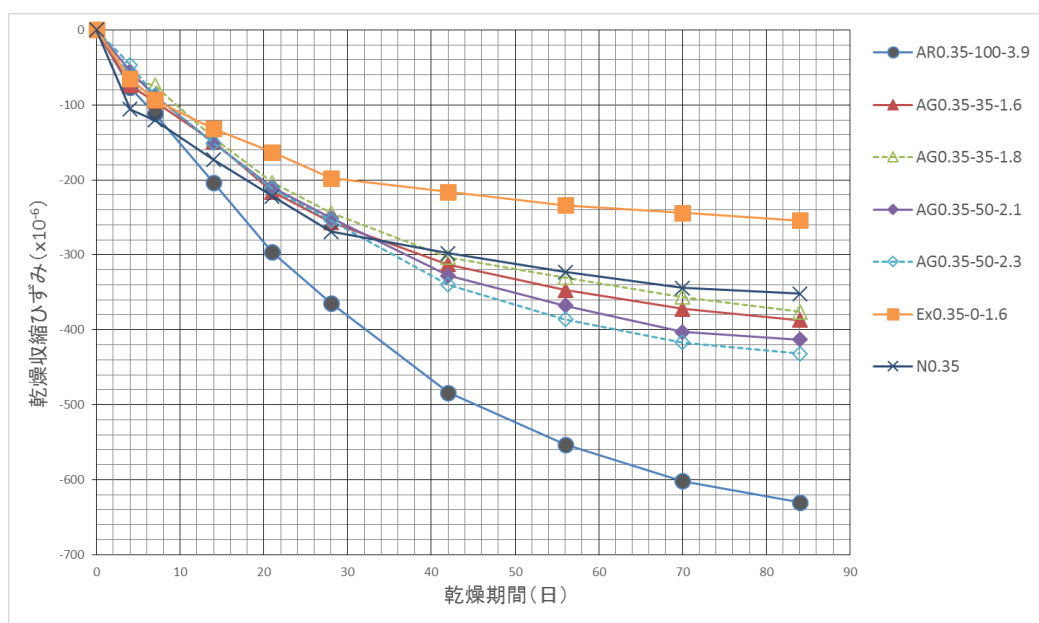


図 5.5.1 乾燥収縮ひずみの経時変化

表 5.5.1 乾燥収縮ひずみの経時変化

乾燥期間(日)	乾燥収縮ひずみ($\times 10^{-6}$)						
	AR0.35-100-3.9	AG0.35-35-1.6	AG0.35-35-1.8	AG0.35-50-2.1	AG0.35-50-2.3	Ex0.35-0-1.6	N0.35
0	0	0	0	0	0	0	0
4	-77	-74	-66	-55	-47	-65	-106
7	-112	-95	-74	-88	-88	-93	-120
14	-204	-149	-144	-151	-151	-132	-173
21	-297	-216	-203	-210	-212	-163	-222
28	-364	-257	-244	-251	-254	-198	-269
42	-484	-313	-303	-328	-340	-216	-298
56	-553	-347	-330	-368	-386	-234	-323
70	-602	-372	-356	-403	-417	-244	-344
84	-630	-387	-376	-413	-432	-254	-352

5.6. 質量変化率

各試験体の質量変化率の経時変化は、図 5.6.1 および表 5.6.1 示すとおりである。質量変化率は、概ね乾燥収縮ひずみと対応したものとなった。

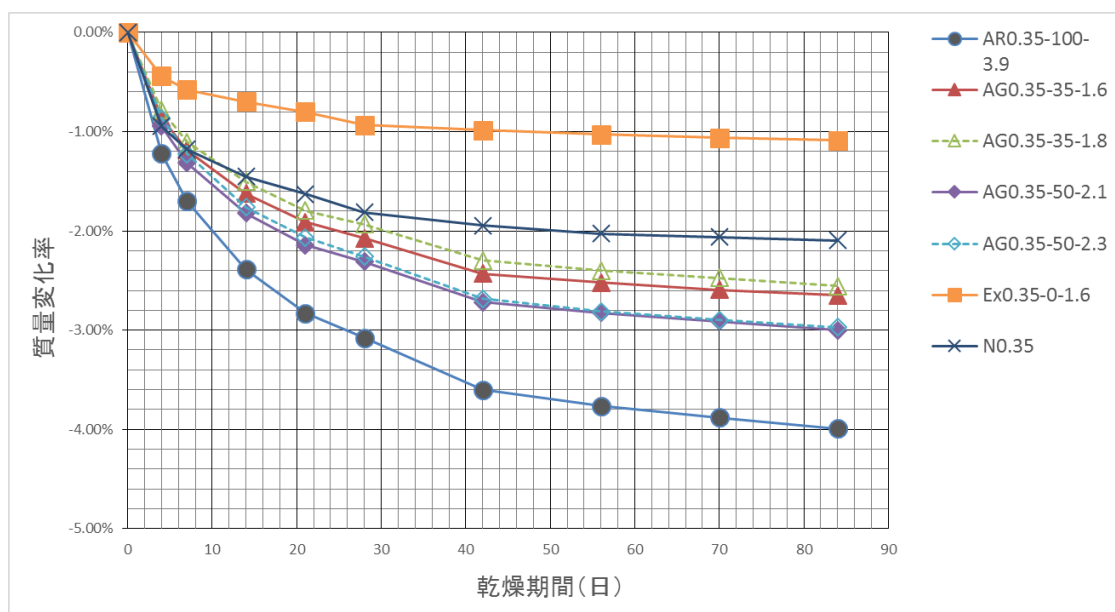


図 5.6.1 質量変化率の経時変化

表 5.6.1 質量変化率の経時変化

乾燥期間(日)	AR0.35-100-3.9		AG0.35-35-1.6		AG0.35-35-1.8		AG0.35-50-2.1	
	質量(g)	質量減少率	質量(g)	質量減少率	質量(g)	質量減少率	質量(g)	質量減少率
0	3490	0	3677	0	3654	0	3621	0
4	3447	-1.22%	3645	-0.86%	3626	-0.78%	3586	-0.95%
7	3430	-1.70%	3633	-1.19%	3614	-1.10%	3573	-1.32%
14	3406	-2.39%	3617	-1.62%	3599	-1.51%	3555	-1.82%
21	3391	-2.83%	3606	-1.91%	3589	-1.80%	3543	-2.15%
28	3382	-3.08%	3600	-2.08%	3584	-1.93%	3537	-2.31%
42	3364	-3.60%	3587	-2.43%	3570	-2.30%	3522	-2.72%
56	3358	-3.76%	3584	-2.52%	3567	-2.40%	3518	-2.83%
70	3354	-3.88%	3581	-2.59%	3564	-2.47%	3515	-2.91%
84	3350	-3.99%	3579	-2.65%	3561	-2.55%	3512	-3.00%
乾燥期間(日)	AG0.35-50-2.3		Ex0.35-0-1.6		N0.35			
	質量(g)	質量減少率	質量(g)	質量減少率	質量(g)	質量減少率		
0	3613	0	3921	0	3767	0		
4	3582	-0.87%	3904	-0.44%	3731	-0.95%		
7	3569	-1.23%	3899	-0.58%	3723	-1.18%		
14	3549	-1.76%	3894	-0.70%	3712	-1.45%		
21	3538	-2.07%	3890	-0.80%	3706	-1.63%		
28	3531	-2.26%	3885	-0.94%	3699	-1.81%		
42	3516	-2.68%	3883	-0.99%	3694	-1.95%		
56	3511	-2.81%	3881	-1.03%	3691	-2.03%		
70	3508	-2.90%	3880	-1.06%	3689	-2.06%		
84	3506	-2.97%	3879	-1.09%	3688	-2.10%		

各シリーズの質量変化率について、図 5.6.1 に示すように、各シリーズの乾燥収縮ひずみと同様な変化傾向が確認できた。Ex シリーズの普通骨材を用いた超硬練りコンクリートの質量変化率は一番少ないことに対し、AR シリーズの全粒度再生骨材を用いた超硬練りコンクリートの 84 日目の質量変化率が一番大きく、-4%の値を確認した。粒子置換により、AG シリーズの混合骨材を用いた超硬練りコンクリートの質量変化率は AR シリーズと比較して質量変化率を 1%以上低減した。また、AG シリーズについて、同一の体積比 y_1 につき、Km 値によらず、質量変化率が大きな差が見えない。一方、体積比 y_1 の増加により、質量変化率も大きくなり、 y_1 が 35%の場合は質量変化率が-2.6%の値に対し、 y_1 が 35%の場合は-3.0%の値を確認できた。

参考文献

- 1) 土木学会：JIS A 1108：2010 コンクリートの圧縮強度試験方法、コンクリート標準示方書規準編、2010.11
- 2) 土木学会：JIS A 1149：2010 コンクリートの静弾性係数試験方法、コンクリート標準示方書規準編、2010.11
- 3) 土木学会：JIS A 1129-2：2010 モルタル及びコンクリートの長さ変化測定方法—第2部：コンタクトゲージ方法、コンクリート標準示方書規準編、2010.11

第6章 結論

本研究では、可能な限り簡易な材料準備により、廃棄物が最小となる形態の再生骨材を用いて RCCP を構築するための配合設計方法に関して基礎的な検討を行った。また、締固め性の向上および硬化後の品質改善のため、全粒度再生骨材の一部を普通粗骨材または普通細骨材で置換するときの配合設計方法を検討した。

第 3 章

(1) 全粒度再生骨材を用いた超硬練りコンクリートの配合設計方法

全粒度再生骨材を用いた超硬練りコンクリートを利用し、迅速に道路網を確保することである。廃棄コンクリートを破碎し、その産物の再生骨材を全量で緊急舗装 RCCP 用コンクリートに利用することが望まれる。本研究では、全粒度再生骨材を用いた超硬練りコンクリートの配合設計方法を提案した。

(2) 従来手法による混合粗骨材を用いた超硬練りコンクリートの配合上の課題の克服

全粒度再生骨材超硬練りコンクリートにおいて、力学的な性能が低下することが予想されるので、一部の全粒度再生骨材を普通粗骨材に置換することにより、混合骨材として使用し、コンクリートの性能を向上させることとした。従来の混合粗骨材超硬練りコンクリートの配合設計には、混合骨材の単位体積質量 $T_{g\ mixture}$ を把握するため、実測実験を行う必要があり、非常に手間がかかる。迅速に被災地を支援するために、本研究は単位体積質量 $T_{g\ mixture}$ の実測実験を省けるよう、各骨材を含むコンクリートを別々に扱うという仮定を提案し、新たな簡易配合設計方法を検討した。

第 4 章

締固め性試験の結果に基づいて配合調整への適用の可能性

前章で提案した全粒度再生骨材および全粒度再生骨材の一部を普通碎石によって置換した混合骨材を用いた超硬練りコンクリートの配合設計理論について、締固め性試験の結果に基づいて配合調整の可能性について検討したものである。

結果としては、AR シリーズ全粒度再生骨材を用いた RCCP において、w/c が 0.35 程度以上であれば、本研究で提案した配合設計方法で良好な締固め性が確保できることを示した。AG シリーズ混合骨材を用いた RCCP において、本研究で提案した配合設計方法で、再生骨材コンクリート含有率 y_1 を変化させても、締固め性試験の結果に基づいて K_m を調整することで、締固め性を改善できることを示した。

第 5 章

全粒度再生骨材および混合骨材を用いた超硬練りコンクリートの硬化後の特性

本研究で提案した配合設計方法により作製した超硬練りコンクリートの強度、ヤング率および乾燥収縮ひずみについて検討を行い、実用上の問題がないことを検討するため、各シリーズの超硬練りコンクリートおよびスランプ 5cm の一般舗装用コンクリートについて、圧縮強度、ヤング係数および乾燥収縮特性の比較検討を行った。

(1) 圧縮強度について

全粒度再生骨材を用いた場合、N シリーズや EX シリーズと比較して、顕著に強度が低下しているが。この場合であっても、 20N/mm^2 程度の強度を示している。

全粒度再生骨材を普通粗骨材で置換することで、 30N/mm^2 以上の強度を示している。すなわち、緊急舗装用の RCCP の場合、全粒度再生骨材のみ、もしくはこれを一部普通粗骨材で置換したものを RCCP として使用することが可能である。

(2) 乾燥収縮ひずみについて

全粒度再生骨材を用いた場合、顕著に乾燥収縮ひずみが大きくなっている。粒子置換により混合粗骨材を用いた RCCP の場合は、乾燥収縮ひずみが顕著に抑制され、十分に実用可能な特性となる。

謝辞

本論文を作成するにあたりまして、多大なご助言とご指導を賜り、学生の目線でご指導下さいました、首都大学東京大学院都市環境科学研究科都市基盤環境学域准教授、上野敦先生に深く感謝するとともに、厚く御礼申し上げます。

本研究を進めるにあたり、ご多忙な中、的確なご助言とご指導をして下さいました、本大学院教授、宇治公隆先生に厚く御礼申し上げます。

本論文の審査にあたり、研究の検討方法や問題点について、鋭いご指摘をして下さいました、本大学院准教授、荒井康裕先生に厚く御礼申し上げます。

本論文作成および実験進行にあたって、親身に相談に乗ってくださり、何事にも率先してご協力して下さいました、本大学院助教、大野健太郎先生に厚く御礼申し上げます。

本研究の実験進行において、いつも明るく、率先してご協力して下さいました、青木薫主事に厚く御礼申し上げます。

論文作成について、様々なご参考をさせていただきました、平成 22 年卒、原田駿平先輩に深く感謝致します。

研究内容について、様々なご指摘をいただきました、修士 1 年の飯塚亮太君に厚く御礼申し上げます。

授業や研究において互いに意見を交換し、助け合ってきました村田哲君、常に気を配り真剣に実験に協力してくれました菊池亮君、佐々木優さん、研究生活について様々なご助言をいただきました新津佑樹君、尾原弘樹君、大学入学時より親しくしていただき、研究においても助けて下さいました市川直樹君に、深く感謝致します。

入学時より様々な有益な助言をいただきました、博士 3 年の張軍雷さん、博士 2 年のズンさん、研究方向においてご指摘をいただきました、博士 2 年の王博さん、王亮さんに深く感謝致します。

実験や学生生活において、忙しい中でも協力して下さいました、修士 1 年の間々田憲哉君、長岡貴紀君、古川凌輔君、小池悠介君、佐藤凜奈さんに深く感謝致します。

本年度の研究全般において、お互いに助け合いながら、共に困難を乗り越えてきた、学部 4 年の永山剛君、坂東真輝君、内田早紀さん、児玉文彦君、小倉達也君に深く感謝致します。

最後に、このような研究に専念する機会を与えてくれ、大学生活を全面的に支えて下さいました、私の両親に心から感謝し、本論文の謝辞とさせていただきます。

平成 27 年 2 月