

転圧コンクリート舗装の配合設計法に関する 実験的研究

AN EXPERIMENTAL STUDY ON MIX DESIGN OF ROLLER COMPACTED CONCRETE PAVEMENT

豊福俊泰*・吉岡博幸**

By Toshiyasu TOYOFUKU and Hiroyuki YOSHIOKA

The roller compacted concrete is the new pavement construction method which can improve the simple and economical technique for the execution work of concrete pavement.

The objectives of this study are to analyze factors which are considered to affect the roller compacted concrete quality and to establish the new design method. In this study the JIS A 1210 and Marshall test instruments are used as the test methods of compaction. It became evident through the compaction tests that compaction mechanism and mix proportion factors are essential in concrete quality control and also the relationship of flexural strength and void ratio is derived for the newly proposed mix design method.

Keywords: roller compacted concrete pavement, mix design, mix proportion, compaction, flexural strength, void ratio

1. 序 論

転圧コンクリート舗装 (Roller Compacted Concrete Pavement, 以下「RCCP」という) は、ゼロスランブの超硬練りコンクリートをアスファルトフィニッシャーで敷き均し、タイヤローラや振動ローラで転圧する新しい舗装技術である。RCCPは、従来のコンクリート舗装の施工性や経済性の改善を期待できることから、その実用化が望まれる。

海外ではすでに数100万 m^2 を超える実績があり、わが国ではここ2、3年急速に注目を集めるようになり、その実用化に向けて各機関で研究開発が進められている。この背景には、従来のコンクリート舗装がアスファルト舗装と比較して施工性に難点があり、それゆえインシヤルコストが若干高いが、耐久性や耐流動性において優位なことなどがある。セメントコンクリート舗装要綱 (日本道路協会)¹⁾では、RCCPを特殊舗装として位置付け、単粒度粗骨材とセメントモルタルを混合したマガ

ダム型と、通常の舗装用コンクリートの単位水量を相当少なくした通常型に分類している。また、これらの用途としてはホワイトベースを一般的としている。これに対し、現在研究開発が進められているRCCPは通常型であり、主に表層に用いることを前提としている。このように舗装要綱にはRCCPに関する記述はあるものの、使用材料、配合設計法、構造設計法、施工方法などがいまだ確立されていないのが現状である。

RCCPの配合設計の考え方やコンシステンシー評価法としては、大別すると次の各方法が提案されている。第一の方法²⁾は、道路の路床、路盤などの試験に用いる「突固めによる土の締固め試験方法」(JIS A 1210の第2法)をコンシステンシー評価法とするもので、その最大乾燥密度を与えるところで骨材粒度や含水比(単位水量)を決定し、曲げ強度と水セメント比の関係より配合を決定するものである。第二の方法³⁾は、配合決定の手順は第一の方法と基本的に相違するところはないが、コンシステンシー評価法にアルファルト混合物の配合試験で用いられるマーシャル試験装置を利用し、最大乾燥密度ではなく締固め率(空隙率)で骨材粒度や単位水量を評価するものである。第三の方法⁴⁾は、RCD工法(Roller Compacted Dam-concrete Method)の配合試験で用いられるVC試験機^{5),6)}を利用してコンシステン

* 正会員 工博 日本道路公団大阪管理局技術部調査役
(前・同試験所コンクリート試験室室長)
(〒565 吹田市清水15-1)

** 正会員 日本道路公団福岡建設局大分工事事務所構造工事区工事長 (前・同試験所コンクリート試験室主任)
(〒870 大分市大道町4-1-7)

シーを評価し、細骨材空隙中のペースト充填率 (K_p) や粗骨材空隙中のモルタル充填率 (K_m) に注目して配合を決定しようとするものである。これらのほか、平面バイブレータを利用したコンシステンシー評価法⁷⁾などもある。また、海外における配合設計法には、セメントコンクリートの考え方やセメント安定処理的な考え方がある⁸⁾。

このように種々の考え方があるが、いずれも締めめやすい(充填性の高い)コンクリートを得ることを配合設計の基本としている。しかし、室内試験で決定した配合で、舗装コンクリートとして十分な強度、耐久性や平坦性、表面のキメなどの表面仕上り状態が良好に得られるとは限らない。わが国では施工経験が乏しく、敷均しや転圧といった施工方法の標準化がまだ行われていないことや、RCCは通常のコンクリートと比較して単位水量が相当少ないため、転圧の程度やその方法等によって硬化コンクリートの品質や表面仕上り状態が影響を受けやすいからである。それゆえ、室内試験で得られた配合で試験施工を実施して、工事用の配合に修正後、本施工に移す例もみられる。しかし、前述の配合設計法では、転圧の程度と強度の関係の把握や配合修正に伴う強度の確認等が困難であり、実用的な配合設計法としては不都合な点が多い。

著者らは、これまでの研究⁹⁾などで、RCCの強度とセメント空隙比^{10)~12)}との間に相関があることを報告したが、この関係を配合設計に取り入れることにより、配合修正や施工上の目標空隙率の設定など品質管理についても強度との関係で明確に説明できるものと考えられる。そこで、本文ではJIS A 1210の第2法(以下、「JIS法」という)とマーシャル試験機を利用した締めめ試験¹³⁾(以下、「マーシャル法」という)で、締めめ機構および各種配合要因が、フレッシュコンクリートの締めめや硬化コンクリートの品質に与える影響を実験的に明らかにし、強度～セメント空隙比の関係をを用いた配合設計法を提案するものである。

2. RCCPの転圧機構とその評価方法

RCCPの転圧は、コンクリートとして十分な強度や耐久性のほか、路面として平坦性や表面のキメなどの表面仕上り状態を良好にするために行われる。すなわち、転圧の目的が「締めめ」と「表面仕上り状態」にあり、両者のほど良いバランスが求められる。このため実際の施工では、2～3種類の転圧機械を組み合わせるものが一般的で、転圧を便宜的に初転圧、二次転圧、仕上げ転圧などと分けてよんでいる。これは、単一の転圧機械では締めめと表面仕上り状態の両者をバランス良く仕上げるのが困難なためで、いきおい複数の転圧機械

が使用される。一方、ダムのRCD工法の場合は単一の転圧機械の例が多いが、RCCPと違い締めめが転圧の主目的で表面仕上り状態はさほど問題としないためである。

土は締めめ固めることにより、一定容積当たりの土粒子数が多くなり土粒子相互の間隙が小さくなることなどから、強度、変形特性、遮水性等の種々の工学的性質が改善されることが知られている。また、締めめ(突固め)エネルギーがこれらの工学的性質の改善に及ぼす影響についても、定量的にかなりのところまで把握されている。一方、締めめがRCCの強度に及ぼす影響については、著者らが強度～セメント空隙比の関係を定量的に確認した⁹⁾。RCCPでは、締めめにより一定容積当たりの固体容積が増大し空隙量が減少し密実なコンクリートとなる。このようにコンクリートが密実化することにより、硬化コンクリートの水密性や気密性ならびに表面粗さやキメなどが改善される。すなわち、締めめやすい配合の選定により締めめ仕事量が少なく品質の良いRCCPが得られるものと考えられる。また、平坦性については、締めめ(転圧)による容積減が厳密には同一ではなく、敷均し時から転圧完了時までの密実化が大きいと平坦性を損なう要素となり得るので、このことから締めめめやすい配合の選定が重要となる。

土質材料の締めめエネルギーとしては、一般に次の3種類に分けることができる¹⁴⁾。

- ① 圧密：静的な圧力を加えて締め固める方法
- ② 衝撃：突固めエネルギーを加えて締め固める方法
- ③ 振動：振動エネルギーを加えて締め固める方法

砂質土や粒状路盤材料のような粘性の少ない土質材料では、振動エネルギーによる締めめが有効なことが知られており、これらの締めめに振動ローラが使用されることが多い。RCCP用のコンクリートは、超硬練りのゼロスランブでありこれらの材料に近いものと考えられ、振動ローラにタイヤローラやコンバインドローラなどを組み合わせて使用している。このようなことから、RCCPの締めめ機構は、施工方法がまだ標準化されていないが、ローラの自重による圧密と振動による骨材粒子間の摩擦の減少およびモルタルの流動作用によるもの⁵⁾(①と③による)と考えられる。また、アスファルトフィニッシャによる敷均し時に、フィニッシャのタンバとスクリュードによる締めめ作用があり、これは②衝撃と③振動によるものと考えられる。このように、RCCPの敷均し、転圧による締めめは、①～③のすべての種類の締めめエネルギーにより行われているものと考えられる。

RCCPの配合検討にあたっては、実際の施工に近いエネルギーの種類と大きさで締めめめ、ワーカビリティ

(コンシステンシー)を評価する必要がある。しかし、既存の試験装置でこのようないく種類も異質な締固めエネルギーで行えるものがない。また、土やアスファルト混合物あるいはRCDコンクリートの場合も、主に一種類の締固めエネルギーで締固めやワーカビリティ(コンシステンシー)を評価しているのが現状である。すなわち、土やアスファルト混合物の場合は主に②衝撃によるJIS A 1120やマーシャル安定度試験¹⁵⁾、RCDコンクリートの場合は主に③振動によるVCあるいは修正VC試験^{5),6)}である。

以上のことから、本研究での転圧の評価試験方法としては、既存の試験装置を利用するなど簡便なことが望ましいため、土とアスファルト混合物の試験に用いられる上記の二方法を締固め方法として用いた。

3. 試験概要

(1) 使用材料

使用したセメントは普通ポルトランドセメントで、その物理試験成績を表一に示す。細骨材に西多摩産の7号砕石(5~2.5mm)と入間川産の陸砂を用い、粗骨材に西多摩産の5号砕石(20~13mm)と同6号砕石(13~5mm)を使用した。このように細・粗骨材に道路用砕石を使用したのは、骨材の粒度調整を容易にするためである。細・粗骨材の物理試験結果を表二に示す。混和剤として、AE減水剤(リグニスルホン酸化合物およびポリオール複合体)およびAE剤(変性ロジン酸塩を主成分とする陰イオン系界面活性剤)を使用した。

(2) 配合および練りませ

通常、コンクリートの配合は、空気(空隙)を含む練り上り単位容積当たりの質量で表わし、この場合の骨材は表面乾燥飽水状態の質量である。本研究においては、RCCが締固めエネルギーの大小、骨材の粒度、水量などによって空気量(空隙量)が大きく変化し、配合を表わすうえでの複雑さを避けるため、以下空気量(空隙量)0%における質量として定義する。RCCの空気(空隙)としては、練りませ時に導入される空隙(エントレインドエアとエントラップトエアの和)と、配合要因や締固めの程度などにより転圧時に混入する空隙が存在するものと考えられるが、区別して測定することが困難なためここでは双方を空隙として扱うこととした。

練りませは、容量50lの強制練りミキサを使用し、1バッチの練り量を締固め試験のみの場合は10l、強度試験用供試体も採取する場合は25lとした。材料投入は粗骨材、細骨材、セメント、水・混和剤の順とし、全材料投入後1分間練りませた。

(3) 締固め試験方法

JIS法は、JIS A 1210の第2法に規定される突固め

方法に準拠した。すなわち、ランマー質量4.5kg、ランマー落下高さ45cm、突固め層数3層、各層当たりの突固め回数92回で、15cmモールド(内径150mm、高さ175mm)を使用した(図一参照)。突固め終了後、カラーをはずしストレートエッジで整形し、その状態の質量からモールド、底板の質量を減じ2209cm³で除し湿潤密度 $\rho_t(g/cm^3)$ とした。乾燥密度 $\rho_d(g/cm^3)$ は、土では試料の含水比を試験によって求めて算出するが、配合計算上の含水比 $w(\%)$ を用いて ρ_t に $100/(100+w)$ を乗じて求めた。なお、ここでいう含水比 w には骨材吸水分を含む。また、 ρ_t を配合計算上のゼロ空隙単位容積質量 $\gamma_0(g/cm^3)$ で除し締固め率 $C_m(\%)$ とした。

$$C_m = \frac{\rho_t}{\gamma_0} \times 100 (\%) \dots\dots\dots (1)$$

この場合、配合計算上の含水比 w および配合計算上のゼロ空隙単位容積質量 γ_0 は次式で表わされる。

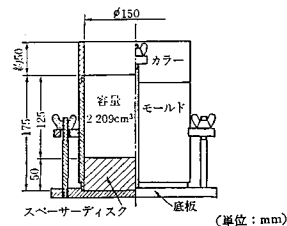
$$w = \frac{W + \frac{Q_s}{100 + Q_s} \cdot S + \frac{Q_g}{100 + Q_g} \cdot G}{C + \frac{100}{100 + Q_s} \cdot S + \frac{100}{100 + Q_g} \cdot G} \times 100 (\%) \dots\dots\dots (2)$$

表一 セメントの物理試験成績

比重	比表面積 (cm ² /g)	凝 結			安定性	圧縮強さ (kgf/cm ²)		
		水量 (%)	始発 時一分	終結 時一分		3日	7日	28日
3.15	3060	28.0	2-31	4-41	良	158	255	411

表二 細・粗骨材の物理試験結果

骨 材 の 種 類	粗 骨 材		細 骨 材	
	5号砕石 (20-13)	6号砕石 (13-5)	7号砕石 (5-2.5)	陸砂
表 乾	2.64	2.64	2.62	2.58
純 乾	2.62	2.61	2.57	2.58
水 率 (%)	0.92	1.12	1.71	1.39
単位容積質量 (kg/dm ³)	1.565	1.535	1.502	1.795
実 率 (%)	59.8	58.8	58.3	70.5
通 過 量 百 分 率 (%)	25mm			
	20	100		
	15	59.5		
	13	25.0		
	10	5.3	94.8	
	7.5	1.2	53.2	
	5		0	100
	2.5			18.2
	1.2			4.2
	0.6			0.6
0.3			12.6	
0.15			3.5	
0.074			0.6	
粗 粒 率	6.94	6.47	4.78	3.33



図一 15 cm モールド (JIS A 1210)

$$\% = \frac{W+C+S+G}{1000} \text{ (g/cm}^3\text{)} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、

- W：単位水量 (kg/m³)
- C：単位セメント量 (kg/m³)
- S：単位細骨材量 (kg/m³)
- G：単位粗骨材量 (kg/m³)
- Q_s：細骨材の吸水率 (%)
- Q_G：粗骨材の吸水率 (%)

マーシャル法は、アスファルト混合物のマーシャル安定度試験に用いられるマーシャル試験装置を使用して行った(図-2参照)。試料を、図-3に示す型わくに目標締固め厚(突固め回数50回で100±2mm)となるよう計量して入れ、型わく内の試料の頂部がやや盛り上がった丸い形となるよう練りサジで整形した。次に、マーシャル供試体作製用ランマー(質量4.5kg、落下高45cm)で突き固め、突固め回数が50、100、150回に達したときに型わく天端からの下がり方を測定して、その試料容積および試料質量から湿潤密度を求めた。乾燥密度および締固め率は、JIS法の場合と同様にして求めた。

(4) 強度試験方法

供試体寸法は、圧縮強度がφ10×20cm、曲げ強度が10×10×40cmとした。型わくは、供試体作製後の押抜き脱型を行いやすいようテーパを付け(図-4参照)、供試体作製時には試料がこぼれないようカラーを取り付けた。

圧縮強度試験用の供試体は、目標の供試体密度となるよう供試体1個分の試料質量を計算により求め、その質

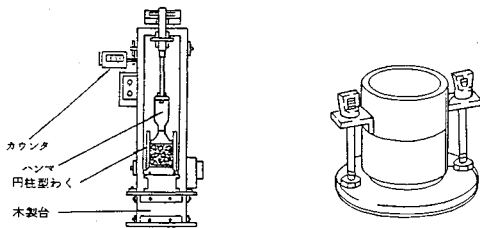


図-2 マーシャル試験装置¹³⁾ 図-3 マーシャル用型わく¹⁵⁾

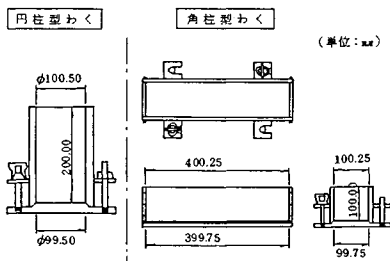


図-4 強度試験用供試体の形状¹³⁾

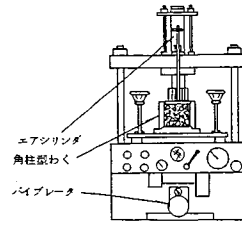


図-5 加圧振動式締固め装置¹³⁾

量の1/2(1層分)を計量して型わくに詰め、マーシャル試験装置で締め固め、この作業を繰り返し2層にて作製した。締固めが終了した供試体は、作製当日にセメントペーストによるキャッピングを行った。曲げ強度試験用の供試体は、同様に計量して1層目分を型わくに入れ、練りサジで周囲および中央部を突きほぼ平らに均し、引き続き2層目分も同じ要領で行い、図-5に示す加圧振動式締固め装置で2層分を一度で締め固め作製した。曲げ強度試験用供試体は、締め固める面が矩形でしかも面積が広いため、全体的に均一な締固めができると考えられる本装置を採用した。

各試験用の供試体は、翌日脱型後水中養生(20°C)を行い所定材令で強度試験を実施した。強度試験方法はJIS A 1106および1108に準拠した。

4. 結果と考察

(1) 骨材粒度が締固めに与える影響

骨材粒度が締固めに与える影響をみるため、5号、6号、7号砕石および砂の配合比率を変えて各種試験を行った結果から、5種類の骨材粒度(A-1~A-5)を合成粒度曲線で図-6に示す。

単位水量と単位セメント量(ペースト量)を一定とした場合の乾燥密度・締固め率と骨材粒度との関係を、図-7に示す。乾燥密度と締固め率ともJIS法ではA-4粒度で、マーシャル法ではA-3粒度で最大となった。これは締固め(突固め)方法とエネルギーの違いによると考えられるが、エネルギーの違うマーシャル法の50、

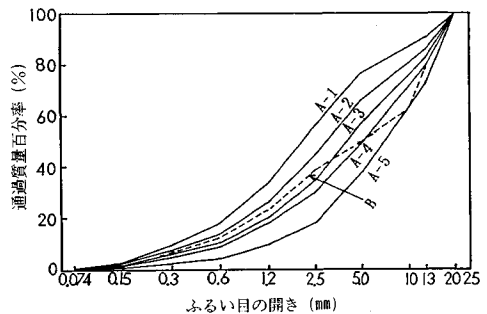
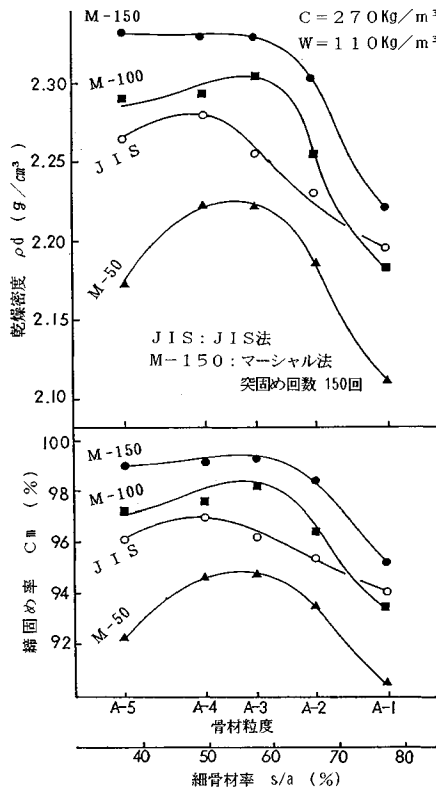
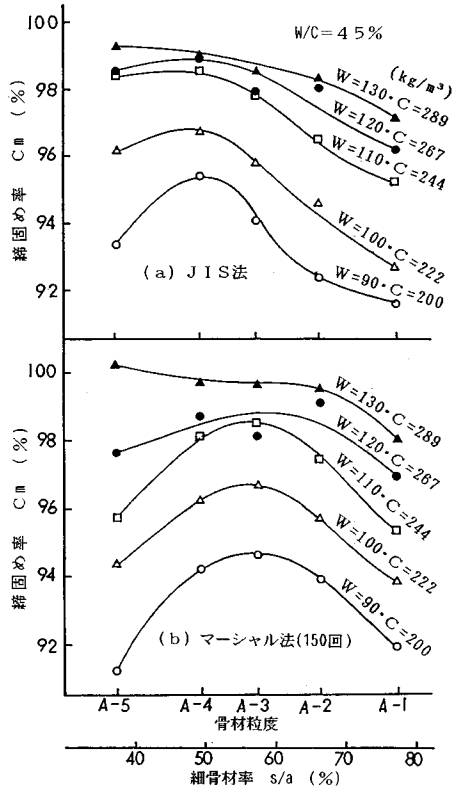


図-6 合成粒度曲線



図一七 乾燥密度・締固め率と骨材粒度の関係



図一八 単位水量による締固め率と骨材粒度の関係

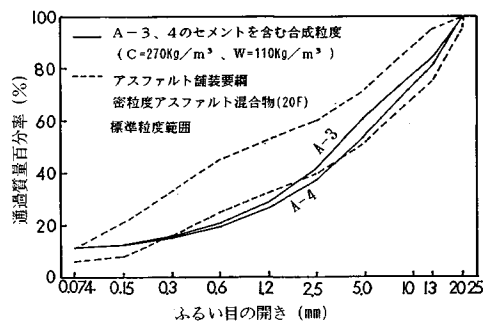
100, 150 回を比較すると乾燥密度と締固め率とも A-3 粒度で最大となっていることから、締固め (突固め) 方法の違いがより影響しているものと考えられる。すなわち、JIS 法は $\phi 150$ mm のモールド内の試料を $\phi 50$ mm のランマーで突き固めるため、試料内部にせん断破壊を伴う突固めとなる。一方、マーシャル法は $\phi 100$ mm のモールド内の試料を $\phi 98.4$ mm のタンパーシュエを介してハンマーで突き固めるため、せん断破壊は生じないと考えられる。

本試験では、最大乾燥密度と最大締固め率とは同一の骨材粒度で得られている。しかし、骨材の比重は個々に相違するので、単位水量と単位セメント量が一定で骨材粒度を変化させた場合でもコンクリートのゼロ空隙単位容積質量は一定ではない。したがって、最大乾燥密度と最大締固め率とが同時に得られるのは、厳密には骨材個々の比重が同一の場合に限られる。よって、骨材粒度の違いによる締固めを評価する場合は、締固め率に着目するのがよいと考えられ、その最大を示す粒度が最も締固めやすい粒度といえる。

水セメント比 W/C を一定とし単位水量・単位セメント量を変化させた場合の締固め率と骨材粒度との関係を、図一八に示す。各曲線を比較すると、締固め率が最

大となる締固めやすい粒度が明瞭となるのは、JIS 法では単位水量が 110 kg/m^3 程度以下、マーシャル法では 120 kg/m^3 程度以下である。この範囲では JIS 法、マーシャル法とも図一七の結果と同様にそれぞれ A-4, A-3 粒度で最大締固め率を示す。本試験では単位水量に応じて単位セメント量も変化する ($200 \sim 289 \text{ kg/m}^3$) しているが、(3) で後述するように単位セメント量が締固めに与える影響は小さいことから、ある程度以下の単位水量では、締固めやすい骨材粒度は単位水量にかかわらず一定であるといえる。

図一九は、単位水量 110 kg/m^3 、単位セメント量 270



図一九 合成粒度曲線

kg/m³とした場合のセメントと骨材との合成粒度曲線である。A-3, 4 粒度ともアスファルト舗装要綱（日本道路協会）¹⁶⁾の密粒度アスファルト混合物（20 F）の標準粒度範囲のほぼ下限付近にあり、RCCP においてもほぼこの付近が締め固めやすい粒度といえる。

(2) 単位水量が締め固めに与える影響

骨材粒度と単位セメント量を一定とした場合の乾燥密度・締め固め率と単位水量との関係を、図-10 に示す。単位水量と締め固め率との関係から、単位水量の増加に伴い締め固め率が大きくなり締め固めやすくなるのがわかる。また、単位水量と乾燥密度との関係からは、最大乾燥密度となる単位水量が存在することがわかる。しかし、単位水量の増加は、全骨材量が減少し比重の小さい水により順次置き換わることを意味しており、これによりゼロ空隙率単位容積質量が減少する。一方、単位水量の増加に伴い締め固め率は大きくなるので、乾燥密度の変化はゼロ空隙率単位容積質量と締め固め率の変化を合成したものであり、この関係を模式的に図-11 に示す。

本試験では、図-10 に示すマーシャル法の単位水量の多い範囲で、締め固め率が 100% を越える部分が認められた。これは、締め固め時にペーストやモルタルの一部

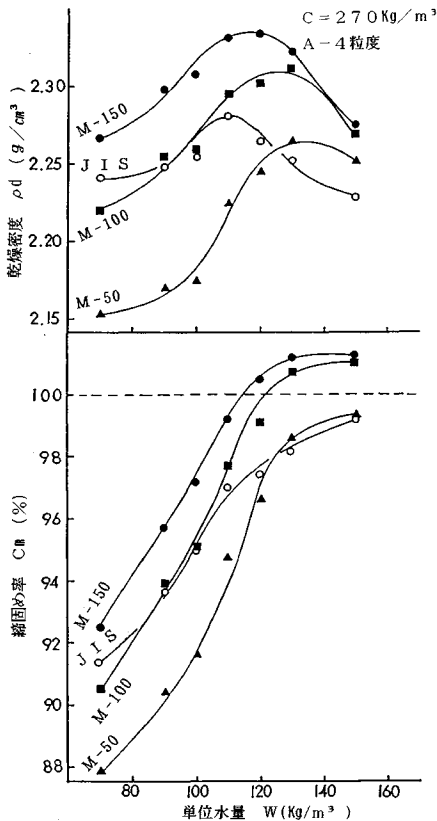


図-10 乾燥密度・締め固め率と単位水量の関係

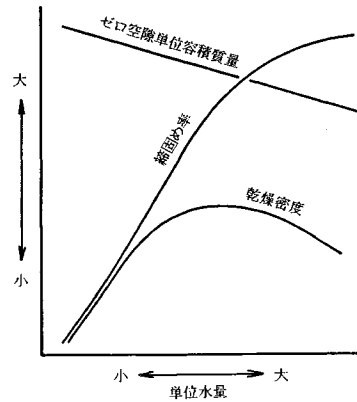


図-11 乾燥密度、締め固め率、ゼロ空隙率単位容積質量相互の関係

が型わく外に飛び散ったりハンマに付着したこと、試料質量として型わく投入前の計測質量を用いて湿潤質量を算出したためと推察される。一方、JIS 法の場合は質量計測を締め固めが終了し整形後に行ったため、マーシャル法のようなことがなかったものと推察される。しかしながら、質量計測を締め固め後に行うにしても、単位水量が多い場合には締め固め時に試料中の一部（ペースト、モルタル）が散逸することを考えると、湿潤質量（締め固め率）の精度に若干の影響もあり、注意を要する。

土では、最大乾燥密度を与える含水比を最適含水比といい、ある締め固めエネルギーのもとで一定容積当たりの土粒子数が最も多く土粒子相互の間隙が小さい状態となる土の含水比である。最適含水比は締め固めエネルギーによって変化し、一般に締め固めエネルギーが大きくなると低含水比側に移行し、最大乾燥密度も大きくなることが知られている。図-10 のマーシャル法の 50, 100, 150 回を比較すると、この傾向がうかがえる。土の場合は、ある締め固めエネルギーにおける最適含水比で締め固めた状態が、土のあらゆる工学的性質が必ずしも最適な状態とはいえないが、強度や変形特性、遮水性などに限れば最適もしくは最適に近い状態といえる。

しかし、最大乾燥密度の状態のフレッシュコンクリートが硬化した場合、硬化コンクリートの強度は必ずしも最適（最大）とならないことは明らかである。すなわち、(4) で後述する強度～セメント空隙比の関係から、強度が最大となるのはセメント空隙比が最大となるところである。

セメント空隙比 c/v は次式で表わされる。

$$c/v = \frac{C \cdot \frac{100-V}{H_c}}{\frac{W}{H_w} \cdot \frac{100-V}{100} + 10 \cdot V} \dots \dots \dots (4)$$

ここに、

C：単位セメント量 (kg/m³)

W：単位水量 (kg/m³)

V：空隙率 (=100-C_m)(%)

H_c：セメントの比重

H_w：練りませ水の比重

V=100-C_m の関係より式 (4) を変形すると、次式で表わすことができる。

$$c/v = \frac{\frac{C}{H_c}}{\frac{W}{H_w} + \frac{1000(100-C_m)}{C_m}} \dots\dots\dots(5)$$

いま、単位セメント量を一定とし、単位水量が変化する場合を考える。単位水量の増加に伴い締固め率も増加するので、単位水量 W に対する締固め率が C_m で、単位水量が微小量 (ΔW) 増加したときの W+ΔW に対して C_m+ΔC_m とし、セメント空隙比が変化しない場合には (H_w=1)、式 (5) より次式を得る。

$$W + \frac{1000(100-C_m)}{C_m} = W + \Delta W + \frac{1000(100-C_m-\Delta C_m)}{C_m + \Delta C_m} \dots\dots\dots(6)$$

式 (6) より

$$\Delta W \cdot C_m^2 + \Delta W \cdot \Delta C_m \cdot C_m - 100000 \Delta C_m = 0 \dots\dots\dots(7)$$

ΔW・ΔC_m≠0 なので式 (7) より式 (8) が得られる。

$$\frac{\Delta C_m}{\Delta W} = \frac{C_m^2}{100000} (\%/kg/m^3) \dots\dots\dots(8)$$

単位水量の増加に伴い強度 (セメント空隙比) が増加するのは、式 (6) の左辺>右辺のときであり、式 (6) と式 (8) の関係より ΔC_m/ΔW > C_m²/100000 である。また、単位水量の増加に伴い強度 (セメント空隙比) が減少するのは、同様にして ΔC_m/ΔW < C_m²/100000 である。すなわち、単位水量の増加に伴い強度が増加するのは、単位水量～締固め率曲線の勾配 (ΔC_m/ΔW) が C_m²/100000 を越える単位水量の範囲である。同様に、単位水量の増加に伴い強度が減少するのは、単位水量～締固め率曲線の勾配が C_m²/100000 未満の単位水量の範囲である。よって、上記の前者から後者に移行するところの、式 (8) の関係が成立する締固め率に対する単位水量で最大強度 (最大セメント空隙比) が得られる。式 (8) より、C_m=95~100% の範囲では C_m²/100000≒1/10.5 となるので、締固め率が 95% 以上の範囲では、単位水量～締固め率曲線の勾配が近似的に 1/10.5 (%/kg/m³) で最大強度が得られるとみなされる。

単位水量～締固め率曲線の一例を、図-12 に示す。同曲線が、締固め率 95% 以上の範囲で勾配が 1/10.5 (%/kg/m³) の直線に接する点 A に対する単位水量 W_A が、最大強度が得られる単位水量である。以上のことから、

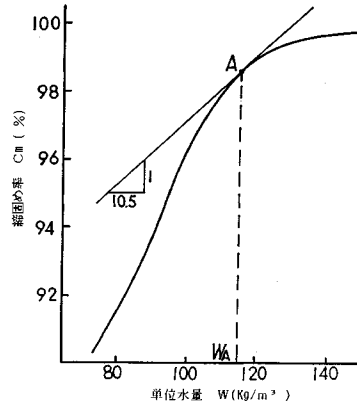


図-12 単位水量～締固め率曲線の一例

最大強度が得られる単位水量は、最大乾燥密度となる単位水量とは必ずしも一致しないことがわかる。

RCCP の配合は、強度からだけではなく耐久性に優れ、ワーカビリティや表面仕上り状態が良好に得られるよう決定しなければならない。これまでの高速自動車道での試験施工や締固め試験での試料の表面仕上り状態観察結果から、単位水量が多くなると表面にペースト分が浮いてきたり、あるいは土でいうオーバーコンパクションとよばれる状態になり、良好な平坦性や表面仕上り状態が得られなくなった。オーバーコンパクションは、単位水量の増加によるフレッシュコンクリートのせん断抵抗の低下により、フレッシュコンクリート内部にせん断破壊が生じて起こるものと考えられる。

これらのことから、フレッシュコンクリートに適当なせん断抵抗を与えワーカビリティを確保するとともに、良好な表面仕上り状態が得られるよう単位水量を決定する必要がある。しかし、現状では施工性に関する研究が不十分なため、締固め試験時の試料表面の状態観察結果より単位水量を決定するのがよいと判断される。

(3) 単位セメント量が締固めに与える影響

使用骨材は 5 号、6 号砕石および砂とし、前述の (1) と同様にそれぞれの配合比率を変えた 5 種類の骨材粒度から、JIS 法で締固め率が最大となる B 粒度 (図-6 参照) を選定した。

骨材粒度と単位水量を一定とした場合の乾燥密度・締固め率と単位セメント量との関係を、図-13 に示す。単位セメント量の増加により、同時に水セメント比が減少しペースト容積率が增加するが、締固め率はわずかではあるが増加傾向が認められ、乾燥密度は若干増加している。これは、締固め率についてはセメントの増による微粒分の増加により、乾燥密度については骨材が比重のより大きいセメントに順次置き換えることによるゼロ空隙単位容積質量の増加と締固め率の増加によるものと考え

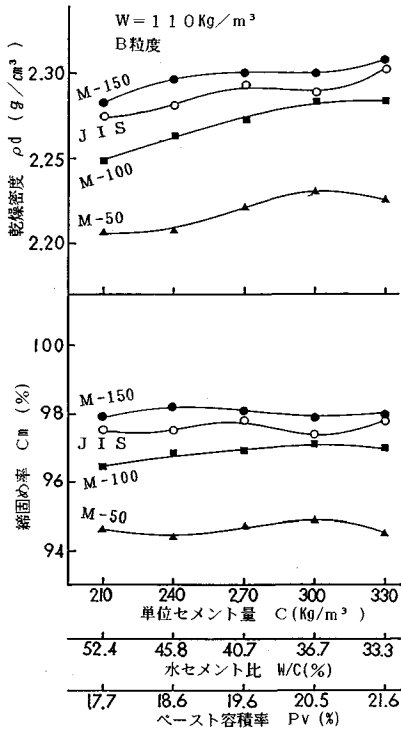


図-13 乾燥密度・縮固め率と単位セメント量の関係

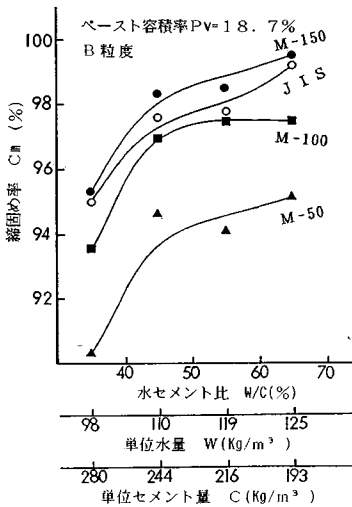


図-14 縮固め率と水セメント比の関係

えられる。しかしながら、このように単位セメント量の縮固め率への影響が小さいことは明らかである。

骨材粒度および全骨材量とペースト容積率を一定とした場合の縮固め率と水セメント比との関係を、図-14に示す。水セメント比の増加に伴い縮固め率が増加しているが、ペースト容積率が一定のため、水セメント比の

増加は同時に単位水量の増加と単位セメント量の減少である。単位水量の増に伴い縮固め率が増加し、単位セメント量の変化に縮固め率がほとんど影響しないという前述の結果から、単位水量による影響と考えられる。

(4) 圧縮強度、曲げ強度とセメント空隙比との関係
強度試験に用いた配合を表-3に、強度試験結果を表-4に示す。配合は単位水量を一定とし、単位セメント量を3水準とした。配合Ⅰ、Ⅱ-1およびⅢについてはそれぞれ同一の縮固め率(空隙率)で、配合Ⅱ-1~Ⅱ-3については縮固め率(空隙率)を変え計3水準で強度試験用供試体を作製した。供試体作製時の縮固め率は、これに先立ち実施したそれぞれの配合の縮固め試験(JIS法およびマーシャル法150回)で得られた縮固め率を下回るものである。これは今回の供試体作製方法では、配合や縮固め試験方法により程度の違いはあるが、縮固め試験で得られた縮固め率で供試体を作製するのが困難なためである。

各材令における圧縮強度とセメント空隙比との関係を、図-15に示す。セメント空隙比は圧縮強度との相関が高く、一般のコンクリートの場合に圧縮強度とセメント水比との関係を求めるのと同様に一次式で表わせる

表-3 強度試験に用いた配合(A-4粒度)

配合の種類	配合 (Kg/m³)									
	水セメント比 W/C (%)	粗骨材 S/a (%)	水 W	セメント C	粗骨材 S	粗骨材 G	AE減水剤	AE剤		
Ⅰ	45.8			240	745	298	532	554	0.600	0.024
Ⅱ-1	40.7	49.5	110	270	736	295	526	547	0.675	0.027
Ⅱ-2				300	728	291	520	541	0.750	0.030
Ⅱ-3				300	728	291	520	541	0.750	0.030
Ⅲ	36.7			300	728	291	520	541	0.750	0.030

表-4 強度試験結果

配合の種類	縮固め率 Cm (%)	空隙率 V (%)	セメント空隙比 C/V	曲げ強度 f _{bi} (Kg/cm²)			圧縮強度 f _{ci} (Kg/cm²)		
				3日	7日	28日	3日	7日	28日
Ⅰ	95.4	4.6	0.4815	53.0	52.8	63.2	205	242	306
Ⅱ-1	95.4	4.6	0.5417	51.3	60.4	73.1	249	291	313
Ⅱ-2	93.0	7.0	0.4626	47.2	57.5	58.4	194	228	250
Ⅱ-3	90.6	9.4	0.4010	42.9	48.4	55.1	166	166	236
Ⅲ	95.4	4.6	0.6019	52.0	61.1	67.4	231	276	314

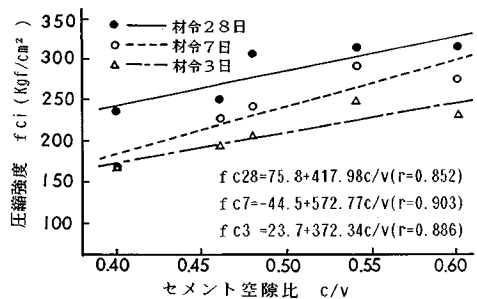
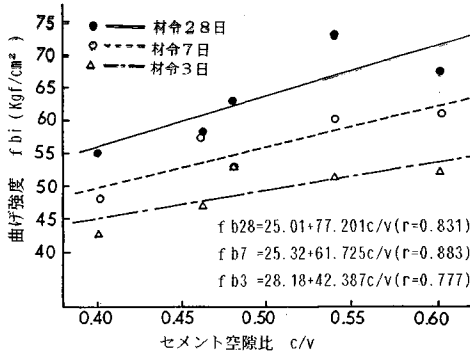


図-15 圧縮強度とセメント空隙比の関係



図一16 曲げ強度とセメント空隙比の関係

ことがわかる^{10),11)}。締固め率（空隙率）が相違する配合Ⅱ-1～Ⅱ-3の場合も、この関係によく合っていることが示されている。また、コンクリートブロック用の超硬練りコンクリートの圧縮強度がセメント空隙比と直線関係にあること¹²⁾は、村田らによって研究されているが、この傾向とも合っている。

次に、各材令における曲げ強度とセメント空隙比との関係を、図一16に示す。曲げ強度は圧縮強度の場合よりも若干相関性が悪いが、同様の傾向が認められる。このように、RCCの場合も通常のコンクリートと同様にセメント空隙比は強度との相関が高く、空隙（締固め）の強度に対する影響が大きいことから、施工における転圧がきわめて重要なことを示している。本方法は、強度とセメント空隙比との関係が求められているため、必ずしも締固め試験時の締固め率で供試体を作製しなくても施工との関係が把握でき、RCCPの転圧の施工管理にも利用可能である。

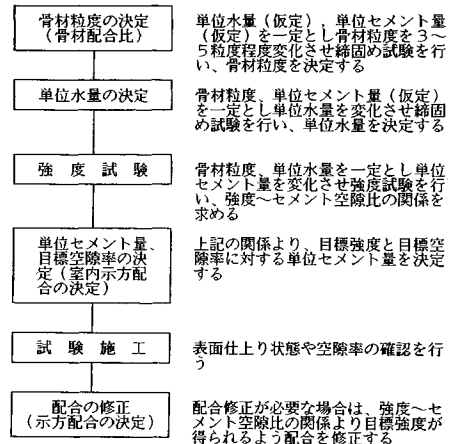
5. 配合設計法の提案

以上の試験結果より、JIS法やマーシャル法の締固め試験を用いた実用的なRCCP版（設計基準曲げ強度が材令28日で45 kgf/cm²程度の場合）の配合設計法として、以下の提案を行う。

配合設計の手順は次のとおりで、そのフローチャートを図一17に示す。

① 単位水量を110 kg/m³程度、単位セメント量を270 kg/m³程度でそれぞれ一定とし、骨材の合成粒度をアスファルト舗装要綱の密粒度アスファルト混合物の標準粒度範囲を参考に3～5粒度程度とし、それぞれ締固め試験を行う。締固め率が最大となる骨材粒度で骨材の配合比率を決定する。

② ①で決定した骨材粒度で、単位セメント量を270 kg/m³程度で一定とし、単位水量を80～120 kg/m³の範囲で数点変化させ、締固め試験を行う。得られた単位水



図一17 配合設計のフローチャート

量～締固め率曲線とそれぞれの単位水量における締固め試験時の試料の（表面）状態とから、単位水量を決定する。単位水量は、単位水量～締固め率曲線の接線勾配が1/10.5(%/kg/m³)に相当する単位水量付近で決定するのが望ましい。

③ ①、②で決定した骨材粒度と単位水量とをそれぞれ一定とし、単位セメント量を240～300 kg/m³の範囲で3～5点程度変化させ、強度試験用供試体を作製する。このとき、各配合の供試体作製時の締固め率は、あえて締固め試験時の締固め率と同一にする必要はない。次に、強度試験を所定の材令で実施し、強度とセメント空隙比の関係を求める。

④ 強度とセメント空隙比の関係より、目標強度が得られるセメント空隙比を求める。次に、施工上の目標空隙率を設定して単位セメント量を決定し、室内示方配合とする。

⑤ この配合で実施工で使用する舗設機械や転圧機械で試験施工を実施し、表面仕上り状態や空隙率の確認を行う。室内示方配合を修正する必要がある場合には、目標強度（目標セメント空隙比）となるように、単位水量、単位セメント量あるいは目標空隙率を修正する。

6. 結論

本研究により、室内試験の結果から次の結論を得た。

(1) 配合単位量を変化させて締固めの程度を評価する場合には、個々の材料の比重が相違するため、練りませ状態（フレッシュコンクリート）の固体密度である乾燥密度によることなく締固め率（空隙率）による方法がよい。

(2) 締固め率が最大（空隙率が最小）となる最も締め固めやすい骨材粒度（最適骨材粒度）は、アスファルト舗装要綱の密粒度アスファルト混合物の標準粒度範囲

の下限付近に存在する。また、単位水量が70~110 kg/m³の範囲では、単位水量による差はないが、JIS法とマーシャル法とではそれぞれ最適骨材粒度が異なることがある。これは、JIS法とマーシャル法では、両者の締固め機構の違いによるものと考えられる。

(3) JIS法とマーシャル法では、締固め機構やエネルギーの違いによるものと考えられるが、単位水量の変化による単位水量~締固め率曲線が若干相違するが、双方とも単位水量の増加に伴い締固め率が增加する。強度は、最大セメント空隙比を与える単位水量で最大となり、近似的には単位水量~締固め率曲線の接線勾配が1/10.5 (%/kg/m³)となる単位水量である。したがって、強度面からは最大セメント空隙比を与える単位水量が最適であるが、この単位水量でワーカビリティや表面仕上がり状態が必ずしも最適とはならないと考えられるので、併せて締固め試験時の表面状態観察などを参考にすることが望ましい。

(4) JIS法とマーシャル法のいずれの締固め試験方法においても、単位セメント量の締固めに与える影響は小さい。

(5) 曲げ強度は圧縮強度と同様にセメント空隙比の一次式で表わされ、正の相関関係にある。締固め試験のエネルギーや強度試験用の供試体の作製方法にもよるが、締固め試験時の締固め率や密度で強度試験用の供試体を作製することが困難な場合でも、この関係を用いることにより必ずしも同一の締固め率や密度で強度試験用の供試体を作製しなくても配合設計が可能である。

(6) RCCPの配合設計法として、5.の方法を提案する。また、(5)の関係を用いて、RCCPの転圧の施工管理にも利用できる。

なお、本研究で提案したRCCPの配合設計法を用いて、日本道路公団では常磐自動車道関本パーキングエリア(スルーレーン)、北陸自動車道能生インターチェンジ(ランプ部)¹⁷⁾および山陽自動車道沼田パーキングエリア(スルーレーンと大型車駐車スペース)¹⁸⁾の3か所で合計約4400m²の試験施工を実施した。いずれも結果は良好であり、現在道路舗装あるいは駐車場として供用している。

謝 辞：本研究にあたり、日本道路公団本社技術部、同仙台建設局いわき工事事務所、同新潟建設局糸魚川工事事務所、同広島建設局広島工事事務所の方々を始め、各舗装工事を施工された共同企業体の方々に、多大なる

ご協力をいただいた。ここに、深甚なる謝意を表す次第である。

参 考 文 献

- 1) 日本道路協会：セメントコンクリート舗装要綱，1984年2月。
- 2) 根本信行・内田精一・井上武美：転圧コンクリートに関する一検討——配合とその特性——，道路建設，No.465，pp.66~72，1986年10月。
- 3) 中丸 貢：合理的施工方法を考慮したセメント系補修材料に関する検討，道路建設，No.478，pp.61~67，1987年11月。
- 4) 建設省関東技術事務所，(社)セメント協会：ローラ転圧コンクリート舗装——共同開発による試験施工——，道路とコンクリート，No.80，pp.18~24，1988年6月。
- 5) 国土開発技術研究センター：RCD工法技術指針(案)，1989年3月。
- 6) 志水茂明・山内 彪・柳田 力：RCD工法に関する最近の調査研究，土木学会論文集，第408号/V-11，pp.1~10，1989年8月。
- 7) 小林良太・長谷川隆・山本富業：連続粒度の転圧コンクリート，道路建設，No.479，pp.64~71，1987年12月。
- 8) セメント協会 RCCP 専門委員会：転圧コンクリート舗装(RCCP)文献調査報告書，1989年3月。
- 9) 豊福俊泰・吉岡博幸・高橋 隆：転圧コンクリート舗装の配合とその特性，セメント技術年報41，pp.229~232，1987年12月。
- 10) 山崎寛司：鉱物質微粉末がコンクリートの強度におよぼす効果に関する基礎研究，土木学会論文集，第85号，pp.15~46，1962年9月。
- 11) 神田 衛・石渡章介：コンクリート強度の早期推定に関する一研究，土木学会論文報告集，第209号，pp.123~130，1973年1月。
- 12) 村田二郎・川崎道夫：高炉スラグ細骨材およびエントレインドエアによる超硬練りコンクリートの凍結融解抵抗性の改善，土木学会論文集，第396号/V-9，pp.119~127，1988年8月。
- 13) 福田万大・中丸 貢・辻井 豪：ローラコンパクトコンクリートの締固め特性に関する実験，第7回コンクリート工学年次講演会論文集，pp.329~332，1985年6月。
- 14) 河上房義・柳沢栄司：土の締固め，鹿島出版会，pp.97~113，1978年。
- 15) 日本道路協会：舗装試験法便覧，1988年11月。
- 16) 日本道路協会：アスファルト舗装要綱，1988年11月。
- 17) 関 英夫・中川 章・佐藤夫志・奥平直誠：転圧コンクリート舗装の施工例，道路建設，No.490，pp.64~72，1988年11月。
- 18) 酒井 脩・坂田耕一・岡林正俊・野々田充：転圧コンクリート舗装の施工——山陽道・沼田パーキングエリア——，舗装，Vol.24，No.4，pp.17~25，1989年4月。(1989.2.21・受付)