

# 転圧コンクリート舗装の施工実験およびコンクリートの品質管理、 配合修正方法に関する実験的研究

## LABORATORY AND FIELD TESTS FOR METHODS OF QUALITY CONTROL AND MODIFICATION OF MIX PROPORTIONS FOR CONCRETE IN RCC PAVEMENTS

中原 康\*・万木正弘\*\*

By Yasushi NAKAHARA and Masahiro YURUGI

Based on the results of laboratory and field tests for concrete in Roller compacted Concrete Pavements, it was found that :

(1) The quality of the fresh concrete can be determined using a slightly modified version of the VC test and the compaction method used for concrete in Roller Compacted Dam concrete.

(2) The degree of compaction in specimens for quality control and the actual concrete at site can be determined from the modified VC values.

(3) The strength can be determined from the degree of compaction and the water/cement ratio.

(4) Among the parameters in mix proportioning, the volumetric water to cement ratio, the ratio of the amount of cement paste to the air voids in the sand, and the ratio of the amount of mortar to the air voids in the aggregate are the ones that affect the modified VC values.

From the results of these tests, regression equations are proposed to estimate the consistency and the compressive strength of the concrete when the mix proportion is varied. Also the methods to suitably modify the mix proportion to obtain the concrete of required quality are discussed in this paper.

*Keywords* : roller compacted concrete pavement, mix proportion, quality control, degree of compaction, modified VC value, void ratio of aggregate, compressive strength, flexural strength

### 1. ま え が き

RCCP (Roller Compacted Concrete Pavement : 転圧コンクリート舗装) 工法はコンクリート舗装の新しい工法として、経済性、施工の簡便さ、急速施工、施工後の早期供用の可能性等の利点が評価され、この数年間で急速に研究開発が進められ、試験的施工の実績が増加している。しかし、使用されるコンクリートは零スランプの超かた練りであるため、従来の舗装コンクリート用のコンシステンシー試験方法や強度試験用供試体の作成方法は適用できず、マーシャル突固め試験、ランマ突固め試験、RCD (Roller Compacted Dam) コンクリート工法での VC 試験を修正した方法等各種の方法が試行<sup>1)</sup>されているものの、それらの結果は、主に単位水量の影響を主体とした個々の要因についての検討であり、骨材の品質、単位セメント量、水セメント比、細骨材率等の配合を構成する各種要因を総合した影響について検討した例は見当たらない。

配合設計方法については、ACI 207 委員会報告<sup>2)</sup>では、 $G_{max}=10\sim 150\text{ mm}$  すなわち、舗装からダムまでを対象とした超かた練りコンクリートの配合の標準と基本的な考え方を示している。豊福ら<sup>3)</sup>はマーシャル試験方法の締固めにより、配合と締固め率との関係を調べ、強度はセメント空隙比に支配されることを利用した配合の決め方を提案している。しかし、施工されたコンクリートの品質は、材料の品質、配合、コンシステンシーに支配されるほかにローラ転圧前の締固め状態、一層の締固め厚さ等に関連する施工機械および施工方法に大きく影響を受けることが明らかになっており<sup>4)</sup>、各種条件が変化した場合に所要の品質のコンクリートを得るためには、適切な品質管理方法および配合の修正方法の確立が必要と考えられる。

RCCP 工法と同様に超かた練りコンクリートを振動ローラで締め固める RCD コンクリート工法は、施工法として類似点はあるものの、コンクリートの材料、配合、要求される品質特性に大幅な差異があり、施工的にも、一層の締固め厚さが大幅に異なっている。

RCD コンクリートでは、この数十年の実績からコンクリートの品質試験方法はほぼ確立されつつあるものの

\* 正会員 鹿島建設技術研究所第1研究部専門部長  
(〒182 調布市飛田給 2-19-1)

\*\* 正会員 工修 鹿島建設技術研究所主任研究員(同上)

配合設計方法に関しては研究事例は少なく、前述の ACI 報告<sup>2)</sup>に見られる程度である。これまでの施工実績では単位セメント量がほとんど  $120 \text{ kg/m}^3$  程度であることから過去の事例を参考に試験施工によって配合を決めていることが多い。

著者らは、RCD コンクリートの品質としてフレッシュコンクリートのコンシステンシーが特に重要と考え、細骨材および粗骨材の品質（特に実績率）、水セメント比、細骨材率、細骨材の  $0.15 \text{ mm}$  以下の微粒分量、セメント量（フライアッシュも含む）等がコンシステンシーに与える影響について検討し、配合を考えるうえで、細骨材の空隙に対するセメントペースト量の比 ( $\alpha$ )、粗骨材の空隙に対するモルタル量の比 ( $\beta$ )、および水セメント比 ( $W/C$ ) がコンシステンシーに与える影響が大きいことを指摘した。その結果より骨材試験結果に基づく配合設計方法ならびに試験練りの結果からの配合修正方法および骨材の品質の変動に対する配合修正方法を提案するとともにその実用性を明らかにした<sup>5)~9)</sup>。

本研究では、RCD コンクリートに適用されている試験方法、配合の考え方、品質管理にあたっての配合の修正方法等を次の3段階の実験を実施し、転圧コンクリートへの適用性を検討したものである。

① 室内試験によるコンシステンシー試験方法および供試体締固め方法の検討、配合の相違がコンシステンシーおよび硬化コンクリートの品質に及ぼす影響に関する基礎的実験。

② 現場施工実験による配合およびコンシステンシーが施工性および硬化コンクリートの品質に及ぼす影響の検討。

③  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $W/C$ , 細骨材の微粒分量がコンシステンシーに及ぼす影響についての実験計画による実験。

## 2. 試験方法および配合に関する基礎実験

### (1) コンシステンシー試験方法および締固め方法の検討

#### a) 使用材料および配合

粗骨材は  $G_{\max}=20 \text{ mm}$  の碎石、細骨材は  $FM=2.72$  の川砂、セメントは普通ポルトランドセメント、混和剤はリグニン系 AE 減水剤を使用し、配合は  $C$  を  $260 \text{ kg/m}^3$  一定とし、 $W$  を 4 水準 ( $80\sim115 \text{ kg/cm}^3$ )、 $s/a$  を 4 水準 ( $30.8\sim44.2\%$ ) に変化させた 12 種類の配合を練り混ぜた。練り混ぜには  $100 \text{ l}$  水平 2 軸ミキサを用い、練り混ぜ時間は全材料投入後 90 秒間とした。

#### b) コンシステンシー試験

##### ① 修正 VC 試験

RCD コンクリートに用いられる VC 試験機（スウェーデン型 VB 試験装置，振動数  $3000 \text{ vpm}$ ，振幅

$1.0 \text{ mm}$ ，錘り  $20 \text{ kg}$ ）を用いた。ただし、RCCP では、施工時の 1 層の転圧厚さが、RCD に比較して大幅に薄いため、RCD の場合の適切なコンシステンシーとされている VC 値  $20\pm 10$  秒よりもかなりかた練りの配合が適切である可能性があり、これに適応させるために測定方法を一部変更した。すなわち、RCD での測定方法では、試験機上面にモルタルが全面に浮き上がる時間であるが、100 秒を超えるようなコンシステンシーでは、測定時間が長すぎて実用性に欠け、測定者の個人差も生じやすくなることから、これに代えて短時間で測定できるモルタルの一部が表面に浮き上がる時間とし、この値を修正 VC 値と称することにした。VC 値と修正 VC 値との関係を Fig. 1 に、 $W$  および  $s/a$  を変化させた場合の修正 VC 値との関係を Fig. 2 に示した。これらの関係から、修正 VC 値は  $W$  のきわめて少ない配合であっても、水量の微妙な変化や  $s/a$  の変化によるコンシステンシーの変化をより短時間に把握できる試験方法であることがわかる。

##### ② ランマ突固めおよびマーシャル突固め試験

道路の路床や路盤に用いられるセメント安定処理の場合等、水量を乾燥密度が最大となる最適含水比によって決めるランマ突固め試験方法 (JIS A 1210)、およびアスファルトコンクリートの安定度を試験するマーシャル突固め試験に準ずる方法で締固め密度（締固め率，空隙

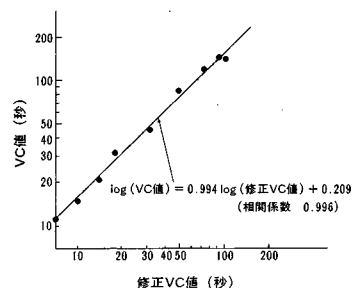


Fig. 1 Relationship Between revised VC-value and VC-value.

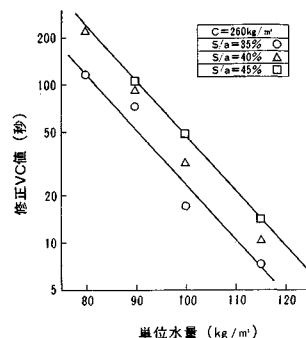


Fig. 2 Relationship Between Unit Water Content and Revised VC-value.

率)を測定し、コンシステンシーを判定する方法である。ここで、締固め率  $\delta_c$  は、空隙率(空気量)を零とした理論密度に対する測定密度の比を百分率(%)で表現することとした。したがって、 $(100-\delta_c)$  は空気量を示すことになる。

両試験方法で締固めた場合の締固め率と修正 VC 値との関係の測定例を Fig. 3 に示した。試験に用いた配合は、 $G_{max}=25\text{ mm}$ 、 $C=270\text{ kg/m}^3$ 、 $s/a=45\%$  で、 $W$  を  $80\sim 130\text{ kg/m}^3$  に変化させたものである。両試験方法とも締固め率は、 $W$  の変化に伴う修正 VC 値の変化に強く支配され、ランマによる突固め方法の締固め率が大きくなる傾向を示している。比較のため、Fig. 2 で試験した  $W$  および  $s/a$  を変化させた配合で、後述の振動タンパによる締固め率を併記した。

以上の結果から、3種類のコンシステンシー試験方法は  $W$  の大小による締固めの難易度を測定できるものと判断される。いずれの試験方法も実用に供せられており、取扱い方法や測定精度に若干の差異はあるものの、優劣はつけがたいが、VC 試験方法は RCD コンクリートでの実績も多く、かつ、エントレインドエアのコンシステンシーへの影響やコンシステンシーの経時変化等が的確に判断できることもあり<sup>7),8)</sup>、本研究ではこれを若干修正した修正 VC 試験方法を用いることとした。

c) 強度試験用供試体の締固め方法

室内試験によって、RCCP に適したコンクリートの配合を検討するにあたって、その締固めやすさの程度を把握するとともに、強度試験用供試体作成のためのコンクリートの締固め方法が重要である。実工事に使用される施工法による締固め程度が室内試験によって再現できることが望ましいが、実工事では種々の施工機械や施工方法が採用されることとなるので、両者を一致させることは非常に困難である。ここでは、コンシステンシーや配合の相違が一定のエネルギーのもとで締め固めたコンク

リートの締固め率にどのような影響を与えるかを検討した。

締固め方法としては、RCD 工法での配合試験および品質管理試験に用いられている振動タンパ (Bosch 社製、振動数 3 000 vpm、無負荷時振幅 1.0 mm) を用いることとし、締固め率測定方法としては、圧縮強度供試体の作成と併用し、 $\phi 15\times 30\text{ cm}$  型枠にコンクリートを 3 層に詰め、各層とも締固め時間は 80 秒とした。そのときの上載荷重は約 60 kg である。締固め率から換算される空気量はエントラップトエアとエントレインドエアの両者を含むが、換算した空気量が小さいほど締固めやすさが良いと判断した。測定結果は Fig. 3 に示したとおりである。

Fig. 2, Fig. 3 から、振動タンパによる締固めの場合、締固め率は  $s/a$  の相違にかかわらず、修正 VC 値によって強く支配され、修正 VC 値が 100 秒以下であれば、締固め率 97% 以上が得られることがわかる。

(2) コンクリートの配合と品質

骨材最大寸法 20 mm で、 $W, C$  および  $W/C, s/a$  を変化させ、修正 VC 値を測定するとともに強度試験用供試体を作成し、圧縮強度および曲げ強度試験を行った。

a) 配合の表わし方<sup>5)</sup>

配合の表わし方として、筆者らが提案した RCD コンクリートのコンシステンシーを推定するのに有用な前述の  $\alpha$  および  $\beta$  を配合の指標として取り入れ、転圧コンクリートにおいて、 $\alpha, \beta$  および  $W/C$  の変化がコンシステンシーや硬化コンクリートの品質に与える影響を検討することにした。ここで、 $\alpha, \beta$  を採用することは、骨材の実績率は粒度および形状に支配されることから、骨材の品質の反映した配合を設定していることを意味している。 $\alpha$  および  $\beta$  は次式によって与えられる。

$$\alpha = (W + C / \rho_c) / [(S / W_s) \times V_s] \dots\dots\dots (1)$$

$$\beta = (W + C / \rho_c + S / \rho_s) / [(G / W_g) \times V_g] \dots\dots\dots (2)$$

$W, C, S, G$ : 水, セメント, 細骨材, 粗骨材の単位量

$W_s, W_g$ : 所定の方法で締め固めた細骨材および粗骨材の単位容積重量

$V_s, V_g$ : 所定の方法で締め固めた細骨材および粗骨材の空隙率

$\rho_c, \rho_s, \rho_g$ : セメント, 細骨材, 粗骨材の比重

なお、骨材の実績率の測定方法として、粗骨材は JIS A 1104 に従い、細骨材は表乾状態で VC 試験機の容器に詰め、20 kg の錘りを載せ、20 秒の振動を与えたときの単位重量を測定し算出した。細骨材をこのような方法で測定したのは、RCD コンクリートの場合、JIS A 1104 の方法での測定値は、本方法の測定値よりも実績率が 3~5% 小さく(空隙率が大きく)、実用に供した

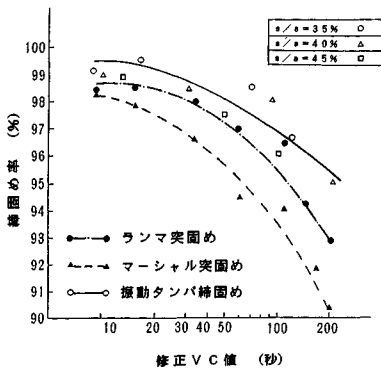


Fig. 3 Relationship Between Revised VC-value and Degree of Compaction.

配合においても単位ペースト量が計算上は細骨材の空隙より少なくなる ( $\alpha \leq 1$ ) 場合が生じるためである。

b) 使用材料および配合

使用材料および配合を Table 1 に示し、 $\alpha$ 、 $\beta$  および修正 VC 値の測定結果も併せ記した。なお、空気量は 1.5% と仮定した。

c) 強度試験用供試体作成方法

圧縮強度試験：前述の締固め方法に準じた。

曲げ強度試験：10×10×40 cm 供試体を振動タンパによる、80 秒×2 層で締め固めた。締固めにあたっては、型枠に内接する加圧板 (10×40×4 cm) を用い、上載荷重は約 60 kg とした。

d) 試験結果および結果の検討

① 配合と修正 VC 値との関係

修正 VC 値と  $\alpha$  との関係性を  $W/C$  および  $\beta$  で整理したものを Fig. 4 に示す。修正 VC 値は  $\alpha$  の値とともに、 $W/C$  および  $\beta$  の値により大きく影響を受けることがわかる。このことは必要強度から決められる  $W/C$ 、分離抵抗性等の施工性から決まる  $\beta$  の値を定めれば、現場施工条件に応じた締固めに必要な修正 VC 値が得られるように  $\alpha$  を選定することで、配合を決めることができることを示唆している。

② 修正 VC 値と締固め率との関係

修正 VC 値と締固め率との関係を、Fig. 5 に示す。修正 VC 値が 100 秒以下であれば締固め率は 97% 以上が確保できるようであり、Fig. 3 の結果とほぼ同じ傾向を示している。

③ 圧縮強度

Fig. 6 に、Table 1 配合の材令 28 日圧縮強度と単位体積重量の関係を Table 1 Concrete Mix Proportion and Consistency.

配合	Gmax (mm)	W/C (%)	S/a (%)	修正 VC 値 (秒)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					$\alpha$	$\beta$
					W	C	S	G	$A_d$ (C <sub>25</sub> %)		
1	20	30	38.0	40	115	383	751	1225	0.25	1.80	1.69
2	20	35	39.4	22	115	329	796	1225	0.25	1.65	1.69
3	20	40	40.4	19	115	288	831	1226	0.25	1.49	1.69
4	20	30	40.4	95	100	333	831	1227	0.25	1.48	1.69
5	20	35	37.9	41	100	286	795	1303	0.25	1.44	1.50
6	20	35	41.6	72	100	286	872	1225	0.25	1.31	1.69
7	20	35	44.8	63	100	286	939	1158	0.25	1.21	1.87
8	20	40	42.4	51	100	250	902	1226	0.25	1.19	1.69
9	20	35	40.1	35	110	314	821	1226	0.25	1.53	1.69
10	20	35	40.9	52	105	300	847	1225	0.25	1.41	1.69
11	20	35	37.2	24	105	300	771	1301	0.25	1.55	1.50
12	20	35	44.1	36	105	300	914	1158	0.25	1.31	1.87
13	20	30	41.2	140	95	317	859	1226	0.25	1.36	1.69
14	20	35	38.7	56	95	271	821	1301	0.25	1.32	1.50
15	20	35	42.3	150	95	271	898	1225	0.25	1.21	1.69
16	20	35	45.5	126	95	271	966	1157	0.25	1.12	1.87
17	20	40	43.0	160	95	238	925	1226	0.25	1.10	1.69
18	20	35	42.9	200%	90	257	921	1227	0.25	1.11	1.69

セメント：普通ポルトランドセメント (N 社製、比重 3.15、粉末密度 3160 kg/m<sup>3</sup>)  
 粗骨材：富士川産、粗粒率 2.75、比重 2.64、単位容積重量 1.83 kg/ℓ、空隙率 30.6%  
 細骨材：八王子産砕石、粗粒率 6.80、比重 2.64、単位容積重量 1.59 kg/ℓ、空隙率 40.1%  
 減水剤：減水剤ポリリス No. 8 (日置マスタービルダーズ社製) をセメント量の 0.25% 使用  
 (注) 練りませには 100 ℓ 水平二軸ミキサを使用した。  
 粗骨材の単位容積重量及び空隙率は VC 試験機により締固めを行った値。

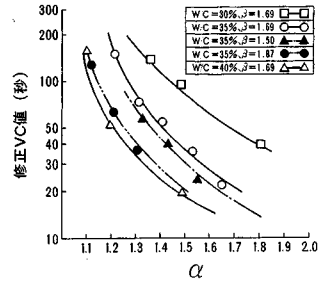


Fig. 4 Relationship Between  $\alpha$  and Revised VC-value.

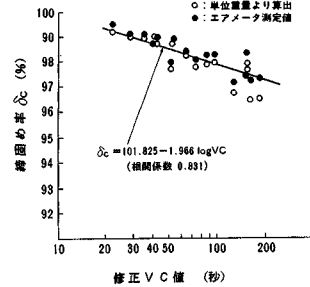


Fig. 5 Relationship Between Revised VC value and Degree of Compaction.

積重量から算出した締固め率との関係を示す。圧縮強度は締固め率に強く影響を受けるが、その程度を把握するために、目的変数を材令 28 日圧縮強度、説明変数を  $W/C$  および締固め率として重回帰分析を行った。その結果、寄与率 0.80 で、それぞれの回帰係数は、 $-6.2$ 、 $+70.0$  となり、 $W/C$  の 1% の増減は  $6.2 \text{ kgf/cm}^2$  の増減、締固め率 1% の増減は  $70.0 \text{ kgf/cm}^2$  の増減となり、 $W/C=30\sim40\%$ 、締固め率 96~100% の範囲では、締固め率は大きく圧縮強度に影響を与えることがわかる。

④ 曲げ強度

Table 1 に示す 18 配合の材令 28 日圧縮強度の平均値  $598 \text{ kgf/cm}^2$  に対して、曲げ強度の平均値は  $80.3 \text{ kgf/cm}^2$  であり、その比は 1/7.45 であった。その際の

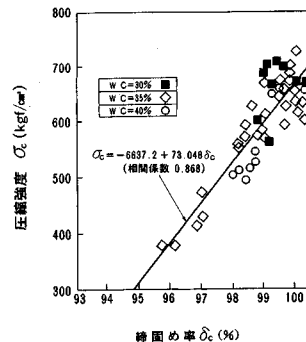


Fig. 6 Relationship Between Degree of Compaction and Compressive Strength.

単位体積重量より算出した締固め率は圧縮供試体, 曲げ供試体で 99.0%, 97.4% であり, 曲げ供試体の締固め率は小さくなっている。圧縮強度供試体の締固め率を曲げ供試体と同じとして圧縮強度を推定すると 486 kgf/cm<sup>2</sup> となり, その際の曲げ強度との比率は 1/6.1 であった。

(3) 実験結果の結論

以上の結果から, 実工事における締固め機械および締固め方法に適した RCCP コンクリートの修正 VC 値と締固め率との関係を把握すれば, 所要の品質が得られる配合設計を室内試験によって実施できる可能性があることがわかった。

3. 現場施工実験

(1) 施工実験の概要<sup>11)</sup>

施工実験は技術研究所の構内舗装として約 520 m<sup>2</sup> を対象に実施したもので, 舗装厚さは 15~25 cm とした。RCCP の施工方法は, 練り混ぜたコンクリートをダンプトラックにより運搬し, ペーパーに積み替え, ペーパーは連続的に道路の形状(厚さおよび幅)に敷きならし, タンピングおよび加圧振動により締め固める(以後, 一次転圧と称す)。今回使用したペーパー(TITAN 411)は最大級の締固め能力をもつものである。次に振動ローラによって転圧(二次転圧)を行うが, 無振 2 回転圧を行った後に, 有振で 4~10 回の転圧を行った。振動ローラには多くの機種があるが, 今回の実験では 2 種類を使用した。転圧回数に伴って締固め程度を把握するために,  $\gamma$  線密度計による密度測定を行った。最後の表面仕上げとして, タイヤローラや, 特殊なローラ(前後方に振動し, 鉄輪はゴムでカバーしたもの)の使用を検討したが, 予備実験から, 表面状態の仕上げが良好な後者 TS-150 を使用することにした。

仕上げ直後の状態はダンプトラックが通過してもほとんどタイヤの後が残らない程度となった。施工に要した時間は 1 層の場合には練り混ぜ後 1.5 時間以内に完了し, 2 層施工の場合には, 約 2.5 時間を要した。修正 VC 値の測定は, 練り混ぜ後 30 分以内に行った。

締固め完了後は, 1 週間養生マットを用いた散水養生を行った。なお, コンクリートの施工に先立ち, 路盤はセメント安定処理を行ったが, K 値は 16.2~27.4 kgf/cm<sup>3</sup> であった。

(2) 因子と水準

室内実験の結果を踏まえ, 施工実験では, 配合およびコンシステンシーを変えたコンクリートを各種施工条件(ローラの種類, 転圧回数, 1 層の厚さ)のもとで施工し, 実施工コンクリートから  $\phi 10$  cm のコアおよび 10×10×40 cm のはり供試体を採取し, 単位体積重量, 圧

縮強度, 曲げ強度等を調べ, 一連の室内試験結果および品質管理用供試体による試験結果と比較検討を行った。実験に使用した施工機械, 実験で取り上げた因子および水準を Table 2 に示す。

(3) コンクリートの使用材料および配合

コンクリートは施工場所から運搬時間 5 分の距離にあるレデーミクストコンクリート工場に二軸ミキサで全材料投入後 90 秒間練り混ぜた。Table 3 に使用材料および配合とともに施工時に採取したコンクリート試料についての品質試験結果を示した。

(4) 施工実験結果および検討

現場採取供試体は, 材令 5 日で 1 条件から圧縮 ( $\phi 10 \times 20$  cm), 曲げ供試体 (10×10×40 cm) とともに各 3 本採取し, 試験材令までの標準養生して強度試験を行った。なお, 材令 5 日までの平均気温は 9.2~14.8°C であった。現場採取曲げ試験用供試体は, 長手方向を道路縦断方向として道路表面から 10 cm 深さで切り取り, 道路表面を載荷面とした。

a) 目視による施工性の評価

①  $\beta=1.35\sim1.70$  ( $s/a=35\sim42\%$ ) の範囲では, ダンプトラックの運搬から, ペーパーの敷きならし時に, 問題となるような粗骨材の材料分離はみられなかった。

② 修正 VC 値 40 秒程度以下のコンシステンシーでペーパーによる敷きならしを行うと, コンクリート表面の横断方向に 5~10 cm おきに深さ 1 cm, 長さ 30 cm 程度の, 引きずりによる表面ひびわれが多くみられた。修正 VC 値 40~98 秒では, 表面ひびわれは減り施工性は良いと思われた。なお, 生じたひびわれは振動ローラ N 3 R による締固めにより, 外観上はほとんど消滅させることができた。

b) 一次転圧および二次転圧によるコンクリートの締固め率

一次転圧による締固め効果および二次転圧の転圧回数

Table 2 Test Program.

検討内容および因子		水 準	
コンシステンシーと施工性		修正 VC 値 15秒~98秒 (40~150 秒)	
配合条件が実施工コンクリートの品質におよぼす影響		$\alpha=1.18\sim1.45$ (1.09, 1.24) $\beta=1.35\sim1.70$ (1.00, 1.59, 1.44)	
施工内容	敷き均し	施工幅員 3.0~7.0 m	
		施工速度 1m/min 振動数: タンパ 1400rpm, バイブ 3600rpm (ダブルタンバ式)	
施工内容	敷き均し	20cm 1層	15+10cm 2層
		施工機械	
施工内容	二次転圧	N 3 R	
		CC-4	
施工内容	転圧回数	自重 8.0ton	自重 18.0ton
		起振力 5.5ton	起振力 6.9ton
施工内容	転圧回数	締固め幅 145cm	締固め幅 168cm
		振動数 3100rpm	振動数 2100~2520rpm
施工内容	転圧回数	無振 2	無振 2
		有振 6~10	有振 4~8
施工内容	仕上転圧	施工機械 TS-150	
		自重 8.5ton	
施工内容	仕上転圧	締固め幅 228cm	
		振動数 2	

Table 3 Materials, Mix Proportions and Test Results.

配合	G <sub>max</sub> (mm)	W/C (%)	s/a (%)	修正 VC値 (秒)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					α	β	曲げ強度供試体		圧縮強度供試体		曲げ強度 圧縮強度
					W	C	S	G	A <sub>d</sub>			締固め率 平均 (%)	強度 平均 (kgf/cm <sup>2</sup> )	締固め率 平均 (%)	強度 平均 (kgf/cm <sup>2</sup> )	
a <sub>1</sub>	20	38.4	41.0	24	117	297	825	1209	0.25	1.33	1.70	98.1	73.9	98.2	473	1/6.4
a <sub>2</sub>	20	32.6	41.6	98	98	301	858	1225	0.25	1.18	1.66	—	—	96.5	425	—
b	20	41.3	38.3	44	189	264	788	1296	0.25	1.28	1.48	98.5	79.3	98.3	489	1/6.2
c <sub>1</sub>	20	48.6	35.2	16	122	246	719	1347	0.25	1.45	1.37	98.1	67.8	99.1	462	1/6.8
c <sub>2</sub>	20	44.0	35.7	42	109	248	739	1359	0.25	1.32	1.35	98.1	76.6	98.4	575	1/7.5
d	20	48.5	38.6	64	104	257	802	1301	0.25	1.21	1.47	97.3	78.5	98.2	553	1/7.0
平均値												98.2	75.2	98.4	496	1/6.8

セメント：普通ポルトランドセメント (M社製、比重3.16、粉末度3250cm<sup>2</sup>/g)

粗骨材：佐原 上の原産ブレンド、粗粒率2.79、比重2.60、単位容積重量1.72kg/ℓ、空隙率33.0%

細骨材：八王子産砕石、粗粒率6.58、比重2.65、単位容積重量1.56kg/ℓ、空隙率40.2%

混和剤：減水剤ポリリスⅧ (日曹マスタービルダーズ社製) をセメント量の0.25%使用

と締固め効果に関して、Table 3のd配合についてγ線密度計による密度試験を行い検討した。測定結果はFig.7に示すとおりである。一次転圧により、すでかなりの締固め効果があり、その後二次転圧の回数が増加するに従って密度は増加するが、有振転圧8回以上になると、ほとんど変化はなくなる。機種の違いによる差は、CC-41の場合が若干締固め効果が高いようであるが、8回以上の転圧によって差がなくなっている。

c) 締固め率

配合および施工法別の現場採取供試体の締固め率をTable 4に示したが、設定締固め率98%以上を満足したのは16ケース中コアで8ケース、はり供試体で5ケースであった。

(5) 締固め率と強度

a) 圧縮強度

コアによる締固め率と圧縮強度の関係を、Fig.8, Table 4に示す。1層転圧の平均の締固め率は98.0%で、品質管理用供試体はTable 3に示すように98.4%であった。圧縮強度の平均値は434 kgf/cm<sup>2</sup>で品質管理用供試体の91.0%であった。2層転圧では、強度が低下する傾向にあり、特にd配合にその傾向が著しい。2層に分けて施工した場合、単に締固め率への影響だけでなく、強度に悪影響を与える何らかの原因があるものと考えられる。これに関しては、5.においても触れる。

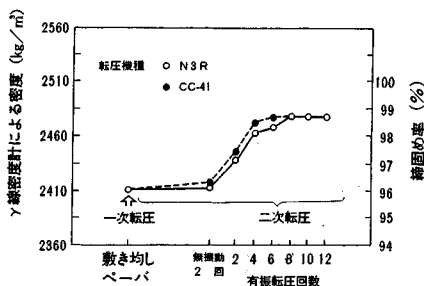


Fig.7 Relationship Between Passes of Vibrating Roller and Degree of Compaction.

Table 4 Test Results.

層	施工	配合	施工機種・転圧回数		設の曲げ強度供試体			コアの圧縮強度供試体		品質管理用供試体			
			上層	下層	締固め率平均 (%)	強度平均 (kgf/cm <sup>2</sup> )	標準偏差 (kgf/cm <sup>2</sup> )	強度平均 (kgf/cm <sup>2</sup> )	コア/標準偏差 (%)				
一層	20cm	a	N3R	2+6	—	96.6	47.1	63.7	98.4	469	97.0	5/9.7	
				2+8	—	95.7	39.7	—	95.0	315	74.1	1/3.9	
			b	CC41	2+6	—	98.5	52.9	66.7	98.7	408	101.8	8/4.4
					2+4	—	95.5	40.4	50.9	97.5	440	93.9	1/11.0
				N3R	2	—	97.3	37.1	46.8	97.3	390	67.5	1/3.9
					2+10	—	97.3	54.5	68.7	98.4	488	98.8	1/11.0
		c	N3R	2+6	—	97.9	48.4	61.0	98.0	510	104.3	10/5.5	
				2+8	—	98.0	47.0	58.3	98.2	452	92.4	1/9.6	
			CC41	2	—	96.1	55.9	82.4	96.6	431	93.3	1/7.7	
				2+8	—	98.3	56.9	83.9	99.2	414	89.6	1/7.3	
			平均値			97.3	48.0	64.8	98.0	434	91.0	4/8.0	
			二層	10cm	a	N3R	2+4	—	97.9	54.9	71.5	97.6	311
2+10	—	98.1					45.1	58.9	97.9	325	96.5	1/7.2	
d	CC41	2+4			—	98.2	53.1	69.3	99.0	441	78.7	8/3.3	
		2+4			—	98.7	31.6	40.3	98.2	221	40.0	1/3.0	
	N3R	2+10			—	94.3	34.2	43.6	95.8	256	46.3	1/7.5	
		2+10			—	96.2	48.5	63.1	96.7	321	58.0	1/6.5	
平均値				96.4	44.7	57.8	97.0	313	55.3	1/9.0			

b) 曲げ強度

1層転圧では、採取はりの締固め率の平均値は97.3%でコアの値よりやや小さくなっている。曲げ強度の平均は48.0 kgf/cm<sup>2</sup>であり、圧縮強度の1/9.0であった。この値は品質管理用供試体では1/6.8であり、かなり現場施工のコンクリートの曲げ強度は低くなることを示している。この場合の品質管理用供試体では締固め率の平均値は98.2%、曲げ強度は75.2 kgf/cm<sup>2</sup>であった。2層の場合、強度は低下する傾向にあるが、ここではデータも少なくばらつきが大きいので検討外とした。

(6) コンシステンシーと締固め率

コアの締固め率と修正VC値の関係を、Fig.9に示す。これより、修正VC値が著しく締固め率に影響を与えることが明らかである。実施工における締固め率の目標をどの程度とするか、一概に決めるのは困難と考えられるが、Fig.8より、締固め率が97%以下では強度低下も大きいので、仮に締固め率の基準を97%以上とすると、敷きならし時の修正VC値は50秒程度以下とする必要がある。目視観察の結果では、敷きならし時の修正VC値が40秒以下では、表面ひびわれが増加すること

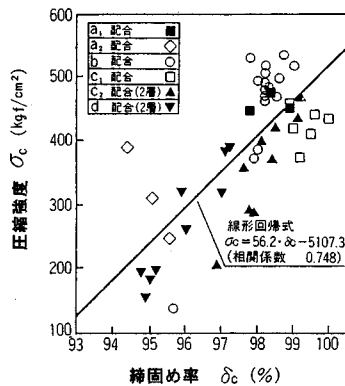


Fig. 8 Relationship Between Degree of Compaction and Compressive Strength of Cores.

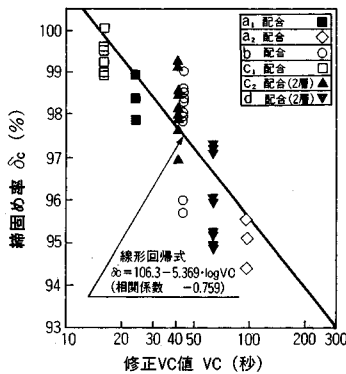


Fig. 9 Relationship Between Revised VC-value and Degree of Compaction.

から, 施工性の良い修正 VC 値は 40 秒以上であり, 今回の施工機械および施工方法では, 締固め率と施工性を満足する修正 VC 値は 50 秒前後と判断された。

#### 4. 配合条件がコンシステンシーに与える影響に関する検討

前章までの検討結果から, フレッシュコンクリートのコンシステンシー (修正 VC 値) が施工性および硬化コンクリートの品質に大きく影響を与えることがわかったので, 材料および配合の各種条件の違いがコンシステンシーに与える影響を定量的に把握することとした。

##### (1) 実験計画法による実験

###### a) 要因と水準

要因と水準を Table 5 に, 直行表 L 27 の割付け表を Table 6 に示した。実験で取り上げた要因と水準は, RCD 工法での実績のほか, 前章までの実験, 本論文記載の実験に先立ち実施した予備的な室内および現場実験, 海外および国内での施工実績の配合を参考に選定したものである。W/C は 30~50% の範囲としたが体積

比で表わすこととし, (W/C) vol. と表記した。これは, 比重の異なる混合セメントを使用する場合にも適用範囲を拡張できることが RCD コンクリートで確かめられていることによる<sup>5)</sup>。

###### b) 使用材料

セメント: N社製普通ポルト, 比重 3.16, 粉末度 3 250 cm<sup>2</sup>/g

混和剤: リグニン系遅延型 AE 減水剤

粗骨材: 津久井産砕石, 最大寸法 20 mm

細骨材: 大井川産川砂

微粒分: 石灰石粉, 比重 2.70, 粉末度 3 500 cm<sup>2</sup>/g

なお, 実験では石粉は細骨材の一部とみなしたので, 粒度の異なる 3 種類の細骨材を使用したことになる。その際の単位容積重量および実績率を, Table 7 に示した。

###### c) 実験方法

練りまぜは, 20±2°C の温度条件で 100 l 水平 2 軸ミキサを用い, 全材料投入後 90 秒間練りまぜた。

###### d) 実験結果

###### ① 分散分析結果

分散分析結果を Table 8 に, 各要因の効果の推定値を Fig. 10 に示す, この結果, (W/C) vol., α, β は有意水準 1% で有意となり, 寄与率も大きくなっている。各要因の交互作用は有意ではなく, 有意とされた (W/C)

Table 5 Factor and Levels.

要因	水準		
	1	2	3
α	1.3	1.5	1.7
β	1.2	1.6	2.0
水セメント体積比	1.575	1.260	0.945
(水セメント比)	50%	40%	30%
微粒分置換率	0%	4%	8%

Table 6 Assignment.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
要因	B	D	B × D	B × D	A	A × B	A × B	A × D	C	A × D	A × D	●	●
(要因分)	(水セメント体積比)	(水セメント体積比)	(水セメント体積比)	(水セメント体積比)	(α)	(α)	(α)	(α)	(β)	(β)	(β)	(β)	(β)

Table 7 Properties of Aggregate.

種類	比重	吸水率 (%)	単重 (kg/m <sup>3</sup> )	実績率 (%)	F	M	備考
川砂	2.61	1.27	1,830	70.1	2.63		微粒分 0%
川砂	2.61	1.27	1,850	70.8	2.52		微粒分 4%
川砂	2.61	1.27	1,870	71.7	2.42		微粒分 8%
砕石	2.61	1.27	1,590	60.1	6.80		5~20mm

Table 8 Results of Valiance Analysis.

要因	平方和	自由度	分散	F	寄与率
濃水分 (B)	0. 08	2	0. 04▲	—	—
(W/C) vol (D)	4. 26	2	2. 13	27. 53**	49. 7
$\alpha$ (A)	1. 45	2	0. 72	9. 33**	15. 7
$\beta$ (C)	1. 00	2	0. 50	6. 43**	10. 2
(B) × (D)	0. 28	4	0. 07▲	—	—
(A) × (B)	0. 05	4	0. 01▲	—	—
(A) × (D)	0. 50	4	0. 12▲	—	—
誤差	0. 64	6	0. 11	—	24. 4

注) \*\*有意水準1%, ▲誤差項にアタリング

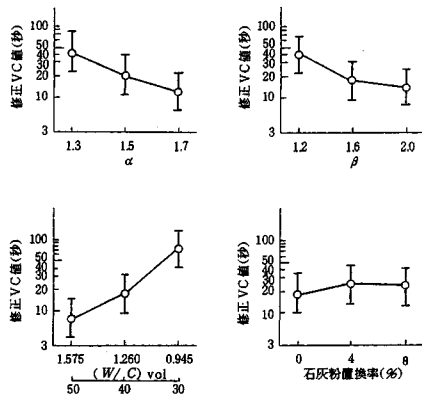


Fig.10 Effects of Each Factor.

vol.,  $\alpha$ ,  $\beta$  の効果はいずれも RCD の場合と同様に修正 VC 値の対数値とほぼ直線関係にあることがわかる。また、微粒分量が有意ならなかったことは、微粒分量の増加に伴う影響は、細骨材の空隙率の減少ととらえて取り扱えば良いことを示している。

② 重回帰分析結果

分散分析の結果、有意と判断された要因について、それらの効果を定量的に把握するために修正 VC 値の対数を目的変数として重回帰分析を行い式 (3) を得た。式 (3) の寄与率  $R^2$  は 0.782 であった。

log (修正 VC 値)

$$= 6.26 - 1.53(W/C) vol. - 1.41 \alpha - 0.55 \beta \dots \dots (3)$$

なお、RCD コンクリートの場合、コンシステンシーに対する各要因の効果の回帰式は、式 (4) で表わされる。この式は粗骨材 2 種、細骨材 3 種、セメントには混和材としてフライアッシュ等を用い、水結合材比が 60~90% の配合に関し、実験計画法で L27 の直行表を用い 2 回実施した実験結果から得られたものである<sup>5)</sup>。

log (修正 VC 値)

$$= 7.04 - 0.53(W/C) vol. - 2.66 \alpha - 0.55 \beta + X \dots \dots (4)$$

ここで、X はその他の要因の影響で決まる値であるが、その影響度は小さい。式 (3), (4) から、RCCP の場合は RCD に比較してコンシステンシーは (W/C) vol. の影響を強く受け、 $\alpha$  の値に鈍感であることを示

している。このことは、対象としている W/C の水準が RCCP では 30~50%, RCD では 60~90% であり、コンシステンシーに対して RCCP ではペーストの硬さが支配的要素であり、RCD では比較的やわ練りのペーストであることから、その量に支配されることを意味している。

e) 実験結果の検証

式 (3) の妥当性を検証するため、施工実験で適切なコンシステンシーと判断された修正 VC 値 40 秒を目標として、 $\beta=1.6$ , 0.15 mm 以下の微粒分量 0~8% の細骨材、W/C=30~50% の条件で 6 種類の配合を練り混ぜた。その結果は省略したが、いずれも修正 VC 値は 40±10 秒の範囲に入ることを確かめた。

(2) 適用範囲の拡張

式 (3) を得た実験で使用した粗骨材は 1 種類であり、細骨材も 1 種類で微粒分量を添加しただけであり、式 (3) の適用範囲に限界がある可能性がある。このため、これまでに著者らが実施した種類の異なる骨材を使用して試験したすべての 127 配合について、目的変数を修正 VC 値の対数とし、説明変数の選択は寄与率の大きくなる組合せを選んで重回帰分析を行った。

127 配合の使用骨材の物理的性質の範囲を Table 9 に示す。なおコンクリートの練り上り時の温度は 14~32°C の範囲であった。

重回帰式は次のとおりであり、実験計画法での結果との差は少なく、寄与率  $R^2$  は 0.804 であった。

log (修正 VC 値)

$$= 6.25 - 1.49(W/C) vol. - 1.47 \alpha - 0.50 \beta \dots \dots (5)$$

式 (5) は、前述の式 (3) と比較して、定数項および回帰係数にほとんど差がなく、省略したが残差ヒストグラムの分布にも特に癖はなく、寄与率も大きいことから、式 (5) により、より広い範囲の条件下でのコンシステンシーの推定が可能であると考えられる。

5. 圧縮強度の推定

舗装コンクリートでは、本来曲げ強度について検討すべきであるが、本研究でのデータが少なく品質のばらつきも大きいこともあり、ここでは圧縮強度のみについて検討した。曲げ強度については、前述のように、圧縮強度との比率が品質管理供試体の場合に比較して、実施工では、かなり低下することを考慮して推定する必要がある。今後の実工事でのデータの蓄積に待つところが多い。

Table 9 Properties of Aggregate.

	種類	比重	粗粒率	実積率 (%)
細骨材	川砂、砕砂	2.59~2.64	2.53~2.98	66.7~71.6
粗骨材	川砂利、砕石	2.63~2.72	6.43~6.87	59.0~65.7



(1) 品質管理用供試体の圧縮強度の推定

コンクリートの圧縮強度は、締固め率および  $C/W$  の影響を大きく受け、締固め率は  $\alpha, \beta, W/C$  の影響を受ける。これらの各要因を含めた多くの要因の効果について定量的に把握するため、これまで室内実験で試験した48種類の配合のデータについて重回帰分析を行った。説明変数の選択は、寄与率が大きくなる組合せを選んで実施した。各変数の統計量を Table 10 に示す。説明変数として締固め率と  $C/W$  を選択することにより次式が得られ、そのときの寄与率  $R^2$  は 0.808 であった。

$$f_{28} = -573 \times 10 + 59.1 \delta_c + 160 C/W \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 $f_{28}$  : 材令 28 日圧縮強度 (kgf/cm<sup>2</sup>)

$\delta_c$  : 供試体締固め率 (%)

$C/W$  : セメント水比

ここでは、省略したが、残差のヒストグラムは特に癖もなく、寄与率も大きいことから、圧縮強度の推定が実用上可能と考えられる。

式 (6) の  $\delta_c$  を空隙率 ( $A_v$ ) で表わすと、 $\delta_c = (100 - A_v)$  であるから、式 (6) は式 (7) で表わされる。

$$f_{28} = 180 - 59.1 A_v + 160 C/W \dots\dots\dots (7)$$

この式の適用性について検討するために豊福ら<sup>3)</sup>の提案と比較検討することとした。豊福らは RCCP コンクリートの圧縮強度はセメント空隙比 ( $c/v$ ) に支配されるとし、次式を提案している。

$$f_{28} = 75.8 + 417.98 c/v \dots\dots\dots (8)$$

この実験式は、 $A_v = 4.6 \sim 9.6 \%$ 、 $W/C = 36.7 \sim 45.8 \%$  の範囲の実験から得られたものであり、著者らの提案した式 (7) は、 $A_v = 5.0 \%$  以下、 $W/C = 26 \sim 55 \%$  での実験結果である。両式を豊福らの実験のデータおよび Table 3 に示す著者らの配合および強度試験データに基づき比較した。その結果、豊福らの実験データで  $A_v = 4.6 \%$  の場合には、式 (7)、(8) での推定値は、ほぼ等しくなったが、 $A_v$  が 7.0, 9.4 % の場合には、式 (7) での推定値は非常に小さく、実測データと大幅に異なっている。著者らのデータでは、 $A_v$  は 3.5 % 以下で非常に高強度であり、式 (7) での推定値は実測値と良い一致をみたが、式 (8) での推定値は実測値よりも 50 ~ 200 kgf/cm<sup>2</sup> 低い値となっている。したがって式 (7) は空隙率  $A_v$  が 5 % 以下の場合、式 (8) は  $A_v$  が 4 % 以上の場合に適用すべき推定式であるといえよう。

(2) 実施工コンクリートの圧縮強度の推定

Table 4 に示した現場施工のコンクリートから採取し

Table 10 Statistical Value of Variables.

変数名	最小値	最大値	平均値	標準偏差
$C/W$	1.818	3.864	2.759	0.430
$\delta_c$	88.9	100.0	98.46	1.93
$f_{28}$	216.0	707.0	553.8	112.9

たコアの圧縮強度に関して式 (7) の適用性を検討する。

1 層施工では、配合条件および施工条件が異なる 10 条件でのコアの圧縮強度は 315 ~ 510 kgf/cm<sup>2</sup> の範囲で平均値は 434 kgf/cm<sup>2</sup> であるが、これらの値は、式 (7) での推定値は 81 ~ 123 % の範囲で、平均値は 98 % であり、前述の品質管理用供試体の圧縮強度の推定値が実測値の 99 % とほぼ同様である。

2 層施工では、6 条件でのコアの圧縮強度は 221 ~ 441 kg/cm<sup>2</sup> の範囲で、平均値は 312 kgf/cm<sup>2</sup> であるが、式 (7) での推定値の 76 ~ 91 % で平均値は 79 % であった。このことは、2 層施工はコンクリートの強度に悪影響を与える可能性があることを示していると考えられる。

6. 品質管理および配合修正

所要の品質の RCCP を確保するためには、前章までの検討結果を踏まえ、コンクリートの材料および配合の品質管理および品質が確保できない場合には、配合の修正を行う必要がある。その要点について以下検討する。

(1) コンシステンシー管理と修正方法

$\alpha$  および  $\beta$  の値は、コンクリートを構成する各材料の単位量が一定であっても、骨材の粒度、形状、等の変動に起因する実績率の変動によって変化する。 $\alpha$  および  $\beta$  の変化は修正 VC 値で表わされるコンシステンシーの変動につながるため、骨材の品質を一定に保つための管理が重要となる。実工事で骨材の品質を一定に保つための努力を払ったとしても、変動するものであり、その際には、提案した式 (5) を利用することにより、 $W/C$  を変更させることなく、 $\alpha$  および  $\beta$  の値を適切に選定することにより、所定のコンシステンシーを確保することが可能となる。単位水量のみを調整してコンシステンシーの管理を行うのは避ける必要がある。

なお、この方法は、骨材の供給源の変更や過去の工事実績の配合を参考に新たな工事での配合を決める際の骨材の品質の変化に伴う配合の修正方法を提案するものである。

(2) 強度管理と修正方法

品質管理用供試体による強度試験結果と施工された RCCP から採取した供試体による強度試験結果は同一配合であっても異なると思う必要がある。施工された RCCP の強度は、配合のほか、施工方法によって影響を受けるので、品質管理用供試体による配合の管理だけでなく、施工されたコンクリートの締固め率の管理が重要となる。所要の締固め率が得られず所要強度が満足できない場合には、①施工方法の改善、②修正 VC 値の低減、③  $C/W$  の増加、の対策を単独または組み合わせで実施することが必要となる。圧縮強度に関しては、

提案した式(7)または、豊福らが提案した式(8)を修正 VC 値の推定式(5)と併用し、配合を修正することが可能となる。

## 7. 研究結果のまとめおよび今後の課題

本論文の内容を要約すると次のようになる。

(1) RCD コンクリートで使用されている小型 VC 試験機を用いて、測定方法を若干修正することで、RCCP に用いられる超かた練りコンクリートのコンシステンシーを精度よく測定できる。

(2) 配合試験において、圧縮および曲げ供試体作成のための締固め方法として、RCD コンクリートで使用されている、振動タンパが利用できる。

(3) コンシステンシーとして、VC 試験機で測定される修正 VC 値は主に  $W/C$ 、細骨材の空隙に対するセメントペースト量の比率( $\alpha$ )、粗骨材の空隙に対するモルタル量の比率( $\beta$ )の影響を受け、骨材の粒度や形状等の品質の相違による影響は  $\alpha$  および  $\beta$  の考え方を配合に取り入れることにより考慮することができる。

(4)  $W/C$ 、 $\alpha$  および  $\beta$  を決めることによって修正 VC 値を推定できる回帰式を提案した。これは、品質管理にあたって、VC 値が変動した場合には、配合の修正方法を提案するものである。

(5) 修正 VC 値が小さいほど、締固めやすさの指標である締固め率は大きくなる。振動タンパで締め固めることにより圧縮強度試験用供試体は修正 VC 値を 100 秒以下にすれば締固め率は 97% 以上とすることができる。

(6) 実工事は、締固め能力の大きいペーバを用い、かつ、振動ローラで十分締め固めても修正 VC 値が 50 秒程度以下としないと締固め率 97% 以上は得られない。しかし、修正 VC 値が 40 秒以下となると、ペーバによるひきずり現象で、ひびわれが生じやすくなるので、実施工では修正 VC 値=40~60 秒程度が適切なコンシステンシーであると判断とされた。

(7) 配合試験における圧縮強度は主に  $C/W$  および締固め率に支配される。したがって  $C/W$  と締固め率がわかれば圧縮強度は推定できる。締固め率 95% 程度以上の場合の回帰式を提案した。

(8) 実施工された転圧コンクリートは、振動タンパで締め固めた品質管理試験用供試体よりも締固め率が低くなる傾向にあり、圧縮強度は低下するが、この場合も  $C/W$  と締固め率がわかれば同様に強度はほぼ推定できる。ただし、2層に分けて施工する場合には推定値よりかなり強度低下が生じるので配慮が必要である。

(9) 曲げ強度は室内試験においては、締固め率が圧

縮強度と同等であれば圧縮強度の約 1/6.1 となる。実施工コンクリートの曲げ強度は、1層転圧の場合の平均値で圧縮強度の 1/9.0 であり、2層転圧では、1層の場合よりもさらに絶対値が低下し、ばらつきが大きくなる。

(10) コンクリートの品質管理にあたっては、修正 VC 値で表わされるコンシステンシーの管理、 $\alpha$  および  $\beta$  に影響を与える骨材の実績率の管理が重要である。

以上の結果を踏まえ、主な今後の課題としては、①曲げ強度と圧縮強度の比率が室内試験または品質管理試験結果と現場施工されたコンクリートとの異なることの原因の解明および対策、②現場施工コンクリートの、より締固め率向上のための施工法および機械の開発、③対凍害性を検討するためのエントレインドエアの測定法、等が挙げられる。

謝 辞：当研究の実施にあたって、鹿島道路(株)の関係者および鹿島建設(株)桜井和美氏、岩原正樹氏に多大なご助力を頂いたことを記し、謝意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) 日本道路協会：転圧コンクリート舗装技術指針(案)、1990。
- 2) ACI committee 207, Roller Compacted Concrete ACI MANUAL OF CONCRETE PRACTICE, 1983, part 1.
- 3) 豊福俊泰・吉岡博幸：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，土木学会論文集，第 414 号/V-12, 1990 年 2 月。
- 4) 松本徳久・佐谷靖郎・志賀三智：RCD コンクリートの現場転圧試験，土木学会論文集，第 391 号/VI-8, 1988. 3.
- 5) 中原 康・横田慎一・平田重信：超かた練りコンクリートの配合の考え方とコンシステンシーについて，セメント技術年報，32 巻，1978 年。
- 6) 中原 康・平田重信：細骨材の微粒分が超かた練りコンクリートのコンシステンシーに及ぼす影響について，セメント技術年報，33 巻，1980 年。
- 7) 中原 康・重松和男・平田重信・秋山完幸：超かた練りコンクリートのコンシステンシーに及ぼす温度の影響について，セメント技術年報，34 巻，1981 年。
- 8) 中原 康・横田慎一・平田重信：超かた練りコンクリートの空気連行特性に関する基礎実験，セメント技術年報，34 巻，1981 年。
- 9) 中原 康・横田慎一・平田重信：振動ローラ締固めコンクリート工法の開発研究(その 1)，鹿島建設技術研究所年報，1977. 4.
- 10) (財)国土開発技術センター編集，RCD 工法技術指針(案)，平成元年 8 月，山海堂。
- 11) 中原 康・万木正弘・桜井和美・岩原正樹：RCCP 工法の開発研究，鹿島建設技術研究所年報，第 36 号，1988. 6. (1990. 10. 23・受付)