

# 振動締固め方式による透水性コンクリートの 配合設計法に関する研究

徳重英信<sup>1</sup>・佐伯 昇<sup>2</sup>・川上 洵<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 博士 (工学) 秋田大学講師 工学資源学部土木環境工学科 (〒010-8502 秋田市手形学園町1-1)

<sup>2</sup>フェロー 工博 北海道大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

<sup>3</sup>フェロー 工博 秋田大学教授 工学資源学部土木環境工学科 (〒010-8502 秋田市手形学園町1-1)

コンクリートの多様性を追求する様々な研究が行われてきているなかで、多孔質コンクリートに対する開発および応用についての研究も活発になってきている。本研究は多孔質コンクリートの一種である透水性コンクリートの振動締固め方式によって製作する場合の配合設計法を論じたものである。透水性コンクリートは用いる環境に応じてその透水係数ならびに強度などを配合によってコントロールすることが一般に必要である。本研究では、設定した透水係数と強度を得るための配合設計法を構築するために、空隙を透水性に関与する連続空隙、透水性に関与しない閉そく空隙およびマトリックス中の気泡の3種類に分類し、セメントペーストと骨材の容積比、骨材の実積率などを用いて、配合諸量を決定する配合設計手法の構築を試みた。

*Key Words* : water permeable concrete, mix proportion, coefficient of permeability, vibrating compaction, continuous void, void ratio's strength theory, absolute volume ratio of aggregate, cement paste - aggregate volume ratio

## 1. はじめに

コンクリートに多孔性を持たせることは、排水、吸音、吸湿、軽量化、断熱性などの多様性を与えることになる。多孔質コンクリートは、建築で外壁材料として用いられるALC、発泡剤、起泡剤を用いたコンクリート、および低水セメント比のセメントペーストと粒径の分布をGap-gradeとした骨材を用いてつくる透水性コンクリート(あるいはNo-Fines-Concrete)の3種類に大きく分けられる。

多孔質コンクリートの適用例は、前述したものに加えて、近年研究が盛んになってきているエココンクリートなど様々であるが、本研究では、多孔質コンクリートを人間環境と自然環境の接点として、より自然環境と融和できる材料として、その透水性能に着目した。透水係数は範囲が重複する部分もあるが概ね、ALC( $10^7$ cm/s前後) < 気泡コンクリート ( $10^7 \sim 10^2$ cm/s) < Gap-gradeの骨材を用いた透水性コンクリート ( $10^2 \sim 10^0$ cm/s)の順である。なお、一般のコンクリートの透水係数は $10^{13} \sim 10^9$ cm/s程度である。

対象としているものは、側溝、舗装、河川、海岸構造物などであり、雨水を地下に還元し、植物の生育に適應できる周辺環境づくり、また血形側溝などでの小動物、

昆虫の保護や生態系の遮断の防止をはかること等を目的としている。このために、対象とするコンクリートの透水係数を $10^0 \sim 10^2$ cm/sのオーダーにして自然の土や砂に近いものも造り、自然環境の多様性に対応できるものを開発することを目的とし、コンクリートを多孔質にすることによって透水性とする透水性コンクリートを検討の対象とした。

透水性コンクリートの研究はV.M.Malhotra<sup>1)</sup>や玉井<sup>2)</sup>などの研究以降、水口ら<sup>3)</sup>による研究など特に最近活発である。また配合や強度に関する研究<sup>4)</sup>も近年はじまっており、CO<sub>2</sub>の吸収<sup>5)</sup>や緑化コンクリートとしての適用に関する研究<sup>6)</sup>もある。透水性コンクリートは工場製品としても製作されているが、これまでの研究のうち配合に関しては経験的な方法などによってなされており、配合設計法を系統的に表している文献は見あたらない。このようなことから、本研究では透水性コンクリートの系統的な配合設計法を確立することを目的とした。配合設計のプロセスは一般的なものを目指しているが、配合諸量を決定する際に用いる数値は練混ぜ方法や締固め方法によって異なることを留意しておく必要がある。この論文では骨材配合をGap-gradeとし、振動締固め方式によって造る透水性コンクリートを対象としている。

今後、自然環境にあわせてコンクリートの透水係数の

設定が必要となる様々な使用ケースが増えてくると考えられ、透水係数を設定することが可能な配合設計方法を明らかにしておくことは必要なことである。

透水性に着目すると、透水性コンクリートの透水係数に配合上で影響を及ぼす主因の一つとして、骨材の影響があり、粒径、粒形、粒度等が深く関わってくることが考えられる。これらは、透水性に深く関与する連続空隙を形成する重要な因子の一つとなる。また、骨材を固定するペーストの粘性等の性質、量は透水性および強度に対する影響が大きいと考えられる。

本研究では使用目的に必要な透水係数、強度を得るために、連続空隙量およびセメントペーストと骨材の容積比を主にパラメータに取り、透水性コンクリートの製作に用いる振動締固めによって得られる骨材の実積率を求める手法を構築し、配合諸量を算定する配合設計を組み立てている。

## 2. 実験概要

### (1) 使用材料と諸係数を決定するための配合

本研究で用いたセメントは普通ポルトランドセメント(比重3.16)、早強ポルトランドセメント(比重3.16)、骨材は沙流川産6号砕石(比重2.79、粒径13mm~7mm、F.M.6.04、吸水率1.27%)または勇払産骨材(比重2.69、粒径7mm~0.8mm、F.M.6.47、吸水率1.36%)を骨材として用い、鶴川産砂(比重2.76、粒径5mm以下、F.M.2.73、吸水率1.41%)を細骨材として使用した。また、混和剤としてアミノスルホン酸系高性能AE減水剤、AE剤を用いた。

配合の組合わせは表-1に示すようにW/Cが0.22~0.30、粗骨材の最大寸法が13mm(6号砕石)のものについては $s/a=0$ 、最大寸法7mm(川砂利)のものについては $s/a=0\sim0.40$ とし、セメントペースト( $p=w+c$ )と単位骨材量( $a$ )の容積比( $\xi=p/a$ )は、振動締固め時にセメントペーストが分離を起こしてたれ落ちない程度の値として0.25~0.36の範囲で行った。この配合に用いたセメントペーストのコンシステンシーの評価として、JIS R 5201に準じてフロー試験を行った。本研究で用いた骨材粒径の範囲では、表-2に示すフロー値のセメントペーストを用いて $\xi=0.25\sim0.36$ とした場合、セメントペーストの材料分離によるたれはほとんどなく、透水性コンクリート製作のために適切なコンシステンシーであった。

### (2) 製作方法

#### a) 練混ぜ方法

透水性コンクリートの練混ぜ方法は、大きく分けて2種類になる。ひとつは、予め骨材以外のものの練混ぜを

表-1 実験に用いた配合諸量

W/C	Gmax	s/a	$\xi$
0.22,0.25	13mm	0	0.25,0.28,0.30
0.22,0.25,0.26 0.27,0.28,0.30	7mm	0~0.40	0.25~0.36

表-2 フロー試験結果

W/C	0.22	0.25	0.26	0.27	0.28	0.30
フロー値	105	130	141	150	153	165

行う、すなわちセメントペーストを先に作り、その後骨材を加えて練混ぜを行うものである。もうひとつは、セメント(混和材を使用する場合は混和材とセメントを予めよく混ぜ合わせたもの)と骨材をよく空練りし、その後水(混和剤を含む)を添加し再び練混ぜを行う。前者では、セメントペーストを製作する過程においてミキサを高速で使用することにより耐凍害性が向上するという結果が報告されている<sup>9)</sup>。この方法では、ペーストミキサとコンクリートミキサの少なくとも2種類のミキサが必要となる。本研究では後者の方法を採用した。この場合一台のミキサでよく、またこれまでに作製実績があるからである<sup>9),10)</sup>。

練混ぜ時間は使用するミキサによって異なってくるので、予め試験練りによって練混ぜ時間を決定することが必要である。本研究では水平2軸強制練りミキサを用いて練混ぜを行った。まず、骨材の周囲にセメントを十分かつ均等にまぶすため骨材とセメントを投入し、試験練りにより目視で十分にセメントと骨材がまぶされるまでの時間を測定した。1分経過においては均一に骨材表面にセメントがまぶされておらず、さらに0.5分かけることにより均一にまぶされていることが観察されたので、以後空練りを1.5分とした。次に予め混和剤と混ぜた水を投入し、3分練混ぜを行った後排出した。

#### b) 締固め、成形ならびに養生

透水性コンクリートの製作には特に締固めが重要であり、振動台式による外部振動締固めと加圧による圧縮成型を行う写真-1に示す機械を用いて行った。この機械は、振動台と、振動を併用できるプレス機からなるものである。性能を表-3に示す。この機械を用いた製作方法の検討を $\phi 10\text{cm} \times 20\text{cm}$ の供試体を用いて行い、圧縮強度試験結果ならびに材料分離等の結果より検討を行い、その結果3層各3秒程度の振動のみを行い、直ちに加圧成形を行う方法を採用した。プレス機の加圧力は種々検討した結果、加圧締固め時に骨材が破壊しない程度の圧力として、予備試験により0.6~0.7MPaとした。

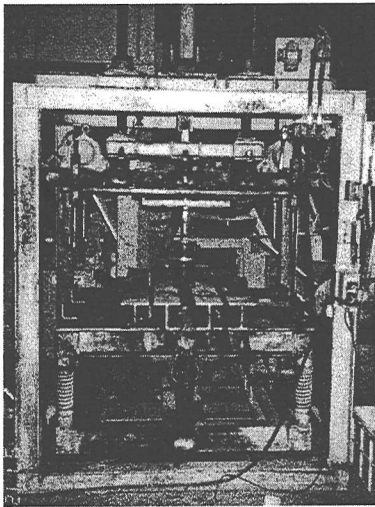


写真-1 透水性コンクリート製作機械  
(振動台と振動機付き加圧版)

表-3 透水性コンクリート製作機械の振動性能

	振動数 (Hz)	加速度 (m/s <sup>2</sup> )	振幅 (mm)
上部バイブレータ	50×2機	30	0.3
下部バイブレータ	50	30	0.3

また、今回の実験範囲の透水性コンクリートにおいて、振動締固めと圧縮成型を行うことにより、成型後の即時脱型が可能であった。一般に即時脱型を行うためには、骨材の安息角と粘着力が問題となり、これを考慮して即時脱型できる状態を確保することは、透水性コンクリートの製作において重要な要素の一つである。即時脱型できる状態では振動締固め時の材料の分離がなく、透水性と関係のある空隙の連続性が保たれる。このような連続空隙の確保とコンシステンシーの関係をレオロジーから整理している研究<sup>23)</sup>もみられる。ここでは経験的判断により即時脱型を行った

養生は、1日湿潤養生の後、水中養生を行った。

### (3) 配合設計のための諸係数の決定試験

配合設計のための諸係数を決定する試験方法について述べる。

#### a) 透水係数の測定

透水係数:  $K$ (cm/s)の測定は、 $\phi 10 \times 20$ (cm)の塩化ビニルパイプに打設したものを透水試験用供試体として用い、JISの土の透水試験方法<sup>10)</sup>に準じて行い、養生後に定水位試験によって測定を行った。図-1は試験方法の模式図である。透水係数 $K$ (cm/s)は式(1)で求められる。 $L$ は供試体長(20cm)、 $h$ はDarcy則の適用が可能な範囲から、水位差

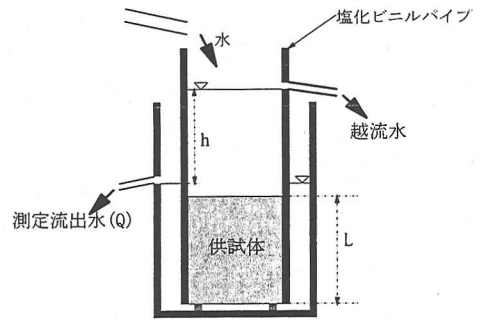


図-1 透水係数の試験法(定水位試験)

20cmとし、 $A$ は供試体断面積(78.5cm<sup>2</sup>)、 $Q$ は流出水量(cm<sup>3</sup>)、 $t_2-t_1$ は測定時間(s)である。

$$K = \frac{L}{h} \times \frac{Q}{A(t_2 - t_1)} \quad (1)$$

#### b) 連続空隙率の測定

連続空隙率 $V_w$ の測定は、透水試験に用いているものと同じ供試体を用いて行った。養生後に室内で気乾状態にした供試体を10sec程度かけてゆっくり水中に没入し、10sec程度振動を与えて気泡を追い出し、水中重量と気乾重量から水に置換された空隙量を求め、その空隙を連続空隙とした。

#### c) 骨材実積率の測定

骨材の実積率 $G_b$ は、前述した供試体製作の締固めの方法と同じ手法で、 $\phi 10\text{cm} \times 20\text{cm}$ の型枠に細骨材と粗骨材をともにいれて締固めを行い、単位容積重量と比重より求めた。

## 3. 透水係数と配合設計に関する諸量との関係

### (1) 配合設計における1m<sup>3</sup>中の諸量

一般にコンクリートの配合設計をする場合、図-2に示すように、コンクリートの1m<sup>3</sup>中の各々の材料の容積は、セメントの容積、水の容積、粗骨材の容積、細骨材の容積と空気量から構成され、次式のように表される

$$c+w+g+s+A=1 \text{ (m}^3/\text{m}^3) \quad (2)$$

ここで、 $c$ :セメントの容積(m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)、 $w$ :水の容積(m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)、 $g$ :粗骨材の容積(m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)、 $s$ :細骨材の容積(m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)、 $A$ :空気量(m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)である。

透水性コンクリートの場合も1m<sup>3</sup>を基本として考えると、これまでの空気量とは別に空隙率の考え方を取り入

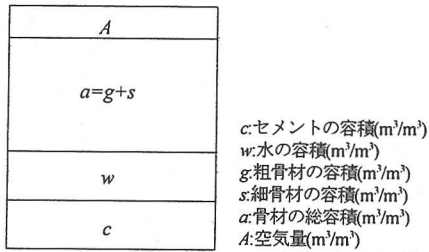


図-2 一般のコンクリート1m³の構成

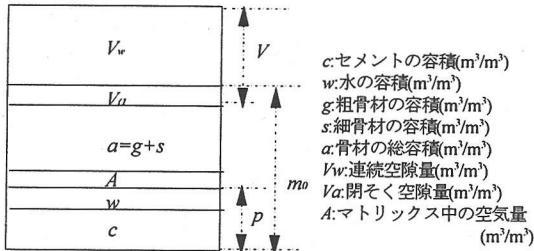


図-3 透水性コンクリート1m³の構成

れた方が判断しやすい。図-3のように空隙 $V$  ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ ) は、透水性に直接関係する連続空隙 $V_w$  ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ ) と、透水性に関与しない閉そく空隙 $V_a$  ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ ) に分けられ、 $V_w$ 、 $V_a$ 、 $A$ の状態を模式図で表すと図-4の様になる。さらにセメントペースト分 $w+c=p$  ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ ) と表記し、 $p$ の中にある空気量を $A$  ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ ) とする。透水性コンクリートの1 $\text{m}^3$ 中の構成は次式のようになる。

$$c+w+a+A+V=1 \quad (\text{m}^3/\text{m}^3) \quad (3)$$

ここで $p=c+w$ とし、 $V$ を連続空隙 $V_w$ と閉そく空隙 $V_a$ に分けると、

$$p+a+A+V_w+V_a=1 \quad (\text{m}^3/\text{m}^3) \quad (4)$$

となる。また、また透水性に直接的に関係する連続空隙 $V_w$ 以外の全容積を $m_0$  ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ ) とすると、

$$m_0+V_w=1 \quad (\text{m}^3/\text{m}^3) \quad (5)$$

ここで、

$$m_0=p+A+a+V_a \quad (\text{m}^3/\text{m}^3) \quad (6)$$

$$a=g+s \quad (\text{m}^3/\text{m}^3) \quad (7)$$

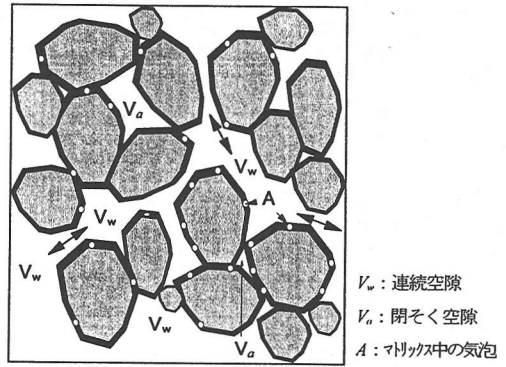


図-4 透水性コンクリート内の空隙の模式図

透水性に関係しないと考えられる空隙率 $V_a$ は、骨材間で拘束された空隙あるいはエントラップトエアなどが含まれると考えられる。一方、 $A$ はペースト中に含まれる気泡であり、これは一般的なコンクリートにおける主にエントレインドエアと一部のエントラップトエアからなる気泡に相当する部分である。一般的なコンクリートに連行される空気量は4~7%を標準にすることを定められており<sup>11)</sup>、これはセメントペーストの耐凍害性を確保するものである。透水性コンクリートにおいても、AE剤の使用は耐凍害性の向上に有効であることが報告<sup>1)</sup>されており、セメントペーストの耐凍害性確保において効果があるものと考えられる。ペースト中の空気量 $A=A_0 \times p$  ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ ) をペーストに対する気泡率100 $A_0$  (%)として表現すると、式(6)は次式のようになる。

$$m_0=a[1+p/a(1+A_0)]+V_a \quad (8)$$

$\xi=p/a$ とおくと、

$$m_0=a[1+\xi(1+A_0)]+V_a \quad (9)$$

となる。ここで $\xi$ はセメントペーストと骨材の容積の比である。

## (2) 透水係数と連続空隙量

配合設計法の流れは、図-5のフローチャートのようになる。実際の配合設計では、透水性コンクリートを構成材料として適用するにあたって、使用目的および設置環境状態によって必要な強度、必要透水係数 $K$ が設定されると考えられる。先ずこの透水係数 $K$ と連続空隙量 $V_w$ との関係を求めた。

供試体の透水係数、連続空隙量の測定により、その実験値をプロットしたものが図-6である。また図中の曲線は最小2乗法により実験値を近似した曲線で、相関係数

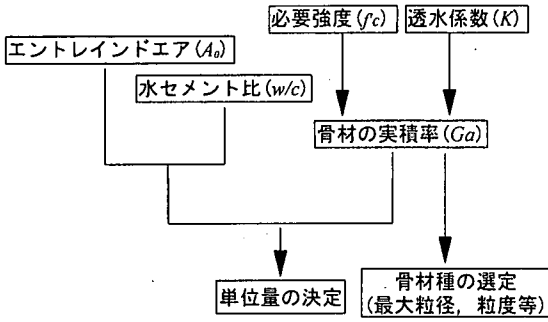


図-5 配合設計の流れ

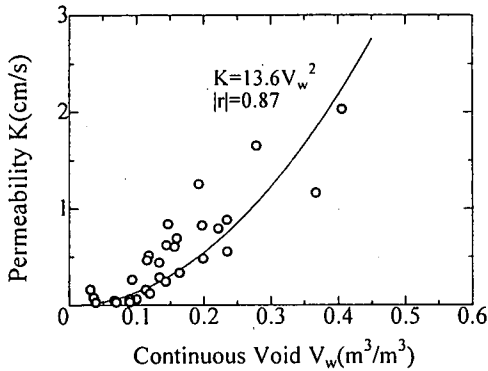


図-6 透水係数と連続空隙量の関係

は0.87である。透水係数が大きくなると水頭差の影響が出てきてばらつきの原因となり、精度を上げるには透水係数に応じて水頭差を変化させることが必要であると考えられる。また透水係数が小さな場合は連続空隙量と閉そく空隙量の差が小さくなり、連続空隙と閉そく空隙の区別が困難になるためであると考えられる。

このように透水係数と連続空隙量はよい相関性があり、式(10)で表される曲線を、配合計算法での透水係数 $K$ と連続空隙量 $V_w$ の関係式とした。製造法によって連続空隙構造が変化すればそれに対応する関係式を用いることになる。

$$K = 13.6 V_w^2 \quad (10)$$

ここで、 $K$ は透水係数(cm/s)、 $V_w$ は連続空隙量(m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)である。

### (3) 連続空隙率と単位骨材量算出に係わる諸量

#### a) 連続空隙以外の諸量に関する係数について

本研究の配合設計法では、使用する骨材の実積率 $G_a$ を

最終的に求め、それに対応する骨材の単位容積 $a$ (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)を求めることとなる。実積率 $G_a$ は、JISに定められている骨材の単位容積重量及び実積率試験方法<sup>12)</sup>に準じて求め、透水性コンクリートの打設方法において用いる締固め方法によって締固めを行い、粗骨材、または配合において粒径5mm以下の細骨材を用いる場合は細骨材と粗骨材と十分に混ぜたものによって求めた値である。研究当初には、単位骨材量 $a$ が骨材の実積率 $G_a$ に相当すると仮定して、透水性コンクリートの配合計算を行うと、計算上で配合諸量の和が1m<sup>3</sup>を越えてしまい妥当ではないことが判った。このことはペーストを加えると単純に骨材の間隙を埋めていくのではなく、ペーストの特性に応じて骨材の周囲に付着し、体積増加するためと考えられる。したがって $\alpha_0$ を一般のコンクリートにおける単位粗骨材容積に相当するものであると考え、実際の透水性コンクリートの骨材の単位容積 $a$ は次式のように表現できる。

$$a = \alpha_0 G_a \quad (11)$$

式(11)により式(9)は次のように整理できる。

$$m = \alpha m \quad (12)$$

ここで、

$$m = G_a [1 + \xi(1 + A_a)] \quad (13)$$

$$V_a = \eta m \quad (14)$$

$$\alpha = \alpha_0 + \eta \quad (15)$$

式(9)ならびに式(12)で、閉そく空隙 $V_a$ は $m$ に比例すると仮定しその係数を $\eta$ とした。

#### b) 連続空隙量と $m$ の関係

連続空隙量 $V_w$ と $m$ との関係は式(5)と式(12)より $\alpha$ を用いて次式のようにかける。

$$\alpha m + V_w = 1 \quad (16)$$

一般に $m$ が大きくなれば、 $V_w$ は小さくなるが、 $\alpha$ を介して関係が複雑となる。係数 $\alpha$ を決定するために供試体各々の配合により $A$ 、 $G_a$ によって求めた $m$ と、連続空隙率 $V_w$ の実験値をプロットしたものが図-7である。図中の曲線は最小2乗法により求めたものであり式(17)に示す。相関係数は0.81である。

$$m = 0.76 V_w^{-0.1} \quad (17)$$

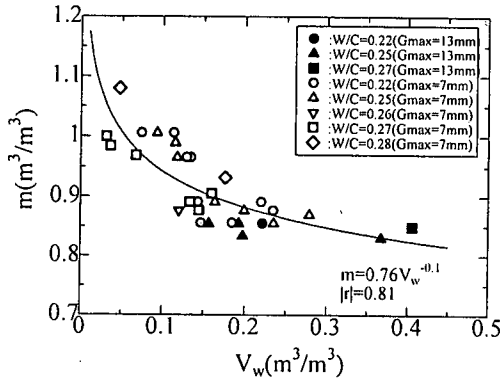


図-7  $m$ と連続空隙量 $V_w$ の関係

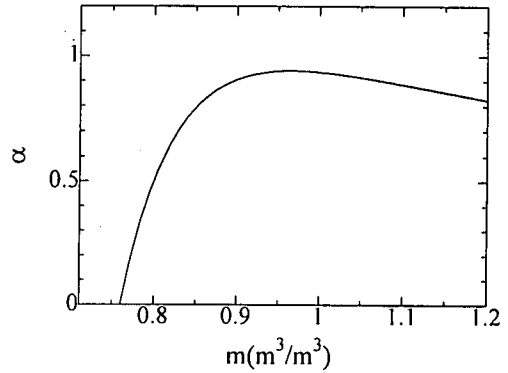


図-8  $\alpha$ と $m$ の関係

$\alpha$ は式(16), (17)より,

$$\alpha = 1/m - 0.0643m^{-11} \quad (18)$$

一方, 式(13)と式(17)より, 骨材の実積率 $G_a$ と連続空隙量 $V_w$ の関係は次式のようになる。

$$G_a = 0.76 V_w^{-0.1} / \{1 + \xi(1 + A_0)\} \quad (19)$$

配合設計においては, 上記の $m$ および強度から定まるセメントペーストと骨材の容積比 $\xi$ , ならびにマトリックスの耐凍害性から定まる空気量 $A_0 (=A/p)$ の値より骨材の実積率 $G_a$ が決まり, 後で述べるように $G_a$ に対応する単位骨材量 $a$ を求めることができる。

式(19)の $m$ と $\alpha$ の関係を図-8に示す。図-7での $m$ の範囲は約0.8~1.1であるので,  $\alpha$ の範囲は0.76~0.96程度となる。 $m$ は $G_a$ に対応する計算から求めるものであり, 1より大きくなる場合もある。以上のように $\alpha$ が求まったので $\eta$ が求まれば, 式(11)より $\alpha_0$ を介して $\alpha_0 G_a$ が単位骨材量となる。

#### c) 閉そく空隙に関する係数 $\eta$

$\eta$ は透水性に関与しない閉そく空隙 $V_v$ に関する係数( $V_v = \eta m$ )である。フレッシュ時の全空隙量と硬化後の連続空隙量を測定した結果から $\eta$ と $m$ の値を算出すると, 図-9に示す結果となった。また文献<sup>9)</sup>では $V_v$ の値は $W/C$ によって0.01~0.04の範囲の値を変化している。 $\eta$ はペーストの粘性等の性質によって上述の範囲で変化し,  $\eta$ が大きくなると空隙の連続性が低下することが考えられる。透水性を確保するためには連続空隙を効率的に確保することが必要であり,  $V_v$ はなるべく小さい値をとることが望ましい。しかし, この値とバインダーの種類や水セメント比などのペーストの粘性に関与すると考えられるパラメータとの関係を明確にすることは難しく, 本研究で

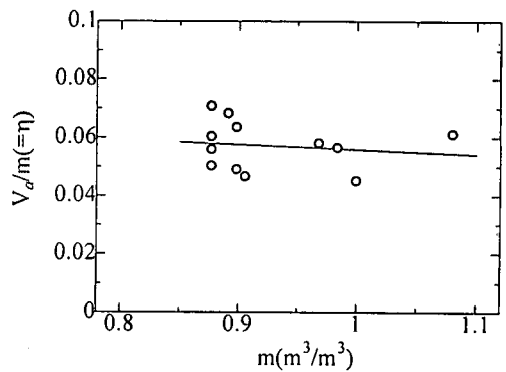


図-9  $\eta$ と $m$ の関係

は図-9に示す結果から $\eta$ を次式とした。

$$\eta = 0.057 \quad (20)$$

したがって, 式(11), 式(15)より, 骨材の単位容積は次のようになる。

$$a = (\alpha - 0.057) G_a \quad (21)$$

式(19)から算出した $G_a$ は前述したように一定の締めめ法によって求める必要があり, その締めめでの骨材の最密な状態である。

また式(18)と式(21)より骨材の単位容積 $a$ は次式となる。

$$a = (1/m - 0.0643m^{-11} - 0.057) G_a \quad (22)$$

#### (4) 細骨材率と実積率の関係

図-10は勇払産骨材(最大骨材寸法7mm)を用い, 細骨材で置換していった場合の実積率 $G_a$ の関係をプロットしたものである。細骨材で置換していくと $G_a$ が大きくなり,

また、細骨材率の増加は連続空隙を減少させ、透水係数のコントロールにおいて有効な方法である<sup>9)</sup>。

後述するように、骨材の実積率 $G_a$ が求めれば、適切な骨材種（最大粒径、粒度）および細骨材率によって所定の実積率になるように骨材を選定することになる。

#### (5) 透水係数の実験値に対する連続空隙率の計算値の

##### 検証

本研究の検討に用いた各供試体の $G_a$ と $\xi$ などの値を用いて、式(16)によって求めた連続空隙率の値(計算値)と透水係数の測定値(実験値)の関係を、図-11に示す。図中の曲線は式(10)であり互いの実験値に対応するものである。これより、本研究で用いた手法が概ね妥当であることがわかる。

#### 4. 骨材容積比およびセメント空隙比と圧縮強度の関係

圧縮強度の算定には、ペーストが骨材表面に（骨材粒径がほぼ一定の場合）どの程度の厚さでまぶされているかによって強度が支配されると考える方法と、これまでの強度理論の延長としてのセメント空隙比などを用いる方法が考えられる。

前節までで骨材の容積と実積率を透水係数から求める手順について述べた。これらの値は透水係数 $K$ とセメントペーストと骨材の容積比 $\xi$ 、セメントペースト中の空気量 $A_0$ の値が定まれば求まる。 $K$ は使用目的から定まり、 $A_0(=A/p)$ は耐凍害性の見地から値が定まる。

ここではセメントペーストと骨材の容積比から圧縮強度を求める方法（Case1）と、セメント空隙比により圧縮強度を求める方法（Case2）の2つのCaseにおいて、セメントペーストと骨材の容積比 $\xi$ を求め、骨材容積などの透水性コンクリートの配合諸量を決定する。後述する配合設計により試設計を行った結果では、透水係数が0.7cm/s程度より大きくなるとCase1の方がよりよく対応し、それ以下の透水係数ではCase2に対応している。

##### Case1：セメントペーストと骨材の容積比と圧縮強度

( $K \geq 0.7$ cm/sの場合)

一般的にコンクリート1m<sup>3</sup>の中では、セメントペーストの割合が多いほど、つまり欠陥となる空隙や骨材との界面が少ないほど強度が高くなる。これは透水性コンクリートにおいても同様であると考えられる。しかしながら、透水性コンクリートは要求される性能に透水性があり、セメントペーストの量を増やしていくと強度は上がるがその透水性が低下する恐れがある。既往の研究<sup>1,2,4)</sup>からも、透水性コンクリートはセメントペーストの量や水セメント比 $W/C$ にある範囲を持つと考えられる。本研

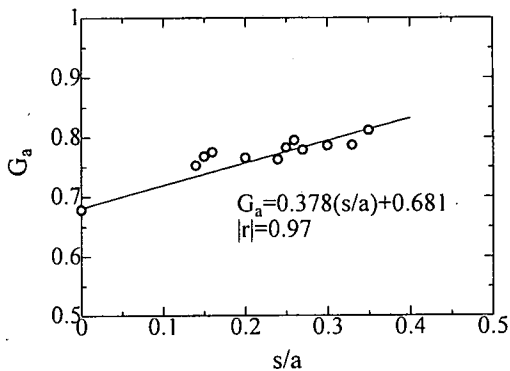


図-10 骨材の最大寸法が7mmの場合の実積率と細骨材率の関係

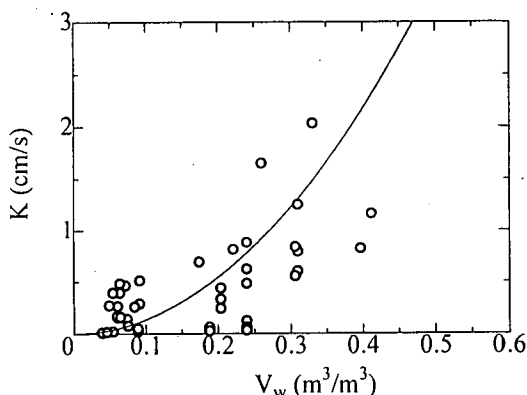


図-11 透水係数の測定値と連続空隙率の計算値の関係

究では $W/C$ を最大0.30までで行っており、コンシステンシーからも透水性コンクリートの $W/C$ の範囲として、本研究で用いた振動締めを行う場合、0.2~0.3程度の範囲が適当と考えている。また、セメントペーストの量についても同様のことがいえ、透水性を維持しうる領域で適切なある範囲が存在すると考えられる。本研究ではこのセメントペーストの量を表現するものとして $\xi$ を用いており、 $\xi$ の範囲を0.22~0.36で検討を行っているが、振動締めによって製作する場合、この程度の値が透水性および施工性を確保する上で適当な値であると考えられる。

図-12は圧縮強度 $f_c$ と $\xi$ の関係を示したものである。図中の値のうち、強度が高い値は水セメント比が0.27~0.3のものであり、参考文献<sup>9)</sup>でもみられるように水セメント比をあげると強度が高くなる傾向を示す場合もある。これは一般的な強度に関する理論に反することとなるが、透水性コンクリートでは $W/C$ を低く設定するとセメントペーストの強度は上がってもフレッシュ時のセメン

トペーストが硬いために骨材間の付着が低下し、その結果このような傾向を示すものではないかと考えられる。この点については、今後さらに詳細な検討を行う必要がある。図中の曲線は最小2乗法で値を近似したものであり、次式によって表せる。

$$f_c = \mu_1 \times \xi^{\mu_2} \quad (\text{N/mm}^2) \quad (23)$$

この実験結果では $\mu_1 = 2.5 \times 10^3$ 、 $\mu_2 = 4.0$ で、相関係数は0.6であった。

式(23)により圧縮強度 $f_c$ より $\xi$ が定められ、式(19)にこの値を用いる。

Case2 : セメント空隙比と圧縮強度 (K<0.7cm/sの場合)

A.N.Talbotのセメント空隙比説<sup>13)</sup>を用いて検討を行うと以下ようになる。この場合、細骨材の影響を考慮しない場合と考慮した場合の2つの条件において検討を行い、相関の良い方を採用した。

一般に、普通のコンクリートにおいてはセメント空隙比 $c/(V^*+w)$ と強度とは相関があり、空隙を欠陥とみなすとコンクリート強度はこの欠陥によって支配されることとなり、このセメント空隙比と圧縮強度の関係は以下のように表される。

$$f_c = \frac{\beta}{\xi^*} + \gamma \quad (24)$$

ただし、

$$\xi^* = (V^* + w)/c \quad (25)$$

ここで、 $V^*$ は全空隙( $V_a + V_w + A$ )、 $w$ は水、 $c$ はセメントの絶対容積、 $\beta$ 、 $\gamma$ は定数とする。

既往の研究<sup>9)</sup>によるとこの理論では使用骨材の最大粒径などによって相関が異なるといわれている。

$f_c$ と $1/\xi^*$ の関係を求めると、式(24)は式(26)のように書き換えることができるので、図-13のようになる。図中の破線は参考文献<sup>9)</sup>において $W/C=0.3$ で最大骨材粒径別にまとめられている関係の平均の値をとったものである。空隙比に対して上限の強度をとる実験式が与えられており、重要な情報が得られる。実線は本研究で行った結果を最小2乗法によって近似したものであり、式(26)で表される。

$$f_c = 44.5\xi^{*-1} - 0.34 \quad (\text{N/mm}^2) \quad (26)$$

破線で表されているデータと本研究のデータの違いは、ひとつは供試体作成時の締固め方法であり、前者はプレスを2層、後者は1層のみで成型を行っている点で

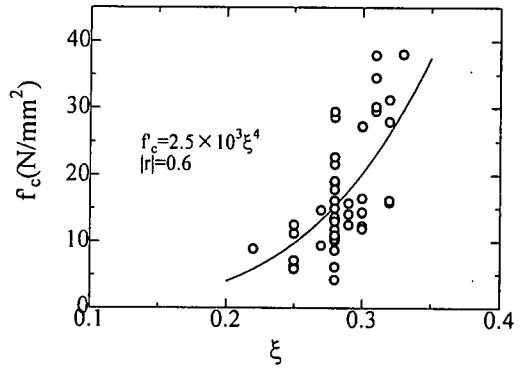


図-12 圧縮強度 $f_c$ と $\xi$ との関係

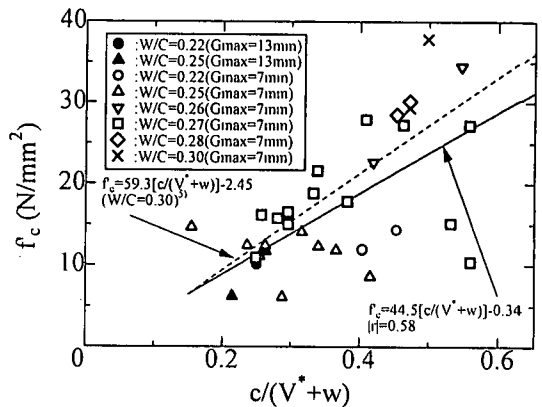


図-13 圧縮強度とセメント空隙比<sup>13)</sup>の関係

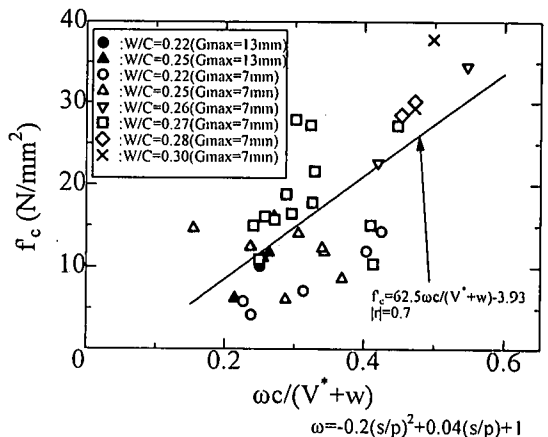


図-14 圧縮強度と細骨材の影響を考慮したセメント空隙比

ある。もうひとつは、本研究では細骨材の混入により $10^2$ cm/sのオーダーの透水係数のコントロールを行っており、細粒分の混入によって骨材の比表面積が増加し、それに伴って同一の $\xi$ において骨材周りのセメントペーストの厚さが減少することによる強度の低下が影響している点が考えられる。図-13ではセメントペーストに対する細骨材の増加に伴って圧縮強度が減少する傾向にあ



り、本実験では相関性はあまり良くなかった。

圧縮強度に関する検討において、締固め法の違いや細骨材の影響を考慮する必要があると考えられるが、締固め法の影響を配合設計法に組み入れるのは現段階では難しい。したがって、本研究では細骨材の影響をセメント空隙比と圧縮強度の関係に組み込み、新たに相関を検討することとする。細骨材の圧縮強度への影響を種々の観点から検討した結果、細骨材の容積とセメントペーストの容積の比 $s/p$ が圧縮強度に対して影響を及ぼしていることが考えられたため、細骨材の影響を係数 $\omega$ として組み込んだ。圧縮強度 $f_c$ と $\omega c/(V^*+w)$ の関係は図-14に示すようになる。図中の直線は最小2乗法で近似した直線であり式(27)である。

$$f_c = \mu_3 \omega \xi^{-1} - \mu_4 \text{ (MPa)} \quad (27)$$

ただし、

$$\omega = -0.2(s/p)^2 + 0.04(s/p) + 1 \quad (28)$$

本実験では $\mu_3 = 62.5$ ,  $\mu_4 = 3.93$ であった。

## 5. 骨材の単位容積と配合計算

以上の検討より2つのCaseにおける配合諸量の決定が可能となる。強度および透水係数を変化させて、Case1およびCase2についてトライ・アンド・エラーで試設計を行い、算出される骨材の実積率と実際の実積率の値を比較検討した結果、Case1については透水係数が0.7cm/s程度より小さくなると骨材の実積率が実際の実積率の値を大きく上まわり、またCase2においては透水係数がおよそ0.7cm/s以上での骨材の実積率は、実際の実積率の値を大きく下まわり現実的な値とならなかった。

透水係数が比較的大きな場合には、図-6に示したように連続空隙量の増加に対して透水係数の増加が大きくなり、これに伴い空隙も大きくなっていくと考えられる。Case2のセメント空隙比は一般のコンクリートに対して用いられているものであり、透水性コンクリートの場合、透水係数が大きくなるにつれて対象とする空隙の径が一般のコンクリートの空隙に比べて遙かに大きくなり、ある程度以上の透水係数においてはセメント空隙比は構造的に合致しない可能性が考えられる。上述したように試配合計算を行った結果、透水係数が0.7cm/s程度以上では算定される実積率が非常に小さな値となる場合があり実際と適合しない結果となった。一方、この範囲の透水係数においてCase1を用いた場合には適正な配合諸量を算出することができた。以上ことから、透水係数が比較的大きくなる場合には強度に対して骨材とマト

リックスの容積の比が大きく影響してくるものと考えられ、透水係数が小さな場合にはセメントと空隙の比が影響すると考えられる。本研究の範囲では、透水係数が0.7cm/s以下の場合にはCase2を用い、それ以上の透水係数が要求される場合にはCase1によって算定を行うのが適切であり、以下に配合計算法を示す。

Case1: 透水係数が0.7cm/s程度より大きい場合

セメントペーストと骨材の容積比 $\xi$ を透水性コンクリートに必要なとされる圧縮強度から求めると、使用骨材の単位容積は透水係数 $K$ とセメントペーストの耐凍害性から定まる空気量 $A_0$ を用いて、式(33)で求めることができる。また適切な $W/C$ を定めることにより、 $\xi$ と $a$ から $w$ と $c$ それぞれの容積が求められる。本研究の範囲では $W/C$ は0.22~0.30で行ったが、今後詳細な検討が必要である。式(29)によって必要な骨材の実積率が求まるので、予めこの値と使用骨材の粒度との関係のみを把握しておけば、求める透水係数と圧縮強度を目標とする透水性コンクリートの配合設計が行えることとなる。

$$G_a = \left(0.866 \times 10^{\bar{K}}\right) \times \bar{m} \quad (29)$$

ここで、

$$\bar{K} = -\frac{1}{20} \log K \quad (30)$$

$$\xi = \left(\frac{f_c}{\mu_1}\right)^{\frac{1}{\mu_2}} \quad (31)$$

$$\bar{m} = \frac{1}{1 + \xi(1 + A_0)} \quad (32)$$

本実験結果では $\mu_1 = 2.5 \times 10^3$ ,  $\mu_2 = 4.0$ であった。

また、

$$a = \left(1 - 0.271 \times 10^{-10\bar{K}} - 10^{\bar{K}}\right) \times \bar{m} \quad (33)$$

Case2: 透水係数が0.7cm/s程度より大きい場合

骨材の細粒分の影響を取り入れ、セメント空隙比による圧縮強度を配合設計法で取り扱う場合は、以下のようになる。

$$G_a = \left(0.866 \times 10^{\bar{K}}\right) \times \bar{m}^* \quad (34)$$

ここで、

$$\bar{m}^* = \frac{a}{a + (1-a)\xi^*} \quad (35)$$

$$\bar{\xi}^* = \frac{(1+A_0)(1+w/c)}{1+\xi^*} \quad (36)$$

$$\xi^* = \frac{\mu_3 \omega}{f_c + \mu_4} \quad (37)$$

本実験では  $\mu_3=62.5$ ,  $\mu_4=3.93$  であった。  
また、

$$\xi = \frac{(1-a)(1+w/c)}{(\bar{\xi}^* + 1)a} \quad (38)$$

$$a = \frac{1 - 0.271 \times 10^{-10} \bar{K} - 10 \bar{K} - \bar{\xi}^*}{1 - \bar{\xi}^*} \quad (39)$$

以上のように、実積率  $G_a$  および骨材の単位容積  $a$  が決まり、Case1と同様にその他の配合諸量も求まる。

図-15にCase1およびCase2を用いた配合計算法の流れを示す。

## 6. まとめ

本研究は振動締固めによる透水性コンクリートの系統的な配合設計法の構築を試みたものである。透水性コンクリートが使用される構造物において、要求される透水係数と強度が定まれば、配合の諸量が求まることとなる。透水性コンクリートには種々の配合が考えられるが、本実験の範囲では骨材の最大寸法は13~7mmが適当であり、また本研究で用いた振動締固め方式ではセメントペーストのたれがない範囲として  $W/C$  は0.22~0.3が適切であった。本実験結果はこの範囲について得られたものであるが、配合の流れとしては一般的なものと考えられる。以下に本研究で明らかになった事柄について述べる。

- (1) 透水性コンクリートの連続空隙は透水係数と相関があり、また全空隙を連続空隙、閉そく空隙、セメントペースト中の空気に分類することにより透水性を配合計算に組み入れることができた。
- (2) 透水性コンクリートの強度はセメントペーストと骨材の容積比、あるいはセメント空隙比などが支配されると考えられる。ここでは  $W/C=0.22\sim 0.3$  を用いた結果を述べたが、この範囲の水セメント比と連行空気量の値を導入することにより配合諸量が決定できることを明らかにした。

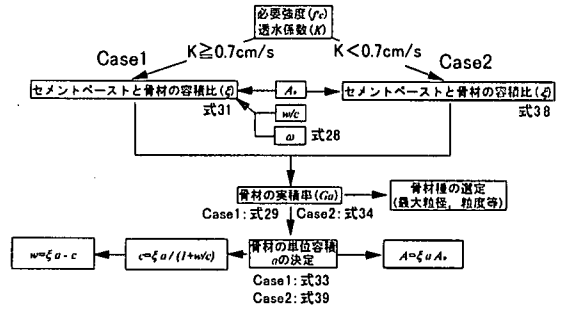


図-15 配合計算の流れ

- (3) 圧縮強度および透水係数が設定されると、振動締固めによって得られる骨材の実積率、通常のコンクリートにおける単位粗骨材容積に相当する係数、および閉そく空隙に関する係数などを用いて、骨材の実積率および単位容積を表現でき、配合計算を行うことができた。

以上のように、骨材の実積率やセメントペーストと骨材の容積比などを導入することによって、理論的手法により透水性コンクリートの配合設計が行えることがわかった。今後は閉そく空隙に対するものと同様に、透水性コンクリートの強度を大きく支配すると考えられる結合材の強度や  $W/C$ 、骨材間の付着強度に関する検討も進めていく必要があるものと考えられる。また、設定透水係数を0.2~0.8cm/sとした透水性コンクリート供試体による側溝の暴露試験を現在行っている。裏込めに切込砂利とコンクリート再生骨材を使用しており、耐凍害性ならびに目詰まりのデータを収集しているが、良好な状態で推移している。また、目詰まりを解消するための透水性回復の実験も継続して行っている。アプリケーションとそれに必要な強度・耐久性・透水係数の適切な値との関係についても、今後検討を進めていく必要があるものと考えられる。

## 参考文献

- 1) Malhotra, V.M.: No-Fines Concrete - It's Properties and Applications, *ACI Journal*, pp.628-644, 1976. Nov..
- 2) 玉井元治: 連続空隙を有する固化体の透水性, *セメント技術年報*, No.42, pp.591-594, 1988.
- 3) Tamai, M.: Properties of No-Fines Concrete containing Silica Fume, *ACI SP-114, Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, Vol.2, pp.799-814, 1989.
- 4) 吉森和人, 藤原浩巳, 伊藤修一, 岡本享久, 下山善秀: ポーラスコンクリートの強度と耐久性に関する研究, *セメント・コンクリート論文集*, No.49, pp.650-655, 1995.

- 5) 水口裕之, 天羽和夫, 服部眞門, 宮川恒夫: ポーラスコンクリートの配合要因と強度との関係, 自然環境との調和を考慮したエココンクリートの現状と将来展望に関するシンポジウム論文集, pp.31-38, 1995.
- 6) 加地 貴, 小川洋二, 島 弘, 中村秀三: 二酸化炭素ガスを吸収したポーラスコンクリートの圧縮強度と細孔容積, コンクリート工学年次論文報告集 Vol.17, No.1, pp.759-764, 1995.
- 7) 日本コンクリート工学協会: コンクリート構造物の緑化に関するシンポジウム論文報告集, 1993.
- 8) Korhonen, C.J. and Bayer, J.J.: Porous Portland Cement Concrete as an Airport Runway Overlay - A Laboratory Evaluation, *U.S. Army Special Report (U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Lab.)*, 89-12, 1989.May.
- 9) 徳重英信, 信太敬貴, 佐伯 昇: 透水性コンクリートの耐凍害性挙動, セメント・コンクリート論文集, No.49, pp.638-643, 1995.
- 10) 土の透水試験法, JIS A 1218, 1993.
- 11) 土木学会: コンクリート標準示方書—施工編—, 平成8年版.
- 12) 骨材の単位容積重量および実積率試験方法, JIS A 1104, 1993.
- 13) 岡田 清, 六車 照 編集: コンクリート工学ハンドブック, 朝倉書店.

(1998. 3. 4 受付)

## MIX DESIGN METHOD OF WATER PERMEABLE CONCRETE BY VIBRATING COMPACTION

Hidenobu TOKUSHIGE, Noboru SAEKI and Makoto KAWAKAMI

Water permeable concrete is required to have the given coefficient of permeability and compressive strength depending on environmental and structural conditions. Their requirements should be controlled with mix proportion, compaction, curing conditions and so on. The purpose in this study is to frame the mix design method of water permeable concrete satisfying the requirements. We carried out to classify void in the concrete into the three types of void of permeable, non permeable and entrained air, and to define the ratio of absolute volume of aggregate, cement paste - aggregate volume ratio. Thus, it is found that new mix design method for water permeable concrete by vibrating compaction could be proposed and be available for the practical mix.