

# アスファルト、ベントナイトを混合したコンクリートの乾燥収縮とクリープへの影響要因に関する検討

トシテュクフィオツ<sup>1</sup>・広永道彦<sup>2</sup>・遠藤孝夫<sup>3</sup>・谷口公一<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 (株) 間組 技術本部技術研究所 (〒305 茨城県つくば市荻間字西向515-1)

<sup>2</sup>正会員 (財) 電力中央研究所 我孫子研究所原燃燃料部外部処分場  
(〒270-11 千葉県我孫子市我孫子1646番地)

<sup>3</sup>正会員 工博 東北学院大学 工学部土木工学科教授 (〒985 宮城県多賀城市中央1-13-1)

<sup>4</sup>正会員 工修 (財) 電力中央研究所 我孫子研究所原燃燃料部外部処分場

従来より、路面およびダム等の遮水材および変形性能の向上に用いられたアスファルトまたはベントナイトを添加したコンクリートを深部岩盤中の構造物と周辺岩盤との緩衝材(充填材)としての適用を図るために、その乾燥収縮およびクリープ特性について検討し、それらの特性に影響を与える要因を把握するとともに、併せてそれぞれ Pickett と Neville の式を修正することによって評価できることを示した。

**Key Words :** filling material, asphalt emulsion, bentonite, drying shrinkage, creep

## 1. はじめに

ダムの地下遮水壁や地下発電所、地下石油備蓄施設など、昨今地下空間を利用した地中構造物の設計・施工が各方面で行われている。また、原子力発電所から発生する放射性廃棄物は地下に処分施設を建設し、その中に廃棄物を収容する方法が各国で検討されている。

このような比較的深層岩盤中に建設される構造物は、地上の一般の構造物に比べて、維持・管理および補修が困難である。そのため、構造物とその支持構造に用いられる外周充填材には、上載荷重、岩盤圧力および地下水圧などに耐えうる強度と遮水性能が要求される。さらに、地震などにより岩盤が変形した場合、その変形に十分に追従し、ひび割れを発生させず、力学的安定性・水密性を維持可能な構造材料が求められる。

充填材のこれらの要求に対して、従来より、地盤への埋戻し材または充填材として一般的に用いられているセメント、またはコンクリート系材料は、強度、施工性、経済性に優れているが、剛性が比較的大きく変形性能が小さいため、ひび割れ発生のおそれがある。遮水性は優れているが長期にわたって発生するひび割れを考慮すると止水性の評価が困難となる場合がある。また、比較的低強度の貧配合コンクリートでは、材料が脆く、遮水性が悪いといった欠点がある。

このように、深層岩盤中に建設する構造物の充填材として、セメントおよびコンクリート材料系に比較して低強度で、しかも長期間に遮水性および塑性変形性能が維持可能な材料の研究開発が重要な課題となる。

そこで、遮水性と塑性変形性能から、アスファルト系

材料および粘土鉱物系材料に着目し、コンクリートにアスファルト乳剤を添加したコンクリートアスファルト複合材料(以下CAと記す)およびコンクリートにベントナイトを添加したコンクリートベントナイト複合材料(以下CBと記す)を充填材として、その適用性を室内試験により評価することとした。

これらの材料に着目した理由は以下による。

アスファルトは高い水密性、柔軟性、耐衝撃性、粘性など他の材料にない特徴を有しているため、古くから道路の舗装、水理構造物や地下埋設構造物の防水に利用されている。紫外線や耐油性に問題があると報告されているが、遺跡などの発掘調査から一般環境下においては優れた耐久性を有していると考えられる。

ベントナイトは、モンモリロナイト粘土鉱物を多く含んでおり、外部からの水分を吸水し膨潤する特性を有しているため、材料の遮水性および自己シール性が期待される。また、イオン交換能力や化学的安定性などにも優れている。

セメントまたはコンクリートにアスファルト乳剤を添加した複合材料については鉄道の道床充填用グラウトやスラブ軌道用モルタルとして研究され、実用化されている<sup>1)</sup>。この場合、アスファルトは繰返し荷重に対し、路盤の損傷を損ねることなく塑性変形と遮水性を生かす材料として得られたものである。実用強度は100kgf/cm<sup>2</sup>(9.8MPa)程度以下を目標としている。

ベントナイト懸濁液は、地盤掘削時の壁面安定液としてよく使用されている。また、地盤の遮水性を向上する目的で注入材として使用される場合がある<sup>2)</sup>。

セメントにベントナイトを添加した複合材料では従来

のグラウトやダムの遮水壁として使用された実績が報告されている<sup>3)</sup>。ダムの遮水壁の場合、圧縮強度は $50\text{kgf/cm}^2$  ( $4.9\text{MPa}$ )と比較的低強度で、しかも単位水量の多い配合に対し、材料分離やブリージングを抑制しかつ変形性能を向上させることをねらいにしている。

一方、深部岩盤中の構造物と岩盤との間に使用する充填材において、強度・変形特性や透水性などの基本物性の他、乾燥収縮およびクリープも構造物の安定性に対して重要な影響要因の一つである。つまり、乾燥収縮は一般に構造物の表面より内部に向かって進行するもので局部的な応力が発生し、ひび割れを生じるおそれがある。また、クリープ変形は鉄筋などの補強材がない場合、外力によって生じる内部応力を分散・均等化させる効果が期待される反面、大きなクリープ変形によって構造上不具合を発生する可能性も考えられる。

しかしながら、上述したようにCA、CBの強度・変形および透水性についてはいくつかの研究結果が報告されているが乾燥収縮およびクリープに関する研究報告がほとんど見当たらず、CAの比較的地表面部にある鉄道の道床やスラブ軌道に使用する場合やCBのダムの遮水壁のように地下水面下に使用する場合などにおいては、クリープと乾燥収縮が設計上重要視されていないように見える。また、コンクリートにアスファルトまたはベントナイトを大量に添加することにより変形性能の向上が期待できるが、アスファルトの粘性やベントナイト内のモンモリロナイトの吸水・膨潤性のため単位水量が多くなることなど、その材料特性から乾燥収縮およびクリープがコンクリートと異なり、未解明の部分が多い。したがって、CA、CBの乾燥収縮およびクリープの特性を把握することが重要であると考えられる。

以上の背景より、本論文はコンクリートにアスファルト乳剤またはベントナイトを少量から団子の形成など品質確保が困難となる大量(CAでは単位アスファルト量 $335\text{kg/m}^3$ 、CBでは単位ベントナイト量 $220\text{kg/m}^3$ 程度)まで、比較的広い範囲の添加量で添加した、比較的低強度のCA、CBの乾燥収縮とクリープ特性を室内試験により把握したものである。

## 2. CA、CBの基本物性の概要

CA、CBのフレッシュ性状および硬化後の強度・変形特性および透水性などに関する基本物性についてはすでに報告した<sup>4) 5) 6) 7)</sup>。以下にその概要について述べる。

### (1) CAについて

①連行空気量はアスファルトの添加により増大し、最大で9~14%にも達する。これはアスファルト乳剤中のアスファルトエマルジョンが骨材の周囲を付着すること

により空気を取り込めるためと考えられる。これに対して消泡剤の使用により空気量は3~5%程度まで低減させることが可能である。

②単位水量は単位アスファルト量 $A_s=120\sim 175\text{kg/m}^3$ 程度を境に増加する。これは粘性が比較的高いアスファルト成分が多くなるとCAの粘性が大きくなり、所定の流動性を確保するための単位水量が増加したものと考えられる。

③圧縮強度および弾性係数はともにアスファルトの添加により小さくなる。これはアスファルトの塑性変形性能に加え、細孔径分布測定結果に示すように全細孔容積が増大したことも重要な要因と考えられる。

このように、CAの圧縮強度は、普通コンクリートのように主に水セメント比だけに支配されるものではなく、単位アスファルト量も重要な影響要因となる。

④透水係数 $k$ は水セメント比 $W/C=90\%$ と $100\%$ の場合、アスファルトの添加による低減効果が見られ、 $k\leq 10^{-9}\text{cm/s}$ となり、目標の $k\leq 10^{-7}\text{cm/s}$ を満足している。また、富配合( $W/C=40\%\sim 50\%$ )では、透水係数の変動は大きくその変化傾向が明らかではないが概ねアスファルトの添加で透水係数は小さくなり $k=10^{-8}\sim 10^{-12}\text{cm/s}$ の範囲内にあり、優れた遮水性を示す。

### (2) CBについて

①ベントナイトの添加で、ブリージングと空気量が低下し、施工性や品質向上が期待できる反面、ベントナイトの吸水・膨潤作用により粘性が増加し、単位水量が多くなる。また、ベントナイト量がさらに多くなると材料の団粒化や単位骨材の減少で所定の流動性を確保できなくなるが、その限界単位ベントナイト量はおよそ $170\sim 200\text{kg/m}^3$ である。

②ベントナイトは骨材と同様にセメントの水和反応に直接に関与せず、CBの圧縮強度にほとんど影響を与えない。一方、ベントナイトの添加量が多いほど弾性係数は小さくなり、CBの変形性能が改善される。

今回の試験範囲内において、目標の強度( $\sigma_c=4.9\sim 9.8\text{MPa}$ )と弾性係数( $E_c=490\sim 98\times 10^3\text{MPa}$ )に対して、水セメント比 $W/C=130\%$ 、ベントナイトセメント比 $B/C=40\%$ (単位ベントナイト量 $115\sim 136\text{kg/m}^3$ )が最も適した配合の結果となった。

③透水係数 $k$ は、ばらつきがあるものの、概ねベントナイトの添加による低下が認められ、 $k=10^{-7}\sim 10^{-12}\text{cm/s}$ となった。

## 3. 試験概要

### (1) 要求品質

著者らは深度300m以浅の地下構造物に使用する、可塑

性を持つ充填材を想定し、岩盤からの圧力や水圧から、圧縮強度を50~100kgf/cm<sup>2</sup>(4.9~9.8MPa)程度を充填材の目標強度にしている。すなわち、地下空洞で実測した岩盤の主応力<sup>9</sup>から、岩盤の充填材への作用する圧力は一軸圧縮強度で評価するとおよそ40kgf/cm<sup>2</sup>と推定される。さらに地下水圧を300m×1tf/m<sup>2</sup>=30kgf/cm<sup>2</sup>とすると、両者の和は70kgf/cm<sup>2</sup>(6.9MPa)となるため、一軸圧縮強度の目標はその前後の範囲を設定した。

また弾性係数は、図-1に示すコンクリート系材料とソイルセメント系材料の中間的な範囲<sup>9</sup>にあり、周辺岩盤の弾性係数に比較して十分小さいことを考慮した。

一般に、周辺岩盤は軟岩、硬岩で大きく異なるが、弾性係数は10<sup>4</sup>~10<sup>6</sup>kgf/cm<sup>2</sup>(980~98×10<sup>3</sup>MPa)の範囲にあると考えられることから弾性係数の目標範囲の目安として、E<sub>c</sub>=5×10<sup>4</sup>~10<sup>5</sup>kgf/cm<sup>2</sup>(490~98×10<sup>3</sup>MPa)とした。

透水係数は工学的に遮水材と見なされる10<sup>-7</sup>cm/s以下とした。また、施工性および材料分離を考慮して、コンクリートの場合、スランプを16~21cm、モルタルの場合、テーブルフローを180~220mmとした。ただし、アスファルトを比較的大量に添加した配合ではスランプ24cm、テーブルフロー=260mmを上限と設定した。

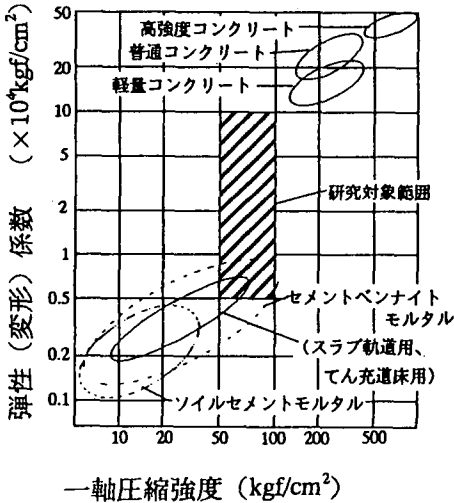


図-1 CA, CBの一軸圧縮強度と弾性係数の設定範囲<sup>9</sup>

## (2) 使用材料

セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材は川砂、粗骨材は砕石、アスファルト乳剤はアニオン系で、ベントナイトは米国ワイオミング産である。表-1に使用材料の仕様を示す。

練混ぜには2軸強制練りミキサ(公称容量60リットル、羽根回転数45~90rpm)を使用した。

表-1 使用材料の仕様

材 料	仕 様
セメント	普通ポルトランドセメント, 比重3.16
細骨材	川砂(粒径5mm以下, 吸水率1.6%, 表乾比重 $\rho=2.60$ , F.M.=2.76)
粗骨材	砕石(粒径20mm以下, 吸水率1.6%, 表乾比重 $\rho=2.71$ , F.M.=6.62)
アスファルト乳剤	7-1系乳剤, アスファルト成分60%, 水成分40%, 見かけ比重1.01
ベントナイト	比重=2.7, 粒度=200#通過81%, 水分=8.4%, 膨潤力=30ml/2g(ACC法)

CAの練混ぜは所定量の骨材、セメントをミキサに入れ1分間空練りした後攪拌しながらアスファルト乳剤と水を投入し2分間混合した。CBの練混ぜは所定量の骨材、セメントとベントナイトをミキサに入れて1分間空練りしたのち攪拌しながら水を投入し2分間混合した。

配合条件はCAでは水セメント比W/C=40~100%, アスファルトセメント比A/C=0~75%, CBではW/C=100~160%, ベントナイトセメント比B/C=0~60%とした。

なお、CAにおける単位水量は添加した水量とアスファルト乳剤に含有した水分(含有率40%)の和、単位アスファルト量はアスファルト乳剤のうちのアスファルト分(含有率60%)とした。

## (3) 試験項目と方法

試験はクリープ試験(ASTMの試験に準拠)および長さ変化試験(JIS A 1129)である。

養生方法は温度20±1℃の恒温室において行い、クリープ試験供試体はモールドである銅板円筒により密閉状態を保持し、28日間養生したのち、載荷を行った。クリープ荷重は材齢28日の圧縮強度の15~40%程度とし、変位追従型の油圧ジャッキで行い、ひずみは供試体中心部に埋設した埋込み型ひずみ計で測定した。

また、長さ変化試験の供試体は、1週間水中養生後気中養生した。表-2に各々の試験における供試体の寸法および養生期間などを示す。

表-2 供試体の寸法と養生期間

試験	供試体寸法, 養生期間など
クリープ	寸法: $\phi 15 \times 60$ cmの銅板円筒 材齢(載荷期間): 円筒密閉し, 約1年間 ひずみ測定方法: 埋込み型ひずみ計
長さ変化	寸法: コンクリート: $10 \times 10 \times 40$ cm モルタル: $4 \times 4 \times 16$ cm 材齢(試験期間): 約1年間(気中) ひずみ測定方法: コンタクトゲージ

#### 4. 試験結果および考察

##### (1) 乾燥収縮について

CA, CBの乾燥収縮ひずみ  $\epsilon_{st}$  の経時変化を図-2に示す<sup>9)</sup>。この  $\epsilon_{st} \sim t$  の曲線から最終的な終局乾燥収縮ひずみを下記の近似式(1), (2)<sup>10)</sup>を用い、最小自乗法により推定した。

$$\epsilon_{st} = t / (As + Bs \cdot t) \quad \text{または} \quad (1)$$

$$1 / \epsilon_{st} = (As + Bs \cdot t) / t$$

$$t \rightarrow \infty \text{ とすれば終局乾燥収縮ひずみ } \epsilon_{sh} \text{ は} \quad (2)$$

$$\epsilon_{sh} = 1 / Bs$$

ここに、 $t$  : 気中養生日数,  $\epsilon_{st}$  : 材齢  $t$  における乾燥収縮ひずみ,  $As, Bs$  : 実験より定められた定数, である。

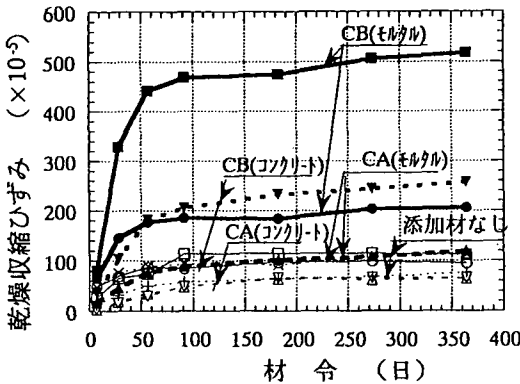


図-2 乾燥収縮ひずみの経時変化の一例

すなわち、各材齢における乾燥収縮ひずみの実験データから式(1)を用いて最小自乗法により定数  $As, Bs$  を推定し、式(2)から終局乾燥収縮ひずみを算定した。

以降は終局乾燥収縮ひずみ(以下乾燥収縮ひずみと記す)を乾燥収縮の評価指標としてCA, CBの配合条件などによる影響を調べた。また、各材料の単位量の容積率(全容積に対する容積比率)で整理した。

コンクリートの乾燥収縮は主にセメントペーストの乾燥収縮に起因するもので、単位水量、水セメント比、セメント量、骨材量や混和剤などがその影響要因である。その中で単位水量が最も重要なもので、単位水量が同一であれば、水セメント比や単位セメント量などが変わっても乾燥収縮ひずみはほとんど変わらないこと<sup>11)</sup>がよく知られている。図-3にCA, CBの単位水量の容積率と乾燥収縮ひずみの関係を示す。

CA, CBとも単位水量の容積率が大きくなるほど乾燥収縮ひずみは増加する傾向を示すがその増加度合は普通

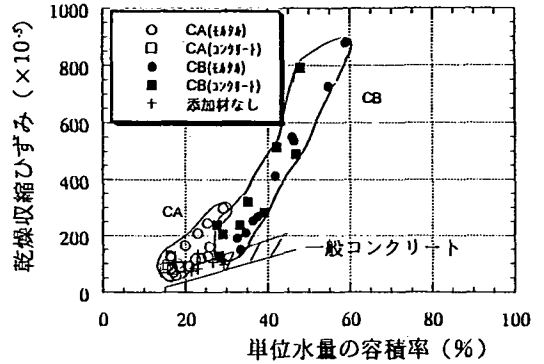


図-3 単位水量の容積率と  $\epsilon_{sh}$  の関係

コンクリート<sup>12)</sup>に比較してCA, CBの方が大きい。また、図-4のアスファルト、ベントナイトの容積率に対応する乾燥収縮ひずみの変化は、CAではアスファルトの容積率が10%当たりまでは、乾燥収縮ひずみは僅かながら減少したのち、漸増していく。CBではベントナイトの容積率の増加により乾燥収縮ひずみは著しく大きくなる傾向を示す。

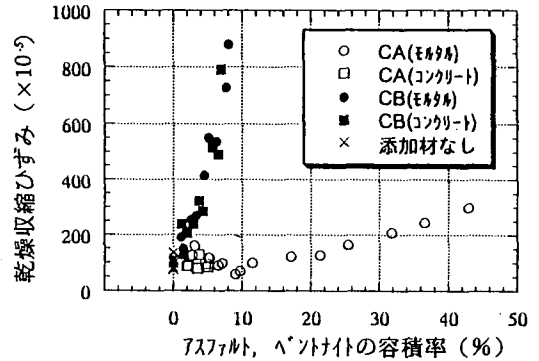


図-4 アスファルト、ベントナイトの容積率による  $\epsilon_{sh}$  の変化

CAの場合、アスファルト乳剤がセメントや骨材の表面を取り囲むことにより流動性が向上し、所定の流動性を確保するために必要な単位水量が減少する。しかしアスファルトがさらに多くなると粘性は大きくなり、単位水量も増加する(図-5参照)。CBでは、コンクリートのように結合力の強い結合水と結合力の弱い付着水のほかに、ベントナイト中のモンモリロナイトによる吸水がある。モンモリロナイトは層状体構造で、水と接触すると層状体間に水が侵入し、層間を広げ、体積は大きくなる。その結果、モンモリロナイト層間に反発力が発生する<sup>13)</sup>。さらに、複合材料の水和硬化進行中または硬化後、気中の乾燥環境においてモンモリロナイト内に吸着された水分は再び蒸発し、層間反発力が減少または消滅することによって体積の減少をもたらすのである。

以上のようにCA、CBの乾燥収縮は普通コンクリートのようにセメントペーストによる乾燥収縮に加え、アスファルトやベントナイトも重要な影響要因と考えられる。特にベントナイトの添加による乾燥収縮ひずみの増加は顕著である。また、骨材に対する乾燥収縮ひずみはCA、CBともに反比例的に変化する傾向を示す(図-6)。

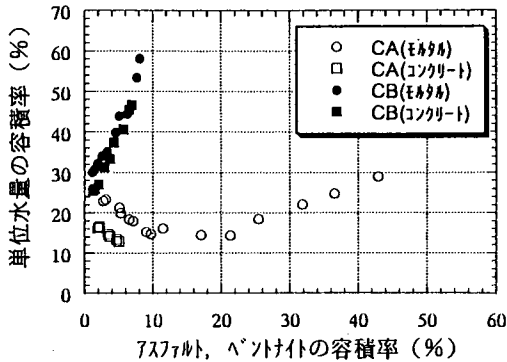


図-5 アスファルト、ベントナイトの容積率と単位水量の容積率

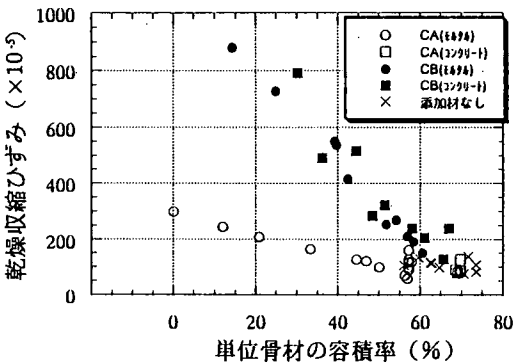


図-6 骨材の容積率と $\epsilon_{sh}$

これは、普通コンクリートと同様、骨材がセメントペーストの乾燥収縮ひずみを緩和し、また乾燥収縮過程において骨材内に圧縮応力が生じることによって乾燥収縮ひずみを抑制するもの<sup>10)</sup>であると考えられる。

Picketはコンクリートの乾燥収縮をセメントペーストの容積率の関数として下式<sup>11)</sup>のように表わしている。

$$\epsilon_{sh} = \epsilon_p (1 - V_g)^n \quad (3)$$

$$n = 3 \times (1 - \mu_c) / \{1 + \mu_c + 2 \times (1 - \mu_g) E_c / E_g\} \quad (4)$$

ここに、 $\epsilon_{sh}$ : コンクリートの乾燥収縮、 $\epsilon_p$ : ペーストの乾燥収縮、 $V_g$ : 骨材の絶対容積(容積率)、 $\mu_c$ 、 $\mu_g$ 、 $E_c$ 、 $E_g$ : それぞれコンクリート、骨材のポアソン比とヤング率。普通 $n=1.2 \sim 1.7$ 、である。

上記の式(3)、(4)を用いて、CA、CBの乾燥収縮ひずみに当てはめてみる。ここで、コンクリートのポアソン比、ヤング率の代わりにCA、CBのポアソン比 $\mu_c$ 、ヤング率 $E_c$ を用い、 $\mu_c=0.2$ とし、 $E_c$ は養生時間における弾性係数の実測データを使用した。また、骨材のポアソン比とヤング率をそれぞれ $\mu_g=0.18$ 、 $E_g=5 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2 (49 \times 10^3 \text{ MPa})$ とした。

セメントペーストの乾燥収縮 $\epsilon_p$ は主にペースト中の水分に起因するものとされていることから、 $\epsilon_p$ を単位水量の容積率 $V_w$ の関数とし、 $\epsilon_p=f(V_w)$ と仮定すると式(3)は式(5)のように変形される。

$$\epsilon_{sh} = f(V_w) \times (1 - V_g)^n \quad (5)$$

図-7に $V_w \times (1 - V_g)^n$ と $\epsilon_{sh}$ の関係を示す。CA、CBは異なった傾向を示しており、同様な $V_w \times (1 - V_g)^n$ の値においてもCBの方が $\epsilon_{sh}$ は大きい。

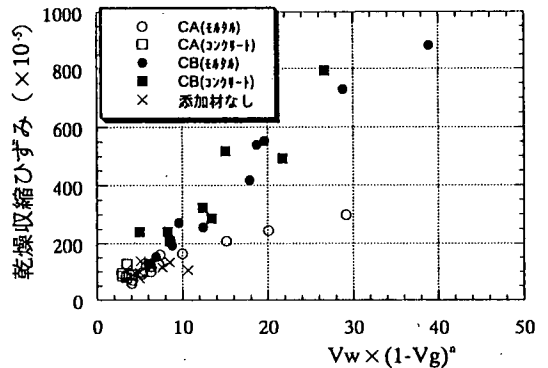


図-7  $V_w \times (1 - V_g)^n$ と $\epsilon_{sh}$ の関係

さらに、コンクリートのペースト中の水分は物理的吸着や毛細管力によって保持された結合力の弱い付着水と主として水和物と強固に結合した結合水(非蒸発性水)に分けられるが大気中での乾燥により前者が蒸発し、乾燥収縮が発生する<sup>12)</sup>と考えられる。

そこで、結合水をセメント重量の25%<sup>12)</sup>と仮定し、蒸発可能な水分をベントナイトの吸水を含めた結合水以外の水分(以下剰余水と記す)とする。

剰余水の容積率 $V_{ws}$ と $(1 - V_g)^n$ との積 $V_{ws} \times (1 - V_g)^n$ と乾燥収縮ひずみ $\epsilon_{sh}$ との関係を図-8に示す。

$V_{ws} \times (1 - V_g)^n$ による $\epsilon_{sh}$ の変化にはばらつきがあるものの、大略としてCA、CBとも同様な直線上にあり、CAとCBとの区別、アスファルトやベントナイトの有無や多少の違い、またモルタル系とコンクリート系との差も見られない。両者の関係は最小自乗法により、次式で表わされる。

$$\epsilon_{sh} = 3277 \times (V_{ws}/100) \times (1 - V_g)^2 \quad (\times 10^{-3}) \quad (6)$$

式(6)はPicketが提案した式(3)を基に修正したものである。この式では乾燥収縮ひずみは剰余水の容積率に一次的に関係しており、また、骨材の容積率および骨材とCA、CBの弾性係数やポアソン比も影響要因として考慮されている。

なお、式(6)の $\epsilon_{sh}$ は材齢1年間における実測データから式(1)、(2)により推定した最終的な終局乾燥収縮ひずみである。

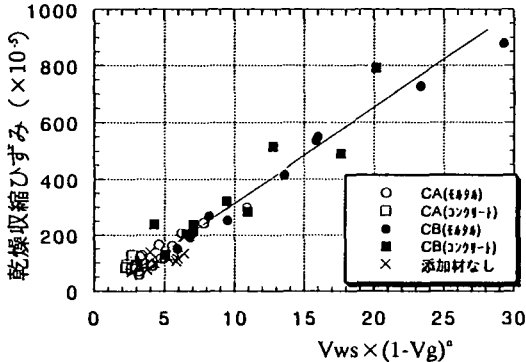


図-8  $V_{ws} \times ((1 - V_g)^2)$  と  $\epsilon_{sh}$  の関係

図-4に示すようにアスファルト、特にベントナイトは乾燥収縮に与える影響は大きいと思われるが式(6)中にはアスファルトやベントナイトの要因が取入れられていない。

CAではアスファルトは比較的高い粘性を持つ細粒子(最大粒径 $10 \mu m$ )の集合体で、アスファルトを添加することにより所定の流動性を確保するために必要な水量が増加する傾向にあり、その結果として乾燥収縮は大きくなる。CBの場合、ベントナイト中のモンモリロナイトは吸水・膨潤⇔脱水・収縮という可逆性の特徴をもつ。したがって、ベントナイトの添加により吸水量が大きくなり、乾燥過程で自由水とともに脱水して大きな乾燥収縮を生じさせるものである。すなわち、CB内の水分を図-9に示すように模式的に分けることができる。

全水量の容積率 $V_w$ は自由水の容積率 $V_{wf}$ 、ベントナイトの吸水の容積率 $V_{wb}$ とセメントの結合水の容積率 $V_{wc}$ からなるものとして、次式のように表わされる。

$$V_w = V_{wf} + V_{wb} + V_{wc}$$

または

$$\text{自由水} \quad V_{wf} = V_w - (V_{wb} + V_{wc}) \quad (7)$$

①練混ぜ直後における自由水の容積率 $V_{wf}$ を以下に概略的に算定する。

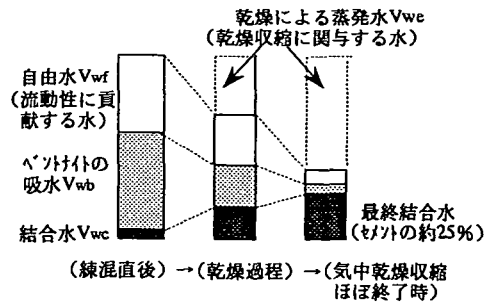


図-9 CB内の水分の種類

ベントナイトの容積率 $V_b$ と全水量の容積率 $V_w$ の関係(図-5)は回帰分析により式(8)のように線形的に表わされる。

$$V_w = 22.8 + 3.7 \times V_b \quad (\%) \quad (8)$$

式(8)に示すようにベントナイトの添加により、 $V_w$ は $3.7 \times V_b (\%)$ だけ増加する。これをベントナイトの吸水の容積率 $V_{wb}$ に相当するものとみなせば次のように表される。

$$V_{wb} = 3.7 \times V_b \quad (\%) \quad (9)$$

また、結合水の容積率 $V_{wc}$ は、練混ぜ直後では単位セメント量の容積率 $V_c$ の1.9%(普通ポルトランドセメント、 $W/C=40\%$ 、 $20^\circ C$ 密閉養生で単位セメント量 $C$ の6%程度<sup>17)</sup>)と仮定すると下式のようになる。

$$V_{wc} = 0.019 \times V_c \quad (\%) \quad (10)$$

式(9)、(10)の $V_{wb}$ と $V_{wc}$ を式(7)に代入すると、自由水量の容積率は式(11)のようになる。

$$V_{wf} = V_w - (3.7 \times V_b + 0.019 \times V_c) \quad (11)$$

式(11)を全配合に当てはめて自由水量の容積率を算定すると、ベントナイト添加量の大小に関わらずコンクリート系材料の場合、18~20%、モルタル系材料の場合、20~25%の範囲内に収束している(図-10)。これは所定の流動性(モルタル系材料の場合、テーブルフロー180~220mm、コンクリート系材料の場合、スランプ16~21)を確保するために必要な自由水量であると推測される。

一方、結合水やベントナイトの吸水は流動性にほとんど影響を与えないものと考えられる。

②次に、セメントの水和反応の進行に伴って結合水は増加(最終的に単位セメント量の25%程度)するが、この水

は脱水せず、自由水およびベントナイトの吸水、つまり、剰余水だけが徐々に脱水・蒸発し、乾燥収縮を発生させるものと考えられる。

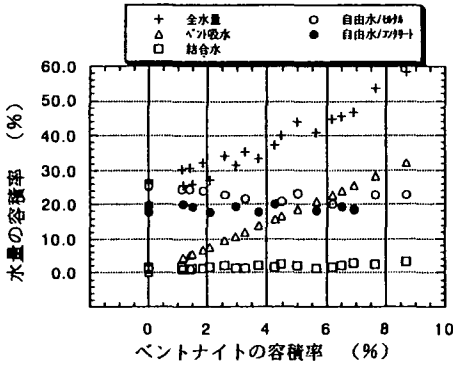


図-10 CBの練混ぜ直後の水分

## (2) クリープ特性について

CA, CBのクリープ試験における単位応力当たり全ひずみ  $\epsilon_t$  の経時変化を図-11に示す<sup>19)</sup>。

時間における単位応力当たり全ひずみ  $\epsilon_{ct}$  は次式に示すように弾性ひずみ  $\epsilon_{cet}$  とクリープひずみ  $\epsilon_{crt}$  の和からなる。

$$\epsilon_{ct} = \epsilon_{cet} + \epsilon_{crt}, \quad \text{または}$$

$$\epsilon_{crt} = \epsilon_{ct} - \epsilon_{cet} \quad (12)$$

$$\epsilon_{cet} = 1/E_{cet} \quad (13)$$

ここに、 $E_{cet}$  : 養生時間  $t$  における弾性係数である。

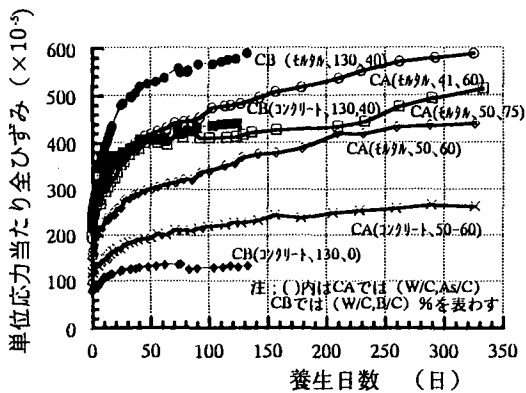


図-11 単位応力当たり全ひずみの経時変化

弾性係数  $E_{cet}$  は養生時間に伴って増加することから弾性ひずみ  $\epsilon_{cet} (= 1/E_{cet})$  は逆に減少する。したがって、クリープひずみ  $\epsilon_{crt} (= \epsilon_{ct} - \epsilon_{cet})$  を図-12の模式図に示すように修正を行った。すなわち、長期材齢の圧縮強度試験から得られた弾性係数の実測値  $E_{cet}$  を用いて、弾性ひ

ずみ  $\epsilon_{cet} = 1/E_{cet}$  として、 $\epsilon_{cet} \sim t$  曲線を描く(図-12中の修正前弾性ひずみ曲線)。さらに、この曲線の原点(クリープ載荷時間  $t=0$  の弾性ひずみ  $\epsilon_{cet_0}$ )がクリープ試験における瞬間弾性ひずみ  $\epsilon_{ce}$  と一致しない場合、 $\epsilon_{cet_0} = \epsilon_{ce}$  になるように  $\epsilon_{cet} \sim t$  曲線を平行移動して  $\epsilon_{cet}$  を修正した(図-12中の修正後弾性ひずみ曲線)。

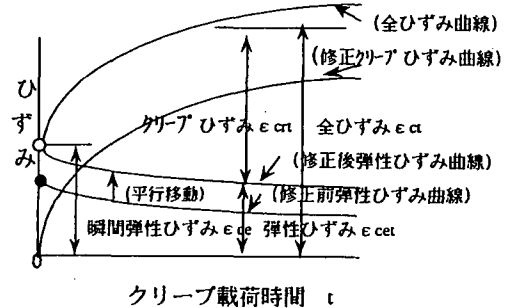


図-12 修正クリープひずみの模式図

なお、クリープは乾燥が進行しない環境において水分移動に関して外部環境と平衡に達した状態の基本クリープと乾燥による乾燥クリープの2つからなるものであるが、本試験では薄い銅製円筒により供試体を密閉した状態で行なったため基本クリープに相当するものである。したがって外部からの水分の影響を受けないクリープひずみは水中養生した場合のクリープひずみよりやや大きくなるものと考えられる<sup>19)</sup>。

### a) 終局クリープひずみ

修正クリープひずみの曲線  $\epsilon_{crt} \sim t$  (図-12) から最終的な終局クリープひずみ(以下クリープひずみ)を下記の近似式を用いて最小自乗法により求めた<sup>20)</sup>。

$$\epsilon_{cr} = t / (A_c + B_c \cdot t)$$

$$\text{または } 1/\epsilon_{cr} = (A_c + B_c \cdot t) / t \quad (14)$$

$$t \rightarrow \infty \text{ とすれば終局クリープひずみ } \epsilon_{cr} \text{ は}$$

$$\epsilon_{cr} = 1/B_c \quad (15)$$

ここに、 $t$  : 養生日数,  $A_c, B_c$  : 実験より定められた定数, である。

図-13~16にCAおよびCBの配合条件における各影響要因と終局クリープひずみ(以下クリープひずみと記す)の関係を示す。クリープひずみは、単位水量の容積率、単位アスファルト量、ベントナイト量の容積率、単位セメント量の容積率にほぼ比例し、単位骨材量の容積率に反比例の関係を示している。

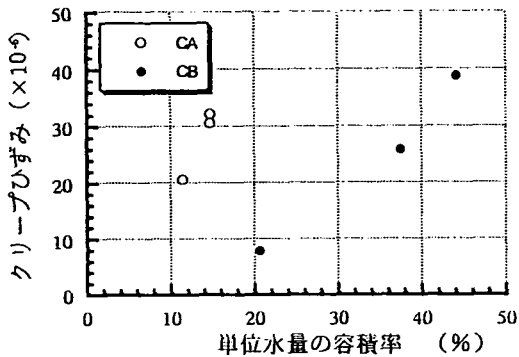


図-13 単位水量の容積率と  $\epsilon_{cr}$  の関係

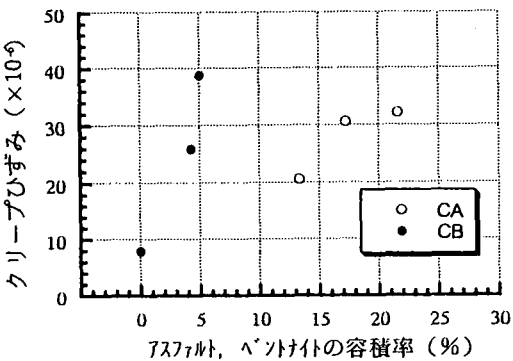


図-14 単位アスファルト, ベントナイト量の容積率と  $\epsilon_{cr}$  の関係

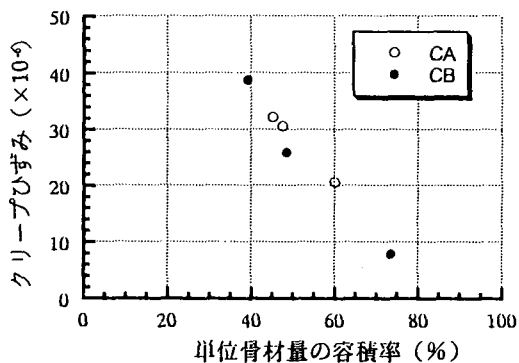


図-15 単位骨材量の容積率と  $\epsilon_{cr}$  の関係

Nevilleはコンクリートのクリープが主にセメントペーストのクリープおよび単位骨材量の容積率に支配されるものとし、Pickertが提案したコンクリートの乾燥収縮に関する前出の式(3), (4)をコンクリートのクリープの表現にも適用できると主張している<sup>13)</sup>。すなわち、

$$\epsilon_{cr} = \epsilon_{pcr}(1-V_g)^n \quad (16)$$

$$n = 3 \times (1 - \mu_c) / \{1 + \mu_c + (2 \times (1 - \mu_g) E_c / E_g)\} \quad (17)$$

ここに、 $\epsilon_{pcr}$ ：ペーストの乾燥収縮、 $V_g$ ：骨材の絶対容積(容積率)、 $\mu_c$ ,  $\mu_g$ ,  $E_c$ ,  $E_g$ ：それぞれコンクリート、骨材のポアソン比とヤング率、である。

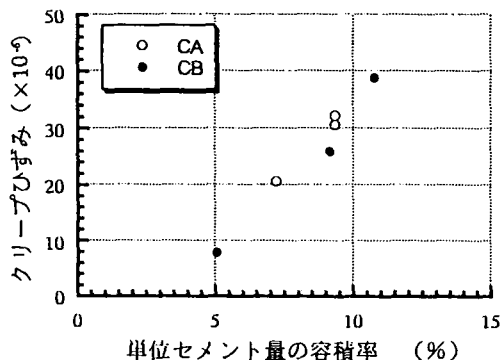


図-16 単位セメント量の容積率と  $\epsilon_{cr}$  の関係

一方、CA、CBのクリープはペーストのクリープのみならず、アスファルトやベントナイトの影響も受けるものと考えられる。今回の試験条件、つまり供試体から水分の出入りを許さない環境において、クリープ荷重に対して、アスファルトまたはベントナイト、剰余水そして空気の混合体が流動しやすい、いわゆる塑性体と仮定し、CA、CBのクリープひずみを式(11)を変形した下式のように表現する。

$$\epsilon_{cr} = f(V_{as} + V_b + V_{ws} + V_{air}) \times (1 - V_g)^n \quad (18)$$

ここに、 $V_{as}$ ：アスファルトの容積率(CAの場合)、 $V_b$ ：ベントナイトの容積率(CBの場合)、 $V_{ws}$ ：剰余水の容積率、 $V_{air}$ ：空気容積率(空気量)、である。

$(V_{as} + V_b + V_{ws} + V_{air}) \times (1 - V_g)^n$ と  $\epsilon_{cr}$ の関係は図-17に示すようにほぼ直線的になり、両者の関係を一次式で表わすと下式のようになる。

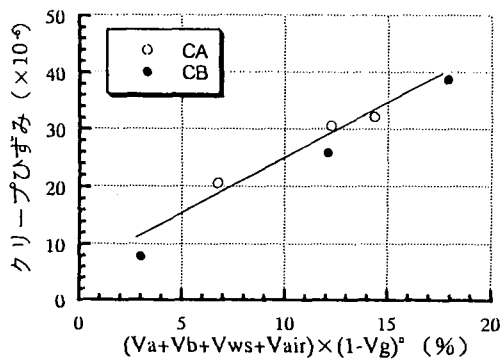


図-17  $(V_{as} + V_b + V_{ws} + V_{air}) \times (1 - V_g)^n$  と  $\epsilon_{cr}$



$$\epsilon_{cr} = 4 + 198 \times (V_{as} + V_b + V_{ws} + V_{air}) / 100 \times (1 - V_g)^9 \quad (\times 10^{-6}) \quad (19)$$

なお、式(19)の $\epsilon_{cr}$ はCAの場合1年間、CBの場合約5ヶ月間の材齢における実測データから式(14)、(15)により推定した最終的な終局クリープひずみである。

#### b) クリープ率について

コンクリートのクリープにおける全ひずみ曲線 $\epsilon(t)$ のあてはめには種々の式が提案されている。その一つに米国開拓局などが採択した式(20)<sup>20)</sup>がある。

$$\epsilon_{ct} = 1/E_{ce} + F(k) \times \ln(t+1) \quad (20)$$

ここに、 $\epsilon_{ct}$ : 単位応力当たり全ひずみ、 $E_{ce}$ : 瞬間弾性係数、 $F(k)$ : クリープ率、である。

式(20)では経過時間における弾性ひずみは瞬間弾性ひずみに等しく一定と見なしている。すなわち、第1項の $1/E_{ce}$ は単位応力当たり瞬間弾性ひずみで、第2項の $F(k) \times \ln(t+1)$ は単位応力当たりクリープひずみと定義されている。しかしながら、すでに述べたように、弾性ひずみは一定ではなく、養生時間と共に増大する弾性係数によって定まり、弾性係数が大きくなることから時間と共に小さくなるものである(図-12参照)。

したがって、式(15)を次の式のように修正する。

$$\epsilon_{ct} = \epsilon_{ct} = \epsilon_{cet} + \epsilon_{crt} = 1/E_{ct} + F(k) \times \ln(t+1) \quad (21)$$

図-18は修正クリープひずみ $\epsilon_{crt}$ の自然対数横軸上での経時変化を示すものである。

$\epsilon_{crt} \sim \log t$ 曲線を直線と見なし、その直線の勾配をクリープ率 $F(k)$ として算定した。

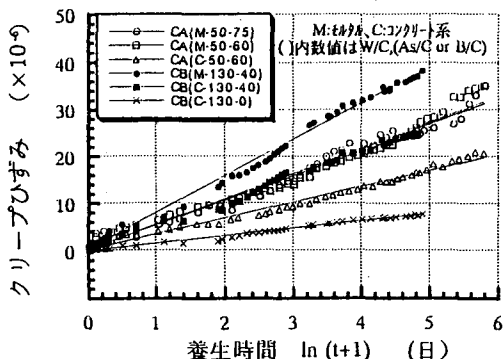


図-18 修正クリープひずみの時間変化

図-19に $(V_{as} + V_b + V_{ws} + V_{air}) \times (1 - V_g)^9$ とクリープ率 $F(k)$

の関係を示す。

$F(k)$ はクリープひずみ $\epsilon_{cr}$ と同様 $(V_{as} + V_b + V_{ws} + V_{air}) \times (1 - V_g)^9$ とほぼ直線的な関係を示しており、 $(V_{as} + V_b + V_{ws} + V_{air})$ は大きいほど $F(k)$ は大となり、クリープひずみの進行速度が大きくなると言える。

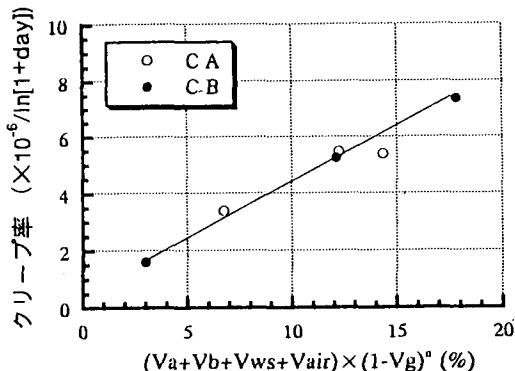


図-19  $(V_{as} + V_b + V_{ws} + V_{air}) \times (1 - V_g)^9$  と  $F(k)$

今回のCA、CBに関するクリープ試験結果ではデータは少ないが、試験条件の範囲内においてはCA、CBのクリープひずみは普通コンクリートのように配合条件、特にW/Cに左右される<sup>20)</sup>ものではなく、同様なW/Cにおいてもアスファルトやベントナイトの添加によりクリープひずみやクリープ率が大きくなる傾向を示す。これは、粘性を持つアスファルトはCAの強度を低下させると同時に塑性変形性能を向上させる効果<sup>9)</sup>があり、この塑性変形性能を反映した形でクリープひずみも大きくなる。

一方、ベントナイトは膨潤性粘土の一種で、しかも粒径 $74 \mu\text{m}$ 以下の細粒分が80%以上と多く含まれているため、水との混合により軟弱な塑性体になり、CBの塑性変形性能、とりわけクリープ変形を増大させるのである。

また、剰余水および空気もアスファルトやベントナイトとともに、いわゆる塑性体として、クリープひずみとクリープ率に影響を与えるものである。

## 5. 結論

CA、CBの乾燥収縮、クリープの特性に関して室内試験結果により、次の所見が得られた。

①CA、CBの終局乾燥収縮ひずみ $\epsilon_{sh}$ において剰余水は最も重要な影響要因であり、剰余水の容積率が大きいほど乾燥収縮ひずみは大きくなる。 $\epsilon_{sh}$ はPickettが提案したコンクリートの乾燥収縮ひずみの推定式を修正した形で式(6)のように表わされる。

$$\epsilon_{sh} = 3277 \times (V_{ws}/100) \times (1 - V_g)^9 \quad (\times 10^{-5}) \quad (6)$$

②終局クリープひずみまたはクリープ率は、CA、CBともに、水和物および骨材以外のアスファルトまたはベントナイト、剰余水および空気により構成された、いわゆる塑性体の容積率に左右される。  
CA、CBのクリープひずみはNevilleの提案式を修正した形で式(19)により評価される。

$$\varepsilon_{cr} = 4 + 198 \times (V_{as} + V_b + V_{ws} + V_{air}) / 100 \times (1 - V_g)^4 \quad (\times 10^{-6}) \quad (19)$$

謝辞：最後に、本研究の遂行に当たり、貴重な御指導を賜った東京工業大学長瀬教授に感謝の意を表する。

#### 参考文献

- 樋口芳朗, 塩尻謙太郎, 中村利夫, 今村義和: セメントコンクリート複合材の性質とその応用, セメントコンクリート, No.384, pp.10~16, 1977.
- 水資源開発公団試験所, 第三試験課, 地質試験室報告第8510号: グラウト工の調査設計法に関する研究 [Ⅲ総括], pp.48~54, 64~66, 1976.
- 出頭圭三, 嶋田三朗, 谷直樹, 梨本裕, 牧野英久: ベントナイト混入コンクリートに関する基礎研究(その2), 前田技報, Vol.24, pp.141~156, 1983.
- トソデユキヲ, 広永道彦, 遠藤孝夫, 島辺賢一郎: アスファルトを添加したコンクリートの基本性状, ベントナイトを添加したコンクリートの基本性状, コンクリート工学年次論文報告集, 第16巻第1号, pp.729~734, 1994.
- ①駒田広也, 遠藤孝夫, 広永道彦, トソデユキヲ: セメントアスファルト複合材料の強度・変形特性; ②楠本太, 遠藤孝夫, 広永道彦, T.F.ヲ: セメント・ベントナイト複合材料の強度・変形特性について, 土木学会第46回年次学術講演会, pp.142~145, 1991.
- ①駒田広也, 遠藤孝夫, T.D.P.OANH, 竹内恒夫: セメントアスファルト複合材料の長期材齢における強度・変形特性, ②大沼博志, 広永道彦, T.D.P.OANH, 竹内恒夫: セメント・ベントナイト複合材料の長期材齢における強度・変形特性について, 土木学会第47回年次学術講演会, pp.88~91, 1992.
- Phi Oanh Tran Duc, Hiroya Komada, Takao Endo, Michihiko Hironaga, Koichi Taniguchi: Strength and Deformation of Cement-Bentonite Underground Filling Materials, 1st Int'l Congress on Environmental Geotechnics, pp.921~926, 1994.

- 大山隆弘, 北野晃一: 放射性廃棄物貯蔵施設立地条件の地学的検討—深部鉱山坑道の地質・地下水に関する文献調査, (財)電力中央研究所我孫子研究所報告No. U87044, pp.10~14, 1987.
- 町田篤彦, 三木千壽: 現代土木材料, pp.121~122, オーム社, 1990.
- 庄谷制征美, 米谷裕: コンクリート乾燥収縮量の早期推定法に関する2, 3検討, セメント技報, No.33, pp.393~397, 1979.
- 岡田清: コンクリート工学ハンドブック, p.475~492, 朝倉書店, 1981.
- 後藤幸正, 尾坂芳夫, 三浦尚: コンクリート工学(Ⅱ)設計, pp.44~51, 彰国社, 1980.
- 小峯秀雄, 緒方信英, 田代勝浩: 締固めたベントナイトの膨潤評価式の提案, 第28回土質工学研究発表会, pp.333~336, 1993.
- 永松静也: セメント・コンクリートの乾燥収縮, コンクリート工学, Vol.32, No.9, pp.31~36, 1994.
- 西林新蔵, 阪田憲次: コンクリートの乾燥収縮の内部機構に関する一考察, 材料, 第22巻, 第232号, pp.52~56, 1972.
- 田代忠一, 田澤栄一, 笠井芳夫編: セメント・コンクリート中の水の挙動, セメント・コンクリート研究会水委員会, pp.33~38, 1993.
- 河角誠, 笠原清, 栗山竹雄: 高温度下におけるコンクリートのクリープ(第3報)セメントの水和に及ぼす温度の影響, 電力中央研究所報告, 研究報告: 381025, 1981.
- ①駒田広也, 広永道彦, T.D.P.OANH, 谷口公一: セメントアスファルト複合材料のクリープ特性について; ②遠藤孝夫, 広永道彦, T.D.P.OANH, 谷口公一: セメントベントナイト複合材料のクリープ特性について, 土木学会第48回年次学術講演会, pp.112~115, 1993.
- 米倉亜州夫: 水分の逸散とクリープ, コンクリート工学, Vol.32, No.9, pp.37~42, 1994.
- 阪田憲次, 西林新蔵: コンクリートのクリープの内部機構に関する一考察, 土木学会論文報告集, 第235号, pp.81~86, 1975.
- 米国内務省開拓局編, 近藤泰夫訳: コンクリートマニュアル(第8版), pp.23~24, 国民科学社, 1978.
- 重迫誠一, 蔵本修, 阪田憲次: 黄鉄鉱を用いた重量コンクリートの乾燥収縮およびクリープに関する研究, セメント年報, No.33, pp.402~405, 1979.

(1995.8.28 受付)

## THE FACTORS AFFECTING ON DRYING SHRINKAGE AND CREEP OF CONCRETE-ASPHALT AND CONCRETE-BENTONITE

Phioanh TRAN DUC, Michihiko HIRONAGA, Takao ENDO and Koichi TANIGUCHI

Concrete asphalt (CA) and concrete bentonite (CB), which have conventionally been used as water proofing or to improve resistance to deformation on road surfaces and dams, were tested to investigate their suitability as filling materials for insertion between deep-level underground structures and the surrounding rock.

The ultimate drying shrinkage strain and ultimate creep strain of CA and CB were studied and the factors affecting these properties considered. Additionally, modifications to the equations of Picket and Neville, respectively, are suggested as a means of evaluating the parameters.