

ソイルセメントの乾燥収縮応力に関する二、三の考察*

SOME CONSIDERATIONS ON DRYING SHRINKAGE STRESSES OF SOIL-CEMENT

岡田 清**・川村 満紀***

By Kiyoshi Okada and Mitsunori Kawamura

1. 緒 論

米国においてソイルセメントがたわみ性舗装の路盤としてさかんに用いられるようになり、その建設率はコンクリート舗装に匹敵している。しかしソイルセメントを路盤として使用する場合もっとも問題となるのは乾燥による収縮き裂の発生である。転圧して使用するソイルセメントには、主として力学的な強さを要求するいわゆるソイルセメントと、力学的な強さは求めず土の物理性質の改良を主目的としたセメント添加土がある。

前者は舗装路盤として使用する場合スラブとしての働きを要求されるためにセメント量が多くなる。このようにセメント量が多く、圧縮強度の大きいソイルセメントはき裂が生じやすいという欠点をもつ一方、自動車荷重を版作用によって有効に支持することを期待できる。

これまでセメント量と乾燥収縮ひずみの関係について種々の研究成果が報告されている。ある実験ではある限度以上のセメント量を使用すればある養生日数以後ではセメント量が多くなるほど乾燥収縮率が大きくなるという結果を得ている¹⁾。一方最近の報告では収縮ひずみとセメント量との間には一定の傾向は存在せず、セメント量が多いほどき裂の間隔およびき裂幅が大きくなるが、全収縮ひずみは大体一定であると述べているものもある²⁾。いずれにせよ土質工学的観点からはあまりセメント量の多いソイルセメントは収縮き裂が生じやすく、ソイルセメントをコンクリート工学的に取扱うドイツにおける考え方の誤りを指摘しているようである³⁾。

元来セメントコンクリートも引張強度が小さいためにき裂が発生しやすい材料であるが、クリープ変形は応力を軽減し引張強度が低いという欠点を相殺する役割りを果たしている。すでに解明されているようにソイルセメントのクリープひずみはコンクリートにくらべて非常に大きい⁴⁾。したがってソイルセメントはコンクリー

トにくらべて収縮ひずみは大きい、クリープ変形も大であることを考慮するとソイルセメントは収縮き裂の発生しやすい点でコンクリートよりも不利な材料であるとは断定しがたい。

またソイルセメントの引張曲げ強度と圧縮強度の比は約 1/4~1/5 であり、コンクリートでは約 1/7~1/10 であるから、もしセメントコンクリートの圧縮強度と同じ強さのソイルセメントを作れば引張曲げ強度はソイルセメントがコンクリートの大体 2 倍になるともいわれている⁵⁾。

このような引張強度特性から考えても、ソイルセメント自体がコンクリートにくらべて本質的にき裂が発生しやすい材料であるかどうかは疑問である。また圧縮強度の大きいソイルセメントはき裂が発生しやすいということも現場における現象としての把握はされていても室内実験としての研究ではまだ決定的なものは見当らない。さらに含水比、セメント量、使用土の物理性質などによって力学的性質（とくに引張強度およびクリープ変形特性）も異なる。したがって収縮き裂発生に関する問題についても一般的な断定は危険であり、ソイルセメントを構成する原材料の特性および配合との関連のもとに検討すべきである。

2. コンクリートの収縮応力についての Picket の理論と本研究の目的

Picket はコンクリートはりやスラブについて乾燥収縮による変形の理論式およびそれにもなる収縮応力の分布式を導いた⁶⁾。そのなかで Picket は乾燥過程におけるコンクリート中の収縮応力の発生を支配する法則は冷却過程における物体中の熱応力の発生を支配する法則に相似であり、コンクリートの応力-ひずみ関係はフックの法則にしたがうと仮定している。しかし乾燥過程におけるコンクリート中の水の流れが拡散方程式によって表現できるという仮定は必ずしも実際の現象と一致しない点が指摘されている。また応力-ひずみ関係はフックの法則にしたがうという仮定は、常温においても大きなクリープ変形を示すコンクリートはりまたはスラブに対して、その収縮応力の算出に用いることは妥当ではない。

したがって Picket の理論解は上述のような仮定を満

* 土木学会第 21 回年次学術講演会 (昭 41.5) にて一部発表

** 正会員 工博 京都大学教授 工学部土木工学科

*** 正会員 工修 金沢大学講師 工学部土木工学科

足する架空の材料に関するものであり、大きなクリープ変形を示す実在のコンクリート内の応力については全然言及していない。

本論文では乾燥収縮によって発生するソイルセメント路盤内応力を求めることが主目的である。この場合の応力-ひずみ関係は急速載荷試験によって得られるものではなく、時間のファクターを入れた実験のタイムスケールの大きいクリープ試験によって得られるものでなければならない。すなわち乾燥によってソイルセメントはりまたはスラブ中に発生する応力を推定するには基本的な応力-ひずみ関係にソイルセメントのクリープ変形特性を導入する必要がある。

前述のごとくソイルセメントのクリープ変形量はコンクリートよりもはるかに大きく、粘土、シルト分の含有量、水量、環境条件などによっても大いに異なり⁴⁾、またきれつ発生はクリープ変形特性の影響を受けるから乾燥収縮によって発生する内部応力の特性およびきれつ発生の特徴はソイルセメントの配合によって違ったものになるはずである。

以上のような観点から、本研究ではソイルセメントの乾燥収縮ひずみの発生を Carlson⁵⁾ や Picket がコンクリートについて考えたようにソイルセメント中の水分の移動としてとらえ、水分移動の過程には熱拡散の法則を適用するが、応力-ひずみ関係としては実験によって得られたソイルセメントの持続応力-ひずみ関係(クリープ変形も含んでいる)を用い、5. に示す方法によってソイルセメント路盤中に発生する乾燥収縮応力を推定した。

これにより主としてセメント量と粘土、シルト含有量がきれつ発生におよぼす影響について考察した。

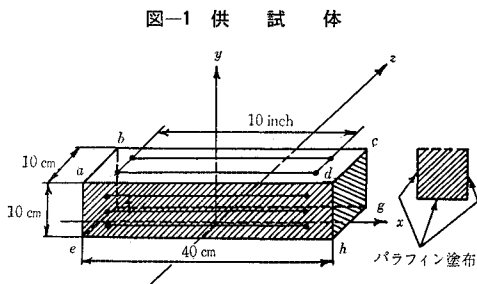
3. 一面のみから乾燥するスラブまたははりの非拘束収縮ひずみの拡散方程式の解

はりまたはスラブの露出面は 図-1 に示すように、 $y=b$ 面とし、相対する面を $y=0$ 面とする。

この場合の拡散方程式はつぎのようになる。

$$k \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} = \frac{\partial S}{\partial t} \dots\dots\dots (1)$$

$y=0$ における境界条件は



$$\frac{\partial S}{\partial y} = 0 \dots\dots\dots (2)$$

初期条件は

$$(S)_{t=0} = 0 \dots\dots\dots (3)$$

露出面 $y=b$ における境界条件としては、熱伝導における Newton の副射の法則を相似させるとつぎのようになる。

$$\frac{\partial S}{\partial y} = \frac{f}{k} (S_{\infty} - S) \dots\dots\dots (4)$$

ここで、

S : 収縮ひずみ

S_{∞} : 環境条件を固定した場合の終局収縮ひずみすなわち $t \rightarrow \infty$ における S の値

t : 時間

k : 収縮の拡散係数 (cm²/day)

f : 表面係数 (cm/day)

式 (1), (2), (4) を満足する Fourier 級数による解^{5),7)}は

$$S = S_{\infty} - \sum_{n=1}^{\infty} A_n e^{-\frac{kt}{b^2} \beta_n^2} \cos \beta_n \frac{y}{b} \dots\dots\dots (5)$$

ここで β_n は

$$\beta \tan \beta = \frac{fb}{k}$$

の n 次根とする。

式 (3) より

$$A_n = \frac{S_{\infty}}{\cos \beta_n} \frac{2 \frac{fb}{k}}{\left(\frac{fb}{k}\right)^2 + \frac{fb}{k} + \beta_n^2}$$

以上のような厳密解の他に、 $y=0$ で水分の蒸発をしゃ断した面を考える代りに半無限の固体表面からの Newton 副射の法則を相似させることによって得られる Gauss の誤差関数で表示される解がある^{5),7)}。

すなわち、

$$\frac{S}{S_{\infty}} = \phi \left[\frac{1 - \frac{y}{b}}{2\sqrt{T}} \right] - \phi \left[\frac{1 - \frac{y}{b}}{2\sqrt{T}} + B\sqrt{T} \right] e^{B(1 - \frac{y}{b}) + B^2 T} \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 $B = fb/k$, $T = kt/b^2$ 無次元のパラメーター

$\phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-x^2} dx$ Gauss の誤差関数

Picket の数値計算の結果によると、式 (6) で計算される $y=0$ における S/S_{∞} の値は式 (5) の厳密解によるものとは少々異なるといわれている⁵⁾。

しかし $y=0$ における S/S_{∞} 値の誤差が許容値以下になる程度の小さい T に対しては式 (6) を式 (5) の代りに用いてよいとしている。

本研究では $y=b$ における S/S_{∞} の値をとくに問題にしており、また十分小さい時間について解析するので、Gauss の誤差関数表⁸⁾を用いて容易に数値計算ができる式 (6) を用いた。

4. 収縮の拡散係数 (k) および表面係数 (f) の決定法

前節で時間 t , 座標 y の関数である収縮ひずみ S の解があたえられたが, 式 (6) を用いて S の値を算出する場合, k および f の値が必要である。

ここで考えた k, f の決定法は T が非常に小さいとき (したがって t が小さい) の実験データを対象にしたもので, 以下に示すように式 (6) の近似式を使用する方法である。

はりの厚さ方向 (y 方向) に分布する収縮ひずみ S の平均値 S_{av} を考える。

$$S_{av} = \frac{1}{b} \int_0^b S dy \dots\dots\dots (7)$$

T が小さいとき式 (6) を式 (7) に代入すると式 (8) が得られる。

$$\frac{S_{av}}{S_{\infty}} = \frac{1}{B} \left[e^{B^2 T} \phi(B\sqrt{T}) - 1 + \frac{2B\sqrt{T}}{\sqrt{\pi}} \right] \dots (8)$$

もし $B\sqrt{T}$ が非常に小さいとき式 (8) を Maclaurin 展開して得られるつぎの式 (9) が近似式として成立する。

Picket は T が約 0.05 以下で, B が 5 以下ならば式 (9) を用いてかなりの精度で S_{av}/S_{∞} の値を算出できるとしている³⁾。

$$\frac{S_{av}}{S_{\infty}} = BT \left[1 - \frac{4}{3\sqrt{\pi}} B\sqrt{T} + \frac{1}{2} (B\sqrt{T})^2 - \frac{8}{15\sqrt{\pi}} (B\sqrt{T})^3 + \dots \right] \dots\dots\dots (9)$$

式 (9) を k, f で表わし, $f/\sqrt{k} = x$ とおくと式 (10) がえられる (ただし $b=10\text{cm}$)。

$$\sqrt{k} xt(1-0.752\sqrt{t}x+0.500tx^2 - 0.301t\sqrt{t}x^3) = 10 \frac{S_{av}}{S_{\infty}} \dots\dots\dots (10)$$

実験供試体はりの $y/b=0.50$ における測定ひずみから S_{av}^* を求め, また S_{∞} を推定することによって各時間 t に対する S_{av}/S_{∞} の値が決定される。

式 (10) において未知数は k, x の 2 つであり, 相異なる時間における S_{av} が既知であるので k, x に関する 2 元連立方程式が得られる。

この 2 元連立方程式を解くことによって k, x が求ま

* 式 (10) を用いて k, x を決定するには後述の一面のみから乾燥させたはりの乾燥収縮試験から S_{av} を求めることができれば都合がよい。

一面のみが露出され, 外的拘束を受けない場合, 等質等方性の弾性材料で作った細長いはり (図-1 参照) において適合条件式 ($\frac{\partial^2 e_x}{\partial y^2} = 0$) およびつり合い条件式 ($\int_0^b \sigma_x dy = 0, \int_0^b \sigma_x y dy = 0$, ここで e_x, σ_x は x 軸方向のひずみおよび応力である) を満足する e_x は収縮ひずみ S によってつぎのように表現される。

り, k, f が決まる。

結局 x に関する 3 次方程式を解くことに帰着する。

5. 乾燥過程におけるソイル セメント供試体 はり内の収縮応力の算定法

座標は 図-1 のようにとる。

3. では時間 t および座標 y の関数としてあたえられた収縮ひずみ S は各微小要素が非拘束の場合に生ずる変形として取り扱ったが, 連続固体では任意の変形分布を許さないで収縮ひずみ分布が連続の条件を満足するような応力が生ずる (連続の条件を満足するような収縮ひずみ分布であれば応力は生じない)。

e_x を x 方向に生ずるひずみと定義するならば, e_x は収縮ひずみ S と応力によって生ずるひずみ ϵ_s との代数和である。もしはりまたはスラブの一面のみが露出状態にあり, 全体として外的拘束を受けない場合, 幅広いスラブまたは細長いはり内の 3 つの主応力の方向は幅, 長さ, 深さであり, 深さ方向 (y 方向) の主応力 (露出面に垂直) σ_y は明らかに零である。

もしスラブが長さ, 幅方向に等しく拘束されているかあるいは非拘束であれば深さにくらべて幅の広いスラブの長さおよび幅方向の主応力は相等しい。また細長いはりでは σ_x を無視してさしつかえない。

したがって

$$e_x = \epsilon_s - S \dots\dots\dots (11)$$

または

$$\epsilon_s = e_x + S \dots\dots\dots (12)$$

ここで,

e_x : x 方向に生ずるひずみ

ϵ_s : 応力によって生ずる x 方向のひずみ

S : x 方向の乾燥収縮ひずみ

時間 t および座標 y の関数である e_x は次節に述べるように実験的に求めることができ, また S は式 (6) の理論解がある。

したがって式 (12) から明らかなように応力によって生ずる x 方向のひずみ ϵ_s が t および y の関数として求まる。ここで e_x, S とともに実験的に求めることが望ましいが, S を実験的に求めることはほとんど不可能であり, ここでは上述のように熱拡散仮定による理論値を用

$$e_x = \left(6 \frac{y}{b} - 4\right) \frac{1}{b} \int_0^b S dy + \left(6 - 12 \frac{y}{b}\right) \frac{1}{b^2} \int_0^b S y dy$$

b : はりの厚さ

この式で $y/b=0.5$ のとき $e_x = -\frac{1}{b} \int_0^b S dy = -S_{av}$, すなわち実験供試体はりの $y/b=0.5$ における測定ひずみ e_x は $-S_{av}$ をあたえる。

もちろんソイル セメントはりに上述の弾性論より得られた結果を適用することには問題がある。

しかし上述のような考えから得られた S_{av} -時間関係を示す理論曲線と実験曲線 (図-6, 図-7) が比較的良好に一致していることからして, $y/b=0.50$ における測定ひずみを $-S_{av}$ と考えてもさしつかえないものと思われる。

いた。

つぎにこのようにして求めたひずみ ϵ_s から t, y の関数である x 方向の応力 σ_x を推定するために、以下に示すようにクリープ試験によって得られた持続応力-ひずみ曲線を用いた。固化したソイルセメント体に応力 σ をかけたときの瞬間ひずみをも含めてある時間後のひずみ ϵ は σ/σ_f (σ : 持続応力, σ_f : 破壊強度) のある関数としてあらわせるものとする。

$$\epsilon = \epsilon_i + \epsilon_c \dots \dots \dots (13)$$

ϵ_i : 瞬間ひずみ

ϵ_c : クリープひずみ

$$\epsilon = f\left(\frac{\sigma}{\sigma_f}\right) \dots \dots \dots (14)$$

σ, σ_f は時間 t の関数と考える

$$\sigma = \sigma(t), \sigma_f = \sigma_f(t) \dots \dots \dots (15)$$

とする。

ソイルセメントの応力とひずみの関係が式(14)であらわせるものと考えた場合、ひずみ ϵ が微小量 $d\epsilon$ だけ変化することによる応力 σ の微小変化量 $d\sigma$ を求める。

式(14)において

$$\frac{\sigma}{\sigma_f} = \xi$$

とおくと

$$\epsilon = f(\xi) \dots \dots \dots (16)$$

ϵ を t について微分すると

$$\frac{d\epsilon}{dt} = \frac{df}{d\xi} \cdot \frac{d\sigma}{dt} \frac{\sigma_f - \sigma}{\sigma_f^2} \dots \dots \dots (17)$$

単位時間におけるひずみ ϵ および応力 σ の微小変化量をそれぞれ $d\epsilon, d\sigma$ とすれば、任意の時間 $t=t_0$ における $d\epsilon$ と $d\sigma$ の関係は式(18)のようになる。

$$(d\sigma)_{t=t_0} = \left(\frac{d\xi}{df}\right)_{t=t_0} \cdot (\sigma_f)_{t=t_0} \cdot (d\epsilon)_{t=t_0} + \left(\frac{\sigma}{\sigma_f}\right)_{t=t_0} \cdot (d\sigma_f)_{t=t_0} \dots \dots \dots (18)$$

t_0 より単位時間 t_1 だけ経た $t=t_0+t_1$ における応力 $\sigma_{t=t_0+t_1}$ は

$$d_{t=t_0+t_1} = \sigma_{t=t_0} + (d\sigma)_{t=t_0} \dots \dots \dots (19)$$

となる。

$\epsilon = f(\sigma/\sigma_f)$ は実験曲線として、各時間における $\epsilon - \sigma/\sigma_f$ 曲線がえがかれているので $d\xi/df$ は図式的に求められる。 $\sigma_f = \sigma_f(t)$ も各供試体について実験曲線がある。

さきに述べたように供試体の y 方向の各位置における ϵ_s が各時間ごとに実験および理論計算から決定されている。

$t=1$ day における σ_x は $t=1$ day において生じたひずみ ϵ_s を用いて $\epsilon - \sigma/\sigma_f$ 曲線から直接求め、以後順次上の方法によって σ_x を計算する。

ただし後述のクリープ試験方法から明らかなように ϵ

$-\sigma/\sigma_f$ 曲線は σ_f が時間とともに増大する点を考慮に入れていない。 σ_f が増大する点を考慮に入れると、 $df/d\xi$ の値が大きくなり全体的に σ の値は小さくなるはずである。

6. 実験概要

(1) 乾燥収縮に関する実験

a) 使用材料の物理性質と配合 使用セメントは普通ポルトランドセメント(大阪セメント(株)製)である。使用土は京都市伏見区の山手産のものと淡路産の粘性土(青色)である。まず山手産の土(4760 μ ふるい通過部分)を土Aとして、土Aに淡路産の粘性土(土Dと称する)を重量で25%加えたものを土Bとする。

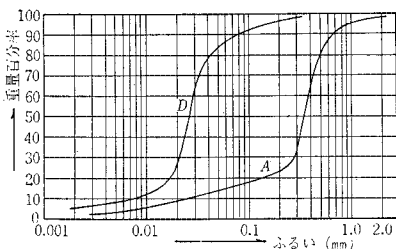
表-1 使用土の物理的性質

土の名称	液性限界 (%)	塑性限界 (%)	最適含水比 (%)	最大乾燥密度 (g/cm ³)	比重
A	N.L.	N.P.	12.5	1.860	2.639
D	42.3	25.6	—	—	2.773
B	24.0	19.5	13.5	1.850	—

表-2 使用土の粒度試験結果

土の名称	砂分 (%)	シルト分 (%)	粘土分 (%)	三角座標による分類
A	84.0	13.5	2.5	砂
D	9.0	83.5	7.5	シルト質ローム

図-2 粒径加積曲線



土Aおよび土Dについて行なった粒度試験および物理試験の結果は表-1、表-2および図-2に示すとおりである。これらの各試験はJIS A 1201~1206およびJIS A 1210にもとづいて行なった。

ただし最適含水比を求めるための突固め試験はセメントを7.5% (絶乾状態の土に対する重量比) 加えたものについて行なった。

セメント量 c/s (c : セメントの重量, s : 炉乾燥状態の土の重量) は5%, 7.5%, 10%の3種類で締固め時の含水比はすべて最適含水比である。

b) 混合および締固め 混合時間は、まず土とセメント5kgにつき約3分間スコップで混合し、その後水を加えながら10分間練り混ぜた。締固め度の決定にはJIS A 1210「土の突固め試験方法」を参考にした。締め固められたソイルセメントの単位容積あたりの突固め

エネルギーを JIS A 1210 の規定と同一にするという考えから、この規定と同一の装置を使用し、締め固められたソイルセメントの単位容積あたりの突固め回数も JIS A 1210 の規定と等しい。

本実験で使用した供試体の寸法は幅 10 cm、深さ 10 cm、長さ 40 cm の直方体である(図-1 参照)。したがって供試体作成のための総突固め回数は 300 回 (JIS A 1210 に規定されている 2.5 kg のランマーを使用した)であり、一層あたり 150 回の 2 層(深さ方向に 2 層)に突き固めた。

c) 実験方法 供試体作成後 1 日間湿潤養生を行ない、1 日後に図-1 に示すように面 abcd を残して他の 5 面にパラフィン塗布することによって水分の蒸発を断断した。

つぎに x 方向のひずみ e_x の y 方向の分布状況を知るために図-1 に示すように露出面 abcd には 10 in 間隔に 2 対のプラグをはりつけ、aehd 面には等間隔に 3 対また efgh 面にも abcd 面と同様に 2 対のプラグをはりつけた。

このようにすれば efgh 面を $y=0$ としたときの各 y 座標 $y/b=0, 0.25, 0.50, 0.75, 1.00$ の 5 点のひずみが測定できる。

プラグをはりつけた供試体は温度 20°C、相対湿度 50% の恒温恒湿室に置き、時間ともなう各ひずみの変化をフーゲンベルガーひずみ計で測定した。各種類の供試体は 2 本ずつ作成され、実験結果はそれらの平均値である。

(2) クリープ試験

a) 使用材料の物理性質と配合 使用セメントおよび土は収縮に関する実験に使用したものとまったく同一のものである。配合についてはすべてセメント量 (c/s) は 7.5% であり、締め固め時の含水比は最適含水比である。

b) 混合および締め固め この項についても 6. の (1) で述べたとおりである。この場合供試体は直径 10 cm、高さ 30 cm の円柱体であり、総突固め回数は 177 回で、一層あたり 30 回の 6 層に突固めた。

c) 養生条件および環境条件 十分に含水比の管理を行なうために供試体の作成はすべて温度 20°C、相対湿度 80% の恒温恒湿室で行ない、作成後型わくのままポリエチレンの袋で密封して 1 日後に脱型した。脱型後供試体のたて方向に 10 in 間隔に 2 対のプラグをはりつけ、再びポリエチレン袋中でさらに 6 日間養生後一定応力を導入した。一定応力下における供試体の環境条件は温度 20°C、相対湿度 80% の空気中である。

d) 一定応力の大きさ 長期間供試体にかかる一定応力 (σ_c) の圧縮破壊強度 (7 日材令 σ_f) に対する比の値が土 A に対しては $\sigma_c/\sigma_f=0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ 、土 B に

対しては $\sigma_c/\sigma_f=0.4$ とした。

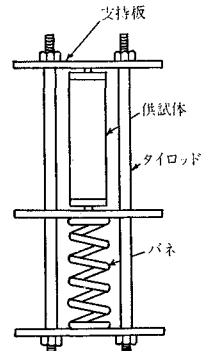
e) 実験装置と実験方法

3 に示すように 3 枚の鋼板と 2 本のロッドとスプリングを組み合わせたものである。所定の圧縮応力を導入後フーゲンベルガーひずみ計によってプラグ間隔の変化を測定してクリープひずみを求めた。

同時に外力をかけてない無応力状態の供試体の収縮ひずみを測定した。供試体はすべて 3 本ずつ作成し、結果はそれらの平均値である。

クリープ試験装置は図-

図-3 クリープ試験装置



7. 応力計算にあたっての仮定

実験により得られたデータを用いてソイルセメント供試体はりに生ずる応力を 5. で示した方法で算定するには各配合のソイルセメントの引張および圧縮強度-材令曲線、持続応力-ひずみ曲線が必要である。しかしここでは一部分の配合のソイルセメントについてこれらの曲線が得られているにすぎないので、つぎに示すような仮定を設けることによって、得られている実験曲線を拡張解釈して使用した。

(1) ソイルセメントの引張破壊強度は JISA 1113-1964 の『コンクリートの引張強度試験方法』を準用した。

(2) 図-4、図-5 に示すように土 A、土 B ともに

図-4 破壊強度と材令の関係

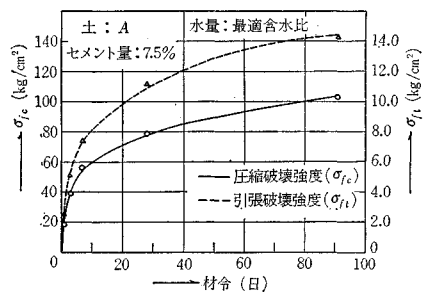
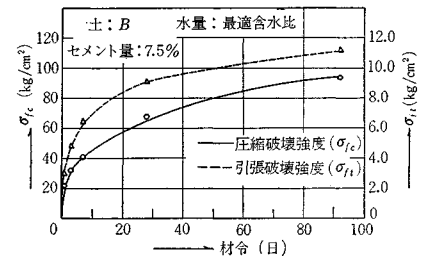


図-5 破壊強度と材令の関係



セメント量が7.5%の配合について引張破壊強度-材令曲線、圧縮破壊強度-材令曲線が得られている(養生条件は温度20°C、相対湿度80%の恒温恒湿室中においてポリエチレン袋で密封の状態である。供試体は直径7.5cm、高さ15cmの円柱体であり、突固め総数50回で1層17回の3層に突き固めた)。

これらの曲線は半対数方眼紙上でほぼ直線になる。他の配合については3日材令、14日材令の圧縮破壊強度がわかっているので半対数方眼紙上で直線になるという特性¹⁰⁾を利用して曲線を推定した。

また他の配合の引張破壊強度-材令曲線は引張破壊強度の圧縮破壊強度に対する比の値が土Aでは約0.13倍、土Bでは約0.15倍になるという実験上の事実から求めている。

(3) 応力計算に使用する $\epsilon-\sigma/\sigma_f$ 曲線についてつぎの3つの仮定を設けている。

(a) 本実験で得られる曲線は圧縮応力に対するものであるが、引張応力に対しても同じ曲線になるものとする。

(b) 使用土が同一のものであれば、セメント量が多少異なっても同一の $\epsilon-\sigma/\sigma_f$ 曲線を使用する。

これはソイルセメントのクリープ変形特性はセメント量によってあまり影響をうけないという実験事実にもとづいている。

(c) 土Bの持続応力-ひずみ曲線は $\sigma_c/\sigma_f=0.4$ の場合のクリープひずみ-時間曲線から推定したものである。推定の方法は土Aの各時間の持続応力-ひずみ曲線は指数関数的であり、半対数方眼紙上で直線になるという性質が土Bについても存在するという仮定にもとづいている。

8. 実験結果と考察

(1) ソイルセメントの収縮拡散係数(k)と表面係数(f)に関する考察

式(10)によって求めたソイルセメントのk, fの値は表-3に示すとおりであり、1日と5日の S_{av} から求めたものである。Picketはコンクリートのk, fとして $k=0.23 \text{ cm}^2/\text{day}$, $f=0.18 \text{ cm}/\text{day}$ を得ている ($S_{\infty}=280 \times 10^{-5}$, 環境条件は温度24.4°C, 相対湿度50±2%)。

表-3 t=1日とt=5日のデータから求めたk, fの値

土の名称	セメント量 (%)	k (cm ² /day)	f (cm/day)	S _∞ の推定値 (×10 ⁻⁵)
A	5	1.11	0.34	186
	7.5	0.77	0.28	222
	10	1.32	0.32	265
B	5	1.14	0.43	247
	7.5	0.93	0.30	290
	10	1.18	0.36	282

注: 含水比はすべて最適含水比である。

この値と表-3のk, fの値をくらべると、ソイルセメントのkはコンクリートよりも約3~5倍、fは1.5~2.5倍大きいことがわかる。ソイルセメント体中の微小要素の容積収縮と含水比の関係が線型的であれば、kの物理的な意味は1日あたり1cm²の面積を通過して移動する水分の量と考えられるので、ソイルセメントはコンクリートにくらべて約3~5倍水分が移動しやすいと考えてよい。

しかしS_∞の値はソイルセメントの方が全般的にやや小さいことから、ソイルセメントの方が早期に水分の移動蒸発がすすみ、Sはコンクリートよりも早く一定値S_∞に近づくものと思われる。

このような事実から考えて、ソイルセメントはコンクリートにくらべて乾燥過程の初期に非常に大きな収縮応力が生じ、き裂が発生の原因になっているものと思われる。

(2) 平均乾燥収縮ひずみに関する考察

表-3のk, fを用いて式(8)によってS_{av}-t曲線をえがくと、A-7.5-0, B-7.5-0(第1の記号は土の種類、第2の数はセメント量(%), 第3は水量を示す。0は最適含水比である)については図-6, 図-7の実線のようになり、y/b=0.5における測定値e_x(=-S_{av})による実験曲線は破線のようになる。

これらの図からわかるように、初期には理論曲線と実験曲線は非常によく一致しているが、時間が経過するに

図-6 平均収縮ひずみ-時間曲線

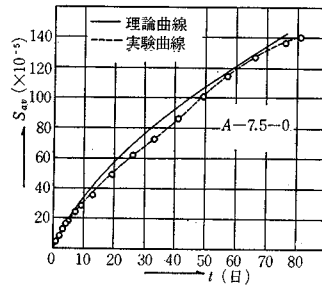


図-7 平均収縮ひずみ-時間曲線

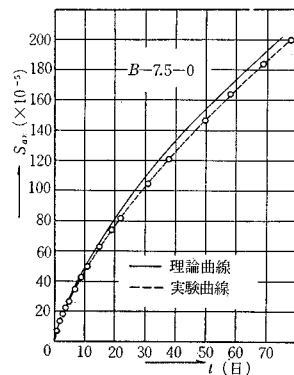


図-8 各時間におけるソイルセメント供試体内の理論収縮ひずみ分布

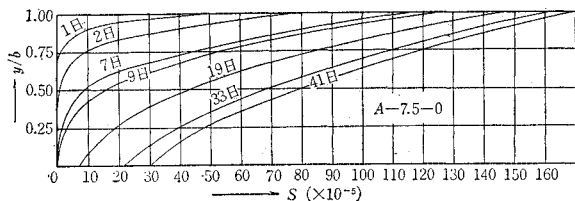
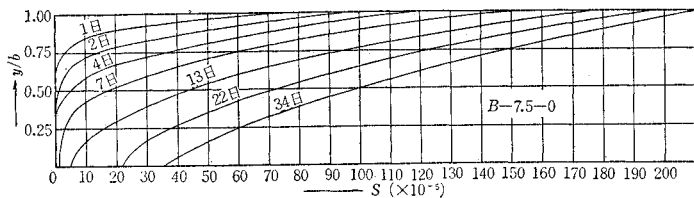


図-9 各時間におけるソイルセメント供試体内の理論収縮ひずみ分布



したがって実験値のほうが理論値より小さくなる。これは乾燥がすすむと収縮拡散係数 k が小さくなることを示している。

(3) 乾燥収縮ひずみ $S(t, y)$ の理論計算の結果と e_x の実験結果

表-3 の k, f の値を用いて、 $S(t, y)$ を計算して図示すると 図-8, 図-9 のようになる。

これらの図から明らかなように、乾燥を開始して初期には露出面近傍に非常に大きな収縮ひずみが生じ、時間とともに次第に深部におよび 10 日後から水分の蒸発を断じた底面 ($y/b=0$) 近傍に収縮ひずみが生じはじめる。すなわちこのことは乾燥を開始して 10 日後から $y/b=0$ 面近くの水分が移動しはじめることを示している。

図-10 時間経過ともなう e_x の分布の変化状況 (A-7.5-0)

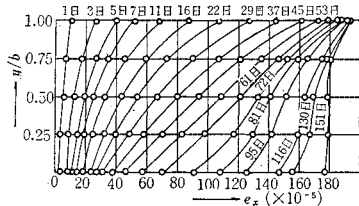
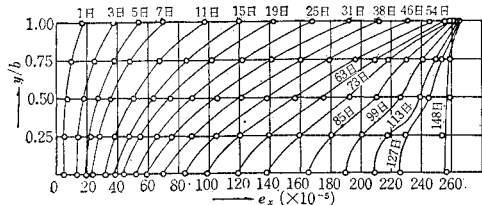


図-11 時間経過ともなう e_x の分布の変化状況 (B-7.5-0)



つぎに e_x の測定結果をグラフにえがくと 図-10, 図-11 のようになる。乾燥を開始して初期には露出面に近い位置の e_x ほど急速に大きくなり、底面 ($y/b=0$) の e_x の値との差は 50 日後で最大になる。その後は底面に近い位置の e_x が次第に大きくなる一方露出面に近い位置の e_x の増加割合は小さくなり、60 日後からはほとんど増加しなくなる。そして各位置の e_x は S_{∞} (=一定) に漸近し、位置による均一化がすすむ。

(4) 乾燥収縮応力の解析結果と考察

a) 持続応力-ひずみ曲線 応力計算に使用した持続応力-ひずみ曲線は 図-12 (土 A に対するもの) のようである。

b) 一面のみから乾燥する非拘束ソイルセメントはりの乾燥収縮応力分布

5. で述べた方法によって求めた供試

図-12 持続応力-ひずみ曲線

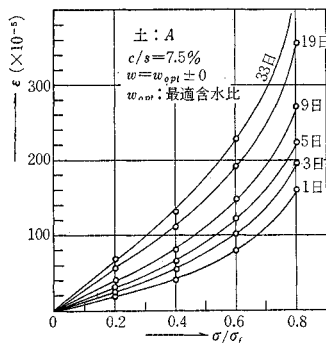
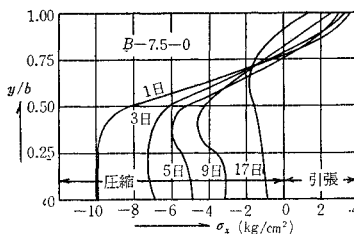


図-13 非拘束ソイルセメントはり中に生ずる応力分布



体の収縮応力分布の一例をあげると B-7.5-0 に対しては 図-13 のようになる。

いずれの供試体も露出面近傍 ($y/b=2/3 \sim 1$) では引張応力、底面に近い部分 ($y/b=0 \sim 2/3$) では圧縮応力が生じている。この場合ソイルセメントはりは非拘束であるから $\int_0^{10} \sigma_x dy = 0$ を満足しなければならない。しかし本計算結果では 図-13 から明らかなように $\int_0^{10} \sigma_x dy < 0$ となる。弾性論にもとづく Picket の計算結果によると、 $0 < y/b < 0.2$, $0.8 < y/b < 1.0$ では引張応力、 $0.2 < y/b < 0.8$ で圧縮応力が生じ、もちろん理論計算

であるから $\int_0^b \sigma_x dy = 0$ を満足する。このように実験的に得られたソイルセメントはり内の応力分布が $\int_0^{10} \sigma_x dy = 0$ を満足しないのは、ソイルセメントの乾燥収縮ひずみの発生過程に熱拡散の法則を仮定したが、実際は熱拡散方程式にしたがう収縮ひずみ S の他に水分蒸発しゃ断の不完全さあるいは乾燥以外の原因による収縮ひずみが生じているためと考えられる。

したがって応力によって生ずる真のひずみはここで得られた $(S+e_x)$ に $\alpha(>0)$ だけ加えたものになるはずである。

本実験で使用したソイルセメントでは各供試体によって α の特性にさほど差違はないと考えられるので、以下に示すような定性的な議論においては本研究で得られた結果は十分信頼のおけるものと思われる。

$y/b=0, 0.25, 0.50, 0.75, 1.00$ の各位置における σ_x/σ_f と時間 t の関係を示す一例をあげると 図-14 のようである。さらに $y/b=1.00$ (露出面) に発生する引張応力に焦点をしばって各供試体の σ_x/σ_f-t 関係をえがくと 図-15, 図-16 のようになる。

露出面に生ずる引張応力 (σ_x) の引張破壊強度 (σ_f) に対する比の値は乾燥開始後増大し、5日ぐらいで最大

図-14 各位置の σ_x/σ_f の時間とともになう変化状況

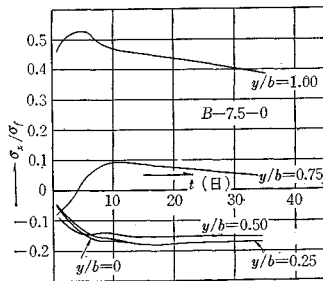


図-15 $y/b=1.00$ における σ_x/σ_f-t 曲線

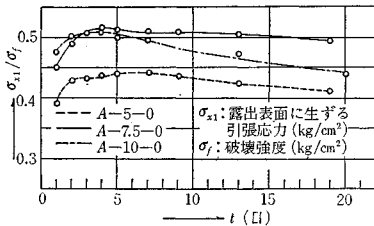
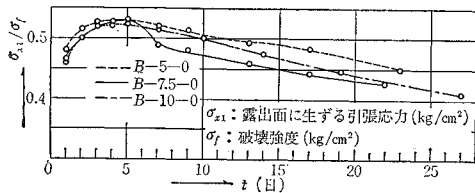


図-16 $y/b=1.00$ における σ_x/σ_f-t 曲線



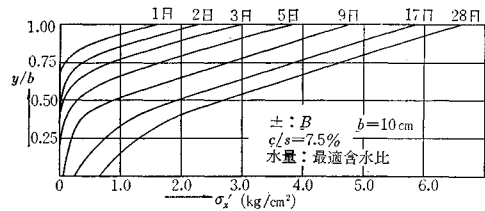
になり、土Aでは、0.45~0.51、土Bでは 0.53 程度になる。 σ_x/σ_f の最大値をみると土Aではセメント量が 5% のものが他の 7.5%, 10% にくらべて極度に小さく、7.5% の方が 10% よりもやや大きいほとんど差がないとみてよい。一方土Bの σ_x/σ_f 値はセメント量が 5%, 7.5%, 10% の順に小さくなっているがほとんど差がないと考えた方が妥当であろう。

上のような結果から、三角座標による分類で砂に属する土Aを使用したソイルセメントではセメント量が非常に少なければ (5% 程度) 露出面に生ずる応力の破壊強度に対する比の値は小さくセメント量の多いものにくらべてきれつ発生点で有利であるが、土Aよりも非常に粘土、シルト分の多い土Bではきれつ発生しやすさの点でセメント量の多少による差はほとんどないといつてよい。

全体としてみると、土Bの方が土Aよりきれつは発生しやす。

c) 一面のみから乾燥する完全拘束はりまたはスラブの乾燥収縮応力分布 実際のソイルセメント路盤は非拘束ではなく、長さ方向の短縮およびそり (warping) を拘束した完全拘束スラブにちかい。したがってソイルセメントでつくった舗装路盤の乾燥収縮きれつの発生しやすさの程度について考察するには完全拘束スラブまたははりの乾燥収縮応力分布を知る必要がある。完全拘束はりまたはスラブでは $e_x=0$ となり、収縮ひずみ S によって生ずる応力を計算すればよい。計算結果をえがいた一例を示すと 図-17 のようになる。完全拘束スラブは非拘束スラブと異なり、露出面から水分の蒸発をしゃ断した底面まで引張応力が生じ、時間とともに大きくなる。

図-17 完全拘束ソイルセメントはり中に生ずる応力分布



また土A, 土Bともにセメント量が多いものほど生ずる引張応力は大きい。

つぎに $y/b=0, 0.25, 0.50, 0.75, 1.00$ の各位置における σ'_x/σ'_f (σ'_x は完全拘束スラブに生ずる応力) と時間 t の関係をえがくと 図-18 のようになる。

さらに露出面に生ずる引張応力の特性を知るために、土A, 土Bの $y/b=1.00$ 面の σ'_x/σ'_f-t 曲線を各セメント量についてえがくと 図-19, 図-20 のようである。

$y/b=1.00$ 面の σ'_x/σ'_f 値は時間の経過とともに大きくなり、非拘束スラブの曲線 (図-15, 図-16) とは異

図-18 各位置の σ_x/σ_f の時間ともなう変化状況

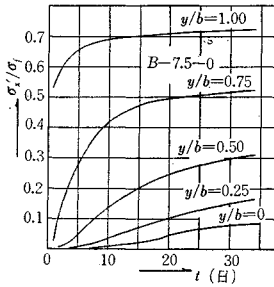


図-19 σ_{x1}/σ_f-t 曲線

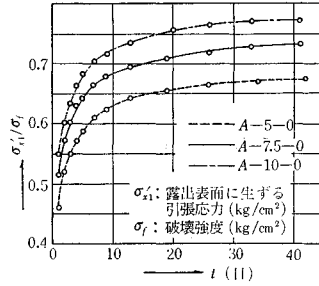
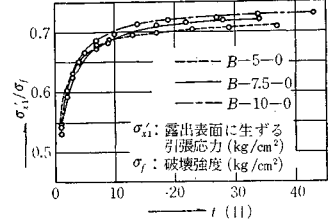


図-20 σ_{x1}/σ_f-t 曲線



なり、40 日程度まで増加の一途をたどる。

1 日～10 日の間に σ_x/σ_f 値は急速に大きくなり、10 日を過ぎると増加割合は急に小さくなる。土 A では 20 日以後、土 B では 10 日以後ほとんど増加しなくなり、40 日前後で土 A では、 $\sigma_x/\sigma_f=0.67\sim 0.77$ 、土 B では $\sigma_x/\sigma_f=0.71\sim 0.73$ の範囲に落ち着くようである。

9. 結 論

(1) ソイルセメントの収縮拡散係数 (k) はコンクリートの約 3～5 倍、また表面係数 (f) は約 1.5～2.5 倍の値を示す。

(2) ソイルセメント路盤を完全拘束スラブと考えた場合、

(a) シルト、粘土分の少ない土 A を用いてつくった路盤ではセメント量が多くなる (本実験では 5%～10%) ほど明らかに表面きれつは発生しやすい。

(b) シルト、粘土分の多い土 B を用いるとセメント量が多少異なっても (5%～10% の範囲) きれつ発生しやすさの点ではほとんど差がない。

(c) セメント量が多いものではシルト、粘土分の少ない土 A の方がきれつは発生しやすいが、セメント量の少ないものでは反対にシルト、粘土分の多い土 B の方がきれつは発生しやすい。

(3) 同一セメント量ではシルト、粘土分の少ないソイルセメントほど強度が大きい。したがって一定の圧縮強度を得るにはなるべくシルト、粘土分の少ない土を用い、セメント量を少なくした方がきれつ発生点で有利である。

しかしシルト、粘土分の多い土に限っていえば、セメント量を多少多くして (10% 程度)、圧縮強度を大きくしてもきれつ発生点でさほど不利になることはないと考えてよい。

(4) ソイルセメント上層路盤の厚さは通常 15～20 cm が標準とされている。

その 1 つの理由としてソイルセメントの厚さが 10 cm 以下の薄い層ではきれつが生じやすいことがあげられる。本研究では $b=10$ cm の供試体で実験を行なった

が、 $b < 10$ cm の場合の理論計算も可能である。 b が小さくなるとパラメーター T が大きくなり、 B が小さくなる。

また S_{av} の測定値も変わってくるであろう。薄いソイルセメント層では、 T 、 B 、 S_{av} の変化によって露出表面に生ずる引張応力が大きくなるものと思われる。

以上を総合して、あまりセメント量の多いソイルセメントは収縮きれつが生じやすいといわれているが、本研究によれば、粘土、シルト分の少ない土 A と粘土、シルト分の多い土 B とで露出表面に収縮によって生ずる引張応力特性が異なっていることからすれば、このような結論は一般的なものではなく、使用する土の性質(とくに粒度)を考慮に入れて検討すべき問題であると思われる。

最後に本研究の実験を行なうにあたり協力いただいた大成建設(株)吉岡伸晃君に厚く感謝する。また本研究の一部分は著者の一人にあたえられた吉田研究奨励金によって行なったものである。

参 考 文 献

- 1) 竹下春見:ソイルセメント, コンクリートパンフレット 第 71 号, p. 26
- 2) Nakayama, H. and Handy, R.L.: "Factors Influencing Shrinkage of Soil-Cement", Highway Research Record No.86, pp. 15~27
- 3) 高橋国一郎:安定処理工法, 新道路シリーズ, 理工図書 p. 39
- 4) 岡田 清・川村満紀: "ソイルセメントの荷重変形特性に関する二、三の考察", 材料, 第 13 巻, 第 132 号, pp. 705~710
- 5) Gerald Picket: "Shrinkage Stress in Concrete", Journal of A.C.I. Vol. 17, No. 3, Jan. 1946, pp. 165~195
- 6) Roy, W. Carlson: "Drying Shrinkage of Large Concrete Members", Journal of A.C.I. Jan. Feb. 1937 pp. 327~336
- 7) 小平吉男:物理数学, 第 2 巻, 昭和 12 年, 岩波書店
- 8) 柴垣和三雄:0.01% 初等函数表, 昭和 27 年, 共立出版株式会社
- 9) Gerald Picket: "Shrinkage Stress in Concrete", Journal of A.C.I. Vol. 17, No. 4, Feb 1946, pp. 361~398
- 10) Grimer, F.J. and Krawczyk, J.: "Relations between Strength and Age for Soil-Cement, with Particular reference to the prediction of later Strengths from earlier strengths", Magazine of Concrete Research Vol. 15, Number 43, Mar. 1963 (1966.9.2・受付)