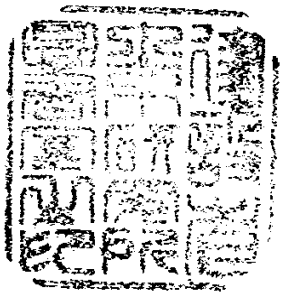
土木研究所報告　第百十二号　昭和三十七年九月

土木研究所報告

第112号

コンクリート舗装の構造設計に関する実験的研究（2）
——摩擦応力，狭義端部こう束応力およびそりこう束応力について——
……岩間　滋…(1)

濾過砂の粒度および表面洗浄に関する研究
……寺島重雄，柏谷　衛…(99)



昭和37年9月

建設省土木研究所

コンクリート舗装の構造設計に関する実験的研究（2）

——摩擦応力，狭義端部こう束応力およびそりこう束応力について——

（昭和36年7月）

岩　間　滋*

Experimental Studies on the Structural Design of Concrete Pavement (2)

——On the Frictional Stress, End Restraint Stress and Warping Stress of Concrete Pavement——

(July 1961)

S. Iwama

Synopsis:

Experimental concrete Pavements with a thickness of 20cm, a width of 3.75m, lengths of 90 and 180m between expansion joints, 6, 10, and 15m between dummy joints were paved at Chiba. The Movement, apparent warping, temperature of the slabs and the variation of joint's widths have been observed for one year. Friction test of 2 concrete slabs, compression test of expansion joint fillers, length and weight variation measurement of concrete specimens from pavement slabs were performed.

After the evaluation of these date, the amount and freguency of frictional stress, end restraint stress and warping stress were experimentaly determined.

The anthor made it clear that the warping stress is the most important one of the thermal stresses of concrete slabs.

要　旨

厚さ20cm，幅3.75m，膨脹目地間隔90mおよび180m，めくら目地間隔6m，10m，15mのコンクリート版の変位，目地幅の伸縮，見掛け上のそり，温度などを1年間にわたって観測した。また実物大コンクリート版の摩擦試験，目地板の圧縮試験，供試体の長さ変化および重さ変化などを測定した。

これらの観測データを整理して，摩擦応力の大きさと頻度，端部こう束応力の大きさと頻度，そりこう束応力の大きさと頻度を実験的に求めた。その結果コンクリート版の温度応力のうちそりこう束応力が最も重要であることを明らかにした。

目　次

1　緒　言……（2）
2　実施した試験および観測の概要……（2）
〔1〕路盤摩擦係数の測定……（2）
〔2〕コンクリート版と路盤の相対変位の測定…（3）
〔3〕目地幅の伸縮の測定……（9）
〔4〕目地板の圧縮試験……（10）
〔5〕現場養生供試体の長さ変化および含水量変化の測定……（10）
〔6〕コンクリート版のそり測定……（10）
〔7〕コンクリート版の温度変化の測定……（11）
〔8〕コンクリート版のひずみの測定……（11）
〔9〕コンクリートの膨脹係数の測定……（12）
〔10〕コンクリート供試体のヤング率およびポアソン比の測定……（12）
3　コンクリートの性質……（12）
〔1〕コンクリートの配合……（12）
〔2〕コンクリートの膨脹係数……（12）
〔3〕コンクリートのヤング率およびポアソン比……（13）
〔4〕コンクリートの圧縮強度……（13）

* 前道路部　舗装研究室研究員　（現日本道路公団高速道路第一部計画第二課）

4　コンクリート版の温度変化……(14)
〔1〕コンクリート版温度の日変化……(14)
〔2〕コンクリート版温度の年変化……(14)
5　コンクリート供試体の含水量変化と長さ変化…(14)
〔1〕コンクリート・ハリ供試体の含水量変化…(14)
〔2〕コンクリート長さ変化供試体の含水量変化および長さ変化……(15)
〔3〕コンクリート供試体の長さ変化と含水量変化の関係……(18)
6　コンクリート版の摩擦応力……(18)
〔1〕摩擦係数……(18)
〔2〕コンクリート版変位の日変化……(19)
〔3〕日変化におけるコンクリート版変位と位置の関係……(24)
〔4〕日変化におけるコンクリート版変位と温度の関係……(26)
〔5〕コンクリート版変位の年変化……(28)
〔6〕年変化におけるコンクリート版変位と位置の関係……(47)
〔7〕年変化におけるコンクリート版変位と温度の関係……(47)
(8)　めくら目地をもつコンクリート版の変位の型……(47)
〔9〕めくら目地をもつコンクリート版の摩擦応力……(49)
7　膨脹目地をもつコンクリート版の狭義端部こう束応力……(55)
〔1〕目地板の圧縮復元試験結果……(55)
〔2〕目地幅伸縮の日変化……(55)
〔3〕日変化における目地幅伸縮と温度の関係…(56)
〔4〕目地幅伸縮の年変化……(56)
〔5〕年変化における膨脹目地幅伸縮と温度の関係……(68)
〔6〕めくら目地をもつコンクリート版の狭義端部こう束応力……(68)
8　コンクリート版の広義端部こう束応力……(69)
〔1〕めくら目地と膨脹目地をもつコンクリート版の広義端部こう束応力……(69)
〔2〕連続鉄筋コンクリート版の端部こう束応力……(70)
9　コンクリート版のそりこう束応力……(70)
〔1〕見掛け上のそりの日変化……(70)
〔2〕見掛け上のそりと位置の関係……(70)
〔3〕カールソンひずみ計によって測定したコンクリート版上下両面のひずみの日変化……(70)
〔4〕コンクリート版のそりこう束応力……(70)
10　ひびわれの観測……(72)
11　結　論……(72)

1　緒　言

本研究の第1報においてはコンクリート版内各点の温度変化の観測結果を報告した。しかしコンクリート版の温度応力のうち温度変化から直ちに求められるものは内部応力だけであって，端部こう束応力とそりこう束応力はこう束の程度がわかって始めて求められるものである。

本報告においては，始めに端部こう束応力を摩擦応力と狭義端部こう束応力にわけて考え，実物大のコンクリート版を水平に動かした場合の抵抗力と変位の関係を求める試験を実施する一方，実際のコンクリート版が日間または年間どのように変化しているかを観測し，摩擦応力の大きさと頻度を推定した。

また膨脹目地に用いた目地板の圧縮力と変形量の関係を求める試験を実施する一方，実際のコンクリート版の膨脹目地幅が日間または年間どのように変化しているかを観測し，狭義端部こう束応力の大きさを推定した。

次にコンクリート版一枚ごとの伸縮量と温度変化の関係から，コンクリート版の広義端部こう束応力の大きさと頻度を推定した。

最後にコンクリート版のそりを実測し，厚さ方向の温度こう配から計算されるこう束なしの場合のそりと比較することによってそりこう束応力の大きさを推定した。そりこう束応力についてはさらに温度こう配のある場合とない場合に実物大コンクリート版の破壊試験を実施し，ひびわれ荷重の差からこう束応力を逆算する方法もとったが，それについては便宜上第3報で報告する。

なお本報告の主体をなす各種長期観測は止むを得ない都合から昭和36年4月10日に一時中止せざるを得なくなったので1年数カ月の観測結果しか報告できないが，将来再開したいと考えている。

2　実施した試験および観測の概要

〔1〕路盤摩擦係数の測定

コンクリート版と路盤の摩擦係数は，土木研究所千葉支所構内に試験舗装をつくって測定した。この試験に用いたコンクリート版は幅3.5m，長さ5m，厚さ15cmおよび25cmの2枚であって，関東ローム路床上に10cmの砂を敷き，その上に20cmの切込砂利を2層にしきならして締固め，さらに平均厚5mm程度のクッション砂を敷いて水平に仕上げた路盤面に路盤紙を敷いて施工した。

路盤材料として用いた切込み砂利の粒度は図－1の曲

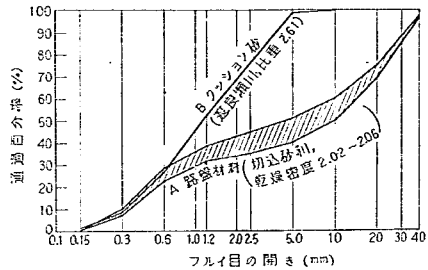


図-1 摩擦係数測定のための試験舗装の路盤材料とクッション砂の粒度

線Aに示すようであった。クッション砂の粒度は図-1の曲線Bのようであった。仕上った路盤面はクッション砂がいくぶん厚かったようであるが，わが国の国道工事現場で一般につくられているものと大きい相違はないと考えられる。

荷重は写真-1および2のようにコンクリート版と根入れ深さ2mの鉄筋コンクリート・アバットの間にジャッキとひずみリングを挿入して加えた。両ジャッキは常に同じ力を与えるようにたえず注意したが，変位の実測結果を見ると，この注意は十分に守られたと認められる。

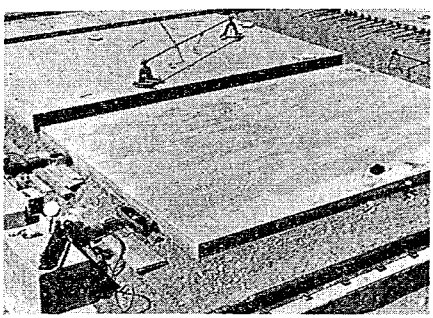


写真-1 3.5×5mのコンクリート版の摩擦試験（ジャッキ，ひずみリング，側面にとりつけたダイヤルゲージ）

コンクリート版と路盤の相対変位は二つの方法で測定した。一つはコンクリート版の側面に鋼棒を半長だけ埋めこんでおき，路盤中深さ1.5mまで打ちこまれたロッドとそれの間隔の変化をダイヤルゲージで読む方法であって，その詳細は〔3〕項でのべる変位計を簡単にしたものである。他の一つは平板載荷試験に用いるダイヤルゲージサポートを加圧面と反対側のコンクリート版側面付近の路盤上において，ダイヤルゲージによってコンクリート版の変位を測定するものである（写真-2）。第2法はダイヤルゲージサポートが路盤と共に動くおそれがあると考えられたが，第1法による測定値と第2法による測定値の間にほとんど差がないことが実測結果から確かめられた。

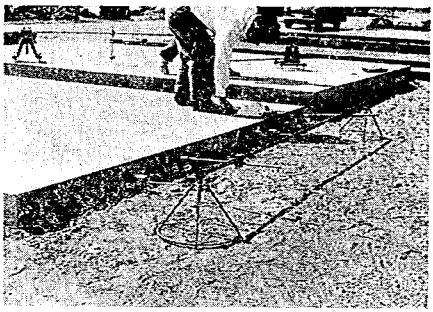


写真-2 摩擦試験におけるコンクリート版変位の測定

荷重は0.5tずつ加えて行き各荷重においてコンクリート版の動きがほとんどなくなった時の変位を読み，コンクリート版の動きが止らなくなったところで試験の終りとした。

摩擦係数測定試験は，コンクリート版施工後約3カ月に2回続けて実施し，さらに約5カ月後に1回実施し，同じ日に写真-3に示すように砂を盛って重さを増加させてもう1度実施した。5カ月後に実施した2つの試験は重さと摩擦係数の関係を求めるために行なったものである。

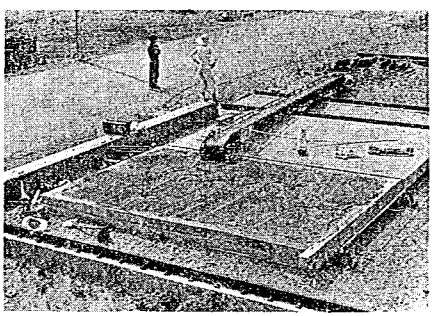


写真-3 砂を盛って重くしたコンクリート版の摩擦試験

〔2〕 コンクリート版と路盤の相対変位の測定

実際のコンクリート版が長期間にわたって路盤上をどのように動いているかは，土木研究所千葉支所構内に施工された交通試験路について観測した。交通試験路は図-2に示すとおり全巾員15m，延長819mの道路であって，主として交通工学の各種試験に供せられる目的によってつくられたものであるが，そのうち2車線7.5mを厚さ20cmのコンクリート舗装版として施工したので，その一部を観測の対象としたのである。

コンクリート舗装部分の断面は図-3に示すとおり関東

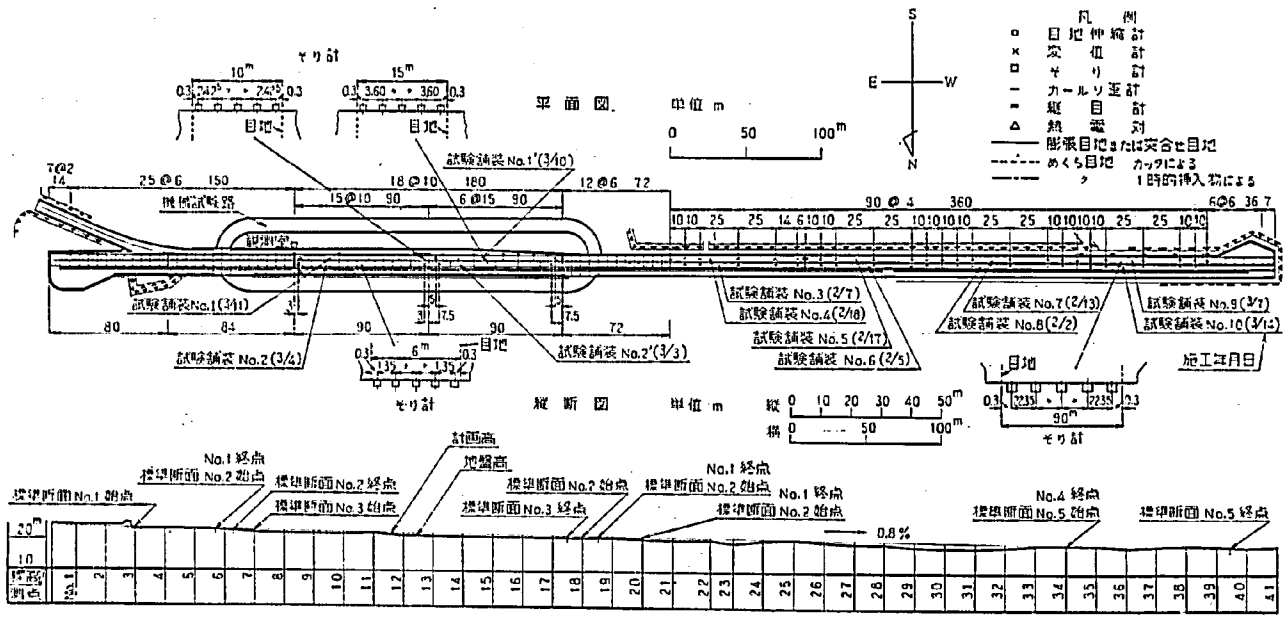
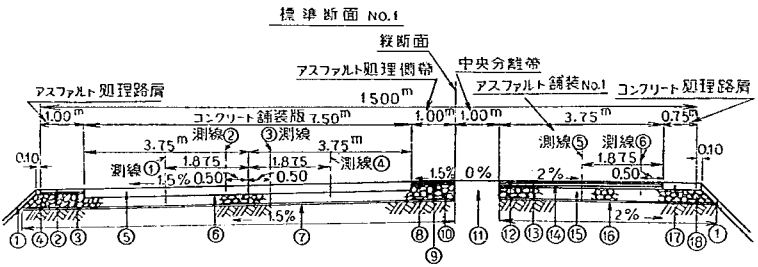


図-2 交通試験路平面図，縦断図および計器設置位置図

ローム路床上に砂を5cm敷き，最大粒径50mmのスラグを2層にわけてマカダム式に20cm厚まで締固め，その上に平均厚5mmのクッション砂を敷いた路盤上に厚さ20cmのコンクリート舗装をおいたものとなっている。



番号	名称		番号	名称	
①	関東ロームまたは路盤土	10 cm	⑫	アスファルトコンクリート	5 cm
②	浸透式アスファルト乳剤舗装	3 〃	⑬	アスファルトマカダム	5 〃
③	水締マカダム	5 〃	⑭	水締マカダム	5 〃
④	スラグ	32 〃	⑮	スラグ	25 〃
⑤	コンクリート	20 〃	⑯	砂	5 〃
⑥	スラグ	20 〃	⑰	コンクリート	15 〃
⑦	砂	5 〃	⑱	スラグ	25 〃
⑧	浸透式アスファルト乳剤舗装	3 〃	⑲	コンクリートL型側溝（現場打）	
⑨	水締マカダム	5 〃	⑳	フイルター層	
⑩	スラグ	32 〃	㉑	上半有孔管	φ20 〃
⑪	中央分離帯（関東ローム）		㉒	不透水性土	

図-3 交通試験路標準断面図 No.1

このコンクリート舗装のうち観測の対象としたものは図-2に示すとおり幅員3.75m膨脹目地間隔180mの鉄網コンクリート版2枚と，幅員3.75m，膨脹目地間隔90mの連続鉄筋コンクリート舗装版8枚（8種類）であって，図-2に示すとおりNo.1からNo.10まで名付けた。

鉄網コンクリート版は図示のとおり6m間隔，10m間隔および15mの間隔にめくら目地を設けているが，膨脹目地間隔が長いため，カッターでめくら目地を切る前に収縮ひびわれの生ずることを避ける目的によって，30m間隔のめくら目地（図-2の1点サ線）はコンクリート打ち直後に板を押しこむ工法によってつくり，他のめくら目地(図-2の点線)はカッターによってつくった。膨脹目地は厚さ20～23mmの杉板とセロシールを用い，スリップバーはφ25×700mmとした。めくら目地および突合せ目地のスリップバーはφ19×700mmとした。鉄網は図-4に示す寸法に溶接された直径7mmの異形鉄筋でつくられており，鉄筋量は3.4kg/m²になっている。

連続鉄筋コンクリート舗装版はめくら目地をもたないものであって，これについては〝連続鉄筋コンクリート舗装に関する2，3の試験〟で報告するが，本報告では膨脹目地間隔90mのコンクリート版の動きを調べるという意味で問題になる資料だけを利用することにする。

なおコンクリート舗装の縦目地にはタイバーを用いず2列の版を別々に観測できるようにした。

これら試験の対象となったコンクリート版は昭和35年2月2日～3月14日の間に施工された。各試験舗装版の施工月日は図-2に示すようである。

交通試験路の路盤面は摩擦係数の測定に用いた試験舗装の路盤に比べてスラグを使っただけにいくぶん粗であったが，クッション砂を撒いて路盤紙を置いたので両者の間に著しい相違はなかったと考えられる。

コンクリート版が路盤に対してどのように動いているかはダイヤルゲージを用いた二つの装置によって測定した。

その一つは写真-4のように長さ1.5m，直径25mmの鋼棒を路床中に打ちこみ写真-5のように上部約20cm（路盤厚に相当）をコンクリートで固め，このロッドと写真-6のようなコンクリート版に一体に打ちこまれた鋼製円筒の間隔の変化をダイヤルゲージで読む装置であって，変位計と名付けた。変位計の詳細は図-5に示すとおりであって，鋼製円筒はダイヤルゲージの接触面となる帯を

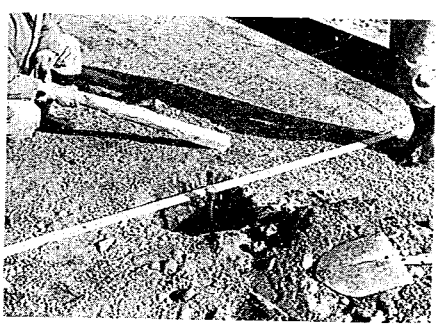
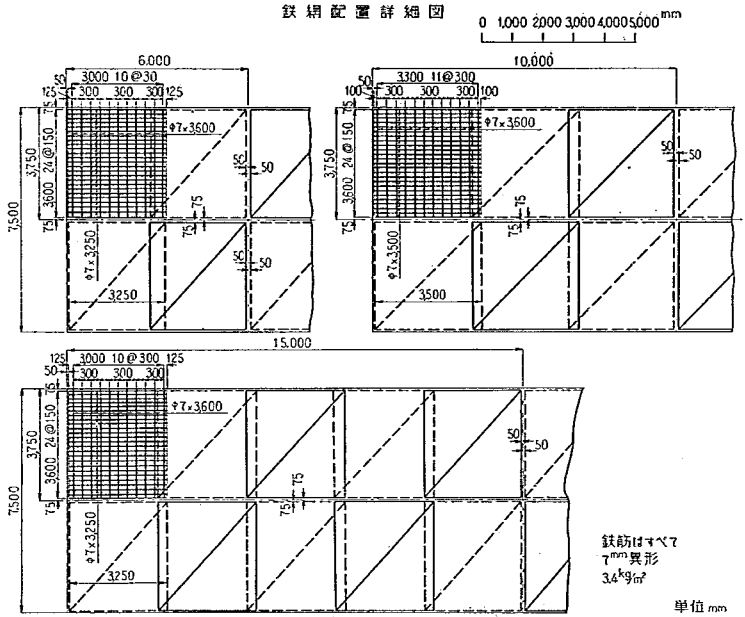
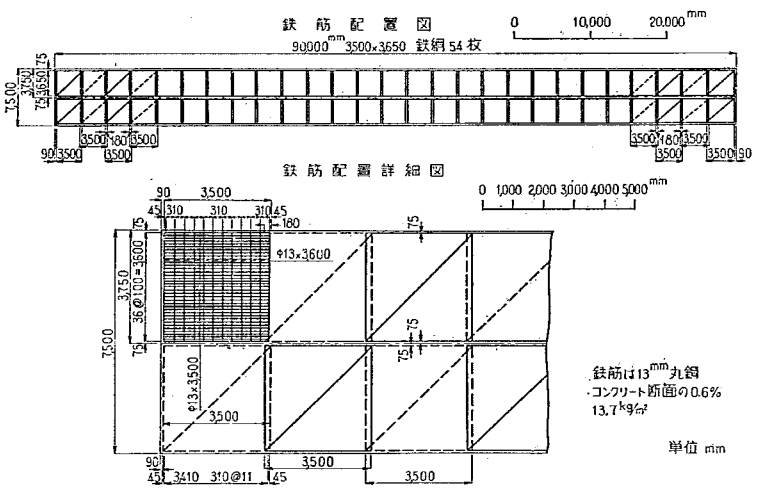


写真-4 変位計のロッドの打ち込み



(a) 交通試験路コンクリート舗装鉄網詳細図



(b) No.7 連続鉄筋コンクリート舗装鉄筋詳細図

図-4 鉄網および鉄筋詳細図

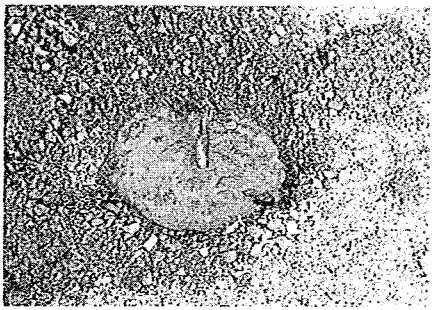


写真-5 変位計のロッドの固定

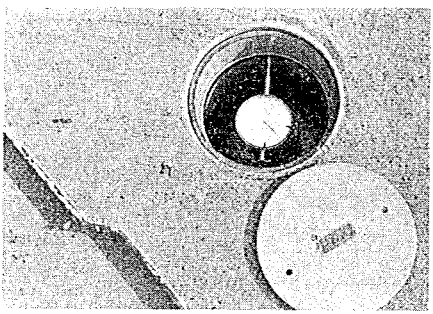


写真-6 変位計完成図

内面にもち，雨水の侵入を防ぐためのゴムパッキングつきの蓋をつけた。コンクリートを打ちこむ際には，この円筒と鋼棒の間隔を所要のものに保つために，写真-7に示すような扇形ブロック4個を一時的に用いた。設置後に路盤から水分が蒸発するのを防ぐために，路盤面にアスファルト乳剤を二層に散布した。ダイヤルゲージはコンクリート版施工後2～3日で取りつけ，その時を零点として年間変化を整理した。したがって2月～3月の冬期を基準として変位が測られたことになる。

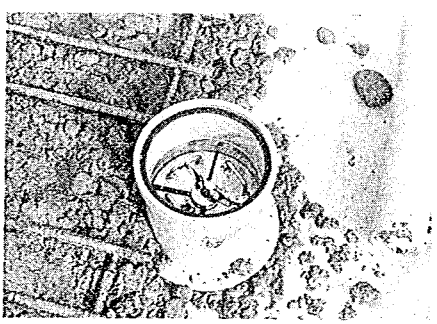


写真-7 変位計の円筒の扇形ブロックによる保持

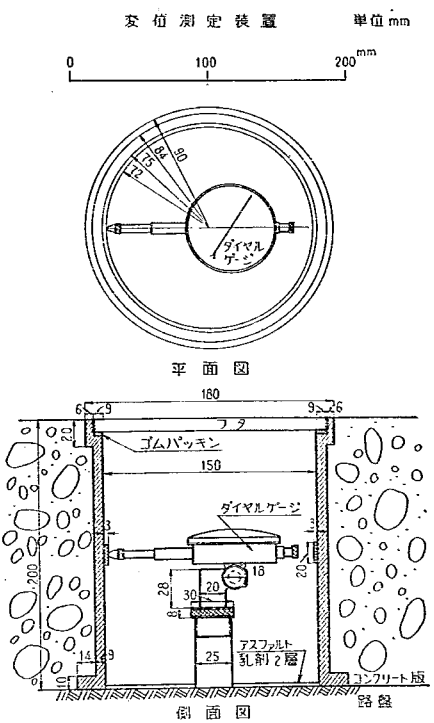


図-5 変位計詳細図

変位計による観測は年変化観測と日変化観測とにわけて行なった。年変化観測は昭和35年5月31日まで（施工後3～4カ月）は毎日朝昼2回の観測を行ない，その後は毎月曜ごとに朝昼2回観測した。朝の観測時刻はコンクリート版の表面温度と底面温度が相等しくなる時刻を選び，本研究第1報の結果から8時30分としたが，総数46個の全変位計の観測に約25分を要したので，実際の観測時刻は8時30分～9時となっている。この点を考慮して各変位計の観測順序を常に一定とするように注意した。また昼の観測はコンクリート版の上下両面の温度差が最大となる時刻を選び，13時30分とした。実際の観測時刻が13時30分～14時であったのは朝の場合と同様である。

日変化観測は晴天の続く日を選んで，奇数時刻（2時間ごと）に行ない昭和35年6月1日13時～6月4日11時の3日間，8月4日9時～8月17日7時の3日間，12月15日9時～18日7時の3日間の3回にわけて実施した。なお日変化観測の結果は，各回の最初の観測値を基準として（零として）整理した。

これら変位計による観測値はコンクリート版が路盤に対して東向きに動いた場合を正とした。

変位計の埋込み位置は図-2に示すとおりであって，試験舗装No.1，No.1′，No.2，No.2′においてはいくつかのめくら目地の間の中央とした。試験舗装 No.3～No.10においては膨脹目地の間の中央と，膨脹目地から10mおよび20mの5カ所ずつとした。ただし試験舗装No.3とNo.4においては打ちこみ時にロッドを折ったため膨脹目地から10mの位置の変位計をそれぞれ1個だけ6mの位置にずらせた。

本研究に用いた変位計は，路床中に打ちこまれた鋼棒がコンクリート版の変位に伴なう路盤の水平変形によって，多少なりとも水平方向に動き，いくぶん小さい変位を与える傾向がみられた（後述の伸縮計の観測結果参照）。しかし路盤摩擦によるコンクリート版の応力を考える場合には，路盤の動きと共に動く鋼棒に取りつけたダイヤルゲージでコンクリート版の動きを測定することは，むしろ適当であると考えられる。

コンクリート版の路盤に対する変位を測定する第2の装置は写真-8のようにコンクリート版目地部分の側面に水平に突き出して埋めこんだ鋼棒と，目地横の路床中に深さ1.5mまで打ちこまれた鋼棒の間隔をダイヤルゲー

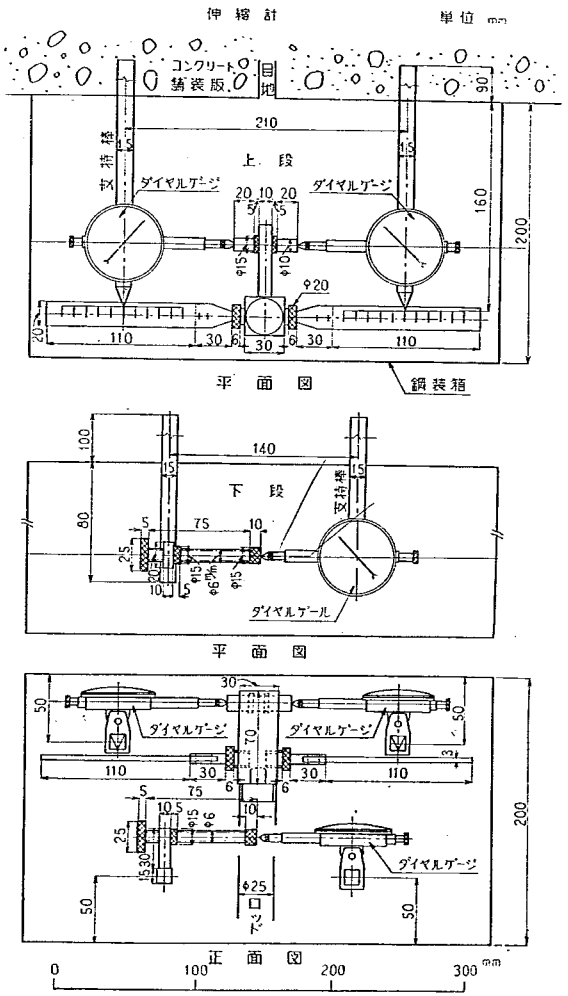


図-6 伸縮計詳細図

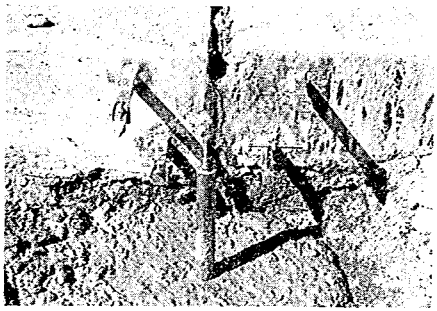


写真-8 伸縮計のロッドと鋼棒

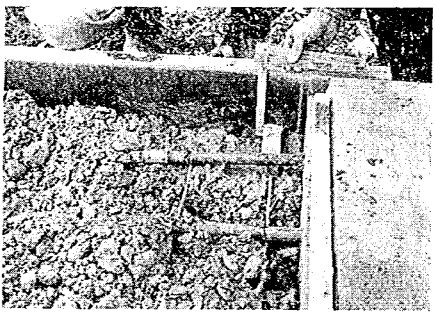


写真-9 伸縮計の鋼棒を埋めこむためのブリキ管

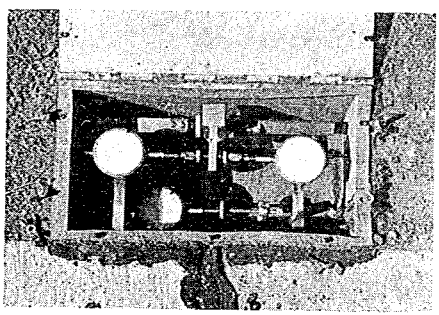


写真-10 伸縮計完成図

ジで測る方法であって，伸縮計と名付けた。伸縮計の詳細は図-6に示すとおりである。コンクリート版側面の鋼棒は写真-9に示すように，ブリキ筒をあらかじめコンクリート版に埋めこみ，鋼棒中心がコンクリート版表面から5cm下の位置にくるように，かつ目地から両側にそれぞれ約10.5cmの位置にくるように，モルタルで固定した。

路床中に打ちこんだロッドの頭にはダイヤルゲージの受け鈑を取りつけると共に大きい動きをチェックするための目盛鈑（物指）を取りつけた。伸縮計の組立てが完了したところは写真-10に示すようである。（伸縮計を目地幅の伸縮を測る装置として利用することについては〔3〕でのべる）

伸縮計も鋼製の箱と底面のアスファルト乳剤撒布によって水密に保つようにしたが，この維持は実際問題として非常に困難であった。長期観測を一年あまりで一応中止とした理由の一つはこの問題にあった。

伸縮計の観測は変位計の場合と全く同じようであって，コンクリート打ちこみ後2～3日で観測を開始し，年変化，および日変化を調べた。伸縮計によって測定したコンクリート版の変位も変位計の場合と同様に東向きの動きを正として整理した。

伸縮計の設置位置は図-2に示すとおり膨脹目地について12個，突合せ目地に2個，めくら目地に15個，合計29個であって，膨脹目地にもめくら目地にも全く同じものを使用した。

〔3〕 目地幅の伸縮の測定

実際のコンクリート版の目地幅が長期間にわたってどのように変化しているかは交通試験路のコンクリート舗装について観測した。目地幅の伸縮はダイヤルゲージを利用した伸縮計とカールソン型継目計によって測定した。

ダイヤルゲージを利用した伸縮計については〔2〕でのべたが，コンクリート版表面から5cm下の点の目地幅の縮み（コンクリート版の膨脹）は，西側のコンクリート版の変位から東側のコンクリート版の変位を引算して求められる。コンクリート版が東向きに動いた場合を正としているからである。

伸縮計にはさらにコンクリート版の底面から5cm上の点（表面から15cm下の点）の伸縮を測定するためのダイヤルゲージを1個加えた。このダイヤルゲージは目地をはさんで両側のコンクリート版に約14cm間隔で，かつコンクリート版底面から5cm上のところに水平に埋めこまれた鋼棒の間隔を測定するもので（写真-10および図-6）ある。この装置では目地幅の伸縮だけが読まれ，変位は得られない。

伸縮計による長期観測の方法は変位計の場合と全く同様であって，変位計と同時に観測した。測定結果は目地幅が減少した場合（コンクリート版が膨脹した場合）を正としてすべて整理した。

ダイヤルゲージを利用したこの伸縮計は防水に非常な苦心を要したことを除けば，十分満足すべき結果を与えたと考えられる。

カールソン型継目計は容量+12mm，−0.7m，精度0.04mmのものを，写真-11のようにコンクリート版の1/2深さ（表面から10cm）のところにあらかじめ5～7mm引張って埋設した。カールソン型継目計の埋設位置は図-2に示されているとおりであって膨脹目地だけに用い，

平面的にも目地の中央の位置とした。

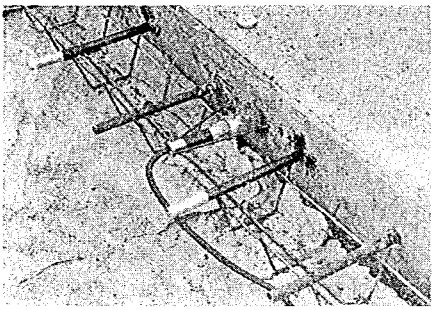


写真-11　カールソン型継目計の設置（6mm鉄筋であらかじめ伸ばしている）

カールソン型継目計はダイヤルゲージを用いた伸縮計とほぼ同じ結果を与え，十分信頼に足るものであることがわかったが，本研究のように膨張目地間隔の大きい場合には容量が不足であって，1年間の使用に耐えたものは8本中4本にすぎなかった。

〔4〕 目地板の圧縮試験

目地板の縮みと圧縮応力の関係は，土木研究所報告101号で提案した標準試験方法によって求めた。ただし供試体の大きさは16×16cmとして実際の目地板の全幅に等しくし，気乾状態のもの2個と水で飽和した状態のもの2個について試験した。

〔5〕 現場養生供試体の長さ変化および含水量変化の測定

摩擦応力と端部こう束応力を求めるための一資料として，試験舗装90mごとに5個ずつ，10×10×50cmの供試体をつくって現場養生を行ない，長さ変化および重さ変化を測定した。長さ変化は写真-12のようなJISA1124-1957のダイヤルゲージ方法のコンパレータによって測定した。標準棒および測定装置は恒温実験室におき21±1°Cの範囲内に絶えず保った。

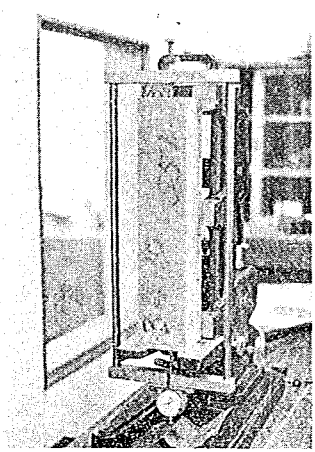


写真-12　ダイヤルゲージ法によるコンクリート供試体の長さ変化の測定

供試体は長さ変化測定装置をおいた恒温実験室の南側屋外の地面上においた。日射の条件は交通試験路とほぼ同様であったが，風は建物によっていくぶんさえぎられたと考えられる。また供試体の大きさが10×10×50cmと小さかったので，乾燥しやすく，実際のコンクリート版が全くこう束されない自由な状態で起した場合の長さ変化よりいくぶん大きい長さ変化をしたものと考えられる。

供試体の長さ変化の測定は，変位計ないし伸縮計と全く同様に，かつ同時に行なった。測定開始はコンクリート版打ちこみ後2～4日であって，年変化測定は最初の測定値を零として整理し，日変化測定はそれぞれの開始時刻の測定値を零として整理した。長さ変化の測定に際しては含水量の変化を求めるために供試体の重量を測定した。

次に含水量と長さ変化の関係を求めるために水で飽和した供試体を空中に放置した場合の長さ変化および重さ変化と，気乾状態の供試体を水中に入れた場合の長さ変化および重さ変化を21°Cの恒温実験室において実施した。

コンクリート版全体の含水量変化は長さ変化供試体の他に15×15×53cmのハリ供試体を2個つくって現場養生し，その重さ変化から求める方法もとった。

この場合も供試体の大きさは実際のコンクリート版より小さいから，実際の版より大きい含水量変化をしたものと考えられる。

〔6〕 コンクリート版のそり測定

実際のコンクリート版が上下両面の温度差によってどのようにそっているかは交通試験路のコンクリート舗装について観測した。

そりを測定する装置は写真-13および図-7に示すように路床中に4m深さまで打ちこんだロッドと，コンクリート版の側面に水平に埋めこまれた鋼板の上下の間隔の模型のダイヤルゲージによって測るものであって，そり計と名付けた。そり計にも伸縮計と同様な防水箱をおいたが，防水について苦心を要したことは伸縮計の場合と同じである。

そり計のロッドは4m深さまで打ちこんだので，機械的な理由で上下に動くことは全くなかったと考えられるが，温度変化によってロッド自身が上下に伸縮するために，ロッドの頂点が上下に動くことは避けられなかった。その影響を計算によって除くことは，鋼棒の温度分布が複雑であるため不可能であった。そこで一箇所だけ

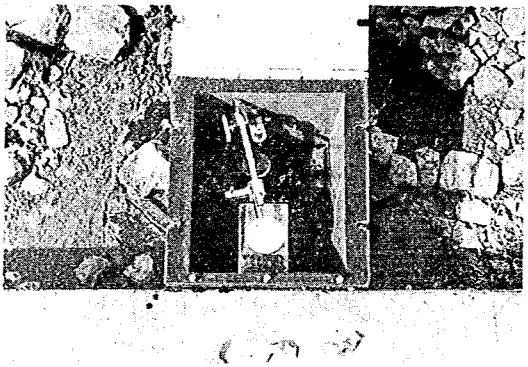


写真-13 そ り 計 完 成 図

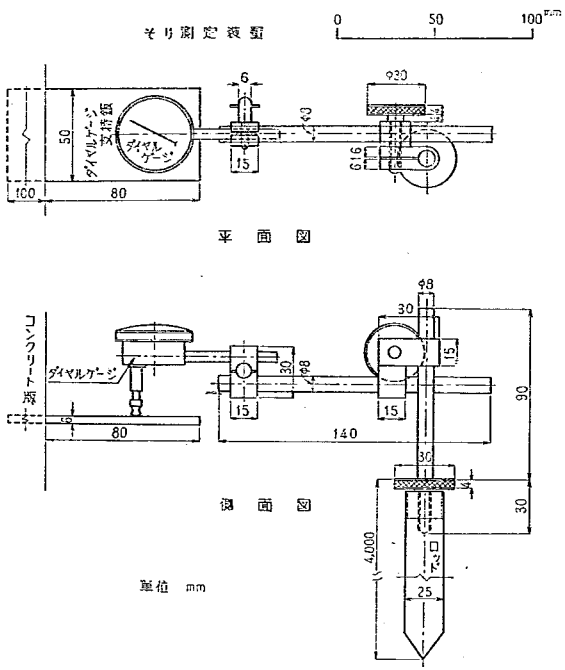


図-7 そ り 計 詳 細 図

インバール製の丸棒を打ちこんでロッドとの比較を行なった。しかしインバールも膨脹係数が小さいというだけであって，0ではなかったから，コンクリート版の上下の動きを絶対的に求めることはやはり不可能であることがわかった。

しかし本研究の目的であるそり応力を求めるためには，コンクリート版の上下方向の動きの絶対値を求める必要はなく，コンクリート版が長手方向にどのようにそっているか（曲っているか）がわかればよい。温度変化によるロッドの伸縮はすべての装置について共通であるとして誤差は大きくないから，本研究に用いたそり計によっても，そり曲線はある程度正確に求めることができたと考えられる。

そり計の設置位置は図-2に示すようであって，間隔6m，10m，15mのめくら目地の間と，間隔90mの膨脹目地の間にそれぞれ5カ所ずつ合計20カ所設置した。ただしそり計を設置した膨脹目地間隔90mの試験舗装No.9は中央付近に（東の膨脹目地から50mの位置に），全断面にわたるひびわれが，コンクリート打ちこみ後9日で発生したので，長さ90mの1枚のコンクリート版のそりを与えてはいない（写真-14）。

そり計による観測は，コンクリート版のそりこう束応力がコンクリート版温度の日変化によって生じ，年変化によっては生じないことから，日変化観測（2時間ごとの観測）のみを行なった。観測の時期は変位計，伸縮計ないし供試体長さ変化の日変化観測と同時に行なったが，12月の観測だけは特に30分ごとに観測した（そり計のみ）。

〔7〕 コンクリート版の温度変化の測定

変位計，伸縮計，そり計などによる観測結果と，コンクリート版温度との関係を調べるために，交通試験路に銅一コンスタンタン熱電対を埋めこみ，電子管式記録計によってコンクリート版の温度を自記させた。その方法は本研究の第1報でのべたものと同じであって，測定位置は図-8に示すようにコンクリート版上下両面から0.5cmの2点，5cmの2点（ダイヤルゲージによる変位ないし伸縮の測定位置）および中央（カールソン継目計による伸縮の測定位置）の5点と路盤中の1点を選んだ。

〔8〕 コンクリート版のひずみの測定

コンクリート版のひずみは表面および底面からそれぞれ2cmのところに埋めこんだカールソン型ひずみ計（直径20mm，長さ100mm）によって測定した。この測定は主としてそり応力を推定する目的によって行なったから，主力を日変化の観測にそそいだ。その要領は変位

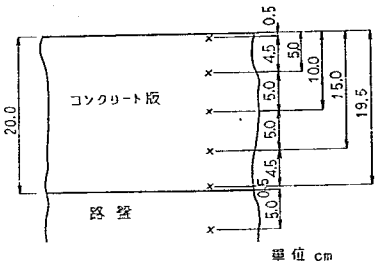


図-8　コンクリート版温度測定点位置図

計，伸縮計などと同様である。

〔9〕 コンクリートの膨張係数の測定

コンクリートの膨張係数は長さ変化供試体13個を利用して測定した。すなわち材令6月以上の長さ変化供試体を＋5°C，＋21°C，＋40°C の恒温実験室ないし恒温槽にそれぞれ8日以上保持したのち，手早く取り出して21°C 恒温室に おかれたダイヤルゲージ式コンパレータに取りつけ長さ変化を測定した。膨張係数は水中養生供試体と気乾供試体の両方について求めたが，気乾のものは湿度をコントロールするのが難かしかったので，含水量変化の影響を多少含んでいると推定される。

〔10〕 コンクリート供試体のヤング率およびポアソン比の測定

コンクリートのヤング率およびポアソン比は写真－15のようにダイヤルゲージを用いたボールダー・ダム型コンプレッソメータおよびエキステンソメータによって2回繰返して測定した。供試体は直径15cm，高さ30cmの円筒供試体であって縦ひずみはゲージ長さ 20cm を中央付近にとり，圧縮強度の約 1/2 のセカント係数をヤング率とした。コンクリート版の最大温度応力度は破壊応力度の約 1/2 であると考えたからである。

これらの試験に用いた供試体は長さ90mの試験舗装から9個ずつとり，3個ずつを標準養生し，6個ずつを現場養生して材令4～5カ月においてヤング率およびポアソン比を測定した。

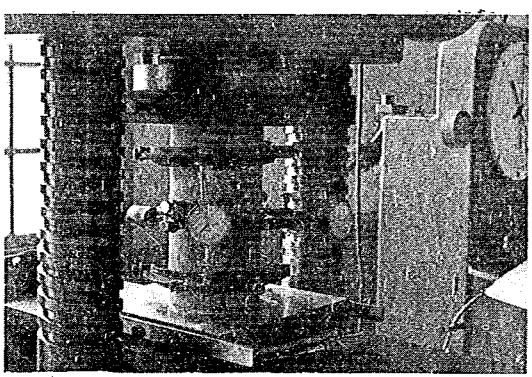


写真-15　円筒供試体のヤング率およびポアソン比の測定

写真-14　そり計の配置

3　コンクリートの性質

〔1〕 コンクリートの配合

セメントは比重3.15，ブレーン 3170cm²/g，88μ フルイ残留分3.0%，モルタルの28日曲げ強さ 68kg/cm²，28日圧縮強さ411kg/cm² のD社普通ポルトランドセメントを用いた。

砂は比重2.58の利根川取手付近産のものを用いた。

砂利は比重2.61の鬼怒川産のものを用いた。砂利はかなり多量の死石を含み，コンクリート用骨材としての最小限の要求をかろうじて満す程度のものであった。コンクリートの品質のばらつきが大きかったのは主として骨材の不良に原因があると考えられる。

コンクリートの示方配合は次のようであった。

骨材の最大寸法	40mm
単位セメント量	300kg
単位水量	140kg
絶対細骨材率	33%
スランプの範囲	1～3cm

〔2〕 コンクリートの膨張係数

コンクリートの温度と長さ変化の関係は図-9および10に示すとおりであった。図-9は空中養生の場合の温度変化によるコンクリートの長さ変化を示すが，3°C，20.5°C および 40.7°C における湿度を等しくすることが不

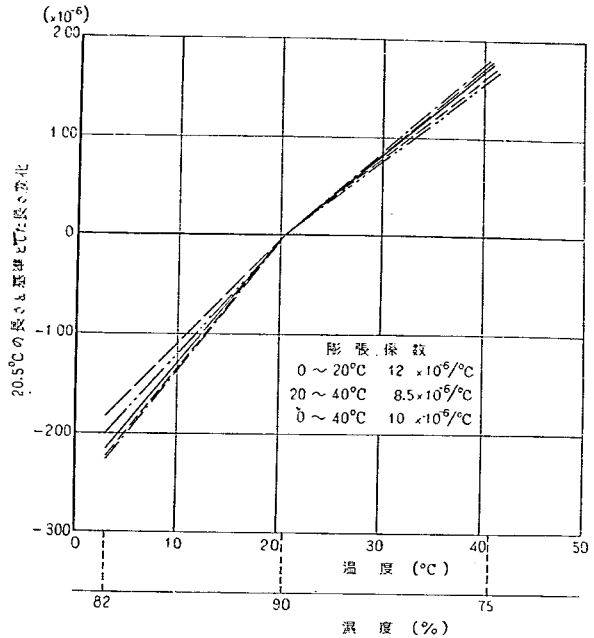


図-9　空中に発生したコンクリート供試体の膨張係数

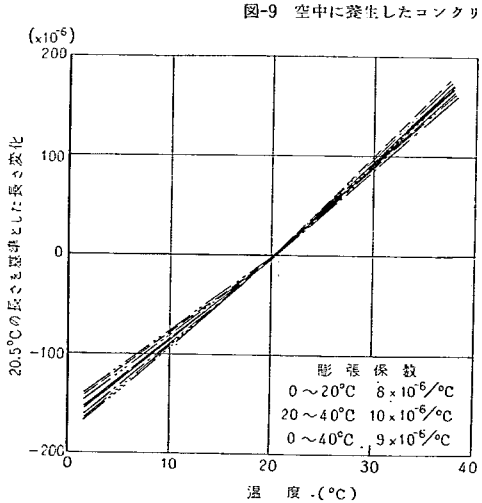


図-10　水中に発生したコンクリート供試体の膨張係数

可能であったため，温度変化だけによる長さ変化の他に含水量変化による長さ変化が含まれている。しかし，コンクリートの膨張係数がおよそ10×10⁻⁶/℃であることは大体見当がつけられる。

図-10は水中養生の場合の温度変化によるコンクリートの長さ変化を示し，含水量の影響はほとんど完全に排除されていると考えられるが，実際のコンクリート版の状態とは相違した条件となっている。この場合膨張係数は 9×10⁻⁶/℃ くらいである。

図-9および10の結果からコンクリートの温度膨張係数は 9×10⁻⁶ であるものとして本研究の解析を行なった。

〔3〕 コンクリートのヤング率およびポアソン比

舗装コンクリートの材令5～6カ月における圧縮試験から求めたヤング率およびポアソン比は表-1に示すとおりであった。

表-1の結果からコンクリートのヤング率は310,000kg/cm²，ポアソン比は0.25であるものとして本研究の解析を行なった。

〔4〕 コンクリートの圧縮強度

舗装コンクリートの材令6カ月における圧縮試験成績は表-2に示すとおりであった。

表-1　コンクリートのヤング率とポアソン比

			平均値	変動係数 %	試験数
ヤング率 (kg/cm²)	現場養生	第1回	314,000	11.9	46
		第2回	297,000	15.8	46
	標準養生	第1回	335,000	15.5	20
		第2回	308,000	21.1	20
ポアソン比	現場養生	第1回	0.24	10.0	46
		第2回	0.26	28.0	45
	標準養生	第1回	0.24	22.6	19
		第2回	0.28	48.8	20

表-2　コンクリートの圧縮強度

	平均値 (kg/cm²)	変動係数(%)	試験数
現場養生	319	18.4	21
標準養生	322	11.3	10

4　コンクリート版の温度変化

〔1〕 コンクリート版温度の日変化

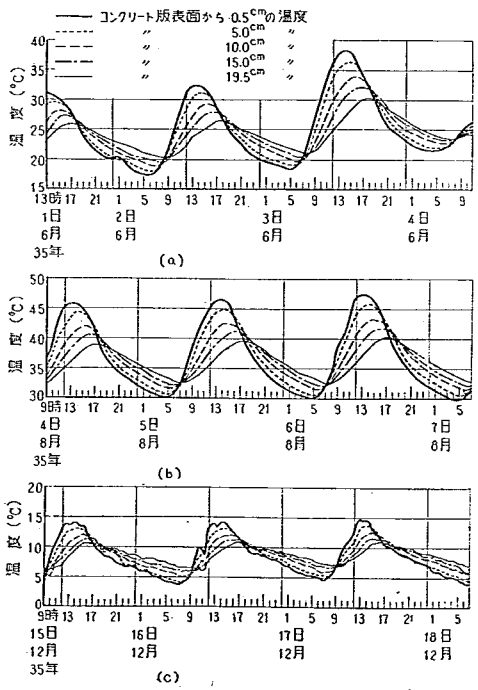


図-11　コンクリート版温度の日変化

コンクリート版の変位およびそり，目地幅の伸縮，供試体の長さ変化などの日変化を観測した6月1日～4日，8月4日～7日，12月15日～18日におけるコンクリート版温度は図-11(a)，(b)，(c)に示すとおりであった。

〔2〕 コンクリート版温度の年変化

コンクリート版温度の年変化は図-12 (a)，(b)，(c)，(d)，(e)に示すとおりであった。この図は縦軸にコンクリート版内各点の温度を，横軸に年月日をとってある。図中の鉛直線は8時30分の温度と13時30分の温度を結んだものである。したがって鉛直線の下端はその日の8時30分の温度を示し，上端は13時30分の温度を示している。

図-12からコンクリート版表面から 0.5cm，5.0cm，10.0cm，15.0cm，19.5cm の点の温度の昭和35年2月～36年4月における年振幅（全振幅）はそれぞれ36°C，34°C，33°C，32°C，31°C くらいであることがわかる。

5　コンクリート供試体の含水量変化と長さ変化

〔1〕 コンクリート・ハリ供試体の含水量変化

現場養生した 15×15×53cm のコンクリート・ハリ供試体の平均含水量変化を供試体の重量変化によって求めたものは図-13および14に示すとおりである。図-13は供試体含水量の日変化を示すが，1日を周期とする周期性はある程度認められる。しかし位相は一定しておらず，規則性がみられない。本研究の第1報で湿度の日変化を図-90として示したが，この空気湿度との関係も明らかでない。コンクリートの含水量は極めてゆっくりとしか変化しないため，寸法の大きい供試体の平均含水量では湿度履歴がかなり効くことが，おそらくその理由であろう。

図-14 は供試体含水量の年変化を示すが，供試体作成直後にかなり乾燥するにも拘らず5～6月の雨季に再び湿潤となり，その後夏季にやや乾燥する他は年間を通じて変化の少ない含水量を示している。すなわち含水量の年変化は周期的でなく，梅雨季にいくぶん高く，夏季にいくぶん低い傾向を示すとはいえ，その日の天気による短期間の変化に比べてむしろ小さいということができる。3月中旬に施工されたコンクリート版の含水量は増加が0.5%以下，減少が1.0%以下であるとしてよいであろう。

また1年後の含水量と，最初の含水量を比べると，平均して0.3～0.4%乾燥していることがわかる。コンクリート供試体の含水量変化と長さ変化の関係を示す図-26（後述）を使つて推定すると，この含水量変化によってコンクリートは1年間に

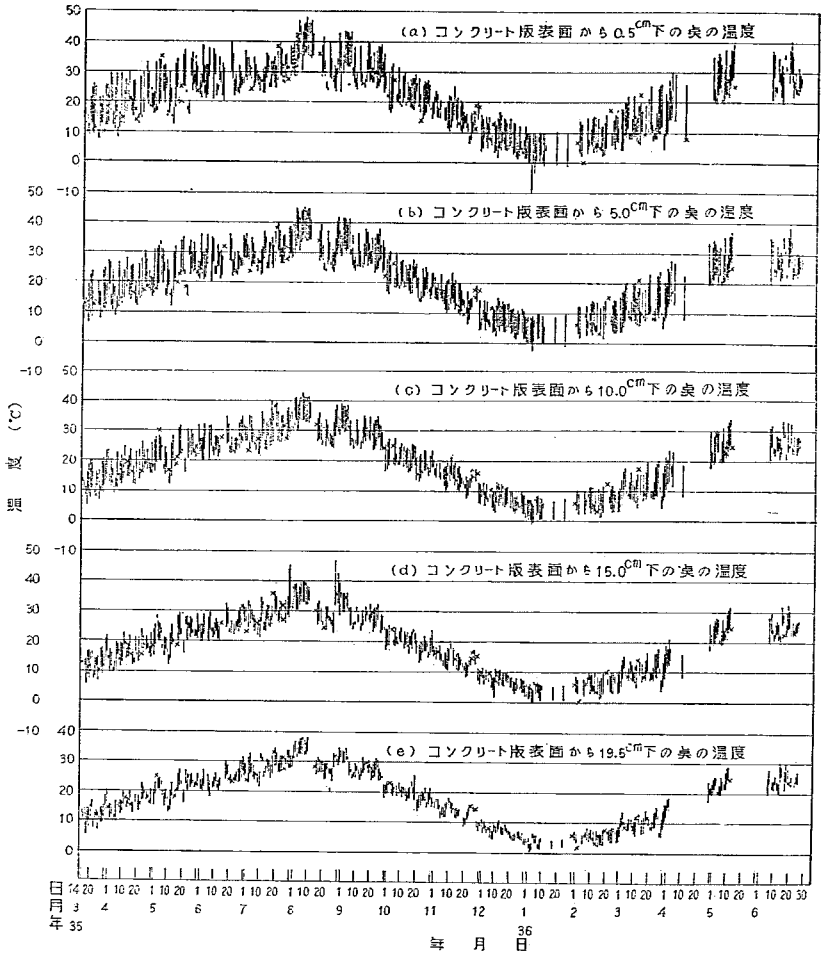


図-12　コンクリート版温度の年変化（鉛直線は8時半の温度と13時半の温度を結んだもの）

(27～36)×10^{-6}だけ収縮していると推定される。実際のコンクリート版もおそらく30×10^{-6}程度収縮しているであろう。

〔2〕 コンクリート長さ変化供試体の含水量変化および長さ変化

図-15～17は現場養生した10×10×50cmのコンクリート供試体の晴天が続いた場合の長さおよび含水量の日変化を示す。

これを見ると供試体の長さは極めて規則的な変化をしていること，その変化の型は温度の日変化の型（図－11参照）によく似ていること，長さが極大値に達する時刻は6月，8月，12月ともに12時ごろであること，長さが極小値に達する時刻は早朝3～5時であること，長さの日振幅は6月に190×10^{-6}，8月に260×10^{-6}，12月に125×10^{-6}であることなどがわかる，すなわち10×10×50cm供試体の長さの日変化の型はコンクリート版表面温度の日変化によく似ているが，位相は表面温度より約1時間早くなっている。

72時間連続観測を開始した時の長さを基準として求めた供試体長さ変化とコンクリート版表面温度との関係を2時間ごとにプロットした1例を図-18に示す。この図を見ると両者の間に直線的な相関々係はなく，矢印の向きのヒステリシスが与えられる。この矢印の向きが時計廻りであることは長さ変化の位相が早いことを意味し，

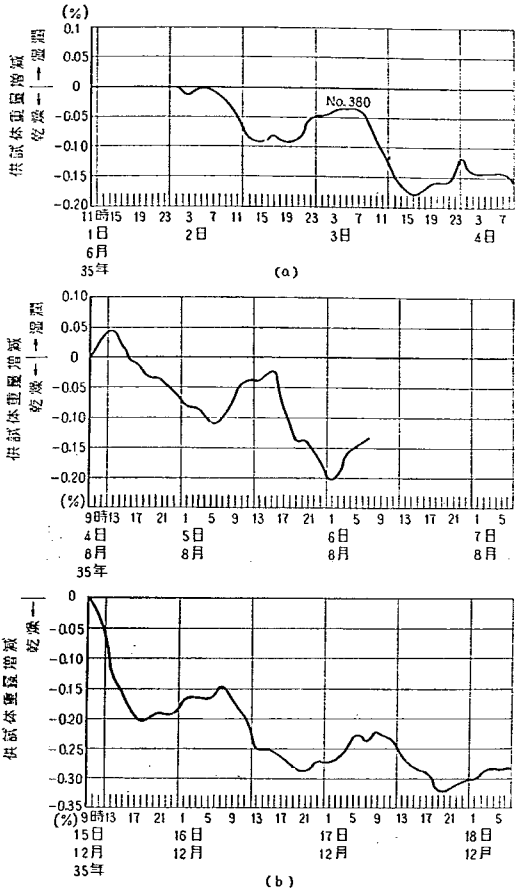


図-13　コンクリート供試体含水量の日変化

位相のずれはこのヒステリシス図からも約1時間であることがわかる。コンクリート供試体の平均温度はコンクリート版表面温度より遅れた位相をもっていることは明らかであるにも拘らず，長さ変化の位相の進んでいる理由は不明である。

またこの図において昇降ともに直線的なこう配のあることは，長さ変化と温度変化の間の強い相関を示すものである，このこう配を求めてみると(a)6月の場合10.5×10^{-6}/°C，(b)8月の場合14.6×10^{-6}/°C，(c)12月の場合12.9×10^{-6}/°Cであって，第3章で求めたコンクリートの膨張係数に極めて近いがいくぶん大きい結果になっている。このことからコンクリート供試体の長さ変化に影響する要素としては温度が支配的であることがわかる。

図-15～17から晴天が続いた場合には供試体の含水量も周期的に変化していること，含水量が高いのは早朝1～5時であること，含水量が低いのは15～19時であること含水量の日振幅は6月に約0.19%，8月に約0.18%，12月に約0.13%であることがわかる。15×15×53cmのハリ供試体の含水量日変化に比べて10×10×50cmの長さ変化供試体の含水量日変化の方がはっきりとした周期性を示し，かつ位相が数時間進んでいることは，供試体の大きさが小さいために空気の湿度に敏感に影響されたことを示していると考えられる。その意味で長さ変化供試体の含水量変化はコンクリート版表面部の含水量変化に近いと推定される。ハリ供試体の含水量変化と長さ変化供試体のそれを考え合せると，コンクリート版全体の平均含水量の日変化が強い周期性をもつことはおそらくないと推定される。

なおコンクリートの含水量変化による長さ変化については次項〔3〕において考察するが，含水量の日変化によってはせいぜい10×10^{-6}程度の長さ変化しか起さないことが推定されている。

図-19～23は現場養生した長さ変化供試体の長さおよび含水量の年間変化を示す。縦軸は長さ変化または含水量変化を，横軸は年月日を示している。鉛直線は8時30分の観測値と13時30分の観測値を結んだものである。ただし含水量は1日1回8時30分しか測らないことが多かったので，その場合には×印で示してある。

これをみると供試体の長さは周期的に変化しており，7～8月に最長となること，2月ごろ最短となること，年振幅は平均して約295×10^{-6}であることがわかる。また供試体作成後2～4日における長さ（観測を開始した時の長さ）と1年間の長さを比べるといずれも収縮しており，その量は平均して約135×10^{-6}，最大180×10^{-6}であることがわかる。すなわち現場養生供試体の最初の1年間の収縮（乾燥収縮や硬化収縮）はおよそ135×10^{-6}である。

前節〔1〕において，コンクリート・ハリ供試体は1年間に0.3～0.4%乾燥しておりその結果約30×10^{-6}の乾燥収縮量を推定した。これを本節〔2〕の1年後の乾燥収縮量135×10^{-6}と比べると，後者はかなり大きい。長さ変化供試体はハリ供試体より小さいために伸縮が大きいことを考慮しても1年後の収縮量は，100×10^{-6}程度であると推定されるから，両者の差70×10^{-6}はいわゆる硬化収縮に相当すると思われる。

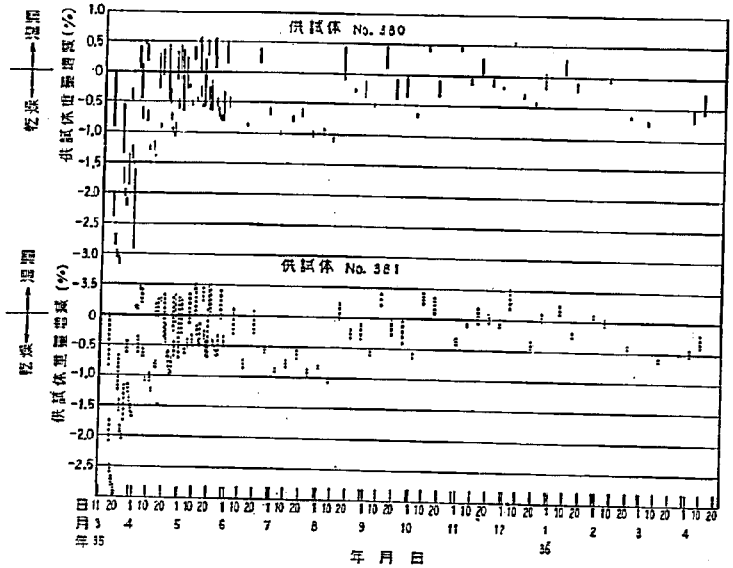


図-14　コンクリート供試体含水量の年変化

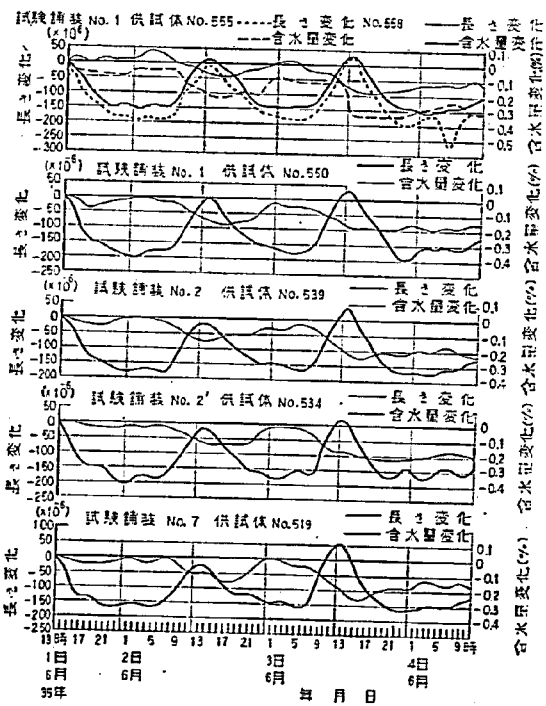


図-15　コンクリート供試体の長さ変化と含水量変化（6月・日変化）

4〔2〕で調べたようにコンクリート版表面から5cm下の点の温度（長さ変化供試体の中心温度にほぼ対応する）の年振幅は，およそ34°Cであった。これにコンクリートの膨脹係数 9×10^{-6} を掛けると，長さ変化は 306×10^{-6} であって，上記実測値 295×10^{-6} と極めてよく一致する。ここでもコンクリートの長さ変化には温度変化が支配的であることがわかる。

図-19～23から長さ変化供試体の含水量年変化は，ハリ供試体の場合とよく似ており，供試体作成後1～2週間は乾燥し，5月の雨季に湿潤となり7～8月の夏季にやや乾燥し，9月以後はほとんど変化しないものが多い。ここでも含水量の年変化が周期的でないことは明らかである。

含水量が落着いた時の含水量と観測を開始した時の含水量を比べてみると（ここで×印の含水量は8時半の高い方の含水量のみ表わしていることに注意しなければならないが）−1.0%から+1.0%の間に広くちらばっており，乾燥した供試体数は4個，平均乾燥率は約0.8%であるのに対し，湿潤となった供試体数は9個，平均湿潤率は約0.6%となっている。前述のとおり供試体の長さが，温度変化以外の原因で（乾燥

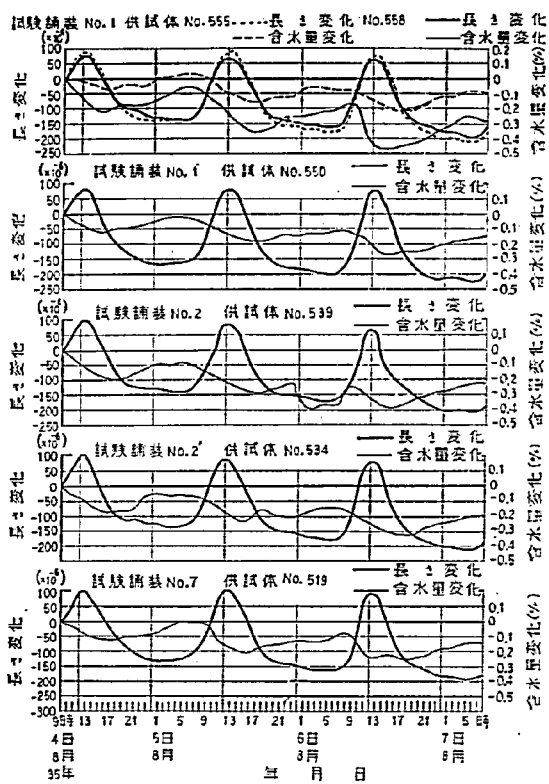


図-16　コンクリート供試体の長さ変化と含水量変化（8月・日変化）

や硬化などによって）収縮していることが明らかであるにも拘らず，供試体の含水量の増加しているものが少なくない理由の一部はおそらく硬化収縮で説明できよう。

〔3〕コンクリート供試体の長さ変化と含水量変化の関係

材令1年以上の長さ変化供試体を21°Cの水中に3カ月浸した後21°Cの恒温室内に放置した場合の長さ変化と含水量変化（重量変化）は図-24に示すとおりであった。また材令1年以上の長さ変化供試体を3カ月以上21°Cの恒温実験室内に放置した後21°Cの水中に浸した場合の長さ変化と含水量変化は図-25に示すとおりであった。

図-24，25を見ると供試体の重さ変化すなわち含水量変化は極めて速やかに変化しているにも拘らず，長さ変化はかなり長時間の遅れをもって変化していることがわかる。すなわちコンクリートの長さ変化は含水量変化の影響に対してかなり鈍感である。このことは長さ変化が温度変化の影響に極めて敏感で，位相がかえって進んでいることと対象的である。

図-25においてはコンクリートの含水量が1日に最大1.65%も変化しているが，現場養生供試体の含水量は図-13あるいは図-15～17からわかるように1日に0.19%以上変化することはない。したがって実際のコンクリート版の平均含水量の日変化も0.19%以下であろう。図-24，25あるいは26で含水量日変化0.19%に対する長さ変化を読むと10×10^{-6}以下であることがわかる。すなわち含水量の日変化による長さ変化は無視できる程小さい。

図-24，25からコンクリートの含水量変化（重さ変化）と長さ変化の関係を拾ってプロットしたものが図-26である。

図-26からも含水量変化に対して長さ変化の遅れていることが認められる。両者の関係が直線的になったところのこう配を求めてみると，含水量変化1%につき90×10^{-6}の割合である。したがって含水量の年変化を考える場合には，最大90×10^{-6}/% 程度の割合でコンクリートが長さ変化するものと考えなければならない。

6　コンクリート版の摩擦応力

〔1〕摩擦係数

厚さ15cmのコンクリート版の変位と横荷重の関係について第1回測定結果は図-27に示すとおりである。同図（a）は最初の試験結果を，同図（b）は（a）に引き続いて行なった試験結果を示す。

これらの図からコンクリート版が路盤に対して1mm以上動いたら，滑り始めると考えられること，滑った後の最大摩擦係数は（本研究の路盤においては）1.5～1.6であることがわかる。コンクリート版が滑り始めるまでの摩擦係数と変位の関係は規則的でないが，ある程度の誤差を許せば，摩擦係数は変位の平方根に大体比例するということもできるし，変位の対数に大体比例するということもできる。またある場合には変位に比例すると考えることもできよう。

コンクリート版と路盤の摩擦係数が1より大きいことはいわゆる固体摩擦の考え方に反するが，この現象は路盤が摩擦によってコンクリート版の動きに抵抗しているばかりでなく，弾性的なこう束によっても抵抗していることを示していると考えられる。実際，図-27には示されていないが，コンクリート版が約2mm変位した後，

すなわち滑ってしまった後に，横荷重を取り除くと，約0.3～0.5mmだけ変位が減少（逆に戻る）していることが認められた。

変位が1mm付近でコンクリート版が滑り始めることは，諸外国の実測例に一致するものであって，この値はかなり権威あるものと考えることができる。しかし最大摩擦係数は路盤の構造，特に路盤面の性質によって相違すると思われる。

図-27(a)と(b)を比較すると，コンクリート版が一旦滑り始めた場合でも，横荷重を除いて再び除々に加えてやれば始めと同じような路盤摩擦抵抗の得られることがわかる。このことは実際のコンクリート版のように極めてゆっくりと動いているものに対する摩擦抵抗はいつも図-27(a)の関係で与えられること，変位が1mmをこえても摩擦係数は最大値を保ち，滑ってしまった後の小さい数値にはならないことを示していると考えられる。

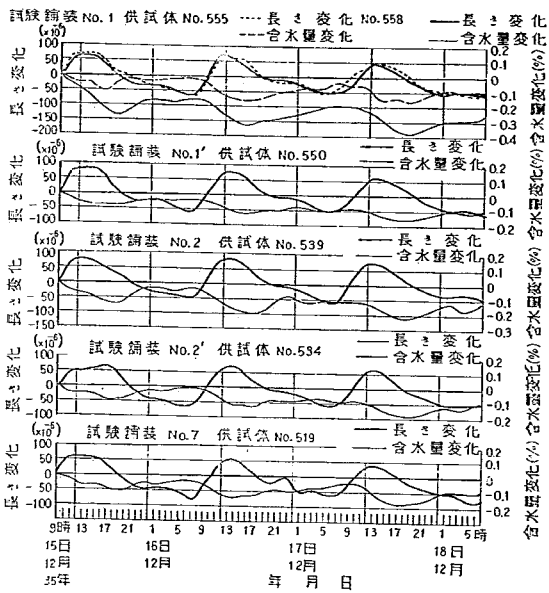


図-17 コンクリート供試体の長さ変化と含水量変化（12月・日変化）

厚さ15cmのコンクリート版についての上記試験の約2カ月後にもう1度同様な試験を実施し，引続いて全重量2.66tの砂をコンクリート版全面の上においてから試験した結果を図-28(a)，(b)に示す。また厚さ25cmのコンクリート版の摩擦係数についての第1回測定結果を図-29に示す。

図-28(a)から相当時間を経過した後の摩擦抵抗も最初の場合とほとんど同じであって，僅かに小さくなっていることがわかる。

図-28(b)を(a)と比較すれば，路盤の抵抗はコンクリート版の重量によって増大するが，全横荷重を全重量で割って求めた比，すなわち摩擦係数で考えるとほとんど同じであって，重量の大きい方が僅かに小さい摩擦係数を与えることがわかる。コンクリート版の重量と最大摩擦係数の関係についてのこの結果は，コンクリート版の厚さが相違する場合の比較，すなわち図-27と図-29の比較によっても確かめられる。

〔2〕 コンクリート版変位の日変化

試験舗装No.1（膨脹目地間隔180m，中央に突合せ目地，めくら目地間隔10m：便宜上突合せ目地より東の90mをNo.1，西の90mをNo.1′として区別することもある）No.2（膨脹目地と突合せ目地の間隔90m，めくら目地間隔6m）およびNo.2′（突合せ目地と膨脹目地の間隔90m，めくら目地間隔15m）の変位の72時間連続観測結果は図-30～47に示すとおりである。また長さ90mの連続鉄筋コンクリート版の1つである試験舗装No.7の変位の72時間連続観測結果は図-48～50に示すとおりである。

これらの図は縦軸に変位，横軸に時刻がとってある。変位計によって測定した変位は実線で示した。伸縮計による変位は目地の東側の版（の西端）の変位を実線で，目地の西側の版（の東端）の変位を点線で表わして区別した。

これらの図から次のことがわかる。

(イ) 膨脹目地に接する版端は晴天が続くと周期的に動いており，15時ごろコンクリート版が最も膨脹した位置に，6時ごろ最も収縮した位置になる。この位相は図-11を見ると，コンクリート版表面から5cm下の温度の位相と10cm下の点の位相のほぼ中間になっている。

したがって長さ変化供試体の長さの日変化の位相とはかなりずれている。

(ロ) 膨脹目地間隔が180mで中央に突合せ目地と，その他いくつかのめくら目地をもつ試験舗装No.1およびNo.2-2′の膨脹目地に接する版端はいずれも大体同じように動いている。

変位の日振幅は6月上旬には1.00～1.40mmの範囲で平均1.18mm，8月上旬には0.50～1.20mmの範囲で平均0.61mm，12月中旬には0.45～1.00mmの範囲で平均0.53mmである。したがって版端部は図-27～29の滑り摩擦の範囲にあると考えられる。

(ハ) 膨脹目地間隔が90mでめくら目地をもたない連続鉄筋コンクリート舗装の版端の変位の日振幅は6月には

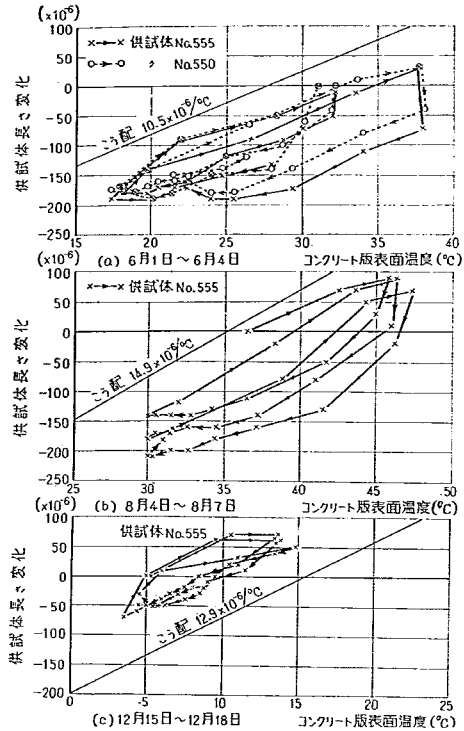


図-18　72時間連続観測における供試体長さ変化とコンクリート版表面温度の関係

1.20～1.95mmの範囲で平均1.64mm，8月には0.90～1.82mmの範囲で平均1.23mm，12月には1.46～1.80mmの範囲内で平均1.64である。この版端部も滑り摩擦の範囲にある。

また(ロ)に比べて変位が大きいのは，膨脹目地の間にめくら目地がなく，版の収縮がそれらによって吸収されなかったためであると考えられる。

(ニ) 図-11のコンクリート版温度の日振幅A，Cに膨脹係数9×10^{-5}と膨脹目地間隔の1/2を掛けて求めた計算値B，Dと，図-15～17のコンクリート供試体長さ変化の日振幅Eに膨脹目地間隔の1/2を掛けて求めた計算値（いずれも膨脹を自由に許した場合のコンクリート版の変位日振幅）F，と，(ロ)，(ハ)の実測値Gを比較したものが表-3である。

表-3はG/B，G/D，G/Fなどがいずれも1よりはるかに小さいことを示しておりコンクリート版の変位はかなり強くこう束されていることがわかる。1からG/B，G/D，G/Fを引いたものをこう束係数とすれば，膨脹目地間隔180mの普通コンクリート版のこう束係数は0.8～0.9，膨脹目地間隔90mの連続鉄筋コンクリート版のこう束係数は0.6～0.8である。

(ホ) 間隔180mの膨脹目地の中央にある突合せ目地（施工目地としてつくられた）に接する版端はNo.1舗装においてもNo.2-2′舗装においても同じように周期的に動いている。突合せ目地の東側の版の西端は5時半ごろ最も東に位置し，14時ごろ最も西に位置する。突合せ目地の西側

表-3　膨脹目地に接するコンクリート版端の変位日振幅の比較

	膨脹目地間隔180m (No.1 No.2 No.2′)			膨脹目地間隔 90m (No.7)		
	6　月	8　月	12　月	6　月	8　月	12　月
A：コンクリート版表面から5cm下の点の温度振幅	12～14°C	14～15°C	8～ 9°C	12～14°C	14～15°C	8～ 9°C
B：$A\times9\times10^{-6}\times\begin{cases}90\times10^3\\45\times10^3\end{cases}$	9.7～11.3mm	11.3～12.2mm	6.6～7.3mm	4.8～5.7mm	5.7～6.1mm	3.2～3.6mm
C：コンクリート版底面の温度振幅	5.5～ 7°C	6.5～7.5°C	4～4.5°C	5.5～ 7°C	6.5～7.5°C	4～4.5°C
D：$C\times9\times10^{-5}\times\begin{cases}90\times10^3\\45\times10^3\end{cases}$	4.5～5.7mm	5.3～6.1mm	3.2～3.7mm	2.2～2.8mm	2.6～3.0mm	1.6～1.8mm
E：供試体の長さ変化振幅	(150～200)$\times10^{-6}$	(200～260)$\times10^{-6}$	(90～130)$\times10^{-6}$	(140～210)$\times10^{-6}$	(220～240)$\times10^{-6}$	(90～130)$\times10^{-6}$
F：$E\times\begin{cases}90\times10^3\\45\times10^3\end{cases}$	13.5～18.0mm	18.0～23.4mm	8.1～11.7mm	6.3～9.4mm	9.9～10.8mm	4.0～5.8mm
G：実　測　値	1.00～1.40mm	0.50～1.20mm	0.45～1.00mm	1.20～1.95mm	0.90～1.82mm	1.46～1.80mm
G/B の大略値	0.10	0.07	0.10	0.30	0.23	0.48
G/D の大略値	0.23	0.15	0.20	0.62	0.48	0.95
G/F の大略値	0.08	0.04	0.07	0.20	0.14	0.34

注　振幅はすべて全振幅

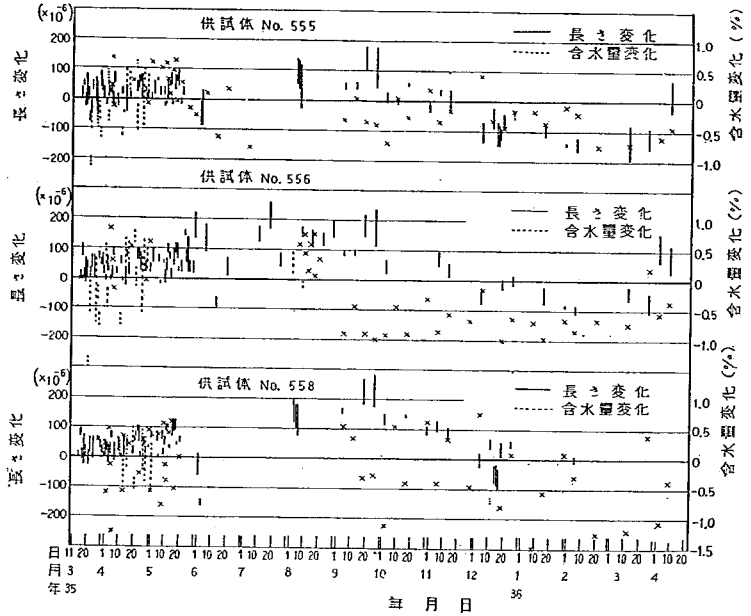


図-19　コンクリート供試体の長さ変化と含水量変化（試験舗装 No. 1）

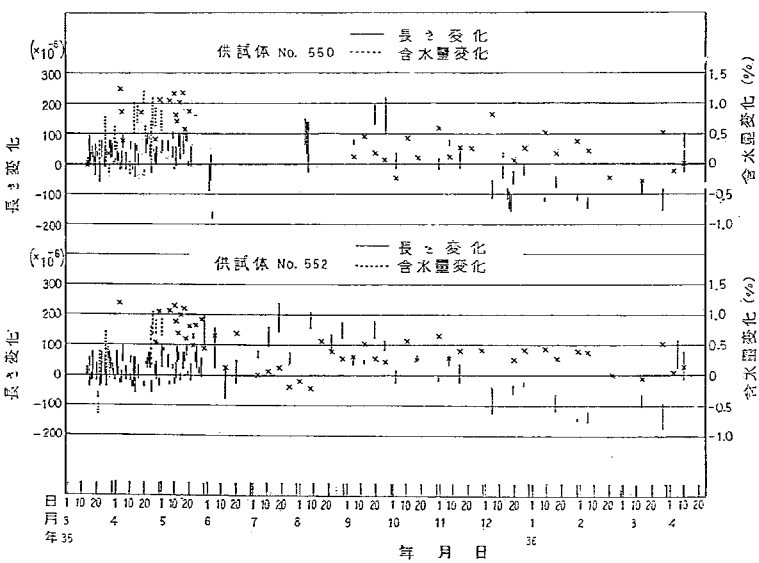


図-20　コンクリート供試体の長さ変化と含水量変化（試験舗装 No. 1′）

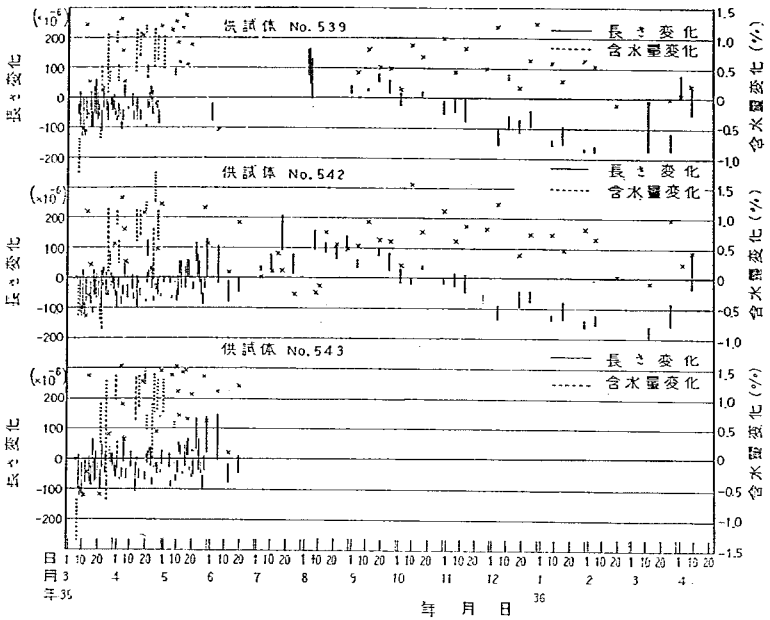


図-21　コンクリート供試体の長さ変化と含水量変化（試験舗装 No. 2）

の版の東端は逆に5時半ごろ最も西に位置し，14時ごろ最も東に位置している。

(ヘ) 突合せ目地に接する版端の変位の日振幅は6月に0.40～0.80mm，平均0.60mm，8月に0.20～0.50mm，平均0.33mm，12月に0.20～0.64mm，平均0.41mmである。

(ト) めくら目地に接する版端も大体において周期的に動いており位相は膨脹目地の場合にほぼ等しい。すなわち6時ごろと15時ごろに変位の極大，極小が生じている。ただしそのいずれが極大になるか，あるいは極小になるかは，個々の目地によって相違する。

(チ) めくら目地に接する両側の版端変位の日変化振幅を図－33～47から調べて表-4にまとめた。まためくら目地自体が変位しているかどうかを調べるためにめくら目地の両側の版端の変位の平均曲線を求めその日振幅を表-4にまとめた。

表-4から施工後3～4カ月間にはとんどすべてのめくら目地にひびわれが発生していること，ひびわれの発生しためくら目地に接する版端の動きは不規則で膨脹目地に近いもの程大きく変位しているとは限らないばかりでなく，同一のめくら目地においても季節によって動きが著しく相違すること，めくら目地自体の位置が動いているのはめくら目地間隔6mの場合膨脹目地から18mまで，10mの場合20mまで，15mの場合30mまでであることなどがわかる。

したがって隣り合った二つのめくら目地の間のコンクリート版を1枚として考えると，膨脹目地から離れたところの版は中心が不動で，版端に近い部分だけが動いているのに対し，膨脹目地に近い版は版全体としても動いていることになる。版全体が動くのは前述のようにめくら目地間隔によって相違しめくら目地間隔の小さい程，膨脹目地に近いところに限られる傾向がみられる。それはコンクリート版の伸縮がめくら目地部分で吸収されるためにめくら目地間隔のせまい程膨脹目地に接する版の動きが早く吸収されることによると考えられる。

めくら目地における版変位の日振幅はすでにのべたように非常にばらついているが，平均をとってみると表-4のようにめくら目地間隔 6 m の場合 0.20～0.33 mm（両側で合計 0.40～0.66mm），10m の場合0.26～0.31mm（両側で合計 0.52～0.62mm），15m の場合0.15～0.45mm（両側で合計0.30～0.90mm）となっている。すなわちめくら目地に接する版端変位の日振幅量は目地間隔の如何に拘らずほとんど一定であって晴天の場合約0.3mmである。

(リ) 変位計によって測られた動きも周期的であるが，位相は多少遅れており極大極小は7時30分ごろと17時ごろに生ずる。

表-4 めくら目地における版の変位

めくら目地番号	最も近い膨張目地からの距離 (m)	めくら目地においてひびわれが発生していたか？ いたとすれば変位の日振幅 (mm) 6月上旬	8月上旬	12月中旬	めくら目地における両版端の変位の平均が動いているか？ 動いているとすれば振幅 (mm)？ 6月上旬	8月上旬	12月中旬
1 — (2)	30	0.10～0.16 平均 0.13	0.20～0.28 平均 0.23	0.06～0.16 平均 0.10	0	0	0
1′ — (2)	60	0.24～0.44 平均 0.34	0.08～0.16 平均 0.10	0.56～0.72 平均 0.64	0	0	0
1′ — (3)	40	未	0.12～0.30 平均 0.20	0.10～0.18 平均 0.13	0.10～0.18 平均 0.15	0	0
1′ — (4)	30	0.30～0.70 平均 0.54	0.18～0.46 平均 0.31	0.44～0.54 平均 0.50	0	0.12～0.18 平均 0.14	0
1′ — (5)	20	0.16～0.30 平均 0.20	0.20～0.34 平均 0.26	0.14～0.18 平均 0.16	0.04～0.12 平均 0.08	0.14～0.22 平均 0.17	0
1′ — (6)	10	0.26～0.40 平均 0.32	0.38～0.50 平均 0.44	0.12～0.20 平均 0.17	0.22～0.30 平均 0.24	0.32～0.34 平均 0.33	0.06～0.10 平均 0.09
めくら目地間隔10mの場合 範囲		0.10～0.70	0.08～0.50	0.06～0.72			
めくら目地間隔10mの場合 平均		0.31	0.26	0.28			
2 — (2)	6	0.20～0.34 平均 0.28	0.30～0.44 平均 0.35	ゲージ故障	0.26～0.28 平均 0.27	0.14～0.18 平均 0.16	ゲージ故障
2 — (3)	12	0.34～0.60 平均 0.47	0.18～0.38 平均 0.25	0.24～0.58 平均 0.39	0.12～0.28 平均 0.21	0.08～0.19 平均 0.11	0.24～0.48 平均 0.37
2 — (4)	18	0.14～0.30 平均 0.20	0.10～0.28 平均 0.17	0.12～0.26 平均 0.19	0.08～0.20 平均 0.14	0.04～0.08 平均 0.06	0.08～0.12 平均 0.10
2 — (5)	24	ゲージ故障	0.10～0.22 平均 0.15	0.08～0.14 平均 0.11	ゲージ故障	0	0
2 — (6)	30	0.16～0.40 平均 0.25	0.06～0.22 平均 0.15	0.24～0.30 平均 0.28	0.09～0.22 平均 0.14	0	0
2 — (7)	60	0.12～0.24 平均 0.18	0.08～0.18 平均 0.12	0.58～0.74 平均 0.70	0	0	0
めくら目地間隔6mの場合 範囲		0.12～0.60	0.06～0.44	0.08～0.74			
めくら目地間隔6mの場合 平均		0.28	0.20	0.33			
2′ — (2)	45	0.08～0.10 平均 0.09	0.12～0.16 平均 0.14	0.08～0.16 平均 0.11	0.04～0.06 平均 0.05	0.04～0.06 平均 0.05	0
2′ — (3)	30	ゲージ故障	0.20～0.84 平均 0.51	0.46～0.68 平均 0.57	ゲージ故障	0.13～0.18 平均 0.16	0.02～0.06 平均 0.05
2′ — (4)	15	0.16～0.28 平均 0.20	0.32～0.50 平均 0.38	0.10～0.20 平均 0.14	0.12～0.16 平均 0.14	0.22～0.34 平均 0.28	0.08～0.10 平均 0.09
めくら目地間隔15mの場合 範囲		0.08～0.28	0.12～0.50	0.10～0.68			
めくら目地間隔15mの場合 平均		0.15	0.45	0.36			
全体の範囲		0.08～0.70	0.06～0.84	0.06～0.74			
全体の平均		0.27	0.25	0.28			

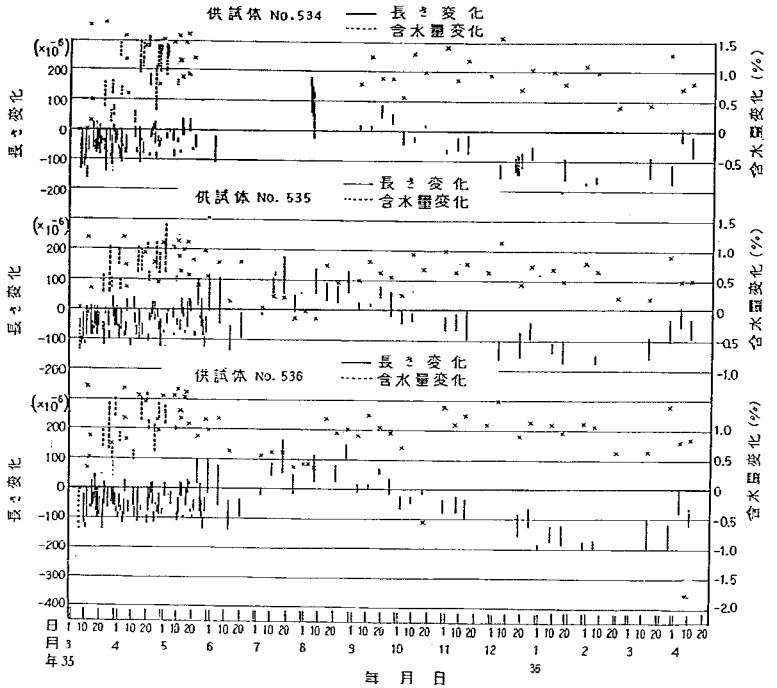


図-22　コンクリート供試体の長さ変化と含水量変化（試験舗装 No.2′）

(ヌ) 変位計による変位の日振幅をとりまとめて表-5に示した。

表-5　変位計による変位の日振幅

変位計番号	最も近い膨張目地からの距離 (m)	変位計による変位の日振幅 (mm) 6月上旬	8月上旬	12月上旬
1′—1	85	0.04	0.04	0.06
1′—2	5	0.44～0.60 平均0.51	0.48～0.50 平均0.49	0.08～0.12 平均0.10
2—1	3	0.32～0.38 平均0.35	0.14～0.24 平均0.19	0.04～0.06 平均0.05
2—2	87	0.03	0.01	0.05
2′—1	82.5	0.04	0.04	0
2′—2	7.5	0.40～0.56 平均0.46	0.46～0.52 平均0.49	0.08～0.10 平均0.09

これによると膨張目地から82.5～87m離れた点はほとんど動いていないこと，膨張目地から3～7.5mの点はかなり大きく 0.5㎜ 程度動いていることがわかる。しかし膨張目地に接する版端の動きに比べると 1/2～1/3 であって，膨張目地から離れるに従って変位は急激に減少していることが認められる。

〔3〕日変化におけるコンクリート版変位と位置の関係

図－51～59は各時刻におけるコンクリート版日変化―位置曲線であって図-30～50からつくったものである。

たとえば図-51は6月1日13時の変位を0とした場合の15時，17時，19時……における変位を縦軸にとり，測定点の位置を横軸にとったものである。これらの図は見にくくなるのを避けるために，a，b，c三図に分割した。また隣り合った測定点の変位を便宜上直線で結んだ。したがって図-51の場合，めくら目地1′-(3)より西の部分については真の変位―位置曲線に極めて近いものが得られているが，これより東の部分においては途中の変位をとばした直線となっている。

図-51～59から6―〔2〕で考察した諸結果，たとえばめくら目地1′―(3)は6月にはひびわれがなかったが，8月にはひびわれが生じていたこと，隣り合った二つのめくら目地に囲まれた版を一枚として考えると，膨張目地から遠い版は中央が動かず両端が動いているが，膨張目地に近い版は，版全体として動いていることなどがもっと明瞭に認められる。

図－57～59は連続鉄筋コンクリート舗装の日変位～位

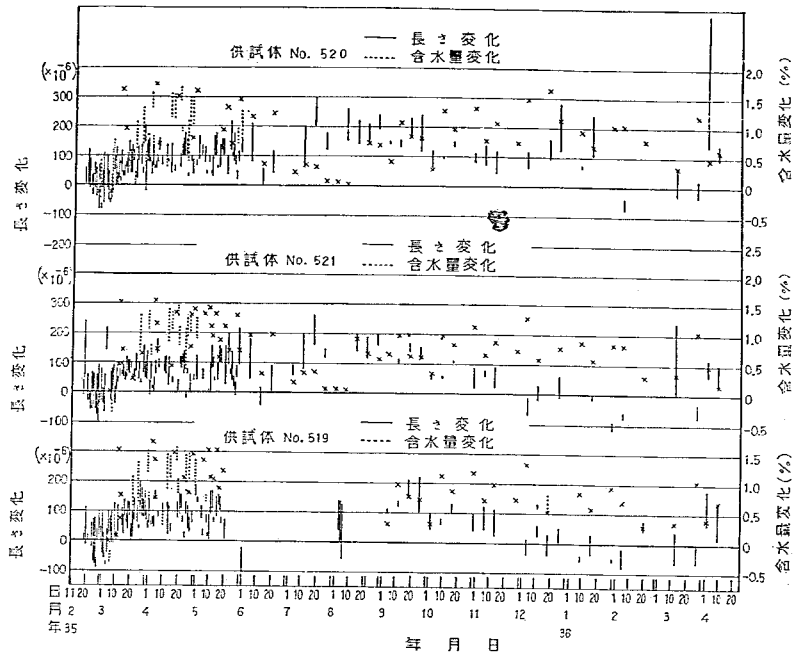


図-23　コンクリート供試体の長さ変化と含水量変化（試験舗装 No. 7）

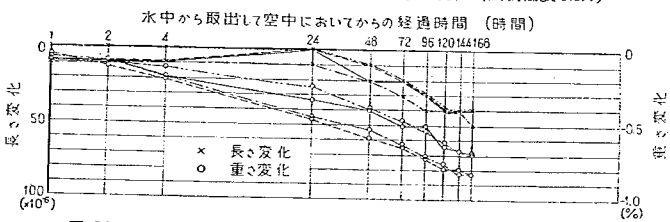


図-24　コンクリート供試体を乾燥させた場合の長さ変化と重さ変化

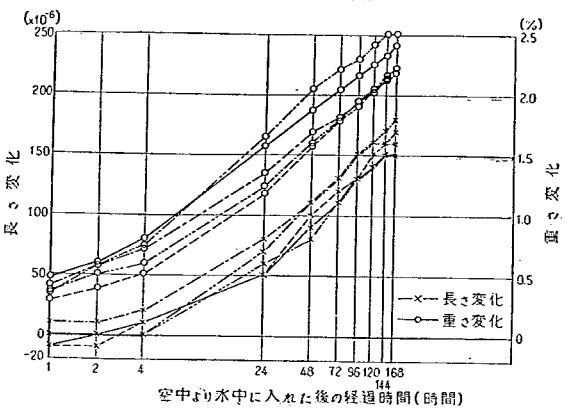


図-25　コンクリート供試体を水中に入れた場合の長さ変化と重さ変化

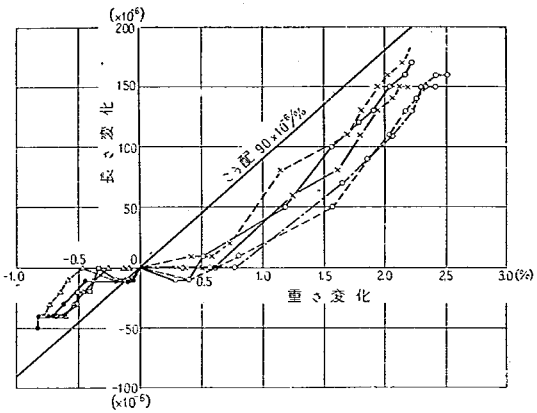


図-26　コンクリート供試体の含水量変化と長さ変化の関係

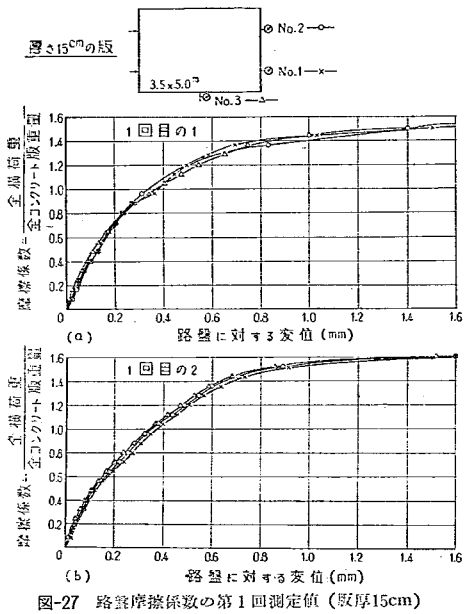


図-27　路盤摩擦係数の第1回測定値（版厚15cm）

置曲線を示すが，連続鉄筋コンクリート舗装版は膨脹目地に近いごく短かい部分だけが動いており，膨脹目地から10m以上離れた部分はほとんど全く動いていないことがわかる。

以上要約すれば，めくら目地をもった普通コンクリート版の摩擦応力のこう束係数は，多かれ少なかれ1より小さいのに対し，連続鉄筋コンクリート版中央部の摩擦応力のこう束係数はおよそ1であるということができる。

〔4〕 日変化におけるコンクリート版変位と温度の関係

図-60～68は日変化におけるコンクリート版変位と版表面から10cm下の点の温度の関係を示すものであって，図-11と図-30～50からつくった。

これらの図からほとんどすべての測定点において，版の日変化と中心温度の間に直線的関係のあることがわかる。変位と温度の間にこのような強い相関々係のあることはすでに度々確かめてきたところである。

しかし少数の点においては，……膨脹目地に接する版端が多いが……変位と温度の関係を一つの直線で表わすより，むしろ二つの直線で表わす方がよい。この場合高温側の直線のこう配は低温側のそれよりも常に小さい。低温時には摩擦力だけがコンクリート版の変位をこう束しているのに対し，高温時には目地幅が縮まるために生ずる圧縮抵抗と摩擦抵抗の両方が加えられることがその理由であろう。

図-60～68の直線のこう配，すなわち日温度変化1°Cあたりの変位量（mm）を読み取ったものが表-6である。

この表から全測定点50カ所のうち約60%にあたる30カ所においては，温度変化1°Cあたりの変位量が四季を通じてほぼ一定であるが，残りの約40%の箇処においては四季によってかなり大きく変化してくることがわかる。

たとえばめくら目地1′—(2)西の場合，6月と8月には温度変化1°Cあたりの変位量は0.005mmであるのに対し12月には0.09mmである。また突合せ目地1—1′東の場合，6月は0.068mm/°C，8月は0.043mm/°C，12月は0.064mm/°Cである。すなわちコンクリート版の摩擦こう束は常に一定のものではなく，時に変化することがある。

摩擦こう束の程度を知るために，温度変化1°Cあたりの変位量をコンクリート版が自由に伸縮した場合の1°Cあたりの変位量で割った数値を求め，表-6の右欄に記入した。ここで自由伸縮の場合の1°Cあたりの変位量は便宜上コンクリート版中心から測定点までの距離に，コンクリートの膨脹係数0.000009を掛けて求めた。またコンクリート版中心は膨脹目地におかれた伸縮計と変位計に対しては，膨脹目地中心をとり，めくら目地と突合せ目地におかれた伸縮計に対してはめくら目地中心をとった。

表-6 日温度変化1°Cあたりのコンクリート版変位

試験舗装	変位測定位置	温度変化1°Cあたりの変位 A (mm) 6月	8月	12月	比=A/(版中心からの距離×膨張率) 6月	8月	12月
No. 1	1′ — 外 西	—	+ 0.085	+ 0.088	—	0.10	0.11
〃	1 — (2) 東	—	0	− 0.008	—	0	0.18
〃	〃 西	+ 0.012	+ 0.016	+ 0.012	0.27	0.36	0.27
〃	1 — 1′ 東	− 0.068	− 0.043	− 0.064	1.51	0.95	1.42
〃	〃 西	+ 0.055	+ 0.025	+ 0.070	1.22	0.56	1.56
〃	1′ — 1	0	0	+ 0.004	—	—	—
〃	1′ — (2) 東	−0.008, −0.100	− 0.008	− 0.095	0.18, 2.22	0.18	2.11
〃	〃 西	+ 0.005	+ 0.006	+ 0.092	0.11	0.13	2.05
〃	1′ — (3) 東	− 0.017	− 0.017	− 0.010	0.38	0.38	0.22
〃	〃 西	− 0.008	+ 0.014	+ 0.018	− 0.18	0.31	0.40
〃	1′ — (4) 東	−0.022, −0.135	− 0.021	− 0.074	0.49, 3.00	0.47	1.64
〃	〃 西	+ 0.047	+ 0.030	+ 0.073	1.04	0.67	1.62
〃	1′ — (5) 東	− 0.024	− 0.023	− 0.022	0.53	0.51	0.49
〃	〃 西	0	+ 0.016	+ 0.017	0	0.36	0.38
〃	1′ — (6) 東	− 0.032	− 0.029	− 0.032	0.71	0.64	0.71
〃	〃 西	− 0.025	− 0.023	+ 0.012	− 0.56	− 0.62	0.27
〃	1′ — 2	—	− 0.037	− 0.013	—	—	—
〃	1′ — 外 東	− 0.162	− 0.104	− 0.104	0.20	0.13	0.13
No. 2	2 — 外 西	+ 0.103	+ 0.052	+ 0.075	0.13	0.06	0.09
〃	2 — 1	+ 0.048	+ 0.014	+ 0.007	—	—	—
〃	2 — (2) 東	+ 0.026	− 0.004	− 0.017	− 0.96	0.15	0.63
〃	〃 西	+ 0.036	+ 0.033	+ 0.015	1.34	1.22	0.56
〃	2 — (3) 東	− 0.029	− 0.027	− 0.034	1.07	1.00	1.26
〃	〃 西	+ 0.030	+ 0.009	+ 0.090	1.11	0.33	3.33
〃	2 — (4) 東	+ 0.014	− 0.012	− 0.006	− 0.52	0.44	0.22
〃	〃 西	+ 0.033	+ 0.020	+ 0.028	1.22	0.74	1.04
〃	2 — (5) 東	—	− 0.016	− 0.005	—	0.59	0.18
〃	〃 西	—	+ 0.014	+ 0.015	—	0.52	0.55
〃	2 — (6) 東	− 0.010	− 0.010	− 0.043	0.37	0.37	1.59
〃	〃 西	+ 0.028	+ 0.018	+ 0.044	1.04	0.67	1.63
〃	2 — (7) 東	− 0.012	− 0.008	− 0.106	0.44	0.30	3.92
〃	〃 西	+ 0.016	+ 0.009	+ 0.103	0.59	0.33	3.81
〃	2 — 2	− 0.005	− 0.004	− 0.007	—	—	—
〃	2 — 2′ 東	− 0.044	− 0.040	− 0.091	1.63	1.48	3.37
〃	2 — 2′ 西	+ 0.034	+ 0.020	+ 0.016	0.50	0.30	0.24
〃	2′ — 1	0	− 0.004	0	—	—	—
〃	2′ — (2) 東	− 0.010	− 0.010	− 0.014	0.15	0.15	0.21
〃	〃 西	− 0.009	+ 0.010	+ 0.014	0.13	0.15	0.21
〃	2′ — (3) 東	—	−0.029, −0.093	− 0.097	—	0.43	1.44
〃	〃 西	—	+ 0.022	+ 0.090	—	0.33	1.33
〃	2′ — (4) 東	0	− 0.043	− 0.026	0	0.64	0.38
〃	〃 西	+ 0.018	+ 0.006	+ 0.006	0.27	0.09	0.09
〃	2′ — 2	− 0.054	− 0.036	− 0.015	—	—	—
〃	2′ — 外 東	− 0.173	−0.062, −0.175	− 0.143	0.21	0.08, 0.22	0.18
No. 7	5 — 7 西	+0.032, +0.312	0.042, 0.176	+ 0.189	0.20, 0.77	0.10, 0.44	0.47
〃	7 — 1	+ 0.024	+ 0.008	+ 0.008	0.08	0.03	0.03
〃	7 — 2	+ 0.002	0	0	0.01	0	0
〃	7 — 3	0	0	0	—	—	—
〃	7 — 4	− 0.002	0	0	0.01	0	0
〃	7 — 5	− 0.008	− 0.008	− 0.008	0.03	0.03	0.03
〃	7 — 9 東	−0.114, −0.228	−0.082, −0.182	− 0.198	0.28, 0.56	0.20	0.49

×注：版中心は膨脹目地の伸縮計においては膨脹目地中心とし，めくら目地の伸縮計においてはめくら目地中心とした。またNo. 7の変位計においては膨脹目地中心をとつた。

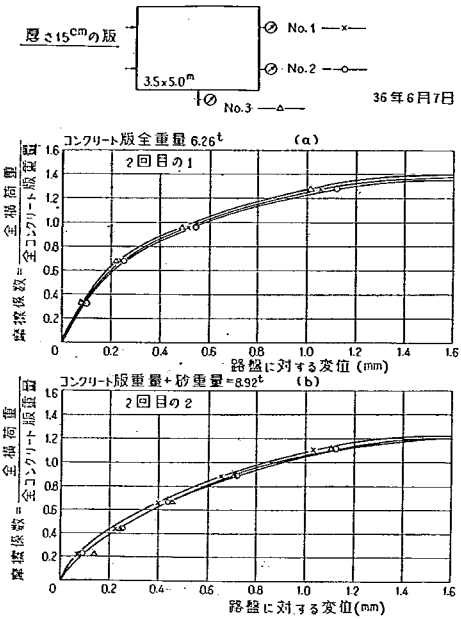


図-28　路盤摩擦係数の第2回測定値　重量変化後の測定値

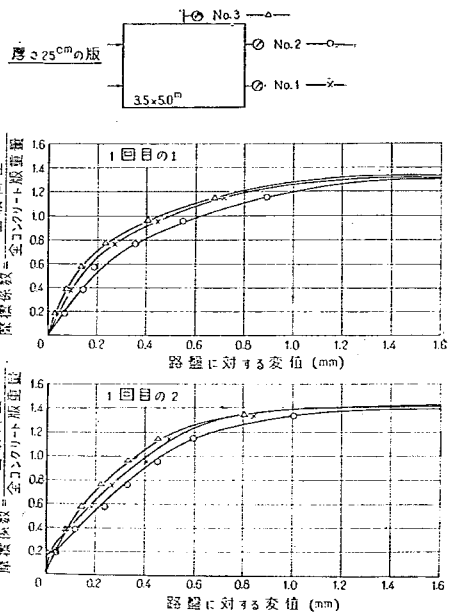


図-29　路盤摩擦係数の第1回測定値（版厚25cm）

もしそれぞれの場合について仮定したコンクリート版中心が不動点であり，かつコンクリート版は温度変化だけによって伸縮しているものとすれば1から前述の比を引いたものがこう束係数を表わすことになる。すでに考察したように第一の仮定は成立たないことが少なくないが，第二の仮定はおおむね成立つことはすでに確かめたことである。

この比についての計算結果を表-6で見ると，0.2～0.5が多い。すなわちこう束係数は0.5～0.8が多い。しかしこの比が1より大きく，こう束係数を計算するとマイナスになる点がいくつかある。それは仮定したコンクリート版中心が実際には動いていたためであると考えられる。

なお隣り合った二つのめくら目地で囲まれた一枚の版の両端の比の和を求めると，これが2より大きくなることはほとんどなく，温度変化により自由伸縮以上に版が伸縮していることはないことを示している。たとえば，伸縮計1′-(4)東の12月の比は1.64，1′-(3)西の比0.40で両者の和は2.04≒2.0である。この場合はめくら目地1′-(3)と1′-(4)によって囲まれた一枚の版は温度変化による自由伸縮量に等しい量だけ全体として伸縮している。(8章広義端部こう束応力参照)

表-6で求めた比が1より大きいものはすべてこう束係数を0とし，他は1から比を引いたものをこう束係数としてこう束係数の平均値を求めた結果は表-7に示すとおりである。表-7の結果を図に表わしたものが図-69である。

表-7と図-69からめくら目地をつくることは変位こう束係数を小さくし，ひいては摩擦応力を減少させる効果が大きいこと，めくら目地間隔6，10，15m の平均こう束係数はおよそ 0.3，0.5，0.65くらいであって，目地間隔のせまい程摩擦応力の小さいことがわかる。

表-7からまた膨脹目地も変位こう束係数を減少し，膨脹目地間隔の小さい程その効果は大きいこと，しかしその影響範囲は膨脹目地からせいぜい10～20mであることがわかる。

〔5〕コンクリート版変位の年変化

試験舗装No.1およびNo.2の変位の1年間の観測結果は図-70～75に示すとおりである。また試験舗装 No.7の変位の1年間の観測結果は図-76に示すとおりである。

これらの図は縦軸に変位をとり，横軸に年月日がとってある。図中の垂直線は8時半の変位と13時の変位を結んだものである。たとえば膨脹目地1—外の西側の変位を考えると，各垂直線の下端

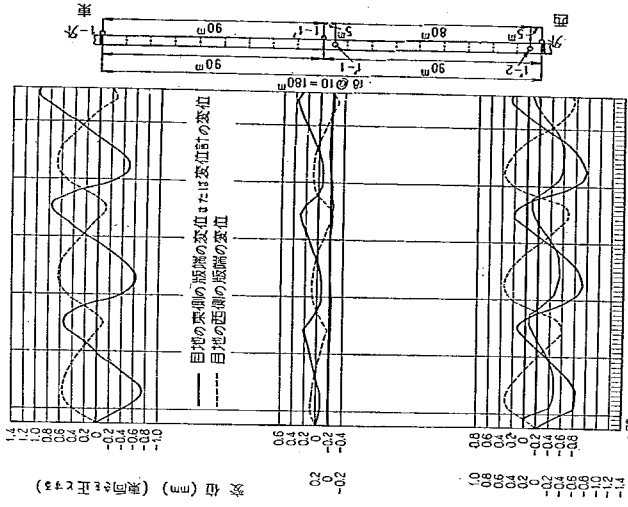


図-31　コンクリート版変位の日変化（試験舗装 No. 1）

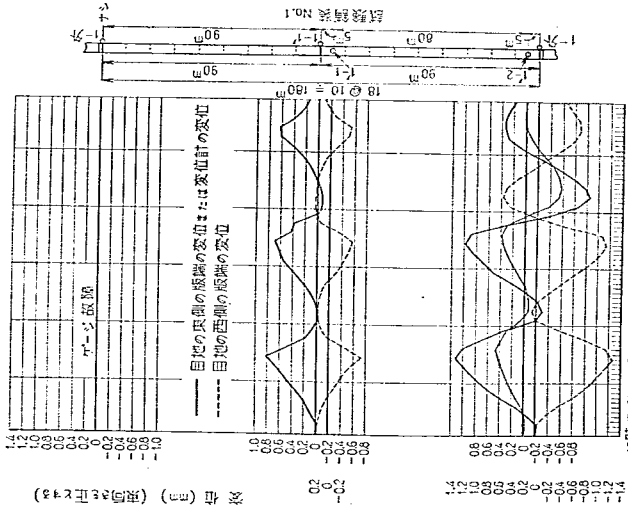


図-30　コンクリート版変位の日変化（試験舗装 No. 1）

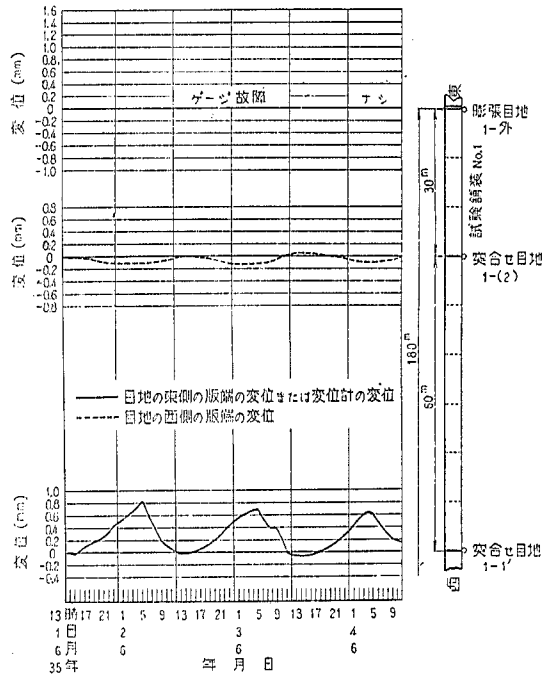


図-33　コンクリート版変位の日変化（試験舗装 No. 1）

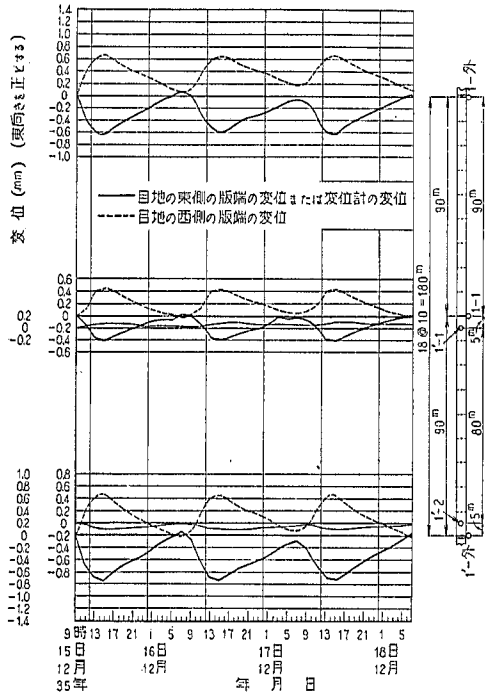


図-32　コンクリート版変位の日変化（試験舗装 No. 1）

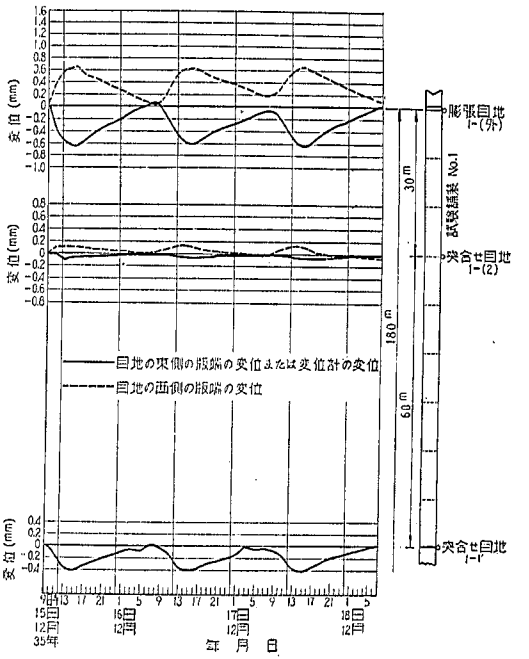


図-35　コンクリート版変位の日変化（試験舗装 No. 1）

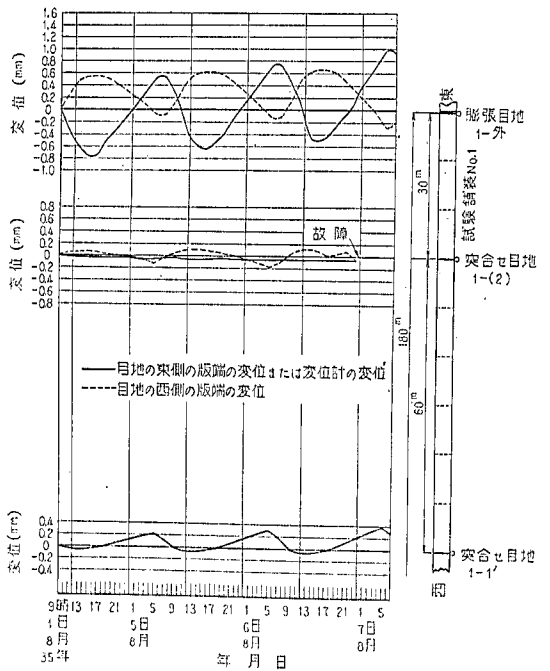


図-34　コンクリート版変位の日変化（試験舗装 No. 1）

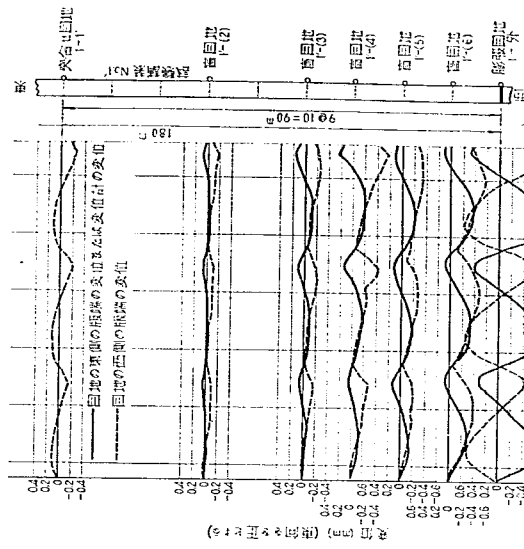


図-37 コンクリート版変位の日変化（試験盛土 No.1）

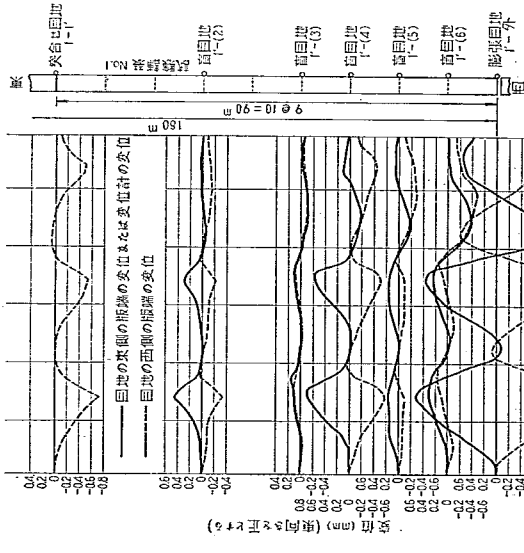


図-36 コンクリート版変位の日変化（試験盛土 No.1）

図-39　コンクリート版変位の日変化（試験舗装 No.2, No.2'）

図-38　コンクリート版変位の日変化（試験舗装 No.1）

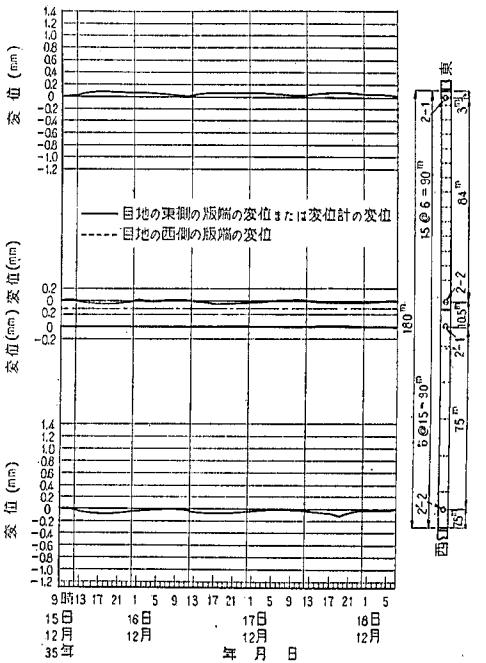


図-41　コンクリート版変位の日変化（試験舗装 No. 2, No. 2'）

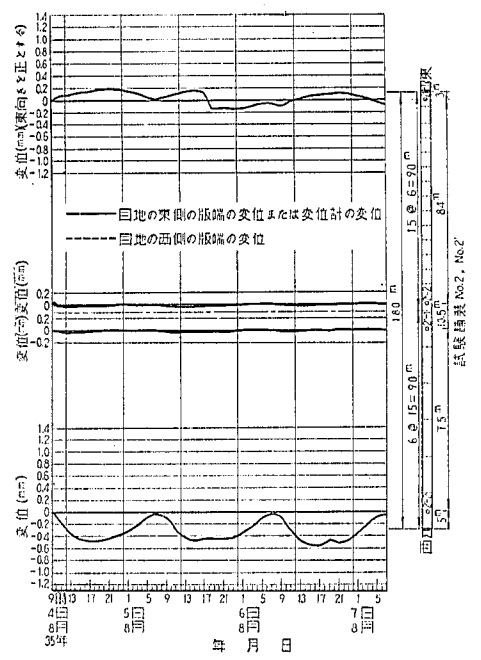


図-40　コンクリート版変位の日変化（試験舗装 No. 2, No. 2'）

図-43　コンクリート版変位の日変化（試験舗装 No. 2）

図-42　コンクリート版変位の日変化（試験舗装 No. 2）

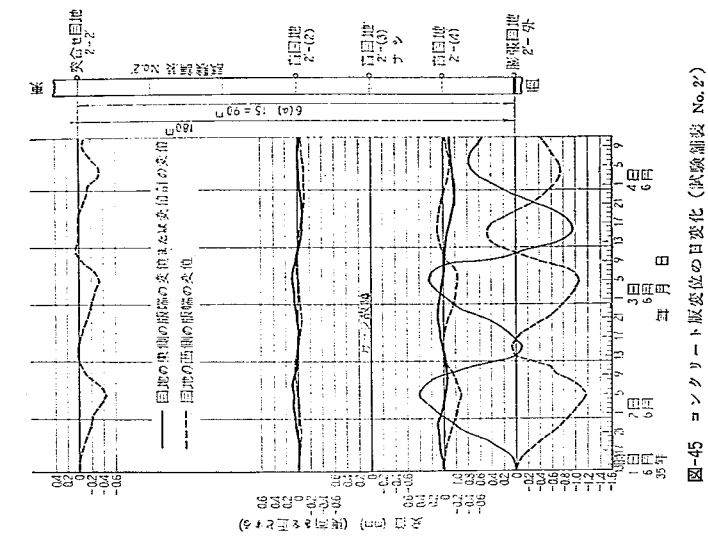


図-44　コンクリート版変位の日変化（試験舗装 No. 2）

図-45　コンクリート版変位の日変化（試験舗装 No. 2'）

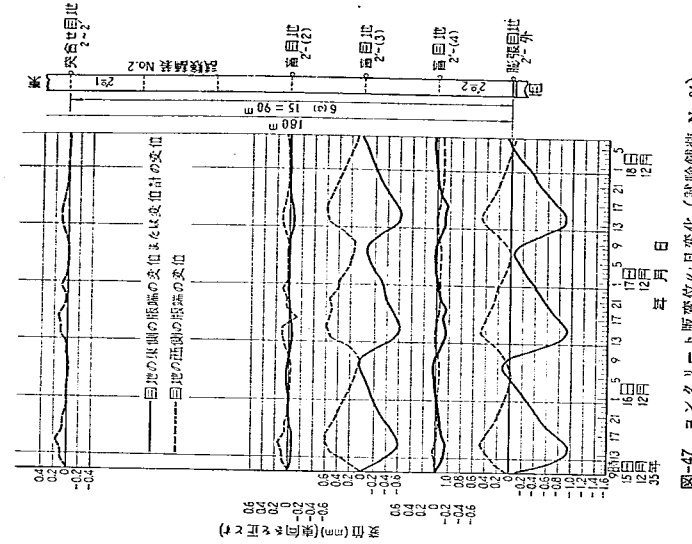


図-47　コンクリート版変位の日変化（試験舗装 No.2）

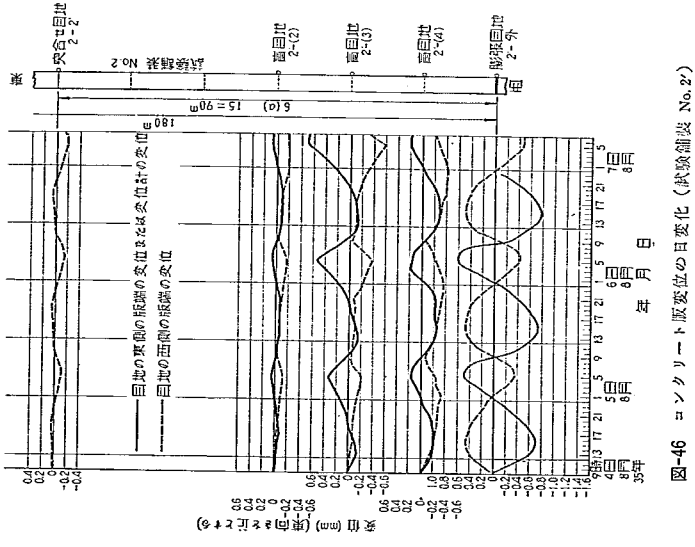


図-46　コンクリート版変位の日変化（試験舗装 No.2）

図-49　コンクリート版変位の日変化（試験舗装 No.7）

図-48　コンクリート版変位の日変化（試験舗装 No.7）

表-7 日変化における変位こう束係数の平均値

測定点	試験舗装	6月 平均こう束係数	6月 個数	8月 平均こう束係数	8月 個数	12月 平均こう束係数	12月 個数	平均
膨脹目地	No.1, No.2	0.82	3	0.87	4	0.87	4	0.86
	No.7	0.34	2	0.55	2	0.52	2	0.48
めくら目地および突合せ目地	No.2	0.17	9	0.46	12	0.24	12	0.29
	No.1, 1′	0.51	13	0.56	14	0.36	14	0.48
	No.2′	0.82	3	0.70	6	0.52	5	0.66
膨脹目地から 10m	No.7	0.95	2	0.97	2	0.97	2	0.96
〃 20m	No.7	1.00	2	1.00	2	1.00	2	1.00

を結んだ線が8時半の変位の年変化を示し，各垂直線の上端を結んだ線が13時の変位の年変化を示している。

図-70～76を見るとコンクリート版変位の年変化は図-77に示す三つのケースに分類されることがわかる。すなわちコンクリート版西端（目地の東端）が冬から夏にかけてマイナス方向（西向き）に動き，夏から冬にかけてプラス方向（東向き）に動くA型，それと全く逆な動き方をするB型，冬から次の年の冬に至る最初の1年間はプラス方向にしか動かないC型である。

ここでA型はめくら目地間隔中心付近を不動点と考えた場合のコンクリート版の温度変化による伸縮と同じ方向に版端が動いていることを示し，B型はめくら目地にかこまれたコンクリート版全体が動いているために一端が逆向きに動いていることを示し，C型は冬から夏まではコンクリート版全体が動いたのに対し，夏から冬にかけては版端だけが温度変化による伸縮と同じ方向に動いたことを示していると考えられる。

コンクリート版変位の年変化をこのようにA，B，Cの3型に分類し，かつ年間変位量の大略値，R，F，Dを読んだ結果は表-8，9および10のようである。

表-8 膨脹目地に接するコンクリート版端変位の年変化

測定点	年変化の型	R 大きさ(mm)	R 時期	F 大きさ(mm)	F 時期	D(mm)	F/R
1 — 外 東	A	− 7.2	8月下旬	− 4.6	1月上旬	− 2.6	0.64
1 — 外 西	A	3.25	9月上旬	2.65	1月中旬	0.6	0.81
1′ — 外 東	A	− 6.45	8月中旬	− 3.85	1月中旬	− 2.6	0.60
1′ — 外 西	A	4.15	8月中旬	3.35	1月中旬	0.8	0.81
2 — 外 東	A	− 4.2	7月下旬	− 3.8	1月上旬	− 0.4	0.90
2 — 外 西	A	4.6	8月下旬	1.6	1月中旬	3.0	0.35
2′ — 外 東	A	− 7.5	8月上旬	− 4.2	1月中旬	− 3.3	0.56
2′ — 外 西	A	4.1	8月上旬	2.5	1月中旬	1.6	0.61
5 — 7 東	A	− 4.5	8月上旬	− 7.0	1月上旬	+ 2.5	1.56
5 — 7 西	A	4.6	8月上旬	8.0	1月中旬	− 3.4	1.76
7 — 9 東	A	− 5.0	8月下旬	− 8.0	1月中旬	+ 3.0	1.60
7 — 9 西	A	6.8	8月下旬	6.8	1月中旬	0	1.00

表-9 めくら目地および突合せ目地に接するコンクリート版端変位の年変化

測定点	年変化の型	R		F		D(mm)	F/R
		大きさ(mm)	時期	大きさ(mm)	時期		
1 — (2) 東	B	1.0	9月上旬	0.6	3月下旬	0.4	0.60
1 — (2) 西	A	1.3	8月下旬	1.0	3月上旬	0.3	0.77
1 — 1′ 東	A	− 0.6	8月中旬	− 1.8	1月下旬	+ 1.2	3.00
1 — 1′ 西	A	1.5	8月上旬	2.3	2月中旬	− 0.8	1.53
1′ — (2) 東	A	− 1.2	9月中旬	− 1.6	1月中旬	+ 0.4	1.33
1 — (2) 西	A	0.4	10月中旬	1.05	1月中旬	− 0.65	2.62
1′ — (3) 東	A	− 2.2	9月上旬	− 0.95	1月下旬	− 1.25	0.43
1′ — (3) 西	B	− 2.3	9月上旬	− 1.25	1月中旬	− 1.05	0.54
1′ — (4) 東	A	− 2.9	9月上旬	− 2.9	1月下旬	0	1.00
1′ — (4) 西	C	—	——	− 4.05	1月下旬	—	—
1′ — (5) 東	A	− 3.0	8月下旬	− 0.5	3月中旬	− 2.5	0.17
1′ — (5) 西	B	− 3.5	9月上旬	− 0.3	1月上旬	− 3.2	0.09
1′ — (6) 東	A	− 4.0	8月下旬	− 1.9	1月下旬	− 2.1	0.48
1′ — (6) 西	B	− 4.0	8月下旬	− 2.2	4月中旬	− 1.8	0.55
2 — (2) 東	B	3.2	8月下旬	0.8	1月上旬	2.4	0.25
2 — (2) 西	A	3.0	8月下旬	0.8	2月上旬	2.2	0.27
2 — (3) 東	C	—	——	2.5	1月下旬	—	—
2 — (3) 西	A	2.8	9月上旬	2.4	1月中旬	0.4	0.86
2 — (4) 東	B	2.4	9月上旬	1.6	1月中旬	0.8	0.67
2 — (4) 西	A	2.2	9月中旬	1.8	1月中旬	0.4	0.82
2 — (5) 東	B	0.8	9月中旬	0.4	3月下旬	0.4	0.50
2 — (5) 西	A	1.0	9月下旬	0.4	2月中旬	0.6	0.40
2 — (6) 東	C	—	——	1.0	1月中旬	—	—
2 — (6) 西	A	0.9	8月中旬	1.3	1月中旬	0.4	1.45
2 — (7) 東	A	− 0.3	9月上旬	− 1.1	1月中旬	0.8	3.66
2 — (7) 西	A	0.5	8月上旬	1.5	1月中旬	− 1.0	3.00
2 — 2′ 東	A	− 0.8	6月下旬	− 1.9	2月上旬	+ 1.1	2.38
2 — 2′ 西	A	0.5	6月下旬	1.9	1月下旬	− 1.5	4.80
2′ — (2) 東	A	− 2.0	9月中旬	− 1.0	3月上旬	− 1.0	0.50
2′ — (2) 西	B	− 1.9	9月上旬	− 0.6	1月下旬	− 1.3	0.32
2′ — (3) 東	A	− 2.8	9月上旬	− 2.6	1月下旬	− 0.2	0.93
2′ — (3) 西	C	—	——	4.1	1月上旬	—	—
2′ — (4) 東	A	− 5.9	8月下旬	− 2.3	1月下旬	− 3.6	0.39
2′ — (4) 西	B	− 4.6	8月中旬	− 1.5	11月中旬	− 3.1	0.33

表-10 コンクリート版中央部各点の変位の年変化

測定点	年変化の型	R		F		D(mm)	F/R
		大きさ(mm)	時期	大きさ(mm)	時期		
1′ — 1	C	—	——	0.6	1月中旬	—	—
1′ — 2	A	− 3.7	8月下旬	− 1.6	1月上旬	− 2.1	0.43
2 — 1	A	3.7	9月上旬	1.2	1月下旬	2.5	0.32
2 — 2	C	—	——	0.7	1月中旬	—	—
2′ — 1	C	—	——	0.4	1月中旬	—	—
2′ — 2	A	− 3.9	8月下旬	− 1.7	1月中旬	− 2.2	0.44
7 — 1	A	1.2	8月中旬	2.2	1月中旬	− 1.0	1.83
7 — 2	A	0.8	9月下旬	0.8	3月下旬	0	1.00
7 — 3	—	0.1	——	—	——	—	—
7 — 4	A	− 0.6	8月中旬	− 0.6	12月中旬	0	1.00
7 — 5	A	− 0.8	10月上旬	− 0.8	11月下旬	0	1.00

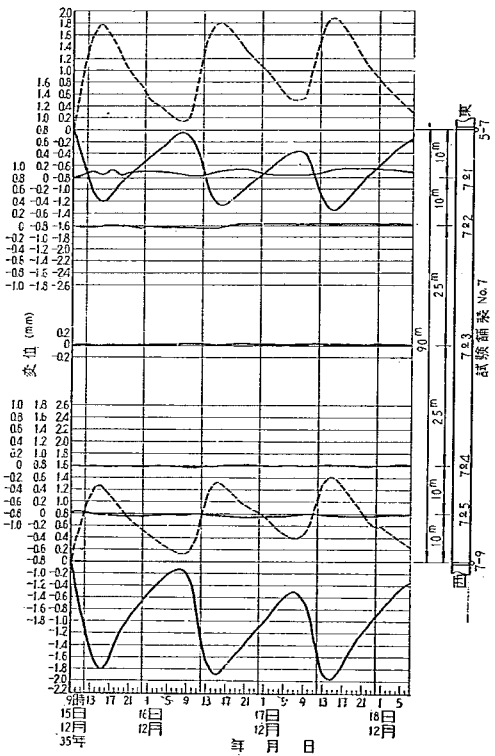


図-50 コンクリート版変位の日変化（試験舗装 No.7）

図-70～76および表-8～10から次のことがわかる。

(イ) 膨脹目地に接するコンクリート版端はA型だけであって，隣りあった膨脹目地に囲まれた一枚のコンクリート版が中央部を不動点として伸縮しているかのように変位し，7月下旬～9月上旬の間平均8月中旬に最も外側に，1月上旬～中旬の間，平均1月中旬に最も内側に位置する。

(ロ) 試験舗装No.1およびNo.2の膨脹目地に接する版端は施工された冬期から8月中旬にかけては3.2～7.5mm平均5.2mm変位しているのに対し，8月中旬から翌年1月中旬にかけては1.6～4.6mm平均3.3mmしか戻っていない。すなわち，施工後1年間に全体として膨脹した結果になっている。その理由の一つはおそらく一旦ひびわれの生じためくら目地において両側のコンクリート版が完全には元の位置に戻らないことにあろう。

(ハ) 試験舗装No.7の膨脹目地に接する版端は施工された冬期から8月中旬にかけては4.5～6.8mm平均5.2mm変位しているのに対し，8月中旬から翌年1月中旬にかけては6.8～8.0mm，平均7.4mmも戻っている。すなわち施工後1年間に全体として収縮した結果になっている。これはおそらくコンクリート版全体の収縮によるものであろう。全体を平均した収縮ひずみは1年

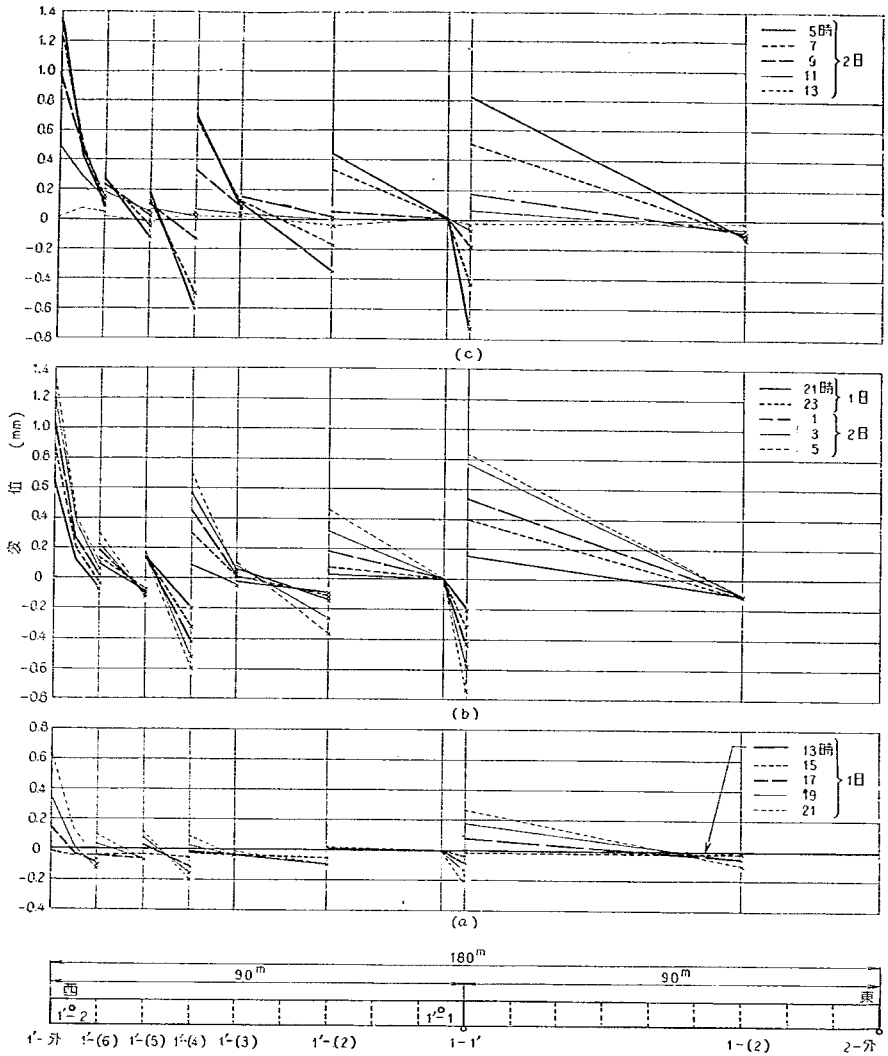


図-51 各時刻におけるコンクリート版各点の変位（試験舗装 No. 1, No. 1', 35年6月）

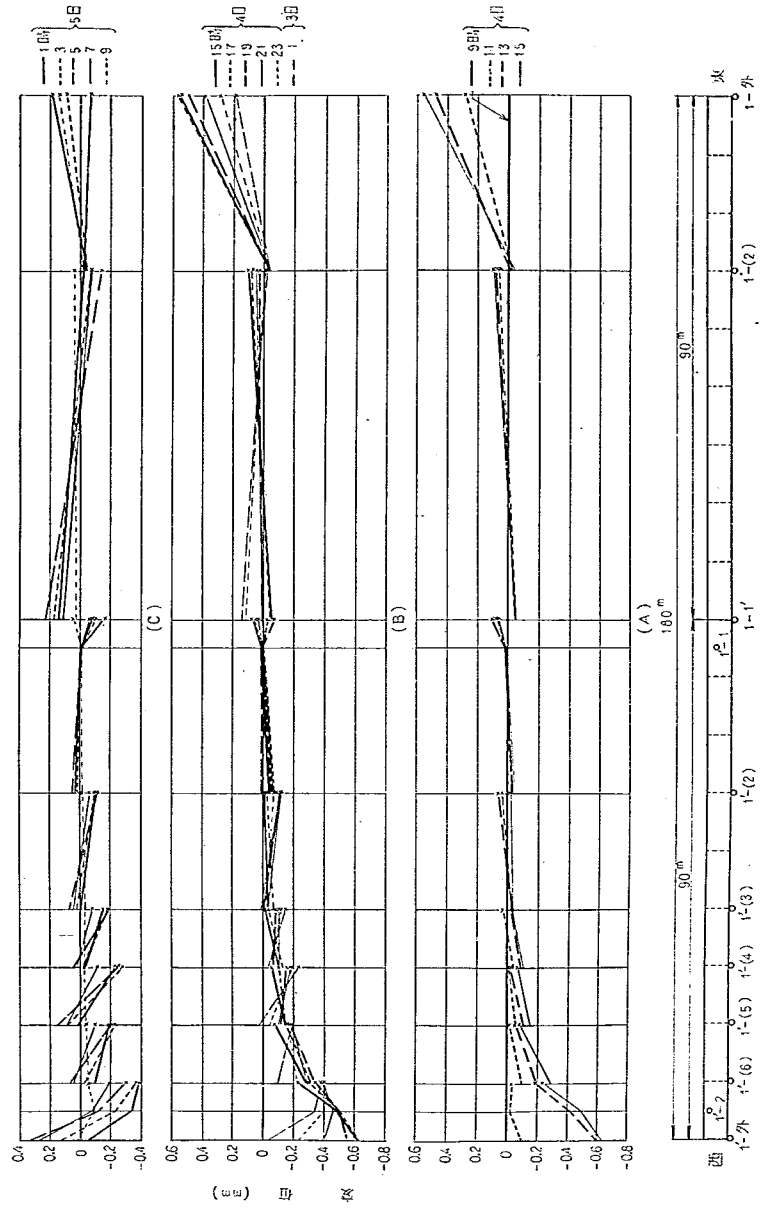


図-52　各時刻における コンクリート版各点の変位（試験舗装 No.1，No.1'，35年8月）

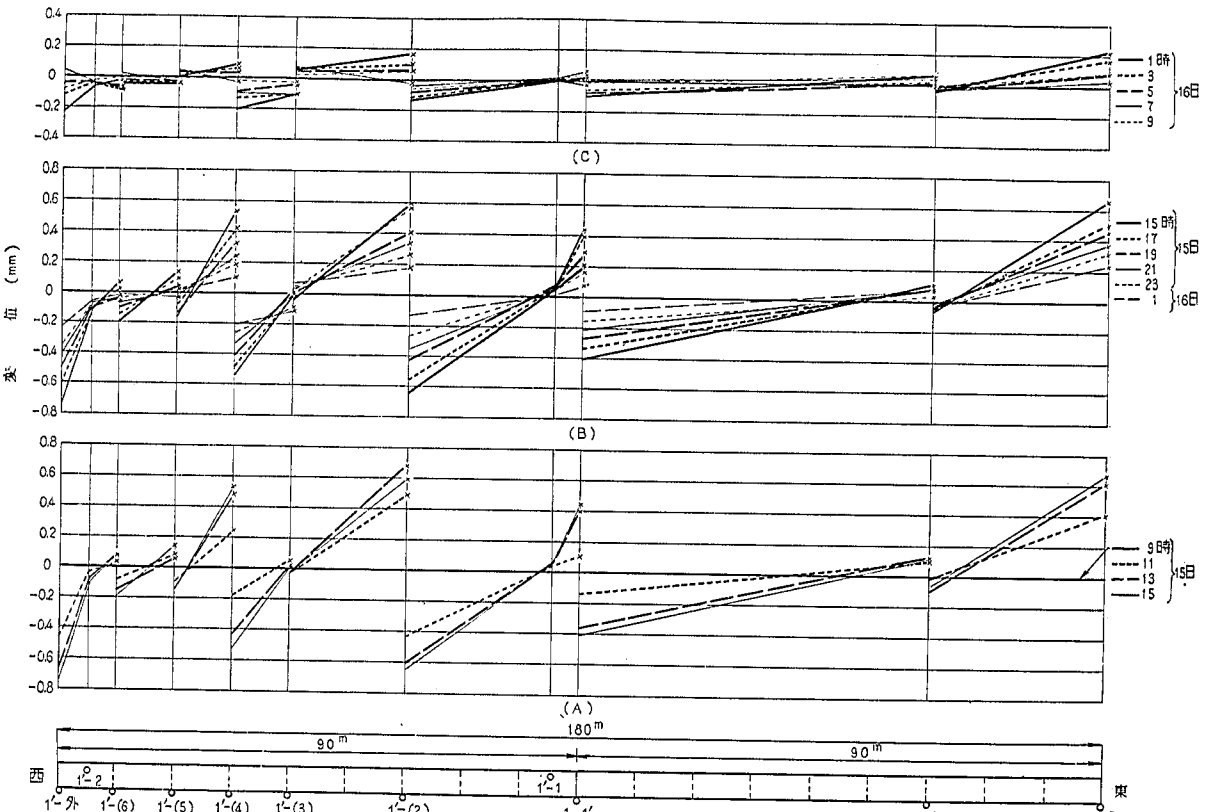


図-53　各時刻におけるコンクリート版各点の変位（試験舗装 No. 1，No. 1′，35年12月）

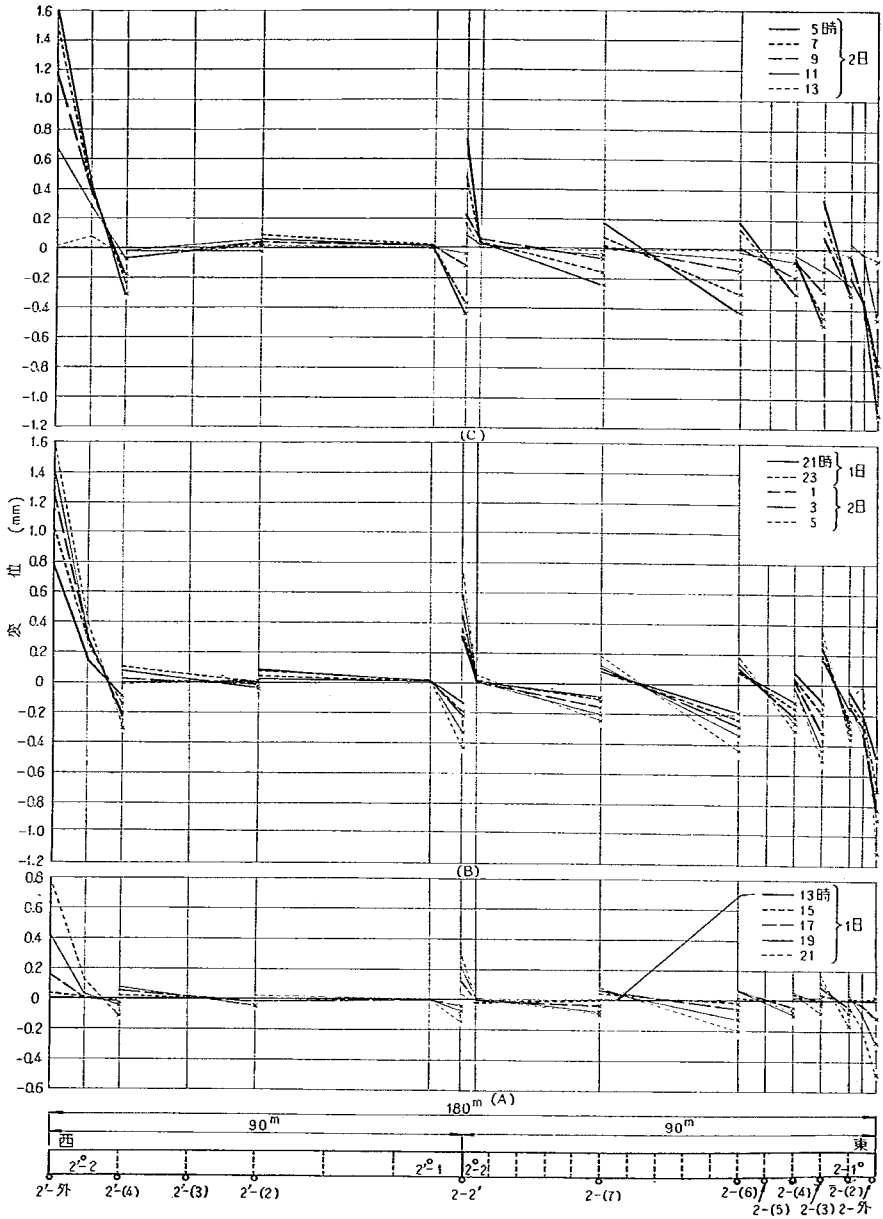


図-54　各時刻におけるコンクリート版各点の変位（試験舗装 No. 2, No. 2′, 35年6月）

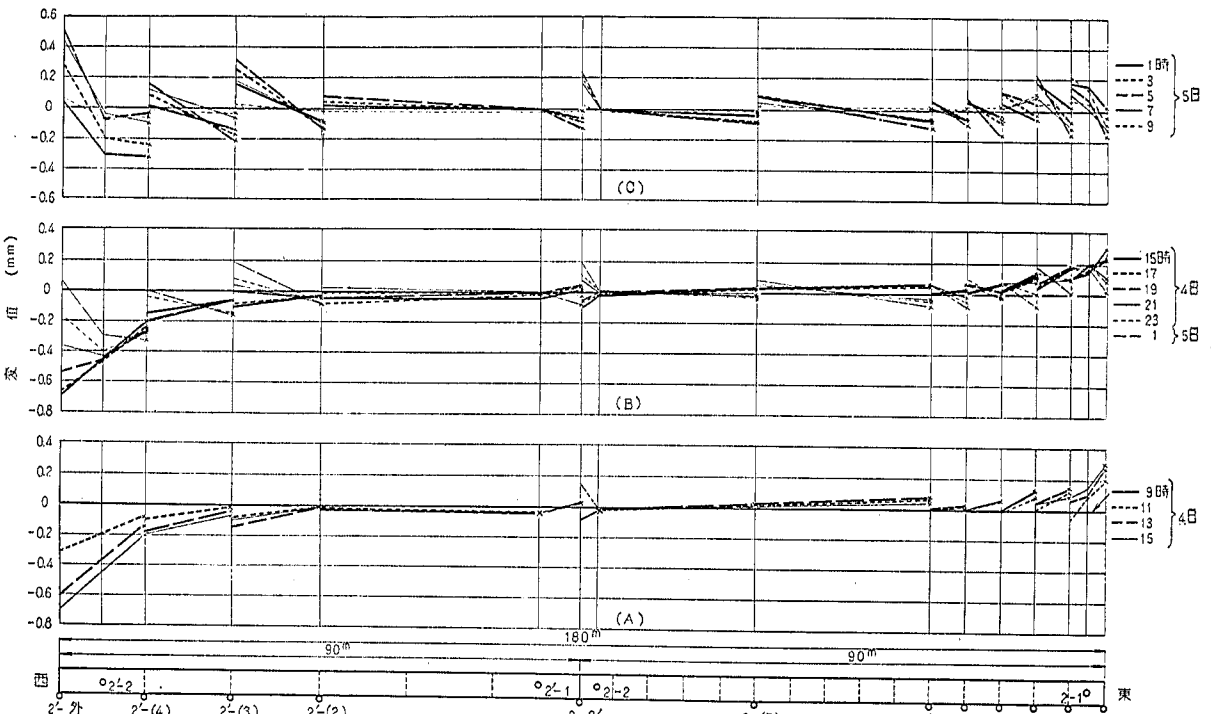


図-55 各時刻におけるコンクリート版各点の変位（試験舗装 No. 2, No. 2', 35年8月）

間に$\frac{3.4+3.0}{90,000}\fallingdotseq 70\times10^{-6}$となっている。この量はコンクリート供試体の年間収縮ひずみ135×10^{-6}より小さい。

(ニ) 突合せ目地の年間変位量はめくら目地と同じオーダーである。

(ホ) めくら目地に接するコンクリート版端の1年間の変位は図-77に分類したA型，B型，C型のすべてを含んでいる。そしてA型およびB型の場合変位が極大，極小となる時期はそれぞれ6月下旬～10月中旬，平均8月下旬と1月上旬～4月中旬，平均1月下旬である。

(ヘ) 間隔6mのめくら目地に接するコンクリート版端は2月から8月下旬にかけて0.3～3.2mm平均1.7mm変位するのに対し，8月下旬から翌年1月下旬にかけて0.4～2.5mm，平均1.2mm戻る。

(ト) 間隔10mのめくら目地に接するコンクリート版端は2月から8月下旬にかけて0.4～4.0mm平均2.1mm変位するのに対し，8月下旬から翌年1月下旬にかけては0.3～2.9mm，平均1.4mm戻る。

(チ) 間隔15mのめくら目地に接するコンクリート版端は2月から8月下旬にかけて0.5～5.9mm平均2.6mm変位するのに対し8月下旬から翌年1月下旬にかけては0.6～2.4mm平均1.8mm戻る。

(リ) 夏から冬にかけて変位が戻る率はめくら目地間隔6～15mの範囲では一定で70%である。

(ヌ) 膨脹目地の中間付近のコンクリート版中心ははとんど動いていない。しかし膨脹目地と最初のめくら目地で囲まれたコンクリート版の中心はA型の規則的な動き方をしている。すなわち2月から8月にかけて3.7～3.9mm平均3.8mm変位するのに対し，8月から翌年2月にかけては1.2～1.7mm平均1.5mm戻る。この大きさを膨脹目地の年間変位と比べると（表-7参照）めくら目地間隔6mの場合約80%，10mの場合約60%，15mの場合約50%となっている。

(ル) 試験舗装No.7の膨脹目地から10mあるいは20m離れた点の1年間の変位も規則的でA型であるが，その動きは膨脹目地の動きよりずっと小さく，10～25%である。

(ヲ) 表-7と表-9を比べるとNo.7のコンクリート版の収縮はほとんど膨脹目地から10m以内で生じていることがわかる。この範囲内で収縮が平均に生じたとすると，収縮ひずみは$\frac{3.4+3.0-1.0}{20,000}=270\times10^{-6}$となる。この量はコンクリート供試体の年間収縮ひずみ135×10^{-6}よりかなり大きい。

〔6〕 年変化におけるコンクリート版変位と位置の関係

図-78～80は8月と1月のコンクリート版変位—位置曲線であって図-70～76から図-51～59と同じようにしてつくったものである。

これらの図から(5)で考察した結果がはっきりと認められる。また図-78および79を図-80と比べてみると，めくら目地を設けたコンクリート舗装においては隣りあっためくら目地に囲まれたコンクリート版が1枚の単位になっているのに対し，連続鉄筋コンクリート舗装においては隣りあった膨脹目地によって囲まれた長さ90mの版が1枚の単位となっていることがよくわかる。

〔7〕 年変化におけるコンクリート版変位と温度の関係

図-81～83は年変化におけるコンクリート版変位とコンクリート版表面下10cmの点の温度の関係を示すものであって図-12と図-70～76からつくった。

これらの年変化においては変位と温度の関係が大体二つの直線によって表わされることがわかる。二つの直線の交点はコンクリート版中心の最高温度45°C近辺である。

各点の内容を調べてみるとコンクリート版を施工した2月から8月にかけての温度上昇期の変位—温度関係が一つの直線で表わされ，8月から翌年2月までの温度降下期の変位—温度関係が別の一つの直線で表わされるようである。

ここでいずれの場合の直線が急なこう配をもっているかは個々の測定点によって相違することは図-70～76あるいは表-7～9に見るとおりである。

表-11は日変化の場合と同じ考え方によって年温度変化1°Cあたりの変位量（図-81～83の直線のこう配）を求めたものである。また表-12は日変化の場合と同じ方法によって年変化における摩擦こう束係数を求めたものである。

表-11と表-6を比べると1°Cあたりのコンクリート版の動き方は日変化の場合と年変化の場合と必らずしも同じでないことがわかる。極端な例は測定点1—1′西であって，日変化の場合のこう束係数は0～0.44であるのに対し年変化のそれは0.98である。しかし表-12と表-7を比べればわかるように全体としてみれば1°Cあたりのコンクリート版の変位は日変化の場合でも年変化の場合でも大体同じようである。

〔8〕 めくら目地をもつコンクリート版の変位の型

本章〔2〕—〔7〕の考察，特に図-51～56，78～79の考察を要約すると次のようである。

(イ) めくら目地をもつコンクリート版は施工後3～6カ月経過すると，ほとんどすべてのめくら目地に完全なひびわれが生じ，隣り合っためくら目地に囲まれた版が一枚の単位になってそれぞれ別の動き方をする。

したがって摩擦応力を考える場合には，めくら目地の間隔を一枚のコンクリート版の長さとして計算してよい。

表-11 年温度変化1°Cあたりのコンクリート版変位

試験舗装	測定点		A 温度変化1°Cあたりの変位(mm)		A 版中心からの距離×膨脹率	
No. 1	1 — 1′	西	− 0.002		0.04	
	1′ — (3)	東	− 0.085	− 0.020	1.89	0.45
	1′ — (6)	西	− 0.148	− 0.062	3.29	1.38
	1′ — 2		− 0.138	− 0.044		
	1′ — 外	東	− 0.230	− 0.104	0.28	0.13
No. 2′	2 — 2′	西	0.085	0.014	1.26	0.21
	2′ — (2)	東	− 0.088	− 0.024	1.30	0.36
	2′ — (4)	西	− 0.190	− 0.040	2.82	0.59
	2′ — 2		− 0.130	− 0.036		
	2′ — 外	東	− 0.204	− 0.096	0.25	0.12
No. 7	5 — 7	西	+ 0.356	+ 0.224	0.88	0.55
	7 — 1		0.050		0.16	
	7 — 5		− 0.006		0.02	
	7 — 9	東	− 0.260	− 0.168	0.64	0.42

表-12 年変化における変位こう束係数の範囲と平均値

目地	試験舗装	年変化における変位こう束係数	
		範囲	平均値
膨脹目地	No. 1 と No. 2	0.72 ～ 0.88	0.80
	No. 7	0.12 ～ 0.58	0.39
めくら目地と突合せ目地	No. 1 と No. 2	0 ～ 0.96	0.30
変位計	No. 7	0.84 ～ 0.98	0.91

(ロ) めくら目地によって区切られた各コンクリート版の各点が晴天の続いたときに13時から翌日早朝5時にかけてどのように変位するかを見ると，中心付近を不動点として両側に伸縮しているもの（イ型），一方のめくら目地付近を不動点として大体片方向にだけ伸縮しているもの（ロ型），版全体が反っているもの（ハ型）に大別される。

(ハ) めくら目地間隔が10mで膨脹目地間隔が180m のコンクリート版においては，中央部の約8枚の版は(イ)型の動き方をし，それより膨脹目地に近い6～8枚の版はロ型の動き方をしたり，(イ)型の動き方をしたりし，膨脹目地に最も近い2～4枚の版は(ロ)型の動き方をしたり(ハ)型の動き方をしたりする。

(ニ) めくら目地間隔が6mで膨脹目地間隔が180 mのコンクリート版においては，中央部の約20枚の版は(イ)型の動き方をし，それより膨脹目地に近い6～8枚の版は(ロ)型の動き方をしたり，(イ)型の動き方をしたりし，膨脹目地に最も近い約4枚の版は(ハ)型の動き方をしたり，(ロ)型の動き方をしたりする。

(ホ) めくら目地間隔が15mで膨脹目地間隔が180m のコンクリート版においては，中央部の約6枚の版は(イ)型の動き方をし，それより膨脹目地に近い約4枚の版は(ロ)型の動き方をし，膨脹目地に最も近い約2枚は(ハ)型の動き方をする。

(ヘ) めくら目地によって区切られた各コンクリート版の

各点が施工後約半年の8月から施工後約1年の2月までにどのように変位するかを見ると，日変化の場合について分類したロ型またはハ型に大別される。

(h) 年変化においてはめくら目地間隔が6m，10m，15mのいずれの場合にも膨張目地に最も近い約8枚の版はイ型の動き方をし，他はロ型の動き方をする。

(ヘ) ハ型の動き方をする場合，版全体の変位の方向は，隣りあった膨張目地に囲まれた部分を一枚の版と考えた場合の温度変化による伸縮の方向に等しい。

〔9〕 **めくら目地をもつコンクリート版の摩擦応力**

始めに温度降下によって生ずる摩擦応力を考える。

温度の日変化による摩擦応力は早朝5～7時に引張最大に達し，年変化による摩擦応力は1月中旬～下旬に引張最大に達する。

本研究ではコンクリート版の摩擦応力をまず摩擦力～変位曲線と変位～位置曲線から図解法で求めてみた。

図-84は温度の日変化による摩擦応力を求めた1例を示す。この図で(a)は図-27～29からつくった代表的な摩擦力～変位曲線である。(b)は図-54の6月1日13時から2日5時までの変位～位置曲線を示す。この例では不動点は版中心ではなく3.9mだけずれている。すなわち〔8〕の分類によれば，ロ型の動き方をしている。

図-84(a)(b)から矢印の要領で読み取って摩擦力一位置曲線(c)をつくる。版上の1点に加えられる全摩擦力は版端からその点まで摩擦力～位置曲線を積分したものであるから，不動点における摩擦力が最大である。計算例の場合，その大きさは(c)図の左下りのハッチの面積=62.4 kg となる。ただし6月1日13時の摩擦が0であることが前提である。

したがって不動点の摩擦応力度は $\frac{62.4}{20\times1}=3.1\mathrm{kg/cm^2}$ である。こうして求めた摩擦応力は摩擦係数が一定であるとすれば版厚に無関係である。

ここで計算例のようなロ型の動きをする版においては，あるいはハ型の動きをする版においては，不動点が版中心でないから，摩擦力～位置曲線は点対称とならず，左右の摩擦力が釣合っていないという奇妙な結果になっている。それは狭義の端部こう束力を分離して考えたためである。端部こう束力を併せ考えれば，すなわち広義端部こう束応力を考えれば全体としての釣合い条件は満足されるはずである。たとえば図-84の例では，(c)の不釣合い摩擦力に等しい狭義端部こう束力が圧縮力として加えられるはずである。不動点の広義端部こう束力は右下りのハッチの面積で求められる (10kg)。したがって有効引張応力度は 0.5kg/cm² である。

(a) 本章では始めに摩擦応力だけを考えることにする。そうすればコンクリート版全体が滑るハ型の動き方をする版の摩擦応力が最大であることは明らかである。

コンクリート版の設計には危険側の摩擦応力を用いるものとして日変化の場合15時ごろの応力が0，年変化の場合8月下旬の応力が0であるとする。(この仮定は8月下旬の15時ごろにコンクリート版を施工したことを意味し最も危険側の仮定となっている。実際にはこらの時刻に何程かの圧縮応力が生じているものである)。

ハ型の動き方をするコンクリート版はすでに確かめたように日変化においても年変化においても1mm以上変位しているから最大摩擦応力は(1)式で求められる。

$$\sigma=fwL \quad \cdots\cdots(1)$$

ここで

σ: コンクリート版の最大摩擦応力 (kg/cm²)

f: 滑り摩擦係数

w: コンクリートの単位体積重量 (kg/cm³)

L: コンクリート版のめくら目地間隔 (cm)

$f=1.5$, $w=0.00238\mathrm{kg/cm^3}$ とすれば

$$\sigma=0.00357L \quad \cdots\cdots(2)$$

(2)式を計算した結果は図-85(a)に示すようであって，めくら目地間隔6，10，15mに対する最大摩擦応力はそれぞれ 2.1，3.6，5.4kg/cm² である。

このようにして求めた最大摩擦応力は温度降下量と関係がないようになっているが，実際のコンクリート版は温度降下量の大小によってハ型の動きをしたり，ロ型またはイ型の動き方をしたりするものであるという意味で温度降下量と最大摩擦応力の間には関係がある。

(b) 前述の摩擦応力すなわちハ型の版の摩擦応力は摩擦応力だけについて考えれば確かに最大であるが，狭義端部こう束力を含めた広義端部こう束力を考えた場合には釣合いの式から合成引張応力は0となる。

これに対してイ型の動きをするコンクリート版の摩擦応力はそれ自体で釣合いの条件を満足しており，広義の端部こう束応力を考えても引張応力となる。

イ型のコンクリート版においてθ°Cの温度降下によって生ずる摩擦応力を次のようにして求めた。まずコンクリート版が自由に収縮した状態を考えると収縮ひずみは $\alpha\theta$ であって，応力は0である。その版をひずみ $\varepsilon(\varepsilon<\alpha\theta)$ になるまで引き伸ばしたことによって摩擦応力 (引張応力) が生じたと考える。したがって $\alpha\theta-\varepsilon$ が摩擦応力を求めるのに有効な収縮ひずみとなる。しかるに変位こう束係数は $1-\frac{\varepsilon}{\alpha\theta}$ として定義してあるから有効収縮ひずみは (変位こう束係数)×$\alpha\theta$ で求められる。

実際に行なった計算手順は次のようである。

(i) コンクリート版中心から各点までの距離にコンクリートの膨張率 $\alpha=0.000009$ と，温度降下量 $\theta=1, 3, 5, 7\cdots\cdots$°Cと変位こう束係数を掛けて，1，

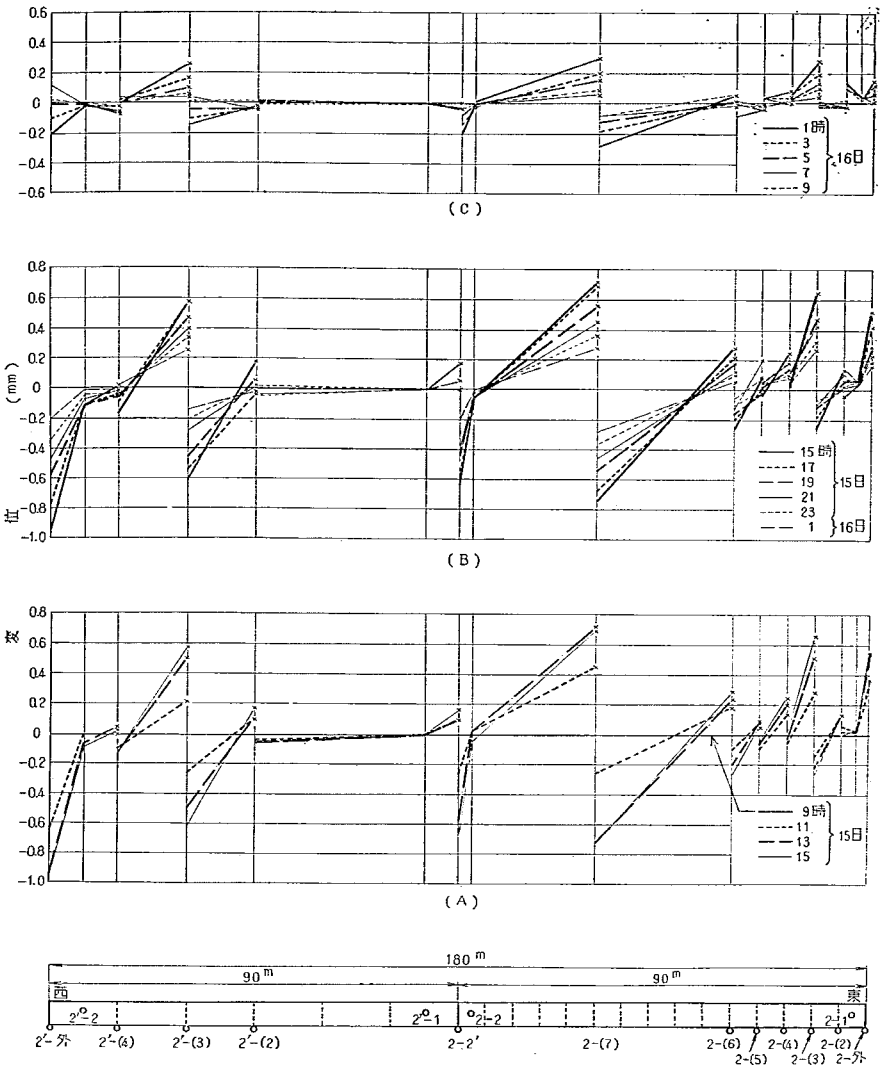


図-56 各時刻におけるコンクリート版各点の変位（試験舗装 No.2, No.2′, 35年12月）

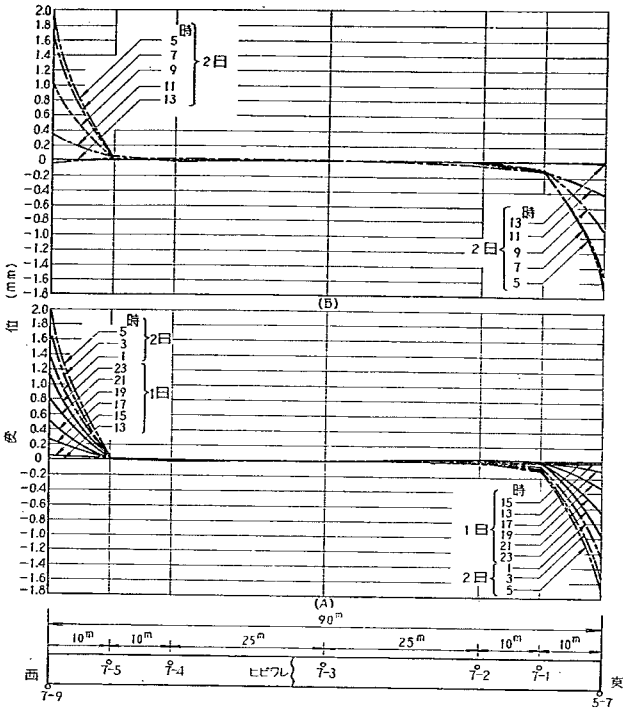


図-57　各時刻におけるコンクリート版各点の変位（試験舗装 No.7，35年6月）

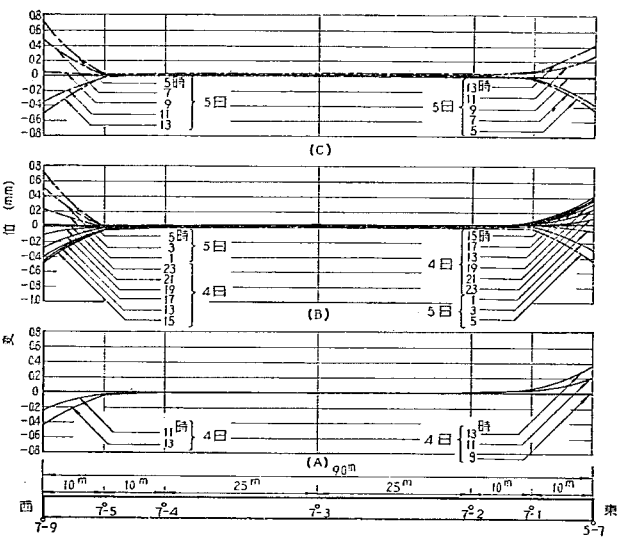


図-58　各時刻におけるコンクリート版各点の変位（試験舗装 No.7，35年8月）

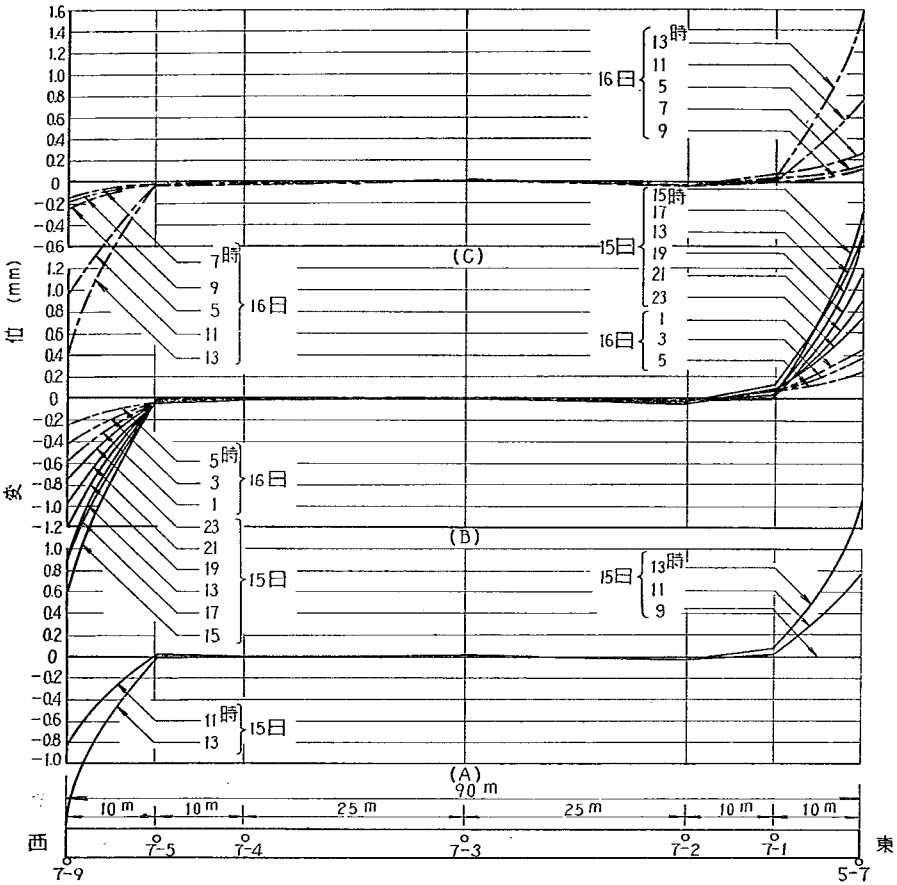


図-59 各時刻におけるコンクリート版各点の変位（試験舗装 No.7, 35年12月）

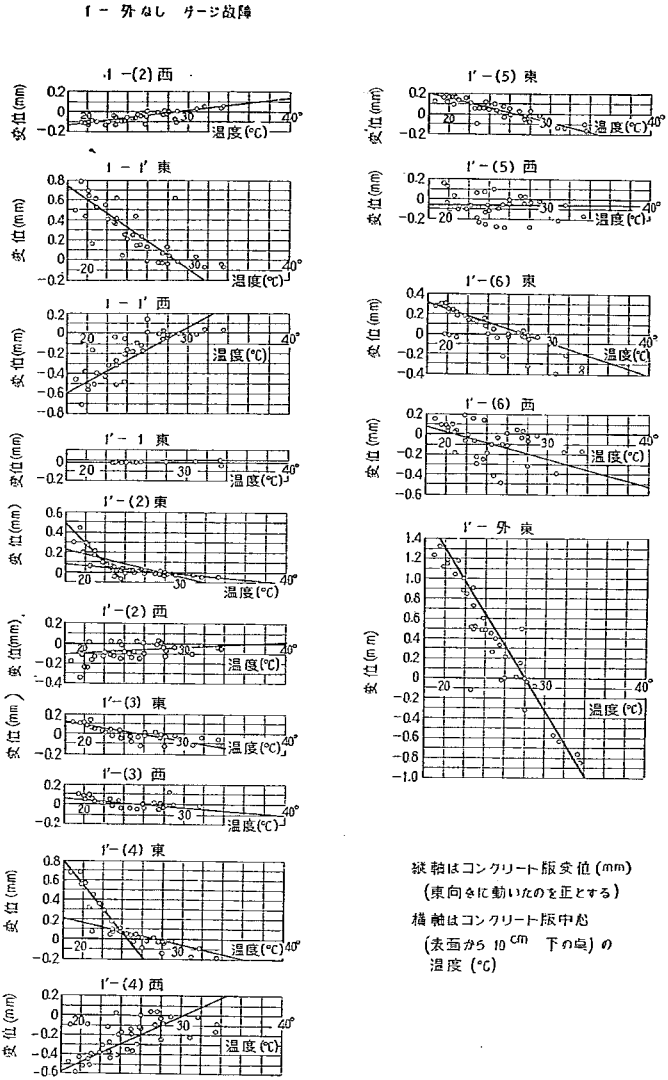


図-60 日変化におけるコンクリート版変位と温度の関係(試験舗装 No.1, 6月)

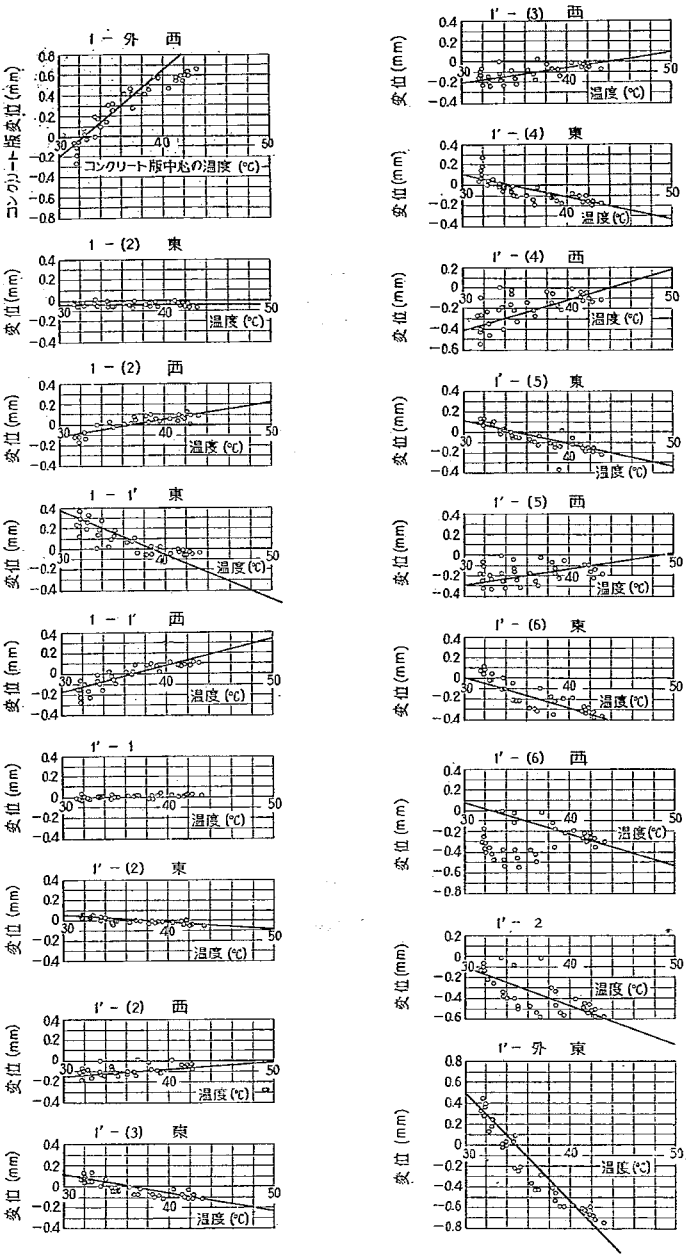


図-61 日変化におけるコンクリート版変位と温度の関係（試験舗装 No. 1, 8月）

3, 5°C……に対する変位—位置曲線をつくる。

(ii) これと変位～摩擦力曲線と組合せて1°C, 3°C……の温度降下に対する摩擦力を求め, これから摩擦応力を計算する。この摩擦応力はいわば実際最大摩擦応力である。

(iii) これとコンクリート版中心温度の日振幅度数分布を組合せれば早朝5時ごろの実際最大摩擦応力の大きさと頻度が得られる。

(iv) 同様に温度降下量33°Cに対する摩擦応力を求めれば1月下旬ごろの実際最大摩擦応力の大きさが得られるが, 年変化の場合イ型の動きをする版はほとんどないことに注意しなければならない。

図-85(b)は(i)(ii)の手続によって求めた摩擦応力をめくら目地間隔と温度降下量に対して表わしたものである。ただしこの図をつくるのに変った変位こう束係数は平均値0.3, 0.5, 0.65をとらず, 最も危険側の数値をとり, めくら目地間隔6, 10, 15mに対してそれぞれ0.70, 0.85, 0.85とした(〔4〕および〔7〕においてイ型の版のこう束係数参照, これらの数値は〔2〕で求めたこう束係数に大体一致している)

図-86はコンクリート版中心温度の日振幅の度数分布を示す。また図-87はめくら目地間隔6, 10, 15mのコンクリート版に早朝5時ごろ生ずる実際最大摩擦応力の頻度曲線を示す。

図-85～87からめくら目地をもつコンクリート版の摩擦応力は極めて小さく, 安全側に考えても日変化の場合2.0kg/cm²以下であること, めくら目地間隔が小さくなると摩擦応力は急激に減少することがわかる。

早朝5時ごろ以外の摩擦応力も同じようにして求められるが, これより小さいことはいうまでもない。

最後に含水量変化によるコンクリート版の摩擦応力を考察してみる。供試体の含水量の日変化は無視できる程小さいし, 含水量の日変化に伴なう長さ変化がほとんど0であることはすでに確かめたとおりである。また一枚の版の両端の変位置の和が温度変化による伸縮量より大きくなることのないことも確かめた。したがって含水量の日変化によるコンクリート版の摩擦応力は0であるとして充分正確である。

供試体の含水量が1年間に0.3～0.4%減少し, これが30×10^{-6}程度の収縮ひずみを起すことはすでに確かめた。他方長さ変化供試体の1年間の収縮は平均して135×10^{-6}であることも得た。これに対して実際のコンクリート版が1年間にどのくらい収縮しているかを図-70～76から読むと(後述の表-17も参考になる), めくら目地間隔6, 10, 15mに対してそれぞれ1.0, 1.1, 1.5mmである。したがって収縮ひずみはそれぞれ167×10^{-6}, 110×10^{-6}, 100×10^{-6}である。

これらを綜合して間隔6, 10, 15mのコンクリート版の1年間の収縮ひずみをそれぞれ150×10^{-6}, 110×10^{-6}, 100×10^{-6}として摩擦応力を求めてみると0.5, 1.0および1.6kg/cm²となる。

7 膨脹目地をもつコンクリート版の狭義端部こう束応力

コンクリート版の狭義端部こう束力はコンクリート版の伸縮を隣の版が妨げるこう束力であるとした。隣の版は版の膨脹を妨げようとすることはあるが, 収縮を妨げようとすることは一般にない。したがってこう束力は圧縮力であって, その結果圧縮応力だけが生ずると考えられる。本章では簡単のため負符号はつけないで考察する。

しかし実際のコンクリート版においては目地の種類の如何を問わずスリップバーを用いることが多い。このスリップバーが中心線に平行でなく施工されたり, 塗料がはげたりしたために完全に滑る状態になっていないことはあり得ることである。本研究の対象としたコンクリート版においてはすでに見たように, ほとんど大部分の目地が大きく伸縮しており, スリップバーがよく滑っていることを示しているが, それでもなお多少のこう束力をスリップバーが与えることはあり得ると思われる。しかしこの応力を分離して取り扱うことができなかったので, 本章では取り扱わず, 8章広義端部こう束応力において併せて考察することにする。

〔1〕 目地板の圧縮復元試験結果

本研究の交通試験路に用いた厚さ32mmの松目地板の水浸状態および気乾状態における圧縮復元試験結果はそれぞれ図-88および89に示すようであった。

実際に埋めこまれた目地板は地面からたえず水分を補給していると考えられるから, 図-88と89の中間の特性を示すものと考えられる。

また図-88, 89から目地板の変形量と圧縮応力の関係は第1回圧縮の場合と第2回以降の場合とで著しく相違することがわかる。実際の目地板は繰返し圧縮されているものであるから, 第2回以降の場合に近い動作をするものと考えられる。

図-88, 89から求めた大略の圧縮変形係数は表-13に示すようである。

また図-88, 89によると第1回圧縮後の復元率は飽和した状態の場合約80%であるのに対し, 気乾状態の場合約45%である。

〔2〕 目地幅伸縮の日変化

コンクリート版の目地幅の日変化は変位の場合と同じように6月, 8月, 12月に測定した。図-90～98は8月と12月の測定結果の数例を示す。また図-99はカールソン継目計による測定結果の数例を示す。

これらの図から次のようなことがわかる。

(イ) 晴天が続いた場合, コンクリート版目地幅は周期1

表-13 目地板の変形係数の大略値

	第1回	第2回以後
水で飽和した状態	変形量 2mm以下 1mmにつき 10kg/cm²	1mmにつき
	変形量 2mm以上 1mmにつき 0.8kg/cm²	1.5～3.5kg/cm²
気乾状態	変形量 2mm以下 1mmにつき 12kg/cm²	1mmにつき
	変形量 2mm以上 1mmにつき 0.6kg/cm²	4.0～10.0kg/cm²

日の規則的な変化をし，早朝5～7時ごろ最も開いた状態（コンクリート版が収縮した状態）になり，15時ごろ最も閉じた状態となる。

(ロ) 目地幅の伸縮量は版表面から 5cm 下の点（伸縮計で測定）をとっても，表面から 10cm 下の点（カールソン継目計で測定）をとっても，表面から 15cm 下の点（伸縮計で測定）ほとんど等しく，後者が僅かに小さい程度である。したがってコンクリート版は表面から底面までほとんど一様に伸縮している（そりこう束応力参照）。

(ハ) 晴天が続いた場合の目地幅の日伸縮量（全振幅）は表-14のようである。

表-14 目地幅の日伸縮量(mm)

目地の種類	目地間隔	6月		8月		12月		平均
		範囲	平均	範囲	平均	範囲	平均	
膨張目地	180m	2.2～2.9	2.6	1.0～2.1	1.7	1.0～1.6	1.3	1.8
	90m	2.8～3.7	3.3	2.2～2.6	2.4	2.2～2.8	2.5	2.8
めくら目地	6m	0.2～0.8	0.4	0.2～0.5	0.3	0.2～1.4	0.6	0.4
	10m	0.1～1.2	0.4	0.2～0.7	0.3	0.2～1.2	0.5	0.4
	15m	0.1～0.6	0.2	0.4～1.0	0.6	0.2～1.3	0.6	0.5
突合せ目地	6～15m	0.9～1.5	1.2	0.3～0.6	0.5	0.8～1.0	0.9	0.9

表-14から膨張目地幅の日伸縮量は春に大きいがばらつきはあまり大きくなく，普通コンクリート版で 1.0～2.9mm，平均1.8mm，連続鉄筋コンクリート版で2.2～3.7mm平均2.8mmであることがわかる。ここで普通コンクリート版は膨張目地間隔が180m で連続鉄筋コンクリート版の2倍であるのに目地幅の伸縮量がかえって小さいのは，めくら目地によって伸縮がかなり吸収されることによると考えられる。

めくら目地の日伸縮量はばらつきが非常に大きく 0.1mmから1.4mm にわたっているが，目地間隔にあまり関係がなく，全体としての平均が0.4mm 程度である。

間隔 180mm の中央におかれた突合せ目地の日伸縮量はコンクリート版全体が膨張している8月に小さく，それ以外の6月と12月に大きいという当然の結果を示している。日伸縮量はめくら目地より大きく，0.3～1.5mm 平均0.9mm である。

〔3〕 日変化における目地幅伸縮と温度の関係

日変化における膨張目地幅の伸縮と温度の関係は図-100～102に示すようである。

これらの図によると日変化における膨張目地幅伸縮と温度の間には明瞭な直線関係がある。

両者の関係を示す直線は目地幅が開いている12月にはこう配の大きい一つの直線で表わされるが，目地幅が閉じている8月には二つの直線で表わされ，中間の6月には二つの直線で表わされる場合と一つの直線で表わされる場合の両方がある。

これらの直線のこう配，すなわち温度変化1°Cあたりの膨張目地幅伸縮量は表-15に示すようである。

膨張率を0.000009とすると180mおよび90m の版は1°C の温度変化によってそれぞれ 1.62mm および 0.81mm伸縮するはずであるから，端部こう束力のこう束係数はそれぞれ $1-\frac{0.20\sim0.29}{1.62}=0.88\sim0.82$および $1-\frac{0.38\sim0.47}{0.81}=0.53\sim0.42$と計算される。

〔4〕 目地幅伸縮の年変化

コンクリート版目地幅伸縮の年変化を変位の年変化と

表-15 温度変化1°Cあたりの膨脹目地幅伸縮量

		6 月	8 月	12 月
膨脹目地間隔180mでめくら目地をもっている版	低温側	0.295 0.270 0.280 0.295 0.305 0.300 平均 0.29	0.225 0.300 0.240 0.265 平均 0.26	0.185 0.225 0.200 0.200 0.180 0.210 0.205 平均 0.20
	高温側	0.160 0.165 平均 0.16	0.090 0.090 0.085 0.095 0.100 0.090 平均 0.09	
膨脹目地間隔90mの連続鉄筋コンクリート版	低温側	0.480 0.430 0.490 平均 0.47	0.390 0.375 0.375 0.375 平均 0.38	0.425 0.415 0.425 0.435 平均 0.42
	高温側	0.230 0.230 0.230 平均 0.23	0.120 0.100 0.110 0.135 平均 0.12	

同じように8時30分の観測値と13時の観測値によって表わした結果は図-103～107に示すようである。

図-103～107を見ると，目地幅は夏に最も縮み翌年冬に最も開くA型（〔5〕の変位の場合のA型に相当する）とたえず開いていくC型（〔5〕の変位の場合のC型に相当）のあることがわかる。

目地幅伸縮量の大略を変位の場合と同じ記号R，F，Dを用いてまとめた結果は表-16および17のようである。

表-16 膨脹目地幅伸縮の年変化

測定点	年変化の型	R		F		D
		大きさ(mm)	時期	大きさ(mm)	時期	(mm)
1 — 外	A	10.9	9月上旬	7.5	1月中旬	3.4
1′ — 外	A	10.7	8月上旬	7.2	1月中旬	3.5
2 — 外	A	8.2	8月上旬	6.4	1月上旬	1.8
2′ — 外	A	11.8	8月中旬	7.3	1月中旬	4.5
5 — 7	A	8.9	8月中旬	13.9	1月上旬	− 5.0
7 — 9	A	10.6	8月下旬	11.6	1月下旬	− 1.0

表-16と17から次のようなことがわかる。

(イ) 膨脹目地幅はどの試験舗装においても施工した冬から最初の夏にかけて8～12mm縮んでいる。すなわちコンクリート版は全体として8～12mm膨脹している。

(ロ) めくら目地をもつ試験舗装No.1および2においては，最初の夏から次の冬にかけて膨脹目地幅が開いていくが，その量は始めの縮み量より2～4mm小さい。すなわちコンクリート版は施工後1年間に全体として2～4mm膨脹したかのようになっている。

(ハ) 連続鉄筋コンクリート版においては最初の夏から翌年冬にかけて膨脹目地幅が十分に開いていき，その量は最初の縮み量より1～5mm大きい。すなわちコンクリート版は打ちこまれた時から1年間に全体として1～5mm収縮したかのようになっている。

(ニ) めくら目地幅の年変化は個々の差が甚だしく大きいが，最初の冬から夏にかけての縮み量はほとんど1mm以下であるのに対し，最初の夏から翌年冬にかけての開き量は2～3mmに達することが少なくない。すなわち個々のコンクリート版は1～2mm収縮している。

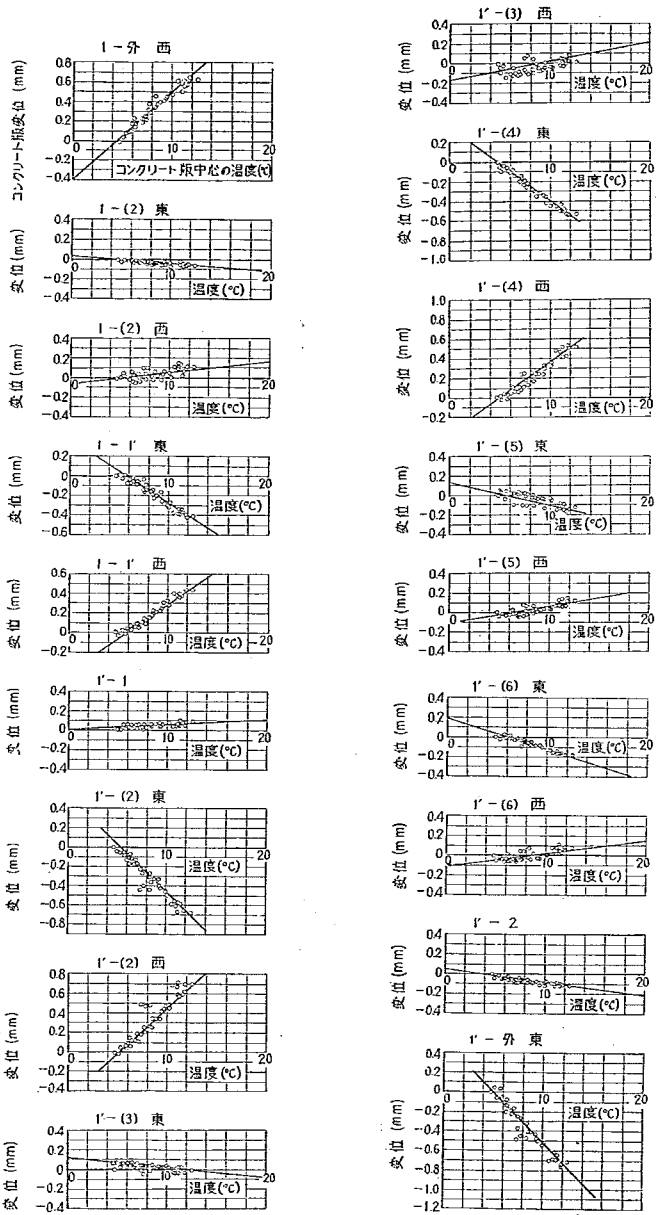


図-62 日変化におけるコンクリート版変位と温度の関係（試験舗装 No. 1, 12月）

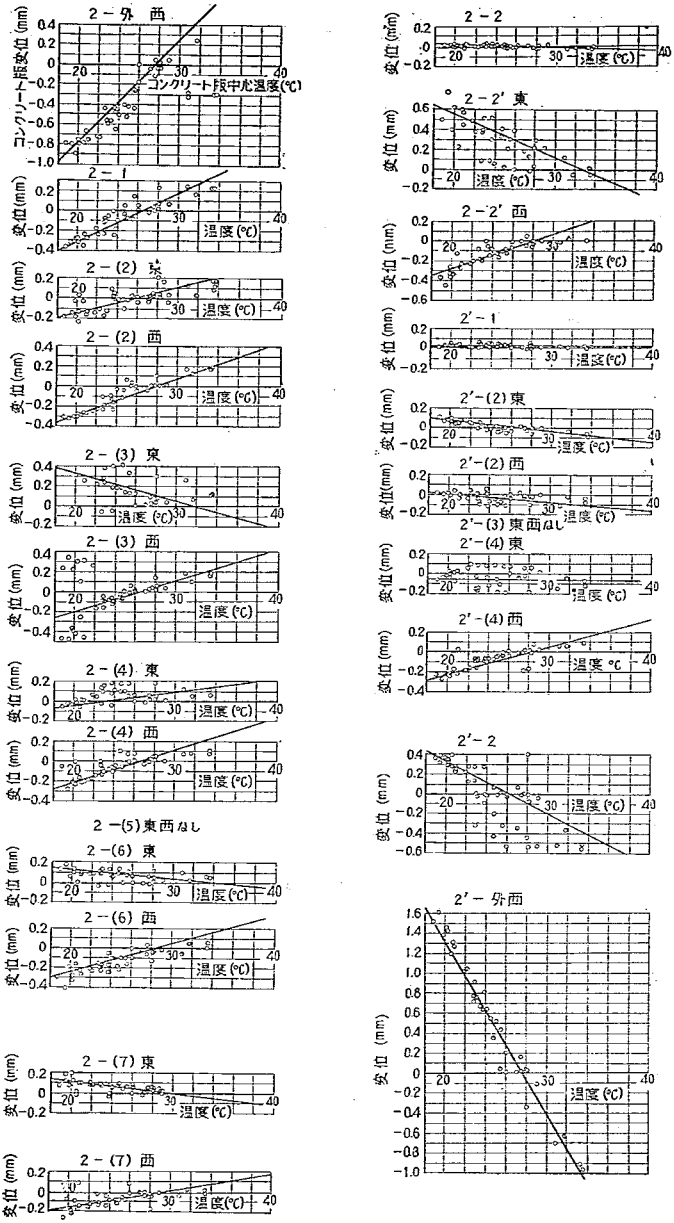


図-63 日変化におけるコンクリート版変位と温度の関係（試験舗装 No. 2, 6月）

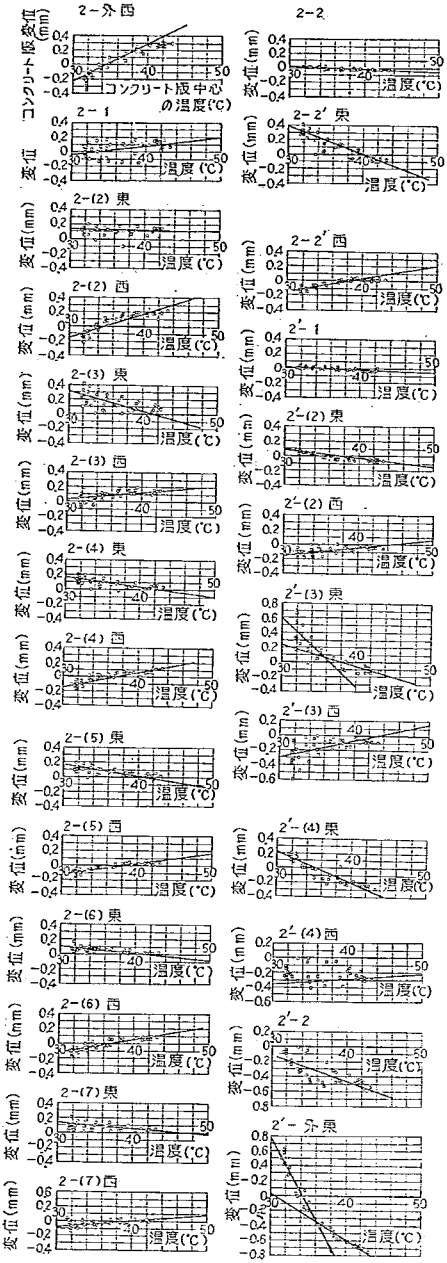


図-64　日変化におけるコンクリート版変位と温度の関係（試験舗装 No. 2，8月）

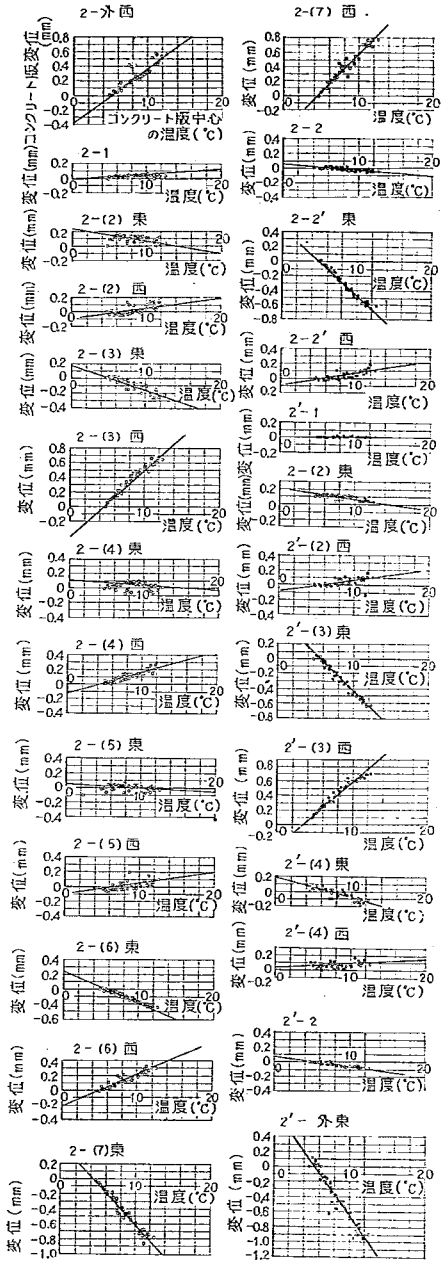


図-65　日変化におけるコンクリート版変位と温度の関係（試験舗装 No. 2，12月）

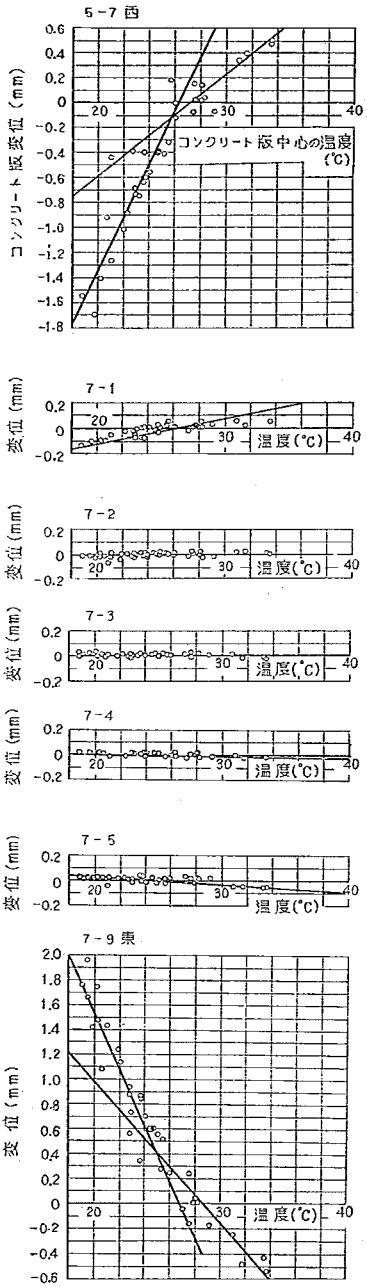


図-66　日変化におけるコンクリート版変位と温度の関係（試験舗装 No.7, 6月）

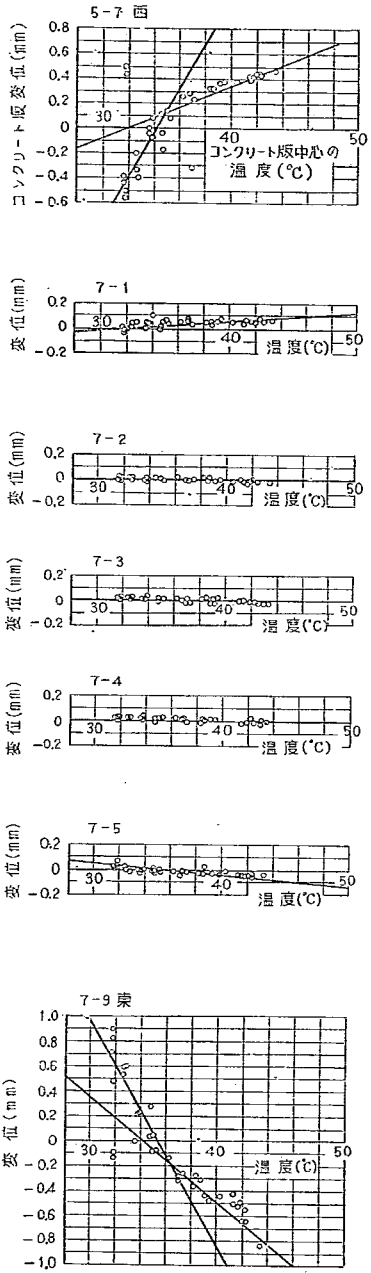


図-67　日変化におけるコンクリート版変位と温度の関係（試験舗装 No.7, 8月）

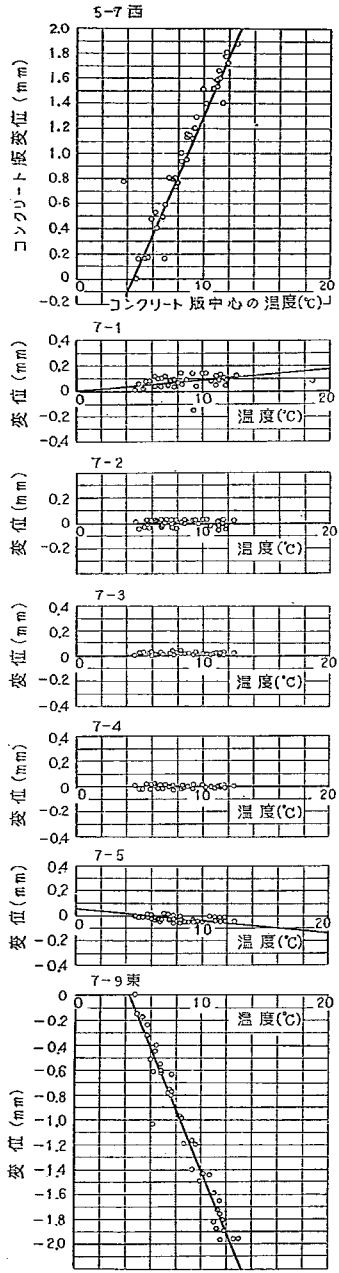


図-68　日変化におけるコンクリート版変位と温度の関係（試験舗装 No. 7, 12月）

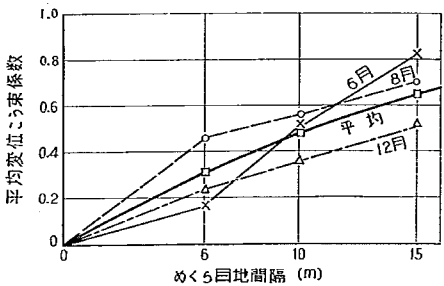


図-69　めくら目地間隔と変位こう束係数の関係

注　図-70は 66 頁にあります。

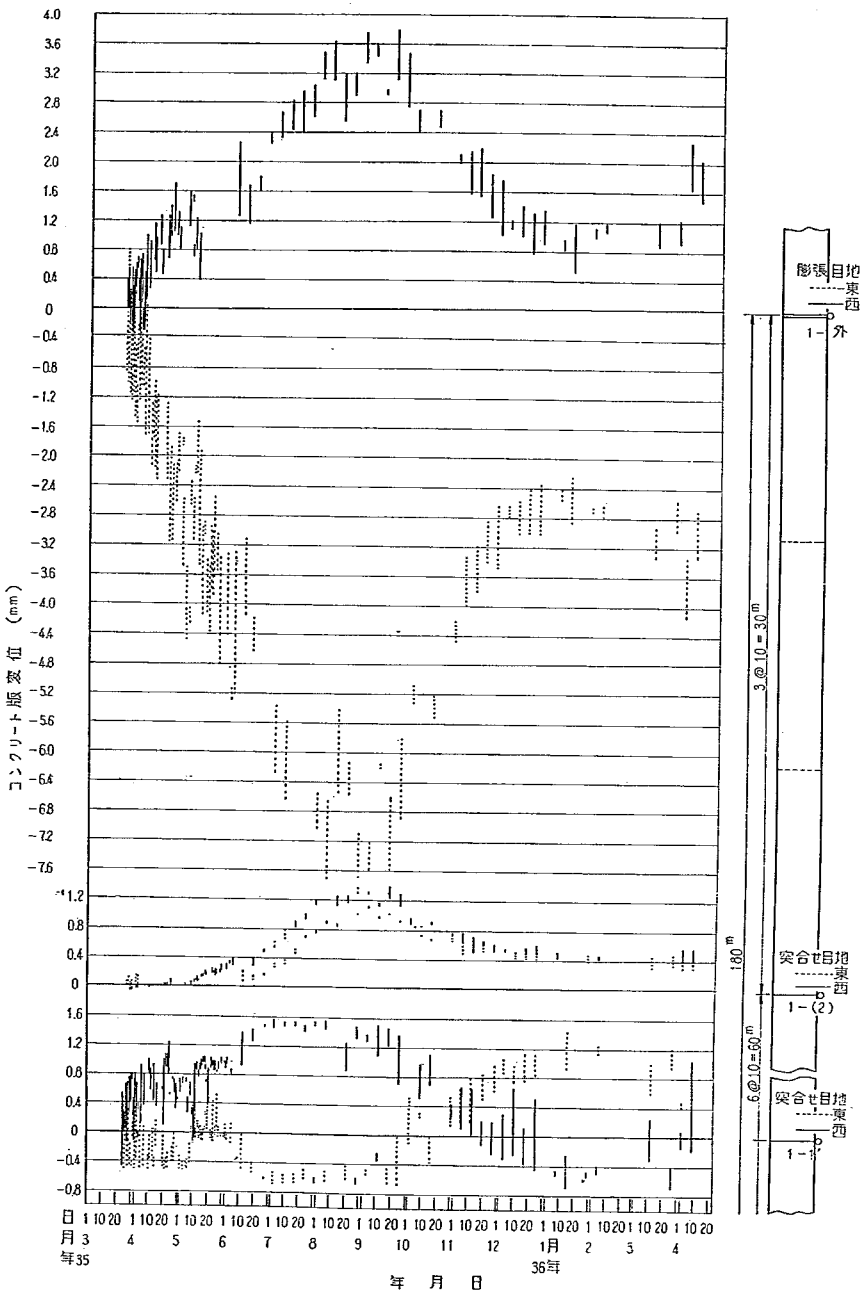


図-71　コンクリート版変位の年変化（試験舗装 No. 1）

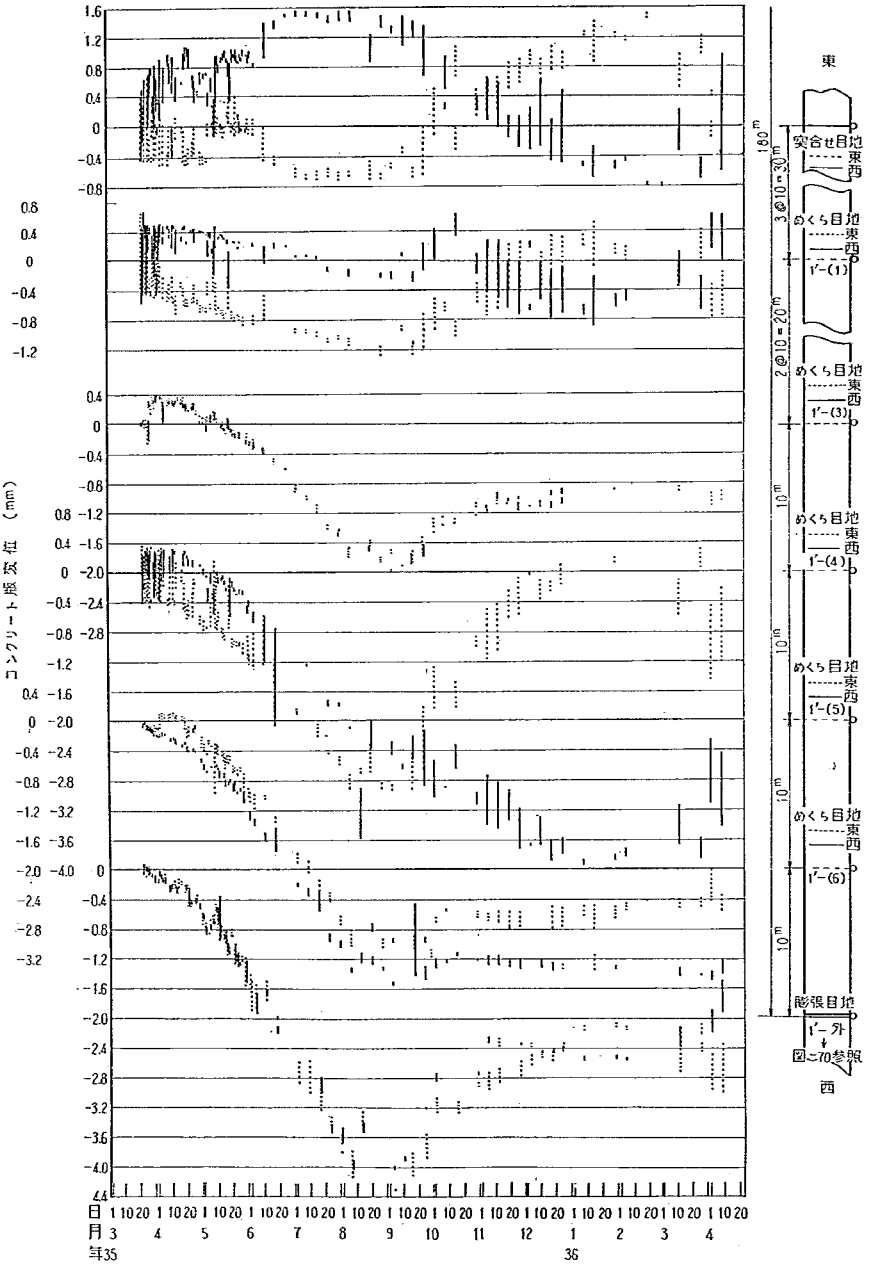


図-72　コンクリート版変位の年変化（試験舗装 No. 1）

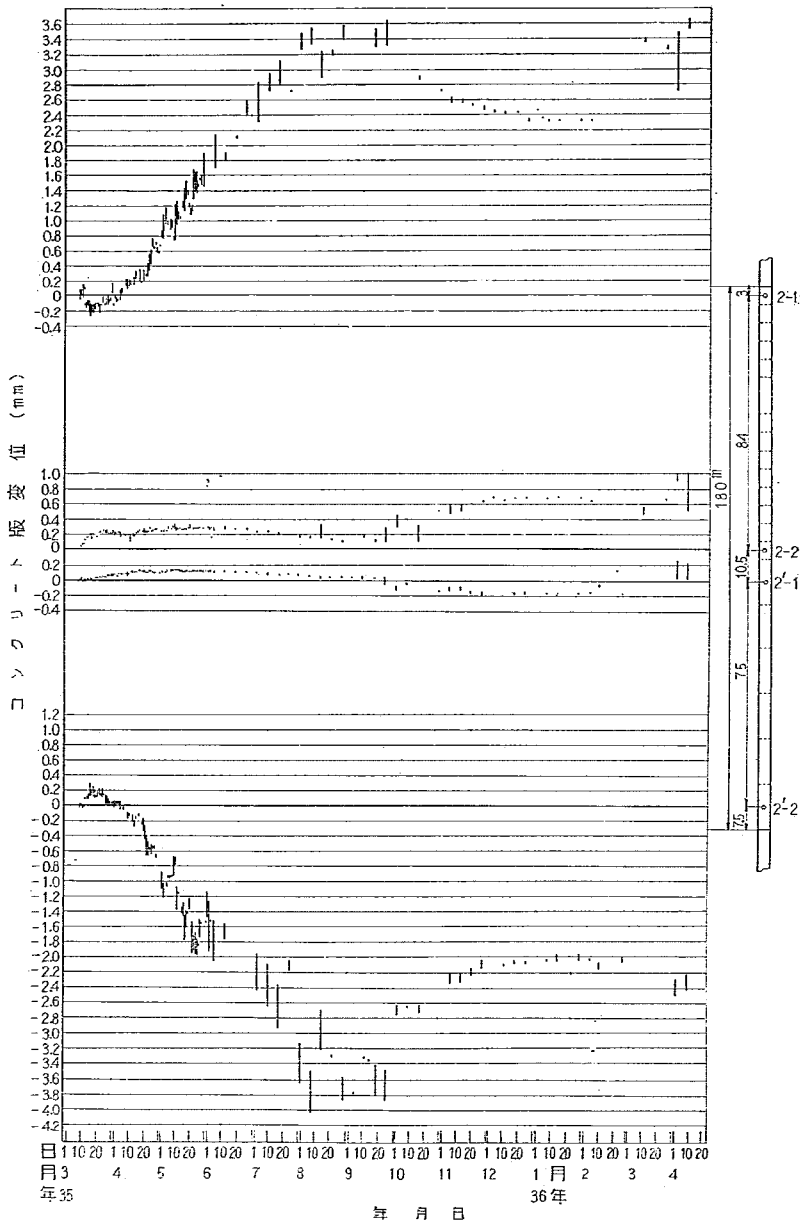


図-73　コンクリート版変位の年変化（試験舗装 No. 2）

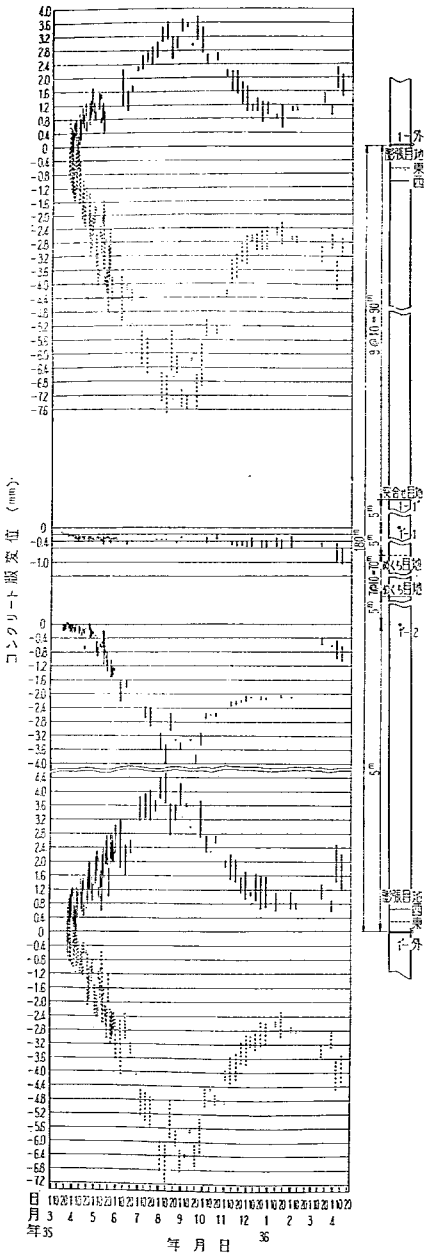


図-70　コンクリート版変位の年変化
（試験舗装 No. 1）

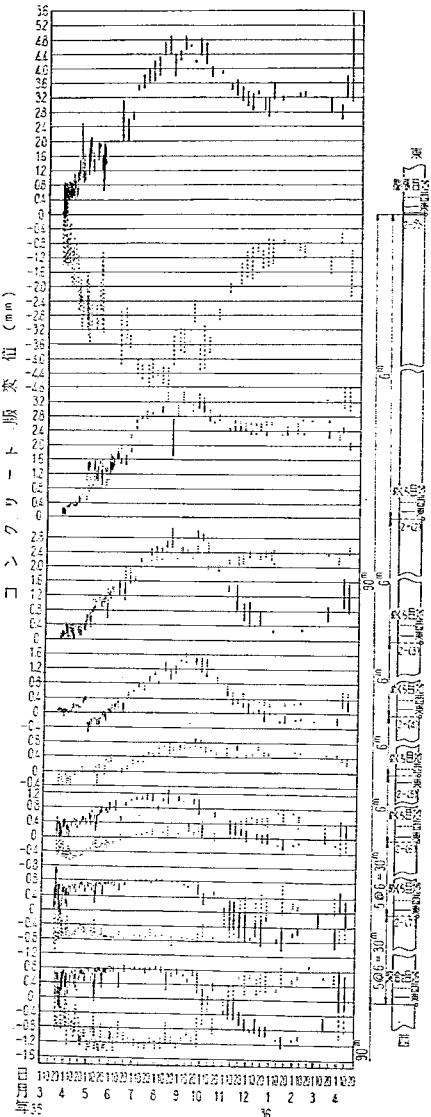


図-74　コンクリート版変位の年変化
（試験舗装 No. 2）

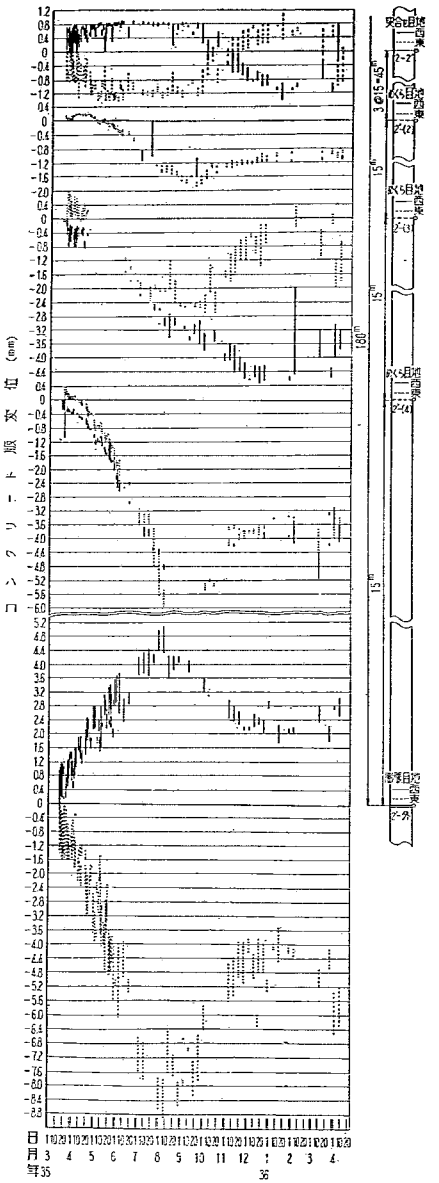


図-75　コンクリート版変位の年変化
（試験舗装 No. 2）

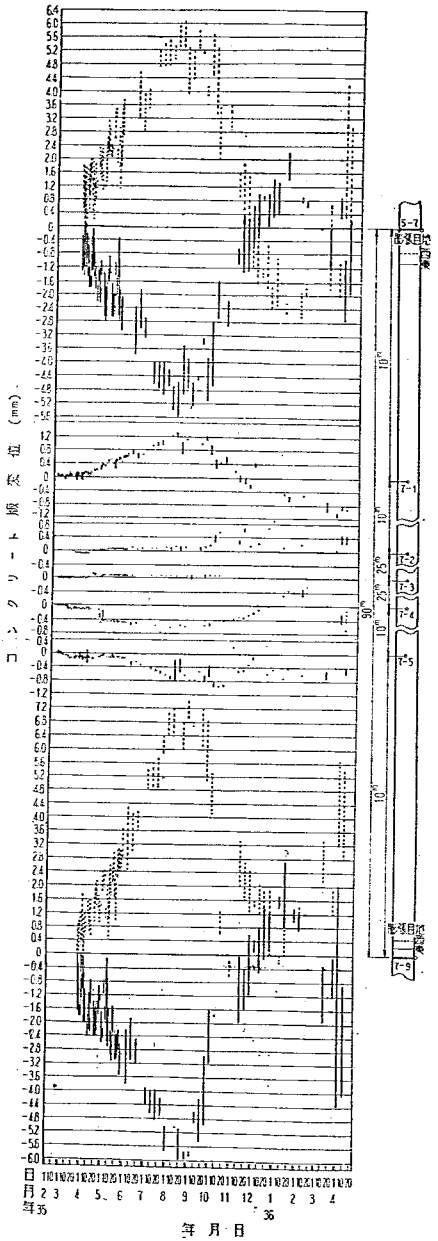


図-76　コンクリート版変位の年変化
（試験舗装 No. 7）

表-17　めくら目地幅および突合せ目地幅伸縮の年変化

測定点	年変化の型	R(mm)	F(mm)	D(mm)
1 — (2)	A	0.4	0.5	− 0.1
1 — 1′	A	2.2	4.0	− 1.8
1′ — (2)	A	1.0	1.9	− 0.9
1′ — (3)	A	0.1	0.2	− 0.1
1′ — (4)	A	0.7	4.5	− 3.8
1′ — (5)	C	—	− 0.7	− 0.7
1′ — (6)	A	0.5	0.9	− 0.4
2 — (2)	C	—	− 0.3	− 0.3
2 — (3)	A	0.2	2.4	− 2.2
2 — (4)	C	—	− 0.5	− 0.5
2 — (5)	—	—	—	—
2 — (6)	A	0.5	1.8	− 1.3
2 — (7)	A	0.5	3.1	− 2.6
2 — 2′	A	1.3	3.8	− 2.5
2′ — (2)	A	0.2	0.4	− 0.2
2′ — (3)	A	0.3	4.3	− 4.0
2′ — (4)	A	0.9	1.2	− 0.3

〔5〕 年変化における膨脹目地幅伸縮と温度の関係

図-108～110は年変化における膨脹目地幅伸縮とコンクリート版表面から10cm下の点の温度の関係を示すもので，図-12と図-103～107からつくった。

これらの図から年変化における膨脹目地幅と温度の関係は，変位の場合と同じように二つまたは一つの直線で表わされること，二つの直線で表わされる場合にはその交点が45°C付近であることがわかる。すなわちゆるやかなこう配をもつ直線は温度上昇期の関係を表わし，急なこう配の直線は温度降下期の関係を表わすものと見られる。

図-108～110の直線のこう配，すなわち温度変化1°Cあたりの目地幅伸縮量を求めてみると日変化の場合と同じオーダーであることがわかる。年変化における狭義端部こう束係数はめくら目地をもつコンクリート版の場合 $1-\frac{0.25\sim0.48}{1.62}=0.85\sim0.70$，連続鉄筋コンクリート版の場合 $1-\frac{0.405\sim0.455}{0.81}=0.50\sim0.44$ である。

〔6〕 めくら目地をもつコンクリート版の狭義端部こう束応力

めくら目地をもつコンクリート版の端部こう束応力は日変化の場合15時ごろに，年変化の場合8月中下旬に圧縮最大となる。

ここで仮りに日変化の場合早朝5～7時の応力が0，年変化の場合1月中下旬の応力が0であるという極端な場合を仮定してコンクリート版の端部こう束応力を次の二つの方法で求めてみる。

(a)　膨脹目地幅の伸縮量と，目地板の応力～変形曲線を用いて端部こう束応力を推定する方法。

(b)　温度変化から計算した端部こう束応力に実験的に求めたこう束係数を掛けて端部こう束応力を推定する方法。

まず日変化の場合について計算してみると次のようである。

(i)　コンクリート版が施工されて始めの頃は図-88の第1回載荷における応力—変形関係が大体成立つと考えられるから，表-14の日最大伸縮量1.3～2.6mm平均1.8mmに対して14～20kg/cm²，平均18kg/cm²程度の圧縮応力が生ずる。

(ii)　しかし何回も伸縮を繰返した後では図-88または89の2回以後の応力—変形関係が大体成立つと考えられるから表-13と表-14を組合せて (3.5～4)×(1.3～2.6)=5～13kg/cm² 程度の圧縮応力が生ずる。

(iii)　6月，8月および12月の温度の日振幅（全振幅）は7～10°Cであるから縦方向に完全にこう束されていて横方向には完全に自由なコンクリート版の端部こう束応力は (7～10)×0.000009×310,000=20～28kg/cm² である。これに〔3〕で求めたこう束係数0.88～

0.82を掛けると 16～25kg/cm² となる。

以上の計算によれば，端部こう束応力は(b)の方法による方がいくぶん大きい結果を与えるが，大きい場合には20kg/cm² 前後の圧縮応力の生ずることがわかる。

年変化の場合についても同様な計算を行なうと次のようである。

（i） コンクリート版の膨脹目地幅が1年間に8～12mm縮んだ場合の応力を図-88ないし89から読むと30～35kg/cm² である。

（ii） コンクリート版中心温度の年振幅（全振幅）は約30° であるから，縦方向だけが完全にこう束されている場合の端部こう束応力は 30×0.000009×310,000≒84 kg/cm² これに〔5〕で求めたこう束係数 0.84～0.70 を掛けると，59～70kg/cm² となる。

年変化の場合は(b)の方法で求めた端部こう束応力はかなり過大な結果を与える。その理由はおそらく中間にあるめくら目地の存在を無視してこう束係数を求めたことにあると考えられる。実際目地板が圧されて圧縮応力が加えられた場合に，めくら目地幅がいつも一定値になるまで縮んだ後に始めて先述の方法でこう束係数を求めることが正しくなるのである。

以上はコンクートが厳寒期の早朝ないし夕方に施工された場合の応力があって，実際にどのくらいの端部こう束応力が生ずるかは主として施工温度によってきまる。いずれにせよ8月中旬の13時ごろに施工されたもの以外についてはかなりの大きい端部こう束応力が期待できることは明らかである。しかし摩擦応力が引張最大となる厳寒期には端部こう束応力は0となることに注意しなければならない。

8 コンクリート版の広義端部こう束応力

コンクリート版の広義端部こう束応力は，含水量変化その他の影響を無視すれば，コンクリート版は自由伸縮量と実際伸縮量の差から求められる。この場合こう束が何であるかを考える必要は全くない。

したがって広義端部こう束係数を $\frac{\text{版の自由伸縮量}-\text{版の実際伸縮量}}{\text{版の自由伸縮量}}$ で求め，これに理論端部こう束応力を掛ければ広義端部こう束応力が得られる。

〔1〕 めくら目地と膨脹目地をもつコンクリート版の広義端部こう束応力

広義端部こう束係数は表-6 および表-11 から一枚の版の両端が1°Cの温度変化によって何程変位しているかを読めば，直ちに計算することができる。表-18 はその結果をまとめたものである。ただし設計のためには温度降下によって生ずる引張応力だけが問題となるので，変位と温度の関係が2つの直線で表わされる場合には温度降下中の関係だけを採用した。以下同様とする。

表-18 コンクリート版の広義端部こう束係数

試験舗装	No.	日変化における広義端部こう束係数						年変化における広義端部こう束係数	
		6	月	8	月	12	月		
No. 1	15	0.84	0.42	0.16	0.42	0	0.09	0	0.02
	16	0.21		0.41		0		0	
	17	0.64		0.50		0.35		0	
	18	0		0.17		0		0.09	
No. 2	1	0	0.23	0	0.30	0	0.10	0	0
	2	0		0		0.09		0	
	3	0.70		0.61		0		0	
	4	—		0.33		0.39		0	
	5	—		0.56		0		0	
No. 3	19	—	?	0.71	0.58	0.17	0.10	0	0
	20	—		0.52		0.14		0	
	21	0		0.50		0		0	

表-18 によれば日変化における広義端部こう束係数は6月と8月ではほぼ同じく，めくら目地間隔 6，10，15m に対してそれぞれ 0.2，0.4，0.6 くらいである。しかし12月広義端部こう束係数は極めて小さく，めくら目地間隔の如何に拘らず0.10くらいである。

すでに度々のべてきたように6月，8月の夏季には狭義端部こう束力が加わるために広義端部こう束係数が大きくなっているが，この時にはかなり大きい圧縮応力が生じている（前章参照）から，設計の目的に対しては12月のこう束係数を用いるべきであると考えられる。12月の広義端部こう束係数は平均値が0.10であるが，設計のためには0.15としておけば大体安全である。

広義端部こう束係数を0.15とし理論広義端部こう束応力を一次元こう束であるとすれば，広義端部こう束応力は(3)式で与えられる。

$$\sigma = 0.15 \alpha E \theta \quad \cdots\cdots (3)$$

ここで σ： 広義端部こう束応力 (kg/cm²)

α： コンクリートの膨脹係数 $=0.000009°C^{-1}$

E: コンクリートのヤング率
$=310,000 kg/cm^2$
θ: 温度降下量（°C）

昼15時ごろの応力が0であるとして早朝5時ごろの最大広義端部こう束応力の大きさと頻度を(3)式と図-86から求めた結果は図-111(a)に示すとおりである。

表-18によれば年変化における広義端部こう束係数は極めて小さく，ほとんど0である。実際この計算をしてみると，年変化における広義端部こう束係数はほとんどマイナスの数値で得られるのであって，表-18にはそれを0と表現したにすぎない。その理由は温度変化だけを考えてこう束係数を求めたためであって，年変化においては含水量変化その他による大きい変形を無視できないことがわかる。前章でも隣り合つためくら目地によつて囲まれた一枚のコンクリート版は1年間に1～2mm収縮していることが確かめられた。

結論として温度の年変化による広義端部こう束応力はほとんど0であって，含水量の年変化による広義端部こう束応力だけ考えればよいといえる。後者の応力はすでに6，〔9〕で求めたとおりである。

〔2〕 連続鉄筋コンクリート版の端部こう束応力

膨脹目地間隔90mでめくら目地のない連続鉄筋コンクリート版においては，日変化の場合中央部約60mがほぼ完全にこう束されており（図-57～59年変化の場合中央部約40mがほぼ完全にこう束されている（図-80)。

本来の連続鉄筋コンクリートは無限に長いものとしてよいから大部分が完全こう束の状態にあると考えられる。したがって中央部に対しては完全こう束の場合の広義端部こう束応力だけ考えればよい。

$$\sigma=\alpha E\theta=0.000009\times310,000\times\theta=2.79\theta \cdots\cdots(4)$$

(4)式を図示したものが図-111(b)である。

連続鉄筋コンクリート版の端部こう束応力は非常に大きい。

ただしθは考えている時の温度と，施工した時の温度の差であるから，夏季施工の場合以外はかなり小さくとることができる。

なお7，〔6〕と同じようにしてまた同じ仮定によって連続鉄筋コンクリート版の膨脹目地端に生ずる実際最大圧縮応力を求めると次のようである。

日変化の場合
(a)法　当初　20kg/cm² くらい
　　将来　8～13kg/cm²
(b)法　8～15kg/cm²
年変化の場合
(a)法　30～45kg/cm²
(b)法　37～42kg/cm²

連続鉄筋コンクリート版はめくら目地がなく，一体の版となっているため(a)，(b)両方法は比較的よく一致した結果を与えていると考えられる。

9　コンクリート版のそりこう束応力

〔1〕 見掛け上のそりの日変化

コンクリート版各点のそり（上下方向の変位量）の真値を求めることは第2章でのべたように不可能であったが，同章〔6〕でのべた方法によって測定した見掛上のそりの測定結果の数例は図-112～115に示すようであった。

これらの図によると見掛け上のそりは夜間はほぼ一定値で上向きであるのに対し昼間は下向きのそりとなって正弦的な変化をし，13時ごろ下向き最大となっている。しかしそりの真値はむしろこれを正負逆の関係にあると想像される。

〔2〕 見掛上のそりと位置の関係

めくら目地間隔6，10，15mのコンクリート版および膨脹目地間隔90mの連続鉄筋コンクリート版の見掛上のそりと位置の関係は図-116～119に示すようであった。

これらの図でそりの測定値は，8月と12月の場合は前日の9時を0としてとっているのに対し，6月においては前日の13時を0としている。いずれにせよコンクリート版が9時にそっていない水平な状態であると仮定すれば，問題としている時刻のそり～位置曲線からその日の9時のそり～位置の曲線を引いたものが，真のそり～位置曲線であると考えられる。

このような操作をすれば，すべてのコンクリート版が13時ごろ上向きに凸型に最も大きくそり，早朝5時ごろ凹型に最も大きくそっていることが認められる。なおこのようにして求めたそり位置曲線は必らずしも円弧にはなっていない。

〔3〕 カールソンひずみ計によって測定したコンクリート版上下両面のひずみの日変化

めくら目地間隔5mのコンクリート版縁部中央において，表面および底面から2cmの位置に埋めこんだカールソンひずみ計を2時間ごとに72時間読み取った結果を計器の温度補正だけ行なって整理したものの一例は図-120のようであつた。この図の縦軸はしたがって温度変化その他の原因による一切のコンクリート版ひずみを表わしている。

図-120からコンクリート版は日中膨脹し，夜間収縮するという温度変化にほぼ対応する伸縮をしていること，日中コンクリート版底面側のひずみは表面側のひずみよりいくぶん小さく，版は上向きに凸にそっていること，コンクリート版底面側のひずみの位相は表面側のそれとほとんど等しく，底面温度と表面温度の位相差ほど大きい差はないことなどがわかる。

〔4〕 コンクリート版のそりこう束応力

コンクリート版が完全にこう束されている場合のそりこう束応力の大きさと頻度については本研究の第1報で

すでに報告した。

本報告においては実際のそりこう束応力を求めるためのそりこう束係数を次の二つの方法によって推定した。

(a) コンクリート版上下両面の温度差からコンクリートの膨脹率を使って計算で求めたそり一位置曲線と，実測そり一位置曲線を比較してそりこう束係数を求める方法

(b) コンクリート版上下両面の温度差からコンクリートの膨脹率を使って計算で求めたそり一位置曲線と，カールソンひずみ計によって測定したコンクリート版上下両面のひずみの差から計算で求めたそり一位置曲線を比較してそりこう束係数を求める方法

コンクリート版上下両面の温度差からそり一位置曲線を求めるには上下両面の温度が等しくなった時を基準として計算すべきであるが，便宜上それを9時とした。比で表わされるこう束係数を求める目的に対してはこれで十分であると考えられる。

図-121で目地間隔を L(cm) 版厚を h(cm) 版表面温度と9時における版表面温度の差を θ_1(°C)，版底面温度と9時における版底面温度の差を θ_2(°C)，自由にそった場合の半径を R(cm)，版中央のそりを $\triangle R$(cm) とすれば次の三つの式が成立つ。

$$\frac{R-h}{R}=\frac{\frac{L}{2}\quad(1+0.000009\,\theta_2)}{\frac{L}{2}\quad(1+0.000009\,\theta_1)} \qquad \cdots\cdots(5)$$

$$\cos\alpha=-\frac{h}{\sqrt{h^2+0.000009^2\cdot\left(\frac{L}{2}\right)^2\cdot(\theta_1-\theta_2)^2}} \qquad \cdots(6)$$

$$\triangle K=R-R\cos\alpha \qquad \cdots\cdots(7)$$

これを解くと

$$\triangle K=\frac{1+0.000009\,\theta_1}{0.000009(\theta_1-\theta_2)}\times\left(1-\frac{1}{\sqrt{1+2.025\times10^{-11}\times\left(\frac{L}{h}\right)^2\times(\theta_1-\theta_2)^2}}\right)h \qquad \cdots\cdots(8)$$

他方 $\triangle R$ の実測値は図-116～119から直接読み取ることができる。両者の比から求めたそりこう束係数は表-19のようであった。

表-19 完全に自由な版のそり計算値と実測そり量の比から求めたそりこう束係数

目地間隔 / 日時	6 m			10m			15m			90m		
	△R(cm) 計算値	△R(cm) 実測量	そりこう束係数	△R(cm) 計算値	△R(cm) 実測値	そりこう束係数	△R(cm) 計算値	△R(cm) 実測値	そりこう束係数	△R(cm) 計算値	△R(cm) 実測値	そりこう束係数
6/2 1時	−0.064	−0.0288	0.55	−0.194	−0.048	0.75	−0.457	−0.010	0.98	− 17.4	−0.036	1.00
5	−0.084	−0.0438	0.48	−0.254	−0.057	0.78	−0.596	−0.004	0.99	− 22.9	−0.040	1.00
13	+0.117	0.0065	0.94	+0.353	0.028	0.92	+0.830	0.032	0.96	+ 32.0	0.008	1.00
8/6 1時	−0.140	−0.0123	0.91	−0.420	−0.006	0.99	−0.988	−0.019	0.98	− 38.2	−0.038	1.00
5	−0.134	−0.0325	0.76	−0.407	−0.020	0.95	−0.956	−0.032	0.97	− 36.8	−0.039	1.00
13	+0.070	0.0040	0.94	+0.213	0	1.00	+0.500	+0.003	0.98	+ 19.3	0	1.00
12/16 1時	−0.009	−0.0110	0	−0.023	0	1.00	−0.058	−0.012	0.79	− 2.3	−0.015	1.00
5	−0.024	−0.0144	0.40	−0.075	−0.002	0.97	−0.176	−0.013	0.93	− 6.8	−0.018	1.00
13	+0.111	0.0175	0.84	+0.338	0.006	0.98	+0.793	0.019	0.98	+ 30.5	0.035	1.00
1時と5時の平均	—	—	0.52	—	—	0.91	—	—	0.94	—	—	1.00
13時の平均	—	—	0.91	—	—	0.97	—	—	0.97	—	—	1.00

表-19を見ると1時および5時のそりこう束係数，すなわち負の温度こう配におけるそりこう束係数と13時のそりこう束係数すなわち正の温度こう配におけるそりこう束係数は互に相違していることがわかる。したがって平均値は別々に求めた。

図-122はそりこう束係数とコンクリート版の目地間隔の関係を表わしたものである。

図-122を見ると正の温度こう配におけるそりこう束係数は負の温度こう配におけるものより大きいこと，めくら目地間隔が大きくなる程そりこう束係数は大きくなることなどがわかる。

正の温度こう配におけるそりこう束係数はかなり大きく，めくら目地間隔が6mの場合でも0.91くらい，10m以上では0.97くらいであって，非常に強くこう束されていることがわかる。

負の温度こう配におけるそりこう束係数は，めくら目地間隔が6mの場合はおよそ0.5であってそれ程強くこう束されてはいないが，10m以上になると0.9以上であってやはり強くこう束されていることがわかる。

次にコンクリート版上下両面のひずみから版中央部のそりを図-121の関係を使い(9)式によって求めてみる。すなわちコンクリート版表面のひずみを ε_1，底面のひずみ

を ε_2 とすれば

$$\triangle R=\frac{1+\varepsilon_1}{\varepsilon_1-\varepsilon_2}\left(1-\frac{1}{\sqrt{1+0.25\left(\frac{L}{h}\right)^2\times(\varepsilon_1-\varepsilon_2)^2}}\right)h \quad \cdots\cdots(9)$$

コンクリート版上下両面のひずみは図-120のようにめくら目地間隔 5 m のものについてしか得られていないが，この数値を仮りに使って計算すると，12月16日13時における版中央部のそり $\triangle R$ は約0.021cm となる。$\triangle R$ の計算値は 0.111cm であるからそりこう束係数は $1-\frac{0.021}{0.111}=0.81$ であって第1の方法で求めた 0.84 と大差ない。

したがって第1の方法でそりこう束係数を求めることはかなり高い信頼度をもっていることがわかる。

なお，載荷試験によって，そりこう束応力を求める方法については，第3報で報告する。そりこう束応力についての一般的な検討は，第3報を参照されたい。

10 ひびわれの観測

めくら目地をもつ試験舗装No.1およびNo.2においては施工後満二年に達するまで全くひびわれを生じなかった

この間交通試験路に加えられた交通荷重はほとんどすべて軽量のものばかりであって，4 t 以上のトラックが走行したことは20回以下であった。他方本研究でこれまで考察してきたように，温度応力や含水量変化による応力がコンクリートの曲げ強さの 1/2 以上に達することはほとんどない。

したがってめくら目地間隔が 6 ～15mのコンクリート版においては，温度応力，含水量変化による応力など輪荷重以外の応力だけでひびわれがはいることはほとんどないと結論できる。ただしコンクリートの強度が十分大きくなってない施工直後に発生するひびわれについては別である。

連続鉄筋コンクリートにおいては施工後 9 日にひびわれが 1 本生じた。このひびわれの幅は 6 月には 0.1mm で日変化をほとんど起さなかったが，施工一年後には約 2 mmの幅まで開いた。この詳細については別に報告する。

11 結　　論

(1) コンクリート版と路盤の間の摩擦力は相対変位量が増大するにしたがって増大するが，変位量がおよそ 1 mmに達するとほぼ一定になる。この関係は何回くり返してもほぼ同様で再現性が強い。

(2) 最大摩擦力をコンクリート版の重量で割って求めた滑り摩擦係数は，コンクリート版の厚さにほとんど関係せず，本研究に用いた路盤においては1.5～1.6である。

(3) 膨張目地間隔 180m，めくら目地間隔 6 ～15mのコンクリート版においては施工後半年以内にほとんどすべてのめくら目地にひびわれがはいった。

(4) めくら目地をもつコンクリート版の応力を解析するためには，隣り合っためくら目地によって囲まれた版が一枚の単位となる。

(5) 膨張目地間隔が 180m，めくら目地間隔が 6 ～15mのコンクリート版が晴天の続いた日にどのように動くかを見ると，中央部の版(めくら目地間隔6，10，15mに対してそれぞれ約20，8，6枚の版）は各版の中央付近を不動点として両側に伸縮する動き方をし，最も外側の版（めくら目地間隔 6，10，15m，に対してそれぞれ約 4，2～4，2 枚の版）は版全体が動いており，その中間の版は一方のめくら目地付近を不動点として大体一方にだけ伸縮している。

(6) 膨張目地間隔が 180m，めくら目地間隔が 6 ～15mのコンクリート版が 1 年間にどのように動くかを見ると，最も外側の版（めくら目地間隔 6，10，15mに対していずれも約 8 枚の版）は版全体が動いており，残りの版は一方のめくら目地付近を不動点として大体一方にだけ伸縮している。

(7) 厚さ20cm のコンクリート版表面から5cm，10cm，15cm 下の点はほとんど同位相，同量の変位をしている。またこれらの点の変位と版表面から 10cm 下の温度はほぼ同じ位相をもっており，両者の間には直線的な関係がある。

(8) 膨張目地間隔 180m，めくら目地間隔 6～15mのコンクリート版の日変位こう束係数を，温度変化による伸縮量から計算すると，めくら目地間隔 6，10，15m に対して平均値はそれぞれ0.3，0.5，0.65くらい，設計に用いる安全側の数値はそれぞれ 0.7，0.85，0.85 くらである。

(9) 膨張目地間隔が 180mでめくら目地間隔が 6，10，15mのコンクリート版を夏に施工した場合，中心点を不動点として左右に伸縮している版に早朝 5 ～ 7 時ごろ生ずる実際最大摩擦応力（引張応力）の大きさと頻度は図-87に示すようである。

(10) 年変化の場合および温度降下の大きい日変化の場合に生ずる最大摩擦応力は，版全体が 1 mm以上滑っている版に生じ，その大きさはめくら目地間隔 6，10，15mに対してそれぞれ2.1，3.6，5.4kg/cm² である。

(11) 含水量の日変化によって生ずるコンクリート版の応力はすべて無視できる程小さい。

(12) 冬期に施工されためくら目地間隔 6，10，15mのコンリート版は1年間にそれぞれ 150×10^{-6}，110×10^{-6}，100×10^{-6} 程度の収縮ひずみを起す。

(13) 膨張目地間隔 180m，めくら目地間隔 6，10，15m のコンクリート版の年収縮ひずみによって生ずる摩擦

応力は，それぞれ0.5，1.0および1.6kg/cm² 程度である。

(14) 晴天が続いた場合，めくら目地をもち，膨脹目地間隔 180mのコンクリート版の膨脹目地幅の日伸縮量は6月，8月，12月にそれぞれ約2.6、1.7，1.3mmである。

(15) 晴天が続いた場合，間隔 6，10，15mのめくら目地幅の日伸縮量は目地間隔や季節によってあまり大きくは相違せず，およそ0.4～0.5mmである。

(16) 膨脹目地間隔 180m，めくら目地間隔 6～15mのコンクリート版の膨脹目地幅の年伸縮量は最大8～12mに達するが，年数が増すにしたがって減少する傾向がみられる。

(17) 膨脹目地間隔 180m，めくら目地間隔 6～15mのコンクリート版の狭義端部こう束係数を，温度変化による伸縮から計算すると，日変化の場合0.82～0.88，年変化の場合0.70～0.85である。

(18) 膨脹目地間隔 180m，めくら目地間隔 6～15mのコンクリート版を1月下旬の早朝または夕方に施工した場合，実際最大端部こう束応力は日変化の場合13～15時ごろ，年変化の場合8月下旬ごろに生じ，最大値はそれぞれ 15～20kg/cm²，30～35kg/cm² （いずれも圧縮）に達することがある。

(19) 膨脹目地間隔 180m，めくら目地間隔 6～15mのコンクリート版の広義端部こう束係数は日変化の場合0.15として設計すれば安全側である。

(20) 膨脹目地間隔 180m，めくら目地間隔 6～15mのコンクリート版を夏に施工した場合，早朝5～7時ごろに生ずる最大広義端部こう束応力（引張応力）の大きさと頻度は図-111(a)に示すようである。

(21) 膨脹目地間隔 180m，めくら目地間隔 6～15mのコンクリート版の温度年変化による広義端部こう束応力は0であるとしてよい。ただし結論(13)の応力は設計上考慮する必要がある。

(22) 以上要約すれば，設計の目的に対しては日変化の場合，広義端部こう束応力を考えればよく，年変化の場合はコンクリートの収縮ひずみによる摩擦応力を考えればよい。

(23) めくら目地をつくることはコンクリート版の広義端部こう束応力を非常に減少させる効果がある。

(24) φ22mm のスリップバーによって十分に補強されためくら目地をもつコンクリート版の正の温度こう配におけるそりこう束係数はめくら目地間隔 6，10，15mに対してそれぞれ0.91，0.97，0.97くらいである。これに対して負の温度こう配におけるそりこう束係数は，それぞれ0.52，0.91，0.94くらいである。

(25) 以上要約すれば，コンクリート版の温度応力のうちそりこう束応力が最も大きい。

(26) 施工直後の収縮ひびわれを別とすれば，間隔6～15mのめくら目地をもつコンクリート版に温度応力，含水量変化による応力など輪荷重応力以外の応力でひびわれが生ずることはほとんどない。

最後に本研究を行なうにあたって終始有益な助言を与えられた竹下春見博士，非常な助力を寄せられた福田正技官，月成稔技官，菅原功君，真田輝臣君，山崎言君，高徳真君，谷藤稲蔵君，伊藤武君ら舗装研究室の方々に厚く御礼申上げる。

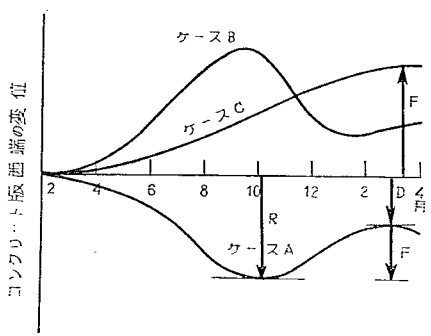


図-77 コンクリート版西端（目地の東端）変位の年変化の分類

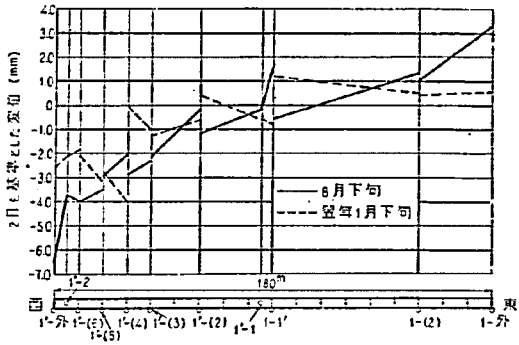


図-78 年変化におけるコンクリート版変位—位置曲線
(試験舗装 No. 1)

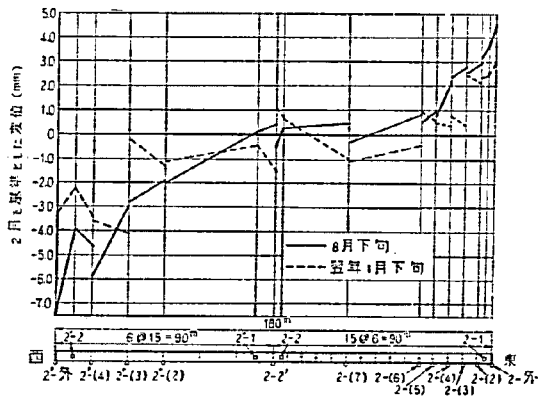


図-79 年変化におけるコンクリート版変位—位置曲線 (試験舗装 No. 2)

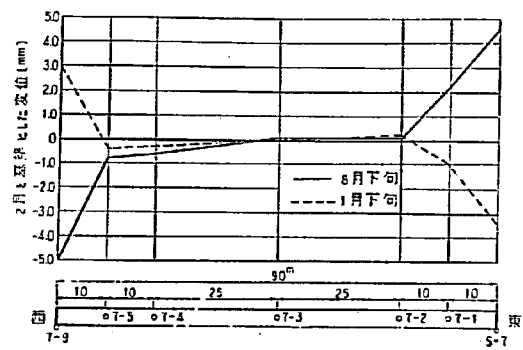


図-80 年変化におけるコンクリート版変位—位置曲線 (試験舗装 No. 7)

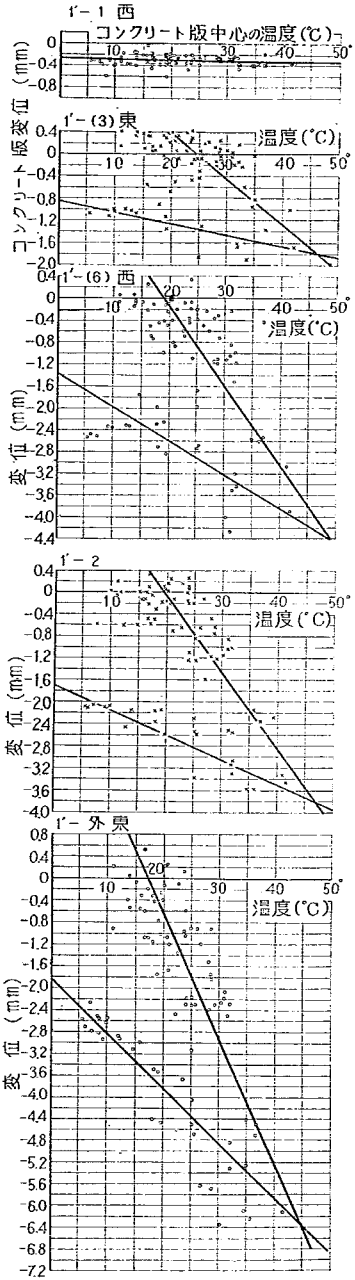


図-81 年変化におけるコンクリート版変位と温度の関係（試験舗装 No. 1）

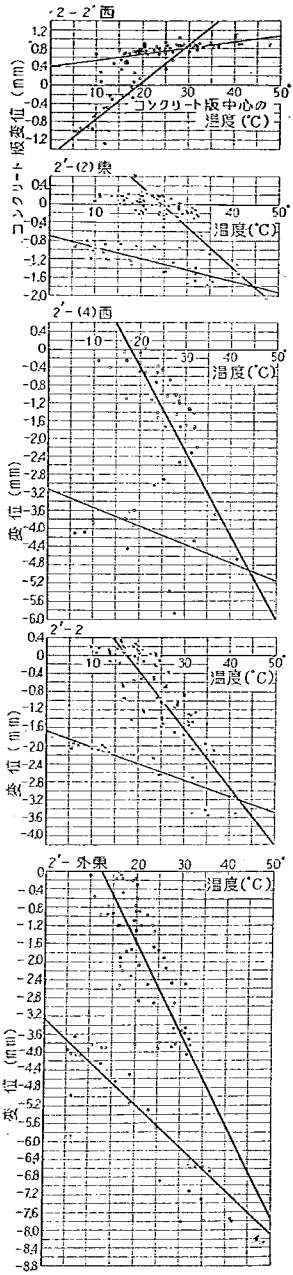


図-82 年変化におけるコンクリート版変位と温度の関係（試験舗装 No. 2）

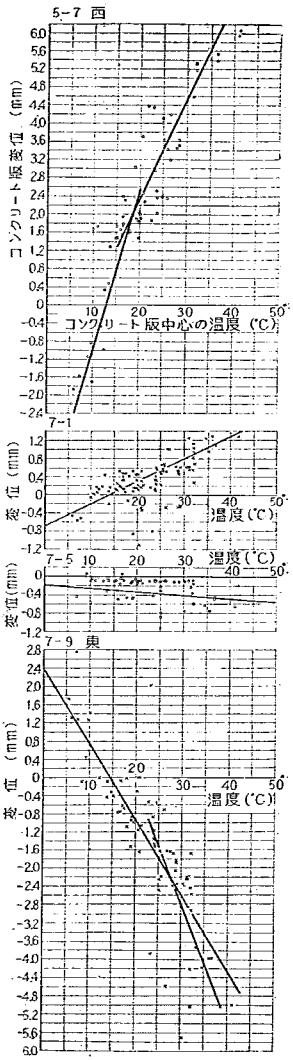


図-83 年変化におけるコンクリート版変位と温度の関係（試験舗装 No.7）

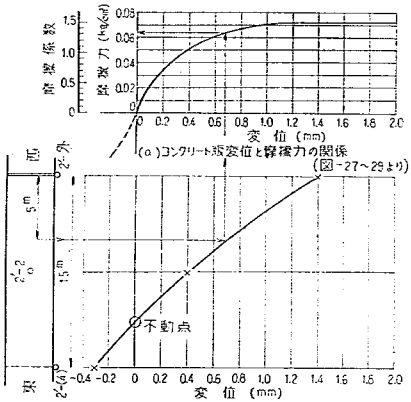


図-84　路盤摩擦応力の図解法

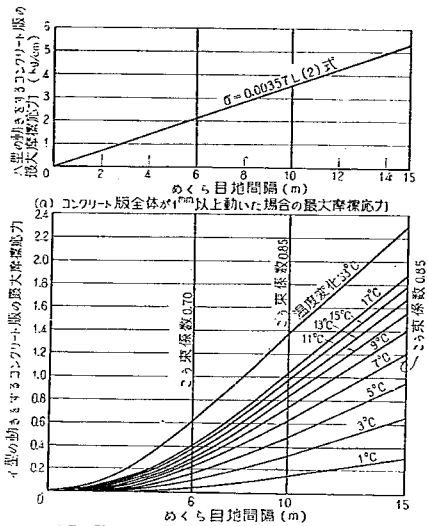


図-85　コンクリート版の最大摩擦応力度

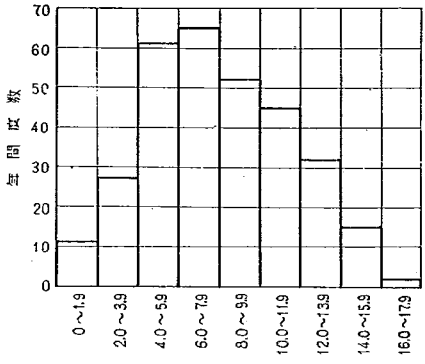


図-86　コンクリート版中心温度日振幅の度数分布

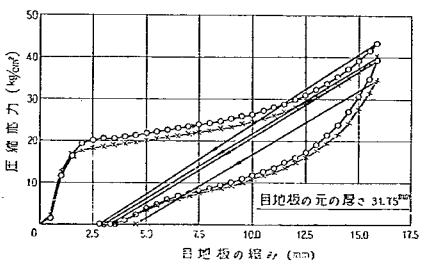


図-88　水で飽和した松目地板の圧縮復元試験結果

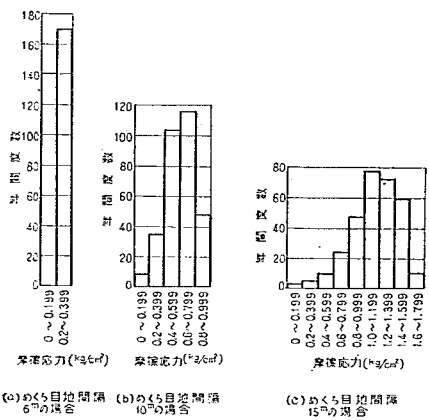


図-87　前日の昼に応力0とした場合の早朝5時ごろの摩擦応力の度数分布

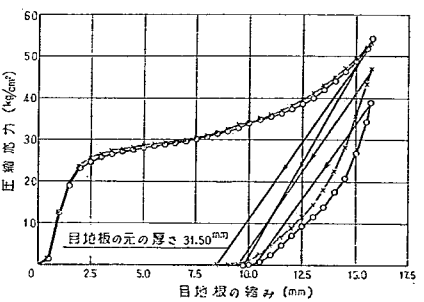


図-89　気乾状態の松目地板の圧縮復元試験結果

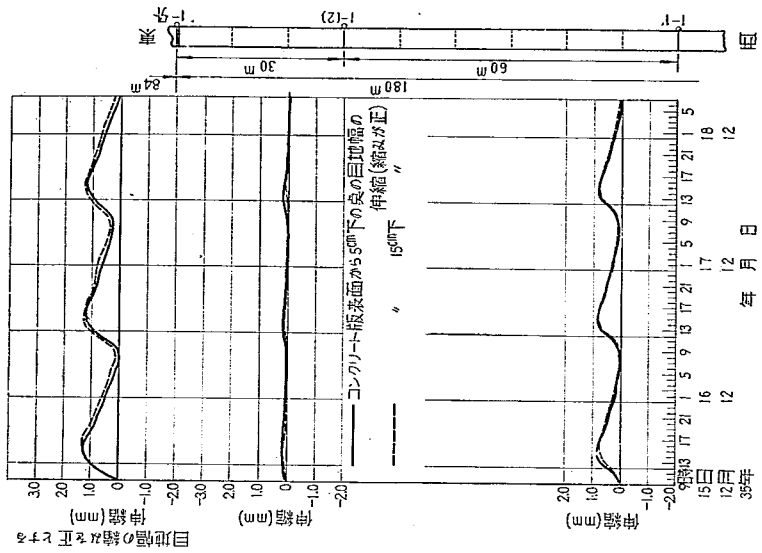


図-91 目地幅伸縮の日変化（試験舗装 No. 1）

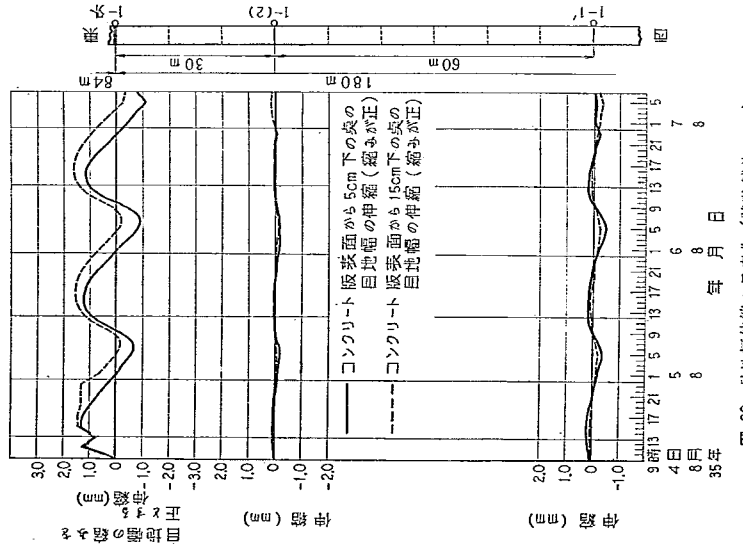


図-90 目地幅伸縮の日変化（試験舗装 No. 1）

図-92 目地幅伸縮の日変化（試験舗装 No.1′）

図-93 目地幅伸縮の日変化（試験舗装 No.1′）

図-94　目地幅伸縮の日変化（試験舗装 No. 2）

図-95　目地幅伸縮の日変化（試験舗装 No. 2）

図-96　目地幅伸縮の日変化（試験舗装 No.2'）

図-97　目地幅伸縮の日変化（試験舗装 No.2'）

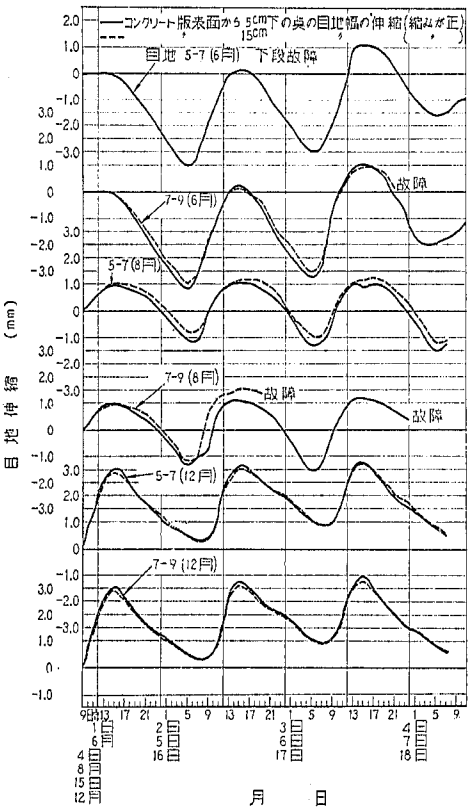


図-98 膨脹目地幅伸縮の日変化（試験舗装 No. 7）

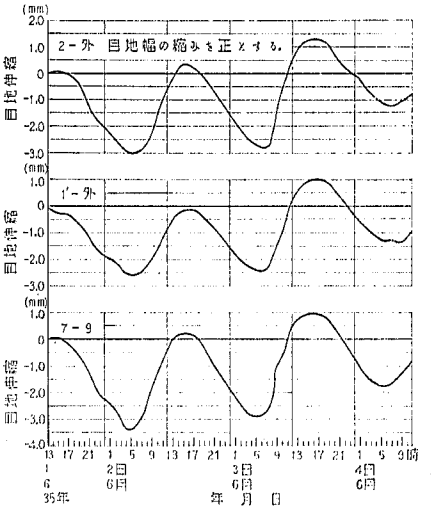


図-99 カールソン継目計による膨脹目地幅伸縮（日変化）測定の1例

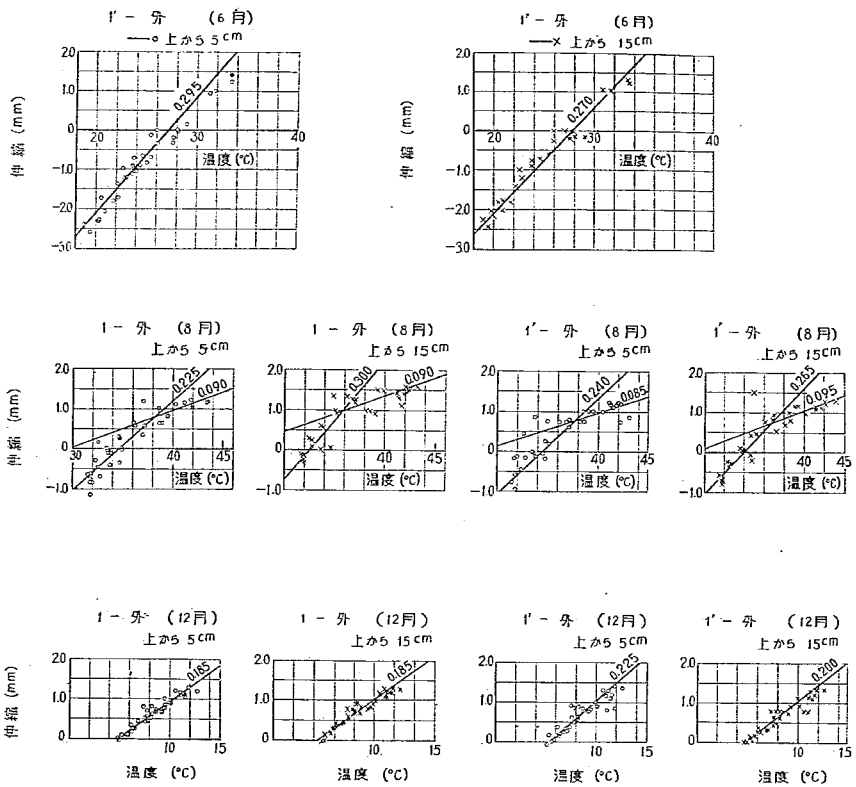


図-100 日変化における膨脹目地伸縮と温度の関係 (試験舗装 No. 1)

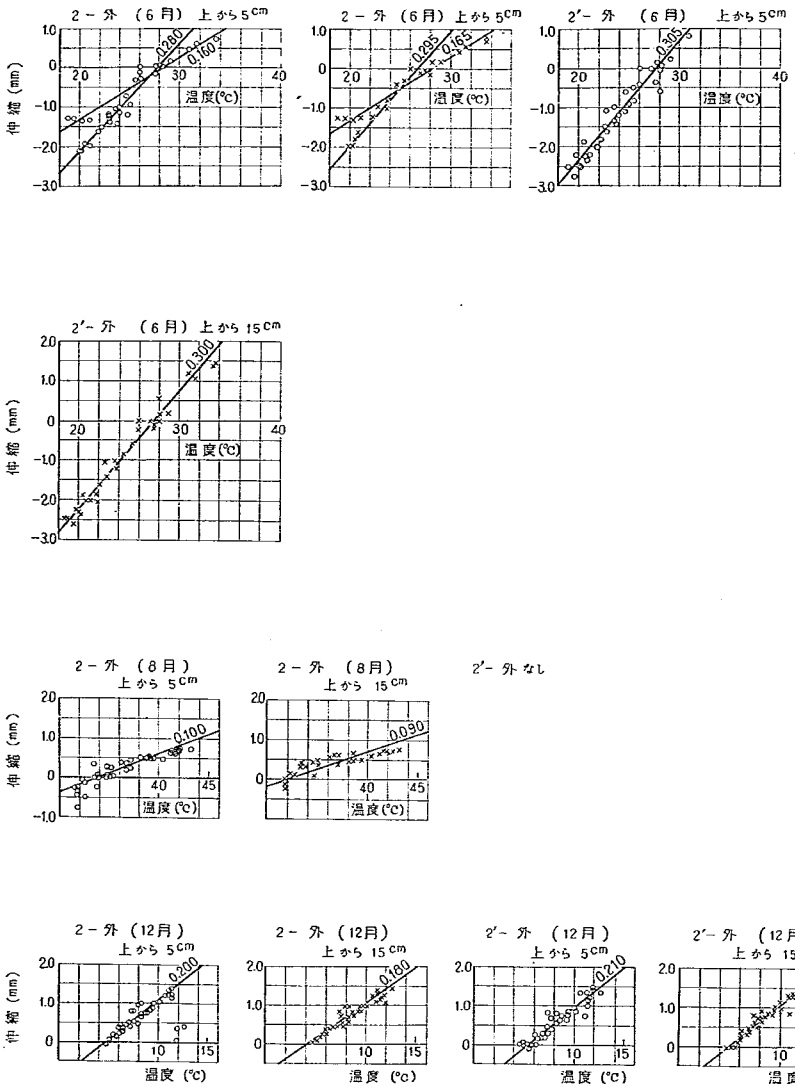


図-101 日変化における膨脹目地伸縮と温度の関係（試験舗装 No.2）

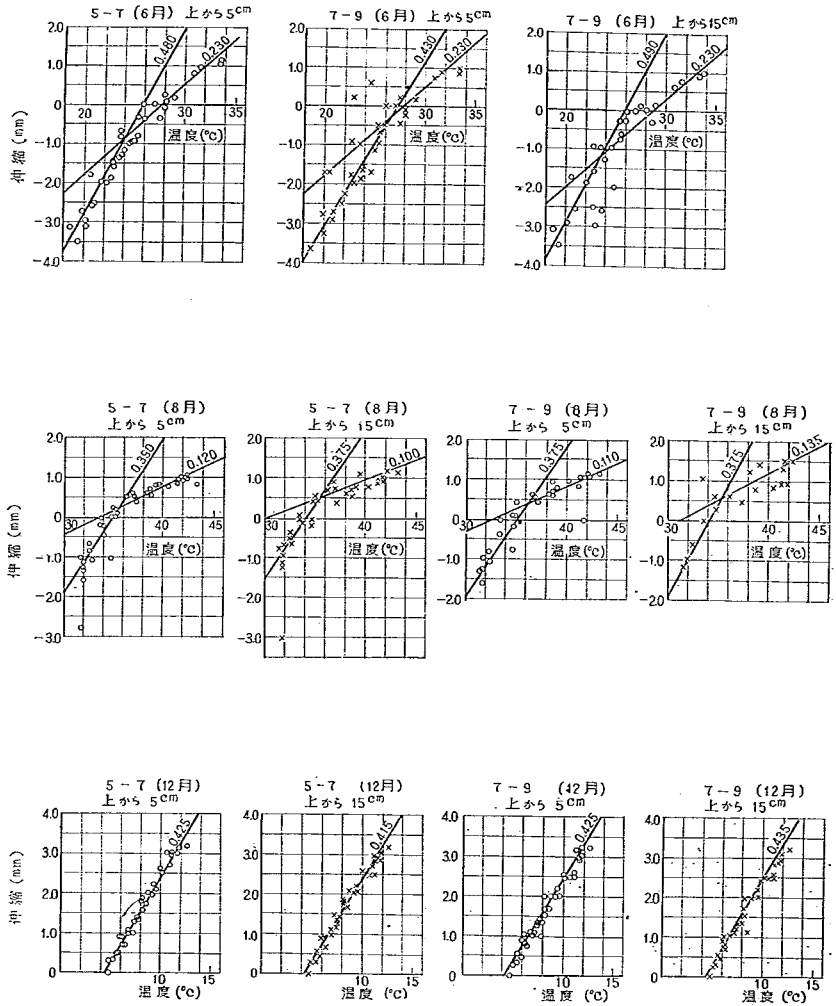


図-102 日変化における膨脹目地伸縮と温度の関係 (試験舗装 No. 7)

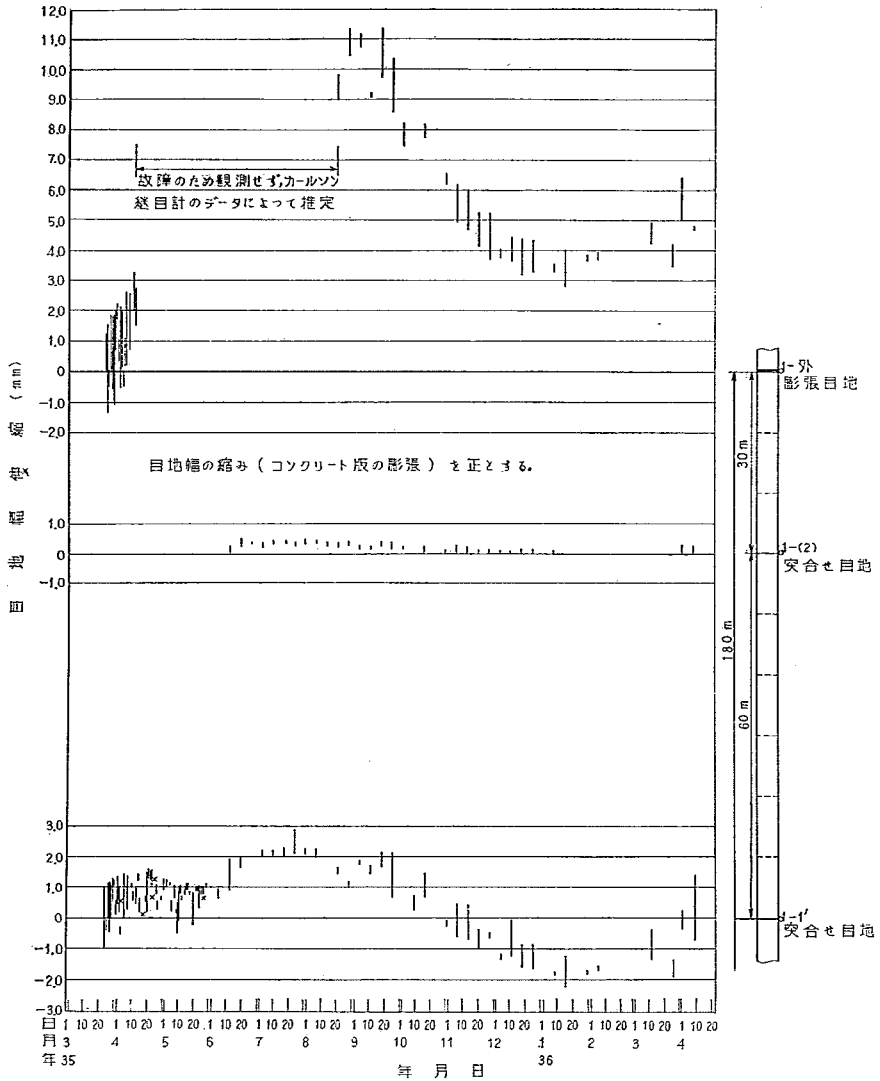


図-103 目地幅伸縮の年変化（試験舗装 No.1）

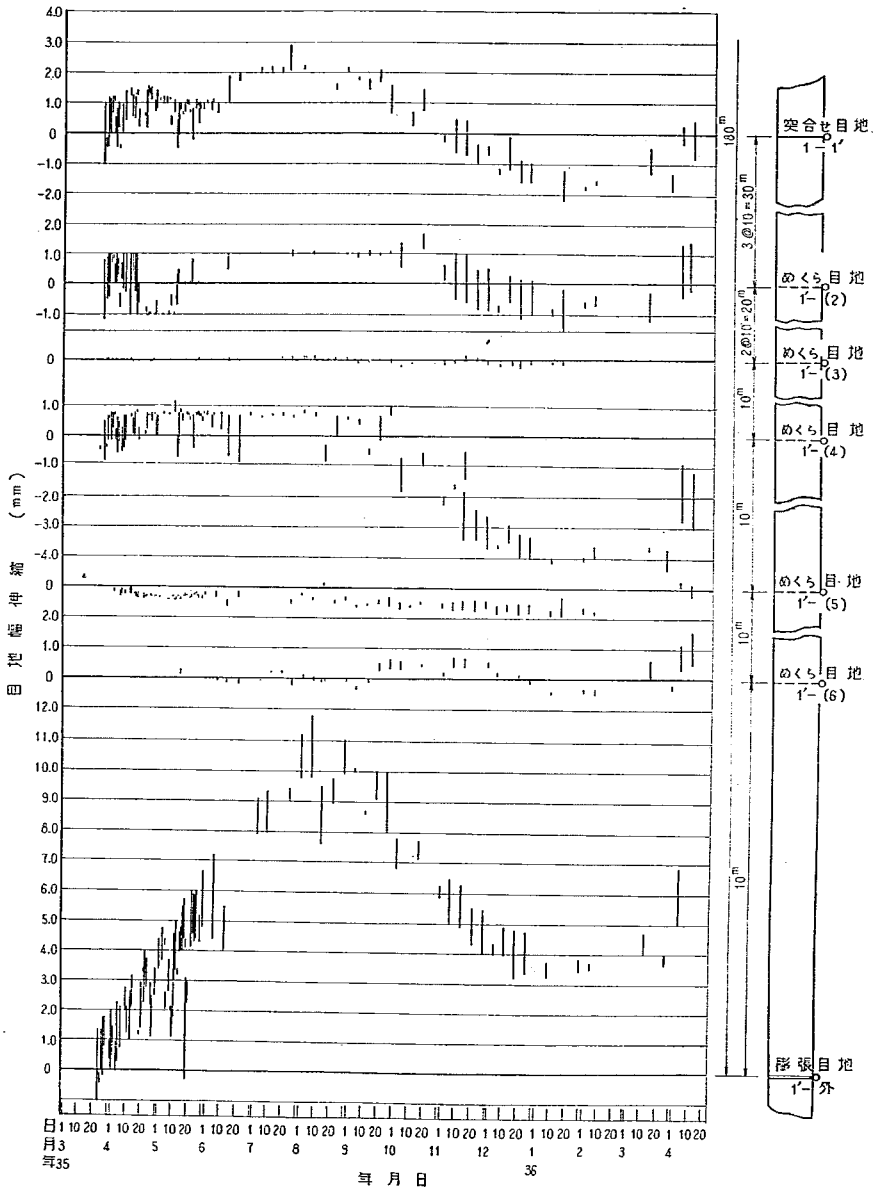


図-104　目地幅伸縮の年変化（試験舗装 No.1′）

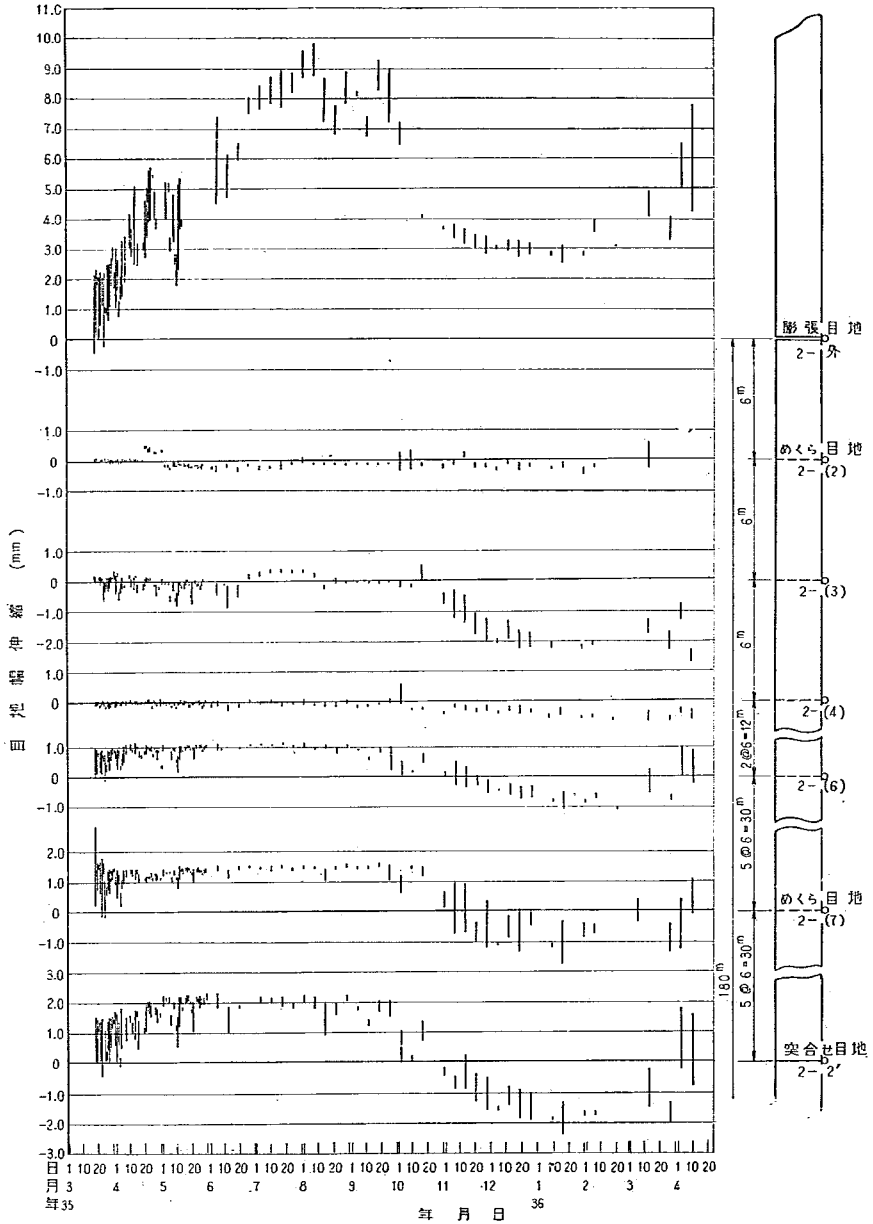


図-105 目地幅伸縮の年変化（試験舗装 No. 2）

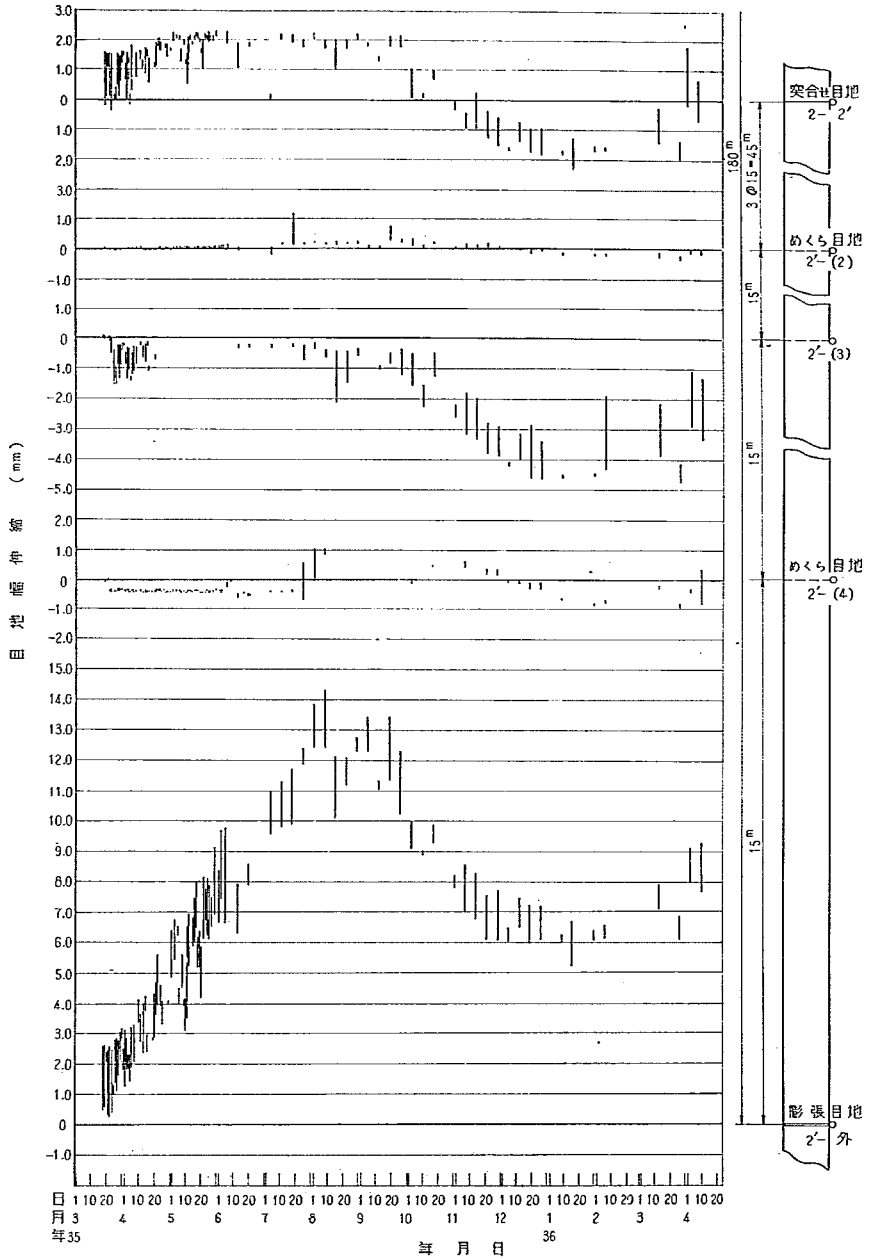


図-106　目地幅伸縮の年変化（試験舗装 No.2′）

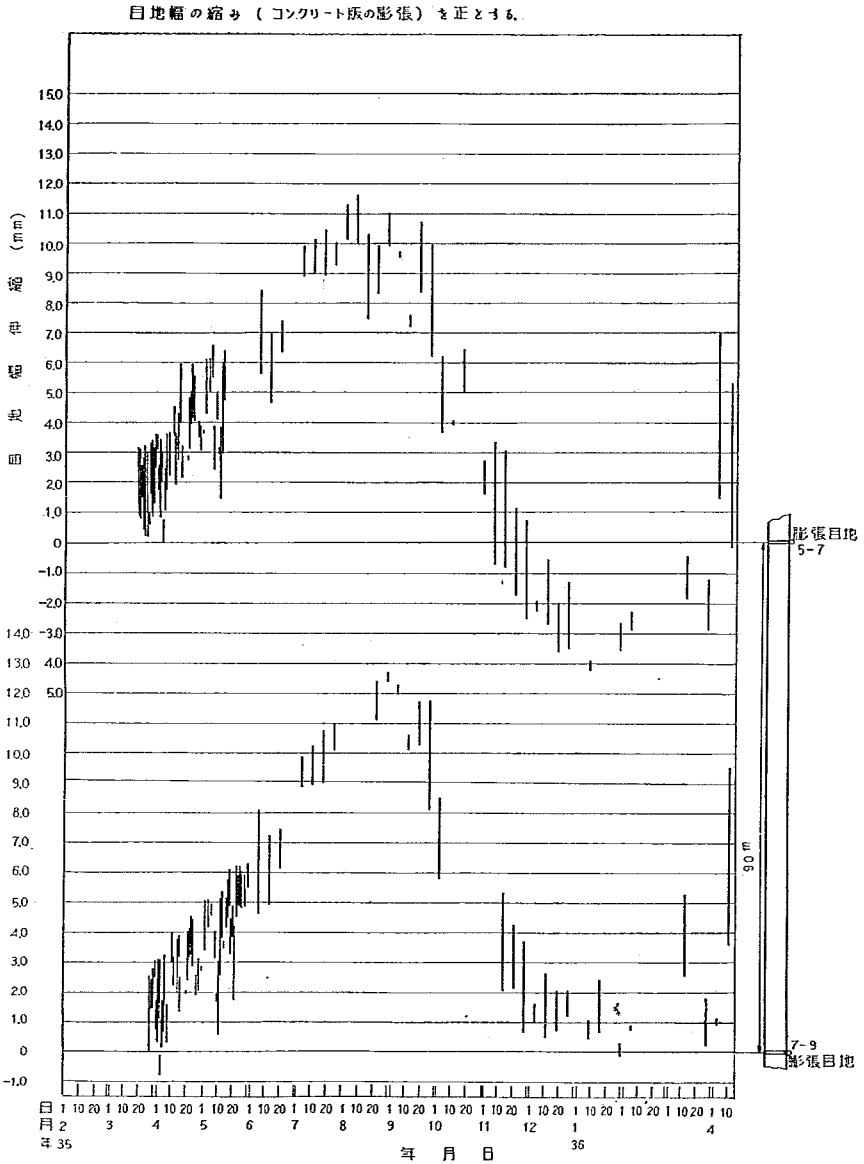


図-107 目地幅伸縮の年変化（試験舗装 No. 7）

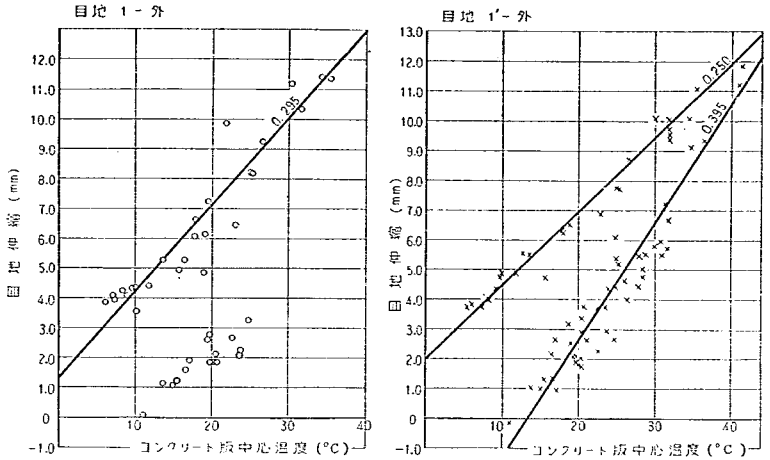


図-108　年変化における膨張目地伸縮と温度の関係（試験舗装 No. 1）

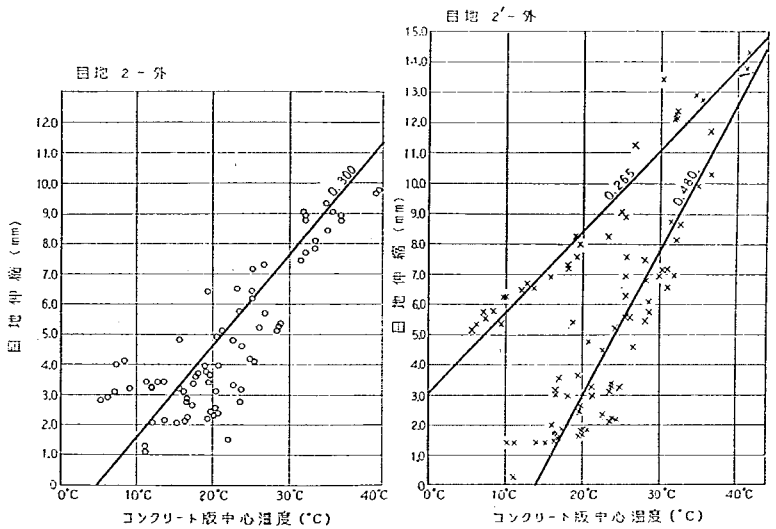


図-109　年変化における膨張目地伸縮と温度の関係（試験舗装 No. 2）

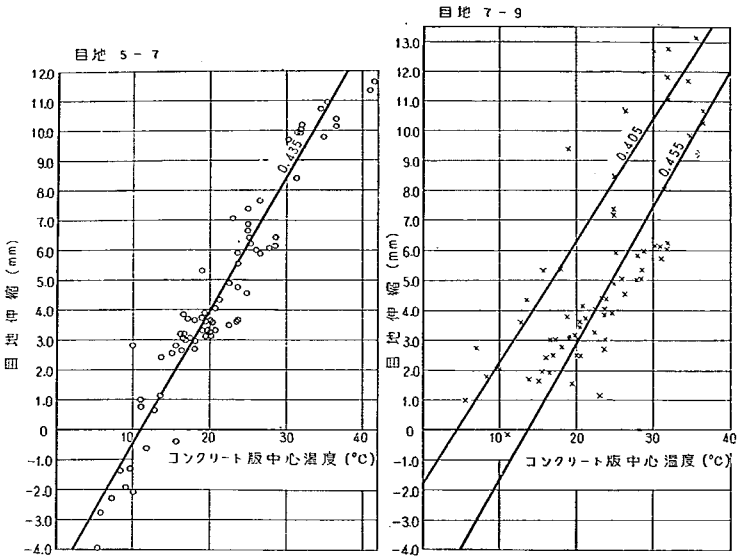
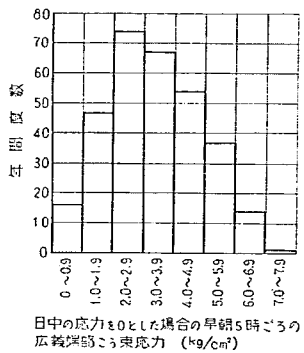
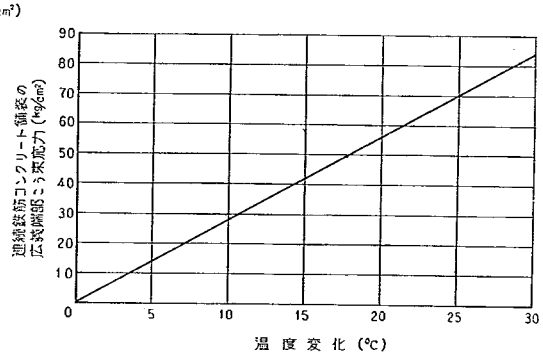


図-110 年変化における膨脹目地伸縮と温度の関係（試験舗装 No.7）



(a) 一般のコンクリート舗装の早朝における最大広義端部こう束応力の度数分布



(b) 連続鉄筋コンクリート舗装中央部の広義端部こう束応力の計算値

図-111 コンクリート版の広義端部こう束応力

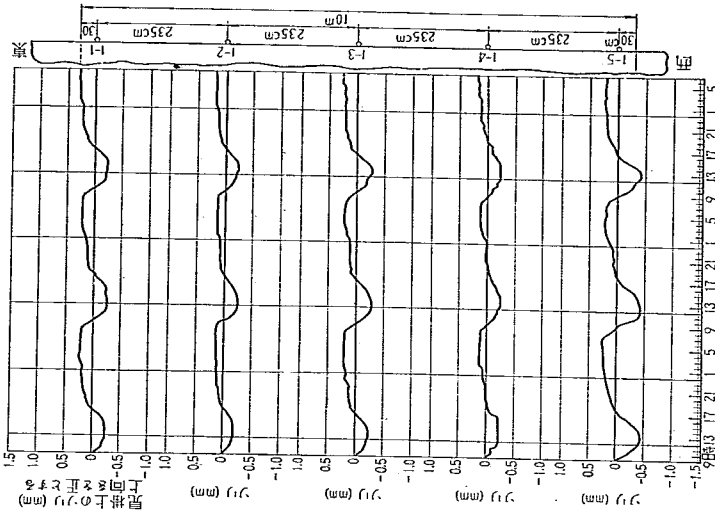


図-113 めくら目地間隔10mのコンクリート版の見掛上のそりの日変化

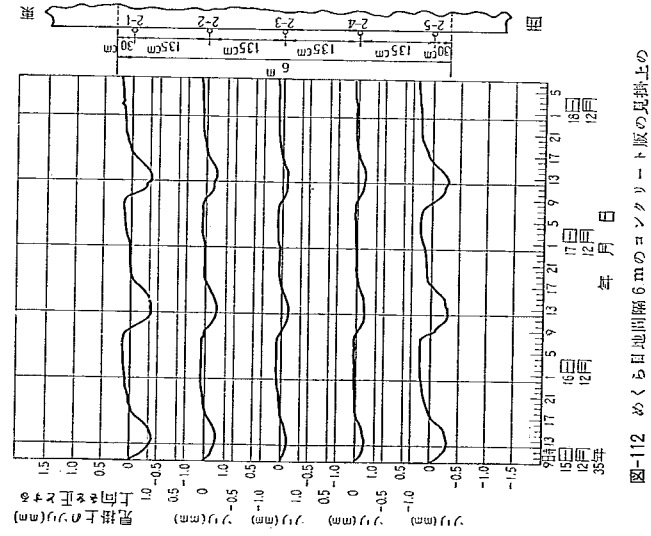


図-112 めくら目地間隔6mのコンクリート版の見掛上のそりの日変化

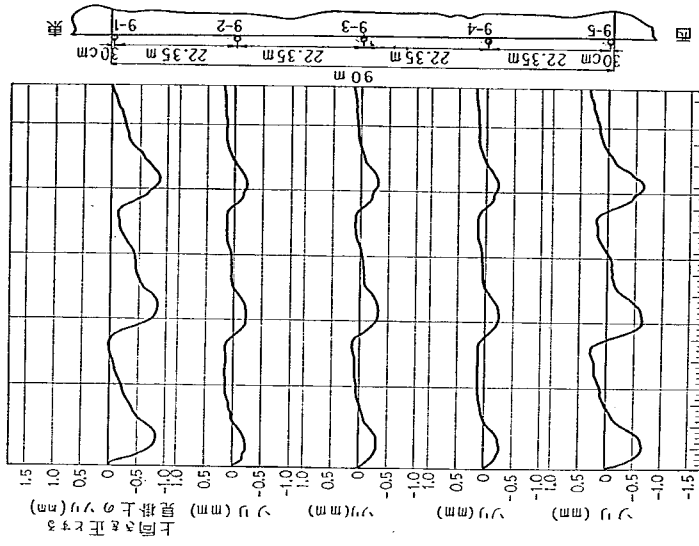


図-115 膨脹目地間隔90mの連続鉄筋コンクリート版の見掛上のそりの日変化

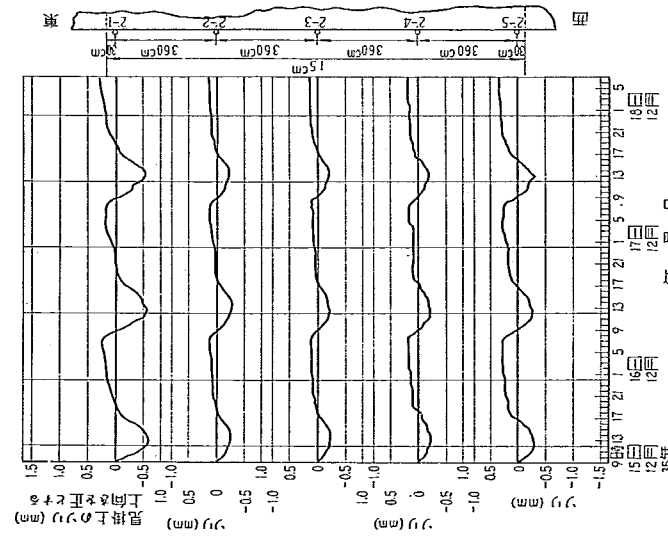


図-114 めくら目地間隔15mのコンクリート版の見掛上のそりの日変化

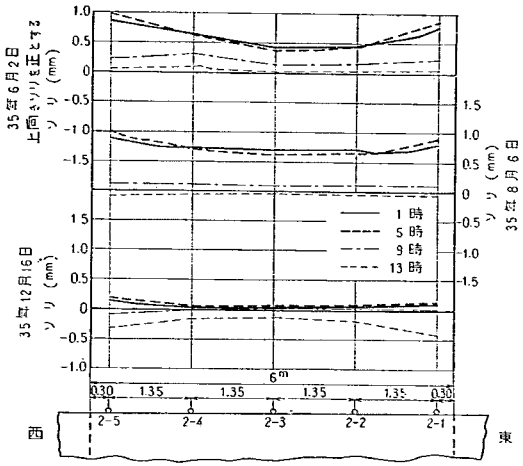


図-116　めくら目地間隔6mのコンクリート版の見掛上のそりと位置の関係

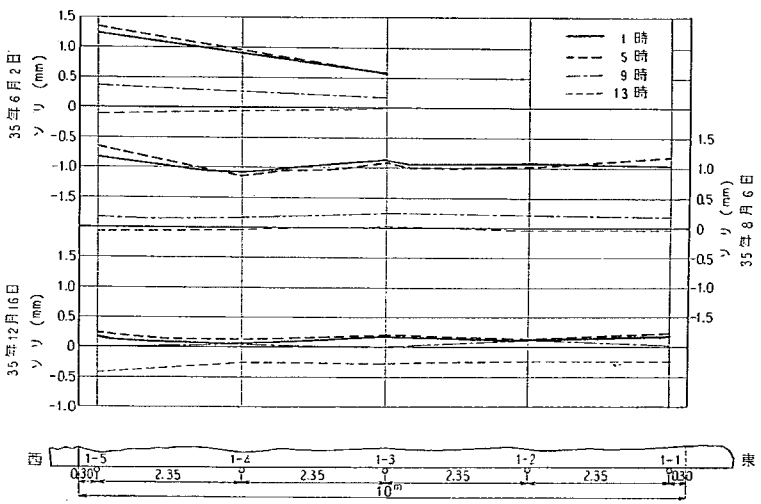


図-117　めくら目地間隔10mのコンクリート版の見掛上のそりと位置の関係

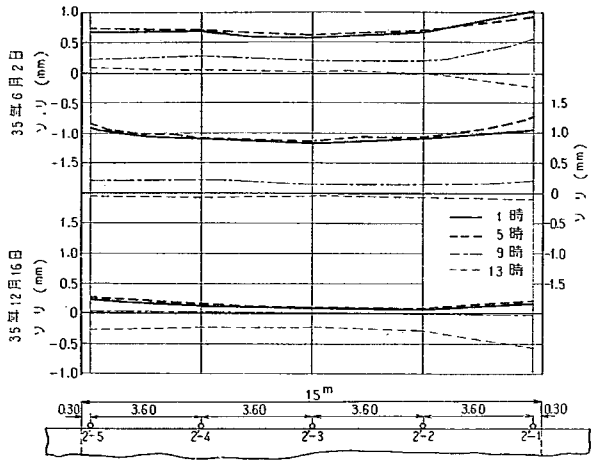


図-118 めくら目地間隔15mのコンクリート版の見掛上のそりと位置の関係

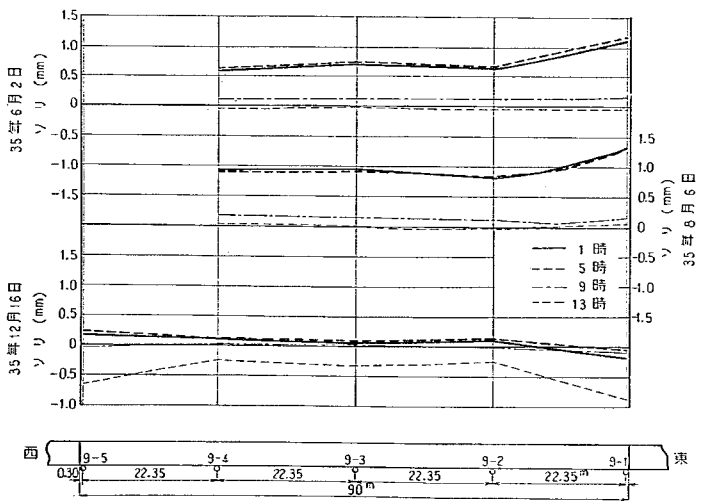


図-119 膨張目地間隔90mの連続鉄筋コンクリート版の見掛上のそりと位置の関係

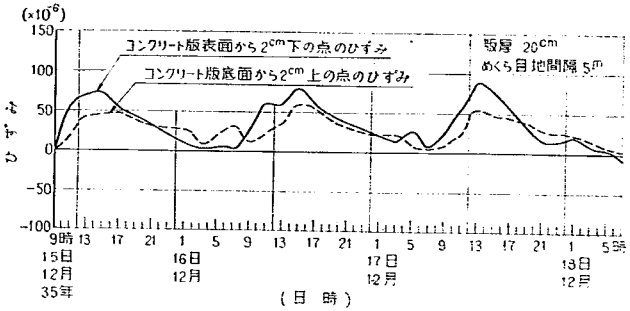


図-120 カールソンひずみ計で測定したコンクリート版ひずみの日変化

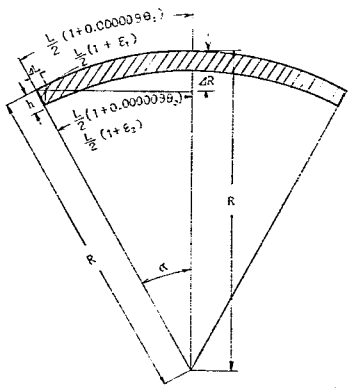


図-121 温度変化からコンクリート版中央のそりを計算する方法の説明図

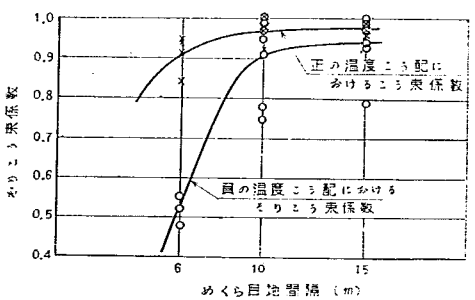


図-122 実測値から求めたコンクリート版のそりこう束係数

濾過砂の粒度および表面洗浄に関する研究

昭和 36 年 11 月

寺　島　重　雄*
柏　谷　　衛**

要　旨：

急速濾過用濾過砂の粒度の選定法について，試験用濾過池を用い，洗浄効果と濾過効果の面から比較検討を加え，さらに表面洗浄併用の効果，表面洗浄方式，粒度と表面洗浄との関係などについて，究明するため実験を行なった。

実験の結果から付随的に各粒度に対する最適の膨脹比および逆流洗浄速度，洗浄時間などの関係や，砂層の成層化による濾過持続時間，濾過水の水質の推移の状況，泥球の発生機構なども明確にすることができた。また表面洗浄の併用によって総洗浄水量を減少させうることや粒度によって表面洗浄方式をかえるべきことなどについても判明した。

目　　次

1. 緒　言……(2)
2. 実験装置および実験方法……(2)
〔1〕 実験装置……(2)
〔2〕 実験に使用した濾過砂……(5)
〔3〕 原水の水質……(5)
〔4〕 実験方法……(6)
〔5〕 砂層の空隙率の測定……(6)
3. 粒度と洗浄効果……(7)
〔1〕 粒度と膨脹……(7)
〔2〕 粒度と洗浄水量……(9)
〔3〕 粒度と砂層の汚染度……(11)
（i） 濾過による砂層の汚染……(11)
（ii） 逆流洗浄による砂層の洗浄効果……(12)
〔4〕 泥球の発生と発達……(14)
〔5〕 総　括……(15)
4. 粒度と濾過効果……(15)
〔1〕 均等係数の異なる場合……(15)
（i） 初期損失水頭……(15)
（ii） 濾過持続時間……(19)
（iii） 損失水頭……(26)
（iv） 濾過水の水質……(27)
〔2〕 有効径の異なる場合……(27)
（i） 濾過持続時間……(27)
（ii） 損失水頭……(28)
（iii） 濾過水の水質……(31)
〔3〕 総　括……(31)
5. 表面洗浄併用時の洗浄効果……(33)
〔1〕 表面洗浄開始時間……(33)
（i） 表面洗浄開始時間と逆流洗浄開始時間との関係……(33)
（ii） 表面洗浄と逆流洗浄速度との関係…(35)
〔2〕 表面洗浄時間と水量……(35)
（i） 固定式表面洗浄の場合……(36)
（ii） 回転式表面洗浄の場合……(39)
〔3〕 表面洗浄併用時の逆流洗浄速度と洗浄時間……(40)
〔4〕 表面洗浄と砂層の汚染度……(41)
（i） 砂層の汚染……(41)
（ii） 表面洗浄方式と砂層の洗浄効果……(43)
（iii） 粒度と砂層の洗浄効果……(44)
（iv） 泥球の発生防止……(45)
〔5〕 総　括……(45)
6. 表面洗浄併用時の濾過効果……(46)
〔1〕 初期損失水頭の減少……(47)
（i） 逆流洗浄のみの場合との比較……(47)
（ii） 粒度と初期損失水頭……(48)
〔2〕 濾過持続時間と損失水頭……(48)
（i） 逆流洗浄のみの場合との比較……(48)
（ii） 粒度と濾過持続時間……(48)
（iii） 損失水頭の傾向……(53)
〔3〕 濾過水の水質……(53)
〔4〕 総　括……(53)
7. 結　論……(55)
〔1〕 粒度と洗浄効果および濾過効果……(55)
〔2〕 表面洗浄併用時の粒度と洗浄効果および濾過効果……(56)
参考文献……(57)

* 都市局　下水道課長
** 河川部　下水道研究室研究員

1. 緒言

急速濾過法の浄化機能や洗浄方法については，過去幾多の研究がなされ，濾過池の構造に関しては濾過が均等に行なわれ，かつ逆流洗浄水を均一に上昇させるための下部集水装置の研究はほぼ完成の域にあり，洗浄方法としては従来の方式から非常に進歩した高速逆流洗浄，表面洗浄併用も次第に普及するようになった。

しかし急速濾過池の本体ともいうべき砂層について，その材質および粒度に関しては数多くの研究があるが，上記のごとき下部集水装置の構造や洗浄方法など関係する要素が極めて多いので明確な結論が得られておらず，とりわけ表面洗浄を併用した場合にはその感が深い。

これらの事情にかんがみ，代表的と思われる9種類の粒度の砂層について濾過速度，砂面上水深，逆流洗浄速度，洗浄時間などを変えて実験して，砂層の洗浄前後の汚染度，損失水頭，濾過持続時間，濾過水の水質などを比較することによって，砂層の粒度と洗浄効果および濾過効果の関係を逆流洗浄のみの場合と表面洗浄を併用した場合とについて究明するため実験を行なったものである。

実験は赤羽分室において，昭和 32 年 10 月から昭和 34 年 3 月にかけて実施したものであり，その後においても若干の補足実験を行なった。

これらの実験に使用した原水は，実験装置を設置した赤羽分室の地理的条件から荒川と新河岸川の合流地点のすぐ上流に求めざるをえなかった。この地点では，とくに満潮時に工場廃水，家庭汚水によって極度に汚染された河水を取水することとなるため，上水道水源としては不適当であるが，実験速度を早めうることと，工業用水道の水源としては，今後この程度の原水も使用されることを予想して，あえて原水として使用したものである。

2. 実験装置および実験方法

〔1〕 実験装置

実験装置は前記のように赤羽分室内に設置し，荒川（隅田川）の河水を実験用水とした。実験期間は昭和 32 年 10 月より 34 年 3 月までの 18 カ月間にわたったが，このうち，32 年 10 月より 33 年 6 月までは前処理装置としてフロキュレータ付凝集池を使用し，以後 34 年 3 月まではアクセレータを使用して実験したものである。

実験装置のフローシートは，図-1 に示すごとく荒川の河水を第1揚水ポンプで着水井まで揚水し，さらに第2揚水ポンプでフロキュレータ付凝集池またはアクセレータに送水してフロック形成を行なった後試験用濾過池に流入させた。試験用濾過池は3池とし，その水位調節を行なうためにフロキュレータ付凝集池またはアクセレータと試験用濾過池との間には可動式越流管付水位調整槽を，濾過池流入管にはバルブを取付けてある。試験用濾過池には流入管，浄水管，捨水管，逆流洗浄管，表面洗浄管，洗浄排水トラフ，洗浄排水管および7本の損失水頭計を設けてある。濾過水はダブルシート型コントローラーで流量調節を行ない，量水槽を経て，貯水槽にはいる。量水槽には整流壁および三角堰を設けて，三角堰の流量測定によりコントローラーを調整できるようにしてある。捨水管は浄水管途中より分岐して濾過水の直接排出を可能としてある。逆流洗浄管は貯水槽の浄水をポンプで圧送して逆流洗浄を行ないうるよう濾過池に接続し，洗浄排水は洗浄排水トラフに越流させた後，洗浄排水管を通じて排出する。表面洗浄装置は，濾過池3池のうちの1号池には固定式，2号池には回転式を設置してあるが，固定式表面洗浄管は逆流洗浄管より分岐させ，回転式表面洗浄管は専用の高揚程ポンプに接続せしめてある。逆流洗浄管，固定式および回転式表面洗浄管の途中にはそれぞれオリフィス管，制水弁，水圧計を取付け，水銀柱マノメータにより，流量調節を行ないうるようにしてある。試験用濾過池の仕様は下記のとおりである。

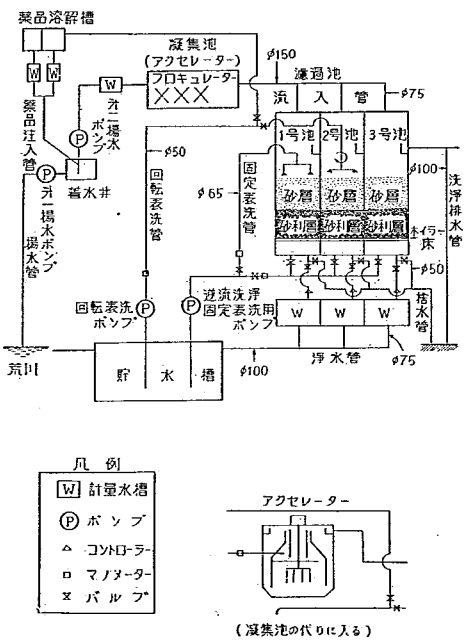


図-1　実験装置のフローシート

池数……3池(鋼製で観測窓を1池につき3枚)
濾過面積……1池につき，縦 1.2 m，横 1.2 m，面積 1.44 m²)
濾過速度……70 m/日～220 m/日 に調節可能
下部集水装置…ホイラー式
砂層厚……60 cm
砂利層厚……50 cm，最大径 50 mm，最小径 2 mm，で下記のように4層とする。

第1層　径　2～ 5 mm　　厚 10 cm
第2層　径　5～12 mm　　厚 10 cm
第3層　径 12～25 mm　　厚 15 cm
第4層　径 25～50 mm　　厚 15 cm

砂面上水深……1.1 m～1.8 m に調節可能
濾過水頭……濾過速度と砂面上水深との関係で表-1のとおりとした。

表-1　濾過速度および砂面上水深と濾過水頭の関係

濾過速度(m/日)	砂面上水深(m)	濾過水頭　(m)
120	1.1	2.2
120	1.8	2.9
180	1.1	2.0
180	1.8	2.7

洗浄排水トラフ…高さ 45～70 cm に調節可能
損失水頭計……① 砂面上 100 mm (水位標示用)
② 砂面下 60 mm
③ 〃 160 mm
④ 〃 260 mm
⑤ 〃 410 mm
⑥ 〃 560 mm
⑦ 砂利面下 300 mm
⑧ ホイラー床下 100 mm
逆流洗浄速度…0.4 m/分～1.8 m/分 に調節可能
表面洗浄装置…1号池は固定式，2号池は回転式で，いずれも砂面上 10 cm に，詳細は表-2のとおり設置した。

表-2　表面洗浄装置の詳細

型式＼項目	管径 (mm)	管内圧力 (kg/cm²)	噴射水量 (m³/m²/分)	回転数 (r.p.m.)
固定式	38	1.2～1.6	0.1～0.2	—
回転式	25	0.5～2.0	0.05～0.1	7～10

流量測定装置…凝集池流入水および濾過水（3カ所）の流量は三角堰で，逆流洗浄本管，固定式および回転式表面洗浄管の流量はオリフィス管（水銀マノメータ）で測定した。
貯水槽……有効容量 17.3 m³ (逆流洗浄および表面洗浄のために十分な容量である。)
その他，ポンプ，配管類

濾過前処理については前記のようにフロキュレータ付凝集池とアクセレータを使用した。この場合急速撹拌は第2揚水ポンプで兼用することとし，硫酸ばん土などの薬品は第2揚水ポンプのフート弁直下に注入した。原水の計量はフロキュレータ付凝集池の場合は三角堰，アクセレータの場合はオリフィス管によった。フロキュレータ付凝集池で前処理を行なった場合には沈澱池を設置できなかったので，やむをえず生成されたフロックをすべて濾過池に送り込まざるをえなかったが，その後凝集沈澱を兼ねそなえた前処理装置としてアクセレータを取り付けた。凝集剤の計量はオリフィスホルダーの水位の高低により行ない，注入率の決定はそのたびごとのジャーテストによった。各装置の仕様は下記のとおりである。
凝集池……横 2.3 m，縦 3.0 m，深 1.0 m 鋼板製

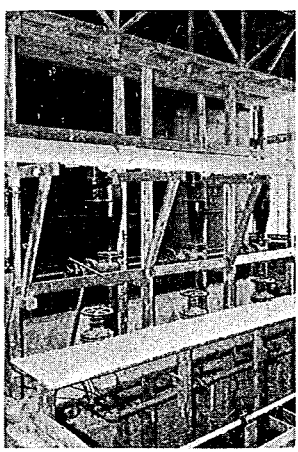


写真-1　急速濾過池の配管

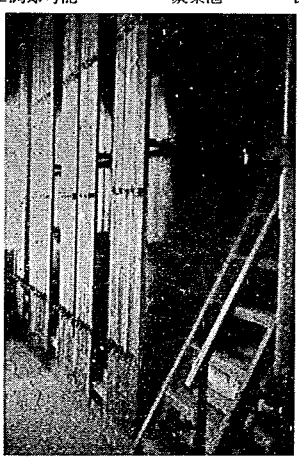


写真-2　損失水頭計

写真-3　濾過速度調整器
(ダブルシート型)

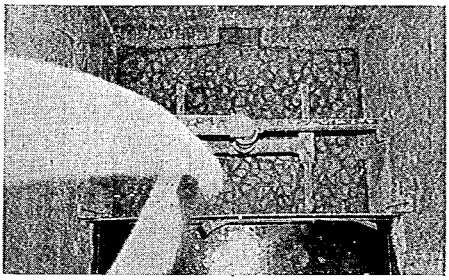


写真-4 1号池の内部（固定式表面洗浄装置付）

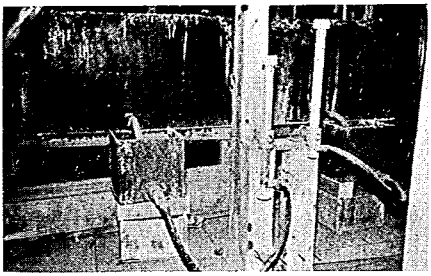


写真-8 硫酸バンド注入用計量槽およびホルダー

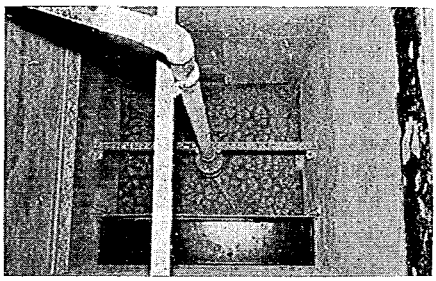


写真-5 2号池の内部（回転式表面洗浄装置付）

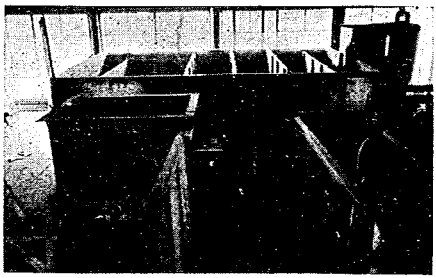


写真-9 フロック形成池と水位調整槽

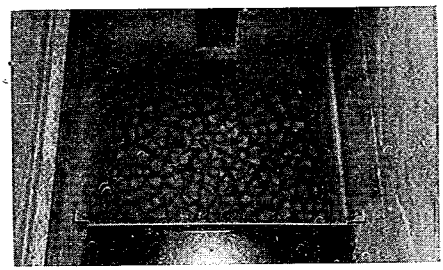


写真-6 3号池の内部（逆流洗浄のみ）

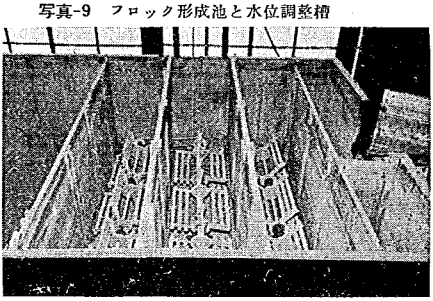


写真-10 フロキュレータ

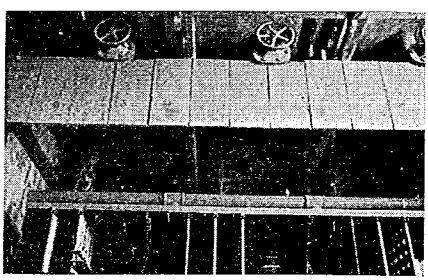


写真-7 浄水用量水樋と濾過速度調整器

フロキュレータ…3段，3列，回転径 38 cm，1段1列につき翼板数最高 12 枚，翼板長 46 cm，翼板幅 1 cm，翼板間隔 2 cm，周辺速度 51, 9～11. 4 cm/秒

写真-11 アクセレータ

アクセレーター…径 2.28 m，高 3.47 m，1 馬力駆動装置付，回転数 10～24 rpm

オリフィスホルダー…プラスチック製，有効深 27 cm，径 3 cm

実験装置は写真-1～11 に示すとおりである。

〔2〕 実験に使用した濾過砂

実験に使用した濾過砂は茨城県高萩産の海砂で有効径 0.45 mm，0.55 mm，0.80 mm，均等係数 1.2，1.4，1.6 を組み合わせた 9 種類である。篩分け試験の結果は表-3 および図-2 に示すとおりであり，その品質は表-4 のごとく水道施設基準[1]に規定する値を十分満足するものである。

〔3〕 原水の水質

原水は荒川（隅田川）の表流水であるが，取水地点は荒川河口より約 12 km の上流で，河床こう配は 1/2,000～1/3,000 である。取水地点では塩水の侵入はほとんど認められないが，潮位の変動により水位差は最大 2.5 m に達している。このため最干潮時には取水が困難になることもあるが，干潮時には，比較的汚染度の低い原水が得られる。しかし満潮時には取水地点より約 100 m の下流で荒川に合流する新河岸川の工場廃水，家庭汚水ではなはだしく汚染された河水（B. O. D. 20～60 mg/l）が逆流して来るので，原水の水質は悪化し，しかも水質の時

表-3 濾過砂の篩分け成績（残留率表）

有効径 (mm)	0.45			0.55			0.80		
均等係数 / 篩の目(μ)	1.2	1.4	1.6	1.2	1.4	1.6	1.2	1.4	1.6
350	0.3	3.3	6.0						
420	28.3	17.8	11.2	1.0	0.8	1.9			
500	66.2	28.9	17.7	15.5	16.0	13.9			
590	5.2	29.9	22.1	73.9	30.7	19.6	0	1.8	2.7
710		14.6	25.8	9.6	27.3	18.8	14.5	12.4	10.5
840		5.5	11.3		17.1	22.8	61.9	25.6	16.6
1,000			5.9		8.1	14.6	20.5	31.5	21.1
1,190						8.4	3.1	18.9	29.5
1,490								4.7	8.9
1,680								5.1	7.2
2,000									3.5
2,380									

表-4 使用した濾過砂の品質

項目	数値
硅酸分	86 %
塩酸可溶成分	0.8 %
洗浄濁度	10 度
比重	2.62
灼熱減量	0.58 %
磨滅率	2.86 %

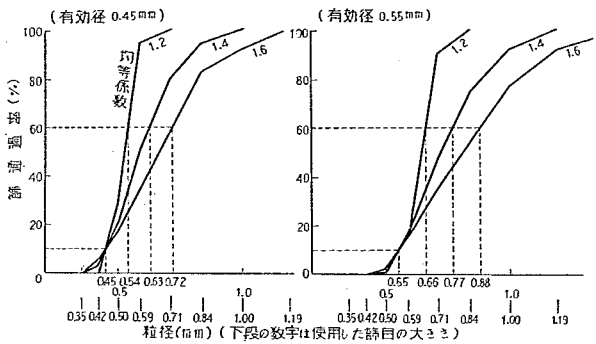


図-2 A 濾過砂の篩分け曲線　　図-2 B 濾過砂の篩分け曲線

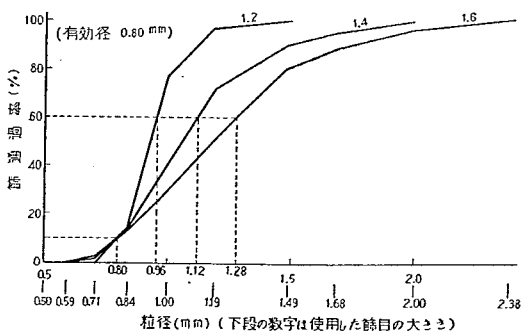


図-2 C 濾過砂の篩分け曲線

間的変化は潮の干満に影響されて非常に大きい。この水質の変化は濁度についてはそれほどでないが，pH，アルカリ度，酸度，過マンガン酸カリ消費量，色度についてはその変化が著しい。すなわち満潮時には pH，アルカリ度が低く，酸度，色度，過マンガン酸カリ消費量が高くなっており，干潮時にはこの逆となる。

過マンガン酸カリ消費量は満潮時に 60～110 mg/l，干潮時には 20～40 mg/l となっており，最干潮時の 90～100 分前および 40～50 分後までは汚染度は非常に少ない。干潮時より満潮時への移り変わり時には過マンガン酸カリ消費量の最小値から最大値に達するのが急激で，僅か 20～30 分間であるのに対し，満潮時より干潮時への移り変わり時には過マンガン酸カリ消費量の最大値から最小値に達するのが緩慢で 2.5～3 時間を要するほどである。

このように原水の水質が著しく変化したので，凝集剤の注入率はできる限り多くのジャーテストに基づいて決定した。

〔4〕 実験方法

実験は 9 種類の濾過砂のうちから 3 種ずつ次の順序で 3 池の濾過池に入れて濾過，洗浄の操作を繰返し，その間にいろいろ測定を行なった。

ⓐ 有効径 0.45 mm，均等係数 1.6，1.4，1.2，の 3 種類
ⓑ 有効径 0.55 mm，均等係数 1.6，1.4，1.2，の 3 種類
ⓒ 有効径 0.80 mm，均等係数 1.6，1.4，1.2，の 3 種類
ⓓ 有効径 0.45 mm，0.55 mm，0.80 mm，均等係数 1.2 の 3 種類

おのおのの試験期間は濾過砂の成層化にいたるまでの時間が異なるので一定していない。

濾過条件は砂面上水深 1.1 m，1.8 m，濾過速度 120 m/日，180 m/日の 4 種類の組み合わせとした。洗浄条件としては逆流洗浄速度については 60 cm/分，90 cm/分，120 cm/分とし，膨脹比を調査する実験にはこれ以外の逆流洗浄速度も採用した。また表面洗浄水量については回転式では 0.05 m³/m²/分，0.1 m³/m²/分，固定式では 0.1 m³/m²/分，0.2 m³/m²/分，を標準とし，必要に応じて種々変えてみた。

調査項目としては初期損失水頭，濾過持続時間，濾過損失水頭の測定，原水，未濾水，濾過水の水質試験，膨脹高，膨脹比，洗浄排水の汚泥量の時間変化，洗浄前後の砂層の汚泥量と過マンガン酸カリ消費量の測定等である。このうち原水，未濾水，濾過水の水質試験は 1 日 2 回定期的に行ない，原則として採水時刻を原水は 9 時 30 分，13 時 30 分，未濾水は 9 時 40 分，13 時 40 分，濾過水は 10 時 20 分，14 時 20 分と定め，採水時の気温はもちろん原水および濾過水については水温，pH，アルカリ度，酸度，塩素イオン（原水のみ）濁度，色度，過マンガン酸カリ消費量，未濾水については，水温，pH，アルカリ度，30 分沈澱後の濁度，色度の測定を行なった。また砂層深度別汚泥量および過マンガン酸カリ消費量の調査では洗浄前後の濾過砂をそれぞれ採取して 10 gr 当りの濾過砂を水洗した水によって行ない，調査深度は濾過池中央部において 0～1 cm，4～5 cm，9～10 cm，19～20 cm，29～30 cm，39～40 cm，49～50 cm，59～60 cm の 8 層とした。表面洗浄を併用した場合には中央部のほか隅部の洗浄が問題となるので対角線上の両隅の濾過砂をも採取して同様の調査を行なった。

〔5〕 砂層の空隙率の測定

砂層の空隙率は 3. および 4. の各章の膨脹高，膨脹比の計算および初期損失水頭の計算に必要とするものである。

砂層の空隙率測定法としては通常アメリカの標準試験方法である Jackson Turbidimeter Tube 法[2]を用いる。この方法は装置，操作とも比較的簡単であるが，濾過池に砂を搬入した直後の状態または成層時の状態における空隙率そのものが得られない。というのはガラス管を傾斜させた後直立させた場合には，濾過池内において 1～2 回の逆流洗浄を実施した場合とほぼ同様な条件になるようにも考えられるが，ガラス管を倒立し静止させた後，もとの状態にもどすため，濾過池内の砂層とは条件が異なるものとなるからである。また径 28 mm 程度のガラス管を使用するため周壁の影響をうけ濾過池内の砂層の空隙率そのものを表わさないことになる。そこで，内径 26.8 mm，管長約 80 cm のガラス管を用い，砂利層に相当する部分はグラスウールおよび網目の開き 250 μ の真鍮の金網を代用し，下部ゴム栓にガラス管を埋込み逆流洗浄できる構造とし，かつガラス管に接続するゴム管にピンチコックを取付け流量を調節した。このような装置により，砂層の成層状態における空隙率，不成層時における空隙率，不成層から成層に変化する場合の空隙率等を求めた。すなわち，不成層時には，数度逆流洗浄を実施してから濾過を開始するのが通例であるから，砂層にアーチ作用が働かずにゆるんだ状態の砂層の空隙率が，また成層時には，相当期間洗浄して逆流洗浄時に砂層の噴出（Sand Boil）が生じたり，一部不成層状態が入り込んだ状態の砂層の空隙率が実際の場合に最も近いものとして求めた空隙率が表-5 である。しかし，Rose[3]の研究によればこの種の実験で

$D/d < 50$

ただし　　D：管径，　d：粒状物の径

表-5　実際池の状態に最も近いと推定される空隙率

有効径 ＼ 均等係数	不成層			成層		
	1.6	1.4	1.2	1.6	1.4	1.2
0.45	0.480	0.486	0.499	0.512	0.510	0.508
0.55	0.485	0.488	0.499	0.515	0.512	0.512
0.80	0.480	0.484	0.499	0.517	0.513	0.513

表-6　空隙率の採用値（f）

有効径＼均等係数	不成層 1.6	不成層 1.4	不成層 1.2	成層 1.6	成層 1.4	成層 1.2
0.45	0.480	0.486	0.490	0.512	0.510	0.508
0.55	0.485	0.488	0.490	0.515	0.512	0.512
0.80	0.476	0.482	0.489	0.513	0.511	0.511

の場合は周壁による影響を大きくうけることがわかったので，原砂を 0.297～0.590 mm，0.590～1.190 mm，1.190～2.000 mm の3種に篩分け，ガラス管も前記の実験で使用した内径 26.8 mm のもののほか 19.5 mm，39.6 mm，51.6 mm の4本を用いて，Jackson Turbidimeter Tube 法により周壁の影響を求め，最小二乗法により補正した各砂層の空隙率は 表-6 に示すとおりである。この実験から，不成層時と成層時の空隙率には2～3％程度の差異があることと，不成層時には均等係数が小なるほど空隙率は増加するが，成層時にはまったく逆になることが判明した。

3.　粒度と洗浄効果

〔1〕 粒度と膨脹

濾過砂を濾過池内に搬入した当初は，細粗の砂粒の混合したいわゆる不成層（Unstratified Filter Bed）の状態にあるが逆流洗浄回数の増加にともない，成層（Stratified Filter Bed）の状態に近づいてくる。これは逆流洗浄による砂層の膨脹によって砂粒が上下に移動するためである。また洗浄効果についても，適当な砂層の膨脹によって砂粒間の衝突等による摩擦抵抗を十分に与えて砂粒とそれに付着した汚泥とを分離し，汚泥のみを洗浄排水トラフより排出させるに必要な砂層の膨脹高を与え

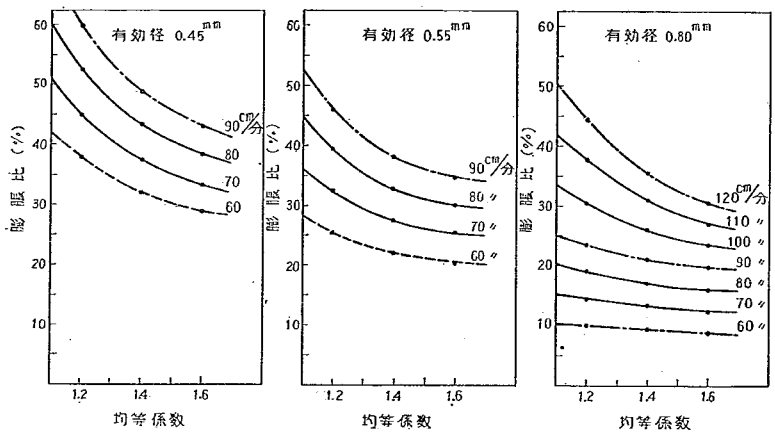


図-3　低水温時における膨脹比，洗浄速度および粒径との関係（有効径別）

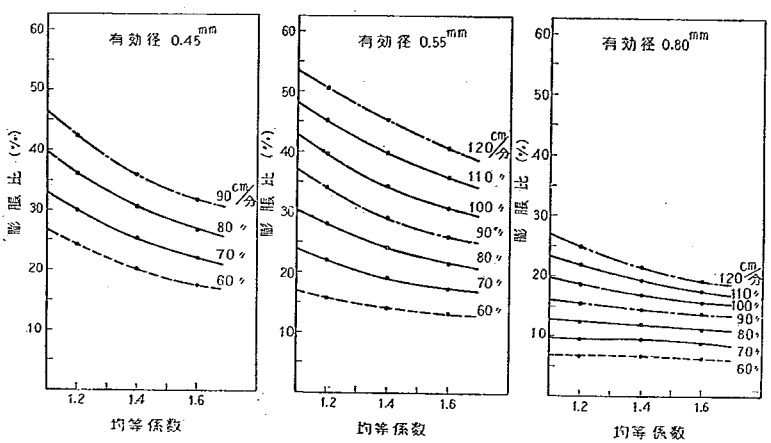


図-4　高水温時における膨脹比，洗浄速度および粒径との関係（均等係数別）

なければならない。最も良好な洗浄効果を得るに必要な膨脹比*は Riddick[4] によれば 30～50％，Baylis[5] によれば 20～30％が適当であるといわれているが，この値は砂層の粒度，水の粘性，逆流洗浄速度などによって大きな差異を生ずるから，これらの要素間の影響を明確にし，濾過池の設計と運営にはそれらの要素を加味した膨脹比だけでなく，洗浄効果を上げるに必要な逆流洗浄速度の最適値を求める必要がある。砂粒の膨脹に関する実験はこのために行なったものである。9種類の砂層と逆流洗浄速度，膨脹比との関係は図-3（低水温時），図-4（高水温時）に示すとおりである。

膨脹高，膨脹比は同一粒度の砂層に対し逆流洗浄速度に比例して大となる。また同一逆流洗浄速度に対しては有効径が小なるほど大となり，その増加率は有効径の小なるほど著しく大となる。同様に同一逆流洗浄速度に対しては均等係数が小なるほど大となるが，この傾向は有効径が小なるほど顕著である。したがって膨脹高，膨脹比を一定に保つよう逆流洗浄速度を選択する場合には，粒度が小なるほど逆流洗浄速度を小とすることができる。水温の変動による膨脹高，膨脹比の相違は図-3，図-4からわかるように非常に大きい。これは水の粘性が大きく影響することを示すものである。

とにかく，砂層の膨脹は水温と逆流洗浄速度に大きく影響をうけるのである。

砂層の膨脹に関する実験式としては Fair 式[6] がある。Fair式は逆流洗浄時の砂層高と静止時の砂層高の比を膨脹時と静止時の砂層の空隙率の関数として表わしたものである。

$$L_e/L=(1-f)\int_{p=0}^{p=1}dp/(1-f_e) \quad \cdots\cdots(1)$$

ここに，L_e：膨脹時の砂層高（cm）

L：静止時の砂層高（cm）

f_e：膨脹時の空隙率

f：静止時の空隙率

p：ある大きさの砂粒の割合

(1)式の f_e は逆流洗浄速度（V）と砂粒の沈降速度（V_s）の関数で，(2)式で表わされる。

$$\phi(f_e)=(V_s/V)^2 \quad \cdots\cdots(2)$$

(2)式について Fair は砂粒の大きさが均一な場合についての実験から(3)式を与えている。

$$\left.\begin{aligned}(V_s/V)^2&=(1/f_e)^9\\ f_e&=(V/V_s)^{0.22}\end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots(3)$$

しかし実際の砂層の場合は，不均一な砂粒の混合状態にあるから(3)式は適用できず，Fair は

$$f_e<(V/V_s)^{0.22}$$

となると称している。しかし砂粒は数多くの篩によって分けられているので，相隣れる篩目の間の砂粒の大きさを篩目の大きさの幾何平均値に等しい均一なものと仮定すれば(3)式を適用させうる。(3)式のうち砂粒の沈降速度（V_s）の算定については一般にレイノルズ数が1より大きくなるため Stokes の式は適用できず，(4)式によらなければならない。

$$V_s=\sqrt{\frac{4}{3}\cdot\frac{d}{C_D}\cdot\frac{\rho_s-\rho}{\rho}g} \quad \cdots\cdots(4)$$

ここに，d：粒径

C_D：抵抗係数

$$C_D=\frac{24}{R}+\frac{3}{\sqrt{R}}+0.34$$

（R＝レイノルズ数）

ρ_s：砂粒の密度

ρ：水の密度

g：重力の加速度

しかし(4)式は R, C_D, V_s を試算法により求めなければならないので，V_s の近似値を鶴見公式[7] によって求めることとした。この場合(4)式と鶴見公式との差異は数値で最大 1.2 cm/秒，比率で7％以下である。そこで，水温が0～30°C，砂粒の径が 0.021～0.250 cm の範囲にあるものとすれば，レイノルズ数は10～500となり，したがってこの場合適用できる鶴見公式は(5)式に示すとおりとなる。

$$\left.\begin{aligned}R=3.5\sim300\text{ の場合}\quad V_{s1}&=171.5\left(\frac{\nu_{25}}{\nu_t}\right)^{0.333}d\\ R=300\sim3,200\text{ の場合}\quad V_{s2}&=81.4\left(\frac{\nu_{25}}{\nu_t}\right)^{0.111}d^{0.667}\end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots(5)$$

ここに，ν_{25}：25°Cの水の動粘性係数

ν_t：t°Cの水の動粘性係数

(1)，(3)，(5)式を用い，f は表-6，d は表-3 の幾何平均値，水温は実験期間の平均値とし，逆流洗浄速度 60 cm/分，90 cm/分，120 cm/分（有効径 0.80 mm のみ）の膨脹比を求め，実験結果と比較すると 表-7 に示すとおりとなる。表-7 からみると Fair 式による計算結果は低水温時においては実験値を下回わり，高水温時においては実験値を上回わる傾向がみられる。

このほか砂層の膨脹を表わす実験式に Hazen 式がある。しかし，この式は砂粒の粒度を有効径のみで表わしているので，酒井[8] は均等係数に関する補正項を Hazen 式に入れ，自己の実験から最小二乗法により(6)式を与えている。

$$X=\left\{\frac{V}{0.0114(d^{3/2})(9t+310)}-16.7\right\}\times\left\{\frac{1.80}{U^{1.45}}\right\} \quad \cdots\cdots(6)$$

酒井は(6)式により本実験値の比較を行なっているが，この式の精度も 表-7 の数値とほとんど差異はないようである。ただ Fair 式を使用した場合には空隙率の定め方が問題である。実験値では砂層の膨脹比は成層時，不成層時にかかわりなく同じ値であるが，Fair 式を使用する

＊ 膨脹比＝膨脹高÷砂層の厚さ×100(%)

表-7　Fair 式を使用した場合の誤差範囲

有効径 (mm)	均等係数	逆流洗浄速度 (cm/分)	水温 (°C)	膨脹比 (%) 実験値 (a)	膨脹比 (%) Fair式 (b)	(a)/(b)	備考
0.45	1.2	60	8.6	38.0	34.3	1.11	低水温時
		90	9.6	59.9	59.4	1.01	
	1.4	60	8.6	32.0	28.4	1.13	
		90	9.6	49.0	50.9	0.96	
	1.6	60	8.6	29.0	24.0	1.20	
		90	9.6	43.2	44.4	0.97	
0.55	1.2	60	6.9	25.5	24.4	1.05	
		90	7.9	46.0	45.4	1.01	
	1.4	60	6.9	22.0	19.5	1.13	
		90	7.9	38.0	38.1	1.00	
	1.6	60	6.9	20.3	15.9	1.28	
		90	7.9	34.7	32.8	1.06	
0.80	1.2	60	8.4	10.5	10.5	1.00	
		90	7.7	23.5	25.1	0.94	
		120	9.2	44.5	39.3	1.13	
	1.4	60	8.4	9.3	6.6	1.41	
		90	7.7	21.2	20.2	1.05	
		120	9.2	35.4	33.0	1.07	
	1.6	60	8.4	8.8	4.6	1.91	
		90	7.7	19.8	17.8	1.11	
		120	9.2	30.6	29.5	1.04	
0.45	1.2	60	21.6	24.2	28.9	0.84	高水温時
		90	25.8	42.5	49.6	0.86	
	1.4	60	21.6	20.2	23.0	0.88	
		90	25.8	35.8	42.1	0.85	
	1.6	60	21.6	17.5	19.1	0.92	
		90	25.8	31.6	36.6	0.86	
0.55	1.2	60	17.7	15.8	20.5	0.77	
		90	18.5	34.2	38.1	0.90	
	1.4	60	17.7	14.2	16.1	0.88	
		90	18.5	29.2	31.7	0.92	
	1.6	60	17.7	13.3	11.0	1.21	
		90	18.5	26.2	27.0	0.97	
0.80	1.2	60	22.8	6.7	6.6	1.02	
		90	24.5	15.5	19.8	0.78	
		120	23.8	24.9	32.5	0.77	
	1.4	60	22.8	6.7	4.1	1.63	
		90	24.5	14.5	16.3	0.89	
		120	23.8	21.6	27.6	0.78	
	1.6	60	22.8	6.3	2.2	2.86	
		90	24.5	13.7	13.9	0.99	
		120	23.8	19.2	25.1	0.76	

場合，成層，不成層によって空隙率が異なるにもかかわらず，いかなる場合でも不成層時の空隙率を使用することは妥当でない。この点，酒井の Hazen 補正式が使いやすいと考えられる。

〔2〕 粒度と洗浄水量

逆流洗浄時に排出される汚水中の汚泥量は濾過持続時間，粒度および逆流洗浄速度によって異なるものとなる。すなわち濾過持続時間が大となればなるほど，一般に砂層深部にも汚泥が累積するので逆流洗浄によって排出される汚泥量は増加する。有効径が大なる砂層ほど表

表-8　砂層の圧縮率平均値

有効径 (mm) ＼ 均等係数 ／ 逆流洗浄前後別	砂層深度の変化 (cm) 1.2	1.4	1.6	砂層圧縮率(%) 1.2	1.4	1.6
0.45	逆流洗浄後 62.3	62.6	63.0	4.3	3.7	3.5
	逆流洗浄前 59.6	60.3	60.8			
0.55	逆流洗浄後 61.3	60.9	60.8	3.3	3.0	2.6
	逆流洗浄前 59.3	59.1	59.2			
0.80	逆流洗浄後 60.5	60.1	60.1	1.5	1.0	0.7
	逆流洗浄前 59.6	59.5	59.7			

-8 に示すように濾過による砂層の圧縮が少ないから洗浄開始当初より汚泥の排出が容易に行なわれるが，有効径の小なる砂層では濾過による砂層の圧縮が大きく砂層内部に抑留された汚泥が粉砕されるまでは，逆流洗浄水はほとんど清澄なまま排出される。したがって砂層の有効径の大小によって洗浄排水汚泥量の最大値に達するまでの時間も，洗浄終了時間も変化することになる。

有効径の相違による洗浄排水汚泥量の時間変化は図-5～10 に示すように有効径の大なる砂層は同一濾過速度において濾過持続時間が 60% 以上も増加するにもかかわらず，最大値に達するまでの時間が早く，各時間に排出される汚泥量も非常に大であるため，洗浄開始 4 分後に排出される汚泥量は似た数値を示すことになる。この最大値に達するまでの時間は，大体において有効径 0.45 mm では 50 秒，0.55 mm では 45 秒，0.80 mm では 25 秒となり，有効径 0.80 mm では有効径 0.45 mm の 1/2 となる。また洗浄排水汚泥量は時間経過とともに減小を始めるが，曲線の形は双曲線に近いもので，洗浄の

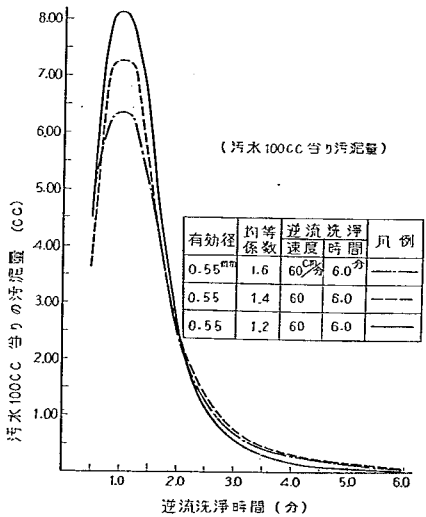


図-5　逆流洗浄時における洗浄排水の時間的変化

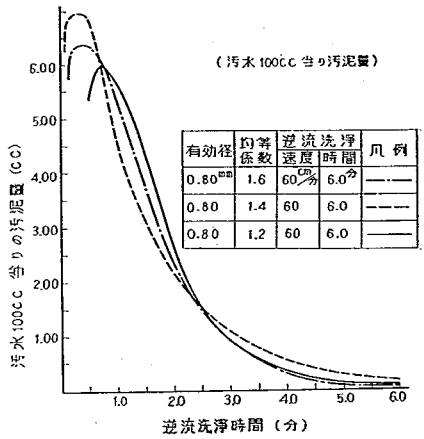


図-6　逆流洗浄時における洗浄排水の時間的変化

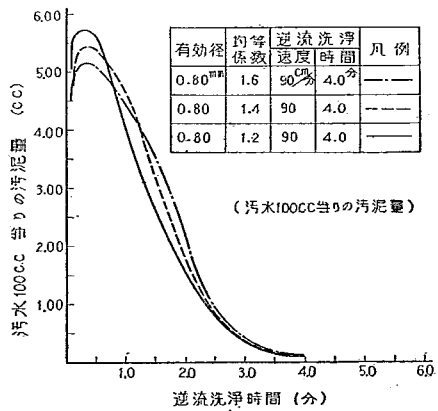


図-7　逆流洗浄時における洗浄排水の時間的変化

終了を排水濁度で 10 度，または排水 1 l 当りの汚泥量を 1 ml 以下とするならば，逆流洗浄速度 90 cm/分 の場合の洗浄時間は，有効径 0.45 mm で 3.2 分，有効径 0.55 mm で 3.5 分，有効径 0.80 mm で 4.5 分となり，洗浄水量はそれぞれ 2.88 m³, 3.15 m³, 4.05 m³ となる。とくに有効径 0.80 mm の場合，洗浄時間を延長しなければならないのは，濾過持続時間の増加によって抑留汚泥量が多いことと，逆流洗浄速度が粒度に比して小なることに原因がある。逆流洗浄速度が過小なる場合は汚泥排出が非常に遅れることは，図-6～図-8 に示すとおりである。これは有効径 0.80 mm の 3 種類の濾過砂で，逆流洗浄速度を 60 cm/分，90 cm/分，120 cm/分 とした場合を比較したものであるが，逆流洗浄速度が大なるほど汚泥量の減小率は大となる。それで洗浄時間も逆流

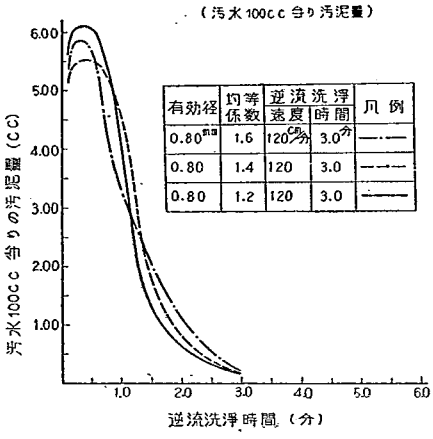


図-8　逆流洗浄時における洗浄排水の時間的変化

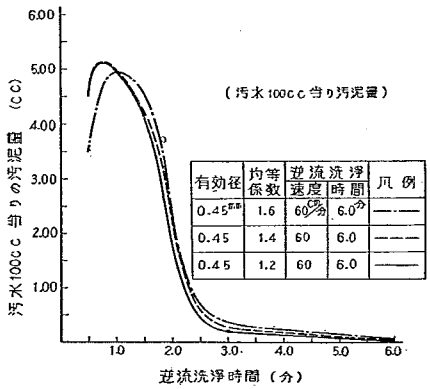


図-9　逆流洗浄時における洗浄排水の時間的変化

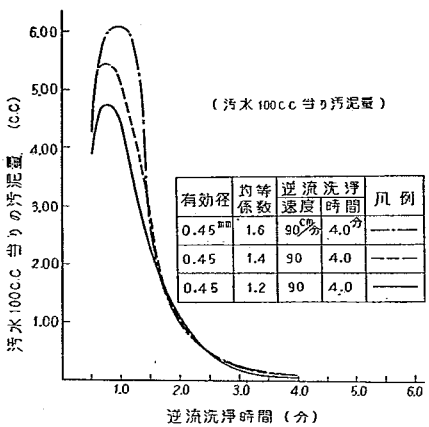


図-10　逆流洗浄時における洗浄排水の時間的変化

洗浄速度を 30 cm/分 増加するごとに 30～45 秒程度減小させうることができ，逆流洗浄速度が大なるほど洗浄水量も減小させうることになる。しかし逆流洗浄速度があまり過大となる場合にはその効果は減退する。図-9～図-10 は有効径 0.45 mm で逆流洗浄速度を 60 cm/分と 90 cm/分 とした場合で，洗浄水量を双方とも 5.18 m³（単位濾過面積当り 3.6 m³）として比較したものであるが，この場合，逆流洗浄速度 60 cm/分 では洗浄時間 6 分，90 cm/分 では 4 分となるが，図に示したように，逆流洗浄速度 60 cm/分 では洗浄時間は 5 分間で十分であり，90 cm/分 では 3.5 分でよいから，逆流洗浄速度 90 cm/分 の方が 0.22 m³（単位濾過面積当り 0.15 m³）多く必要とし，結局逆流洗浄速度 60 cm/分 の方が有利となる。

均等係数の相違による洗浄時間は前掲の 図-5～図-10 からみると，均等係数が小なるほど汚泥排出が早くなる傾向がある。均等係数が小なるほど，表-7 に示したように，濾過によって生ずる汚泥の圧密度が大となるが，〔1〕で述べたように同一逆流洗浄速度の場合には膨脹比が大となるため，一般に洗浄排水汚泥量の最大値到達時間も早く，また次章のように均等係数の小なるほど濾過持続時間が増加するにもかかわらず，汚泥の排出は迅速に終了し，洗浄に関しても有利となる。

〔3〕 粒度と砂層の汚染度

（i） 濾過による砂層の汚染

濾過終了時において砂層内に抑留された汚泥の分布状態は砂層の有効径，均等係数によって異なるものとなる。表層部における汚泥の抑留は有効径の小なるほど，逆流洗浄の回数が増加するほどはなはだしいものとなる。砂層は逆流洗浄回数の増加に伴い成層化され，その空隙は増加していく傾向にあるが，表層部には微細な砂粒が集積してくるので濾過は表層部の閉塞のみで終了して，砂層の汚染は表層部のみに限られることになる。このような場合には濾過水水質は良好となるが，濾過持続時間は短縮されることになる。濾過持続時間を増加させ，しかも濾過水水質の低下を防止するためには，砂層全体を利用してフロックを抑留させることが必要で，このためには有効径の小なる砂層の使用は不利となる。濾過に支障を与える微細な砂粒は有効径の小なるほど当然多くなるが，このような砂粒は逆流洗浄によって流出したり，また泥球の中核となるため，濾過持続時間に与える影響は次第に少なくなってくるが，そのようになっても有効径の小なる砂層の表層面での負荷はなかなか減少しない。

濾過持続時間はフロックの形成状況とその沈澱状況によっても非常に異なる。これは濾過池内に流入するフロックの量とその大きさが関係する。濾過前処理が良好で，生成されたフロックの大部分を沈澱池において除去してしまうならば，濾過池へ流入するフロックの量も少なく，また微細なものばかりであるため，表層部に微細砂粒が多く集積していても，濾過持続時間に与える影響は少ないものとなる。しかし沈澱作用が不良な場合，もしくは沈澱池を設置しない場合には濾過持続時間は極端に短縮されるが，このような場合には特に砂層の表層面の微細砂粒によってうける影響が増加する。

本実験の場合は凝集池でフロックを凝集させて沈澱池でそれを除去しないで濾過池に流入させた場合とアクセレータによって完全に濾過前処理をした場合について実験を試みた。この場合逆流洗浄速度を 90 cm/分，洗浄時間を 4 分として逆流洗浄前後の砂層の 100 ml 当りの汚

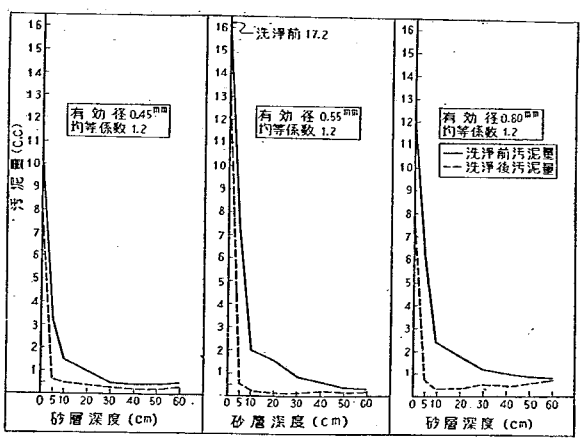


図-11　洗浄前後の砂層深度別汚泥量（沈澱池を取付けない場合）

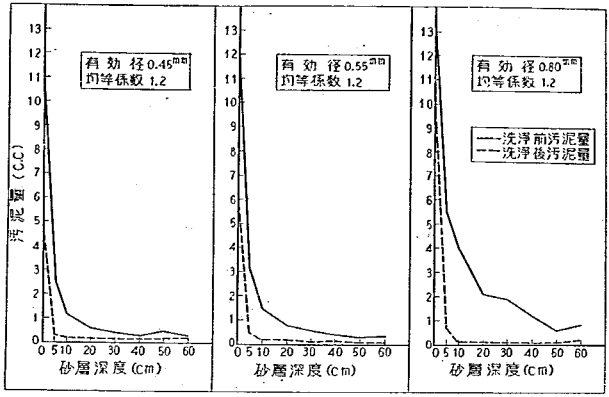


図-12　洗浄前後の砂層深度別汚泥量（前処理としてアクセレータ使用）

泥量を砂層の深度別に調べた実験結果の1例を示すと図-11，図-12のとおりである。濾過持続時間は後者の方が6～10倍も長くなっているが，砂層内に抑留された汚泥量にはあまり差異がない。これは砂層内の抑留汚泥量の限界は如何なる前処理の場合にもほぼ同じになることを示しており，濾過前処理が良好なほど濾過持続時間は大となる。また，いずれの場合においても有効径 0.45 mm および 0.55 mm の砂層は有効径 0.80 mm の砂層よりも汚泥の抑留量が少ない。とくに中層部以下の汚泥抑留量にその傾向が著しい。それゆえ同一濾過前処理の条件のもとでは濾過持続時間が大であれば砂層の中層部以下の汚泥抑留量が増加している。換言すれば有効径の小なる砂層の損失水頭は砂層全体に抑留された汚泥量の絶対値にかかわりなく，表層部における閉塞の影響によるものがほとんどをしめており，また表層部における損失水頭は圧縮率に比例すると考えられる。また砂層の汚泥抑留量は表層部においては有効径の大小にかかわらずほぼ同一であるが，中層部以下においては有効径の大小に関係し，ひいては濾過持続時間に影響を与える。均等係数の差異では均等係数の小なる方が微小砂粒量も少なく，濾過持続時間が増加し，濾過水水質も良好なので中層部以下の汚泥抑留量が多くなっている。

（ii）逆流洗浄による砂層の洗浄効果

逆流洗浄による汚泥の排出の状態は粒度，逆流洗浄速度および洗浄時間に影響される。前項の図-11，図-12には洗浄後の濾層内部の汚泥量の調査結果を図示したものであるが，この場合の洗浄除去率について図示するとそれぞれ図-13，図-14に示すとおりとなる。

均等係数が同一で有効径の異なる砂層では，砂層深度が10 cm 以下となると残留汚泥量は有効径の大小にかかわりなくほぼ同程度となっている。したがって有効径の大なる砂層の方が濾過後の抑留汚泥量が多い関係上，洗浄除去率についても優れた傾向を示している。有効径 0.80 mm がこのように良好な結果を得たのは砂層の圧密と密接な関係がある。

すなわち，フロックとして砂層内に侵入した汚泥の圧密は有効径の小なる砂層では非常に大であり，有効径の大なる砂層での圧密は表-8のように非常に少ないから膨脹比が 20% 程度でも深層部の汚泥は砂と分離されて

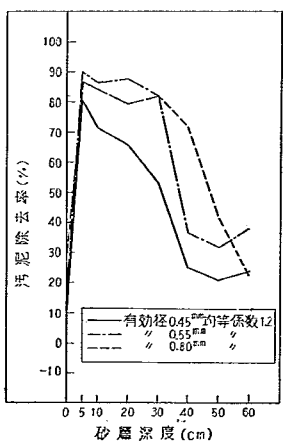


図-13　砂層深度別の汚泥量除去百分率量（図-11の場合）

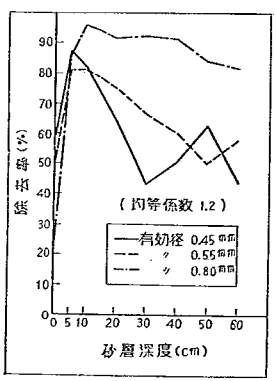


図-14　砂層深度別の汚泥除去百分率（図-12の場合）

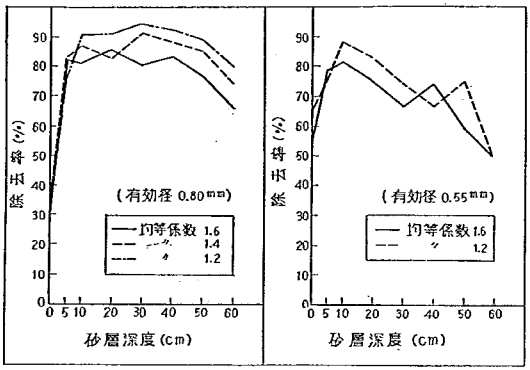


図-15A　砂層深度別汚泥量の除去百分率（アクセレータ使用の場合）

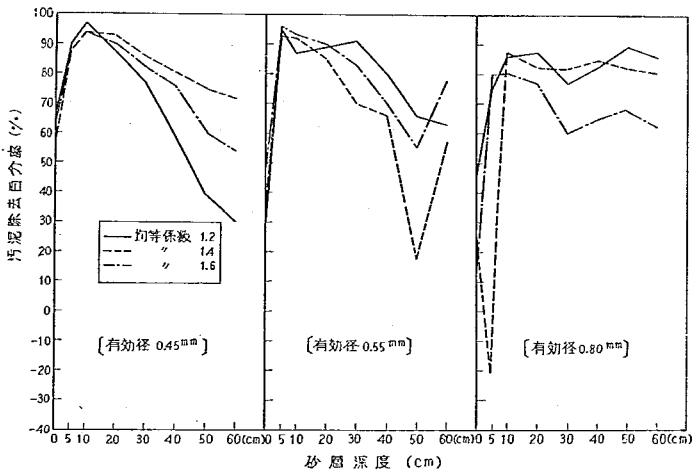


図-15B　砂層深度別汚泥量の除去百分率（沈澱池を設置しない場合）

上昇する。これに対し，有効径の小なる砂層の場合には膨脹比がそうとう大となっても，汚泥は砂粒と分離されにくく，したがって深層部での排出は有効径の大なる砂層とほとんど変わらないものとなった。しかし有効径の大なる砂層でも汚泥の残留の多い表層部での汚泥除去は逆流洗浄速度が小なるため不良で残留汚泥量は相当多くなっている。

均等係数の相違による洗浄除去率は同一逆流洗浄速度の場合には均等係数の小なる砂層が膨脹比が大なるため良好となるが，膨脹比が 60% にも達するような場合には洗浄効果は逆に低下する。

有効径の相違による洗浄除去率は 図-15 に示すように，有効径 0.45mm の場合は均等係数 1.2 では膨脹比が図-3 に示したように 59.9% と過大なるため，均等係数 1.4（膨脹比 49.0 %）よりも洗浄効果は低下してい

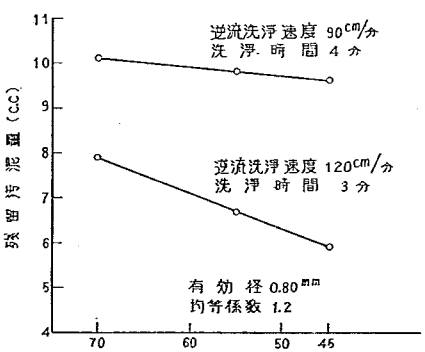


図-16　洗浄排水トラフの高さと残留汚泥量

る。また図-15 の有効径 0.80 mm で均等係数 1.4, 1.6 は膨脹比がそれぞれ 21.3%, 19.8% と非常に小さく，表層面の洗浄効果は低下している。とくに均等係数 1.6 では洗浄後に中層部以下の汚泥が表層部に集積したためか，洗浄前より増加して洗浄除去率が負となっている。これからみると，膨脹比が 20% 以下では十分な洗浄はできない。

残留汚泥量は洗浄排水トラフの高さとも密接な関係がある。図-11～15 は膨脹比の大小にかかわらず，洗浄排水トラフの高さを 70 cm と一定としたため，かなり粉砕されたものまでも排出されずに残留したようである。そこで逆流洗浄速度を変えて洗浄排水トラフの高さと表層部の残留汚泥量との関係を調査したものが図-16 である。すなわち，有効径 0.80 mm，均等係数 1.2 の砂層において逆流洗浄速度 90 cm/分，120 cm/分 として調査したものである。逆流洗浄速度 90 cm/分 とした場合には，洗浄排水トラフの高さを低くした割合いほどには残留汚泥量は減少しないが，逆流洗浄速度を 120 cm/分 とすれば，洗浄排水トラフの高さを低くするほど残留汚泥量は減小している。しかし洗浄排水トラフの高さが膨脹比に比べて低すぎる場合では表層部の汚泥の排出は良好となるが，微細砂のみならず，相当量の設計上必要な砂粒も流出してしまい，常時補砂しなければならない事態も生ずる。これに対して洗浄排水トラフが高すぎる場合には表層部の汚泥残留量が増加する。したがって砂層の粒度に適した逆流洗浄速度を定め，それから砂層の膨脹比に応じた洗浄排水トラフの位置を決めてこそ，砂層は清浄かつ安全に保たれることになる。

〔4〕 泥球の発生と発達

急速濾過池の洗浄方法として逆流洗浄のみを用いた場合，泥球の発生をみる。泥球の発生ならびに発達については多くの研究結果があるが，とくに大阪市水道局[9]のものは非常に詳細なものである。

表-9 泥球の発生状況

	均等係数	砂層深度 (cm) 1～15	16～30	31～45	46～60
形状	1.2	不整形塊状	球状 楕円球状	楕円球状	楕円球状
	1.4	不整形塊状	球状 楕円球状	楕円球状	楕円球状
	1.6	不整形塊状	球状 楕円球状	楕円球状	楕円球状
直径 (mm)	1.2	5～20	3～6	5～15	15～25
	1.4	5～20	3～8	7～20	15～30
	1.6	5～20	3～8	7～20	25～35
濾過砂 500 cc 当りの個数	1.2	13	33	17	11
	1.4	17	41	9	6
	1.6	20	53	10	2

本実験でも実験期間が短かかったにもかかわらず，有効径 0.45 mm，0.55 mm の砂層では泥球の発生が認められた。しかも泥球は深層部に至るほど径が大きくなっていて長径 12～20 mm，短径 5～10 mm で楕円球状，楕円盤状のものが多かった。有効径 0.45 mm の砂層における泥球の調査結果は表-9 に示すとおりである。本実験中の泥球は特に前期の実験，すなわちフロック形成池で生成したフロックを沈澱池で除去することなしに全量沪過した期間に多くみうけられた。これは砂層内の侵入汚泥量が多かったことと，成層化の進行にともない，微細砂粒が表層部に集積していたからである。

観測によると泥球の中核となる細砂の粒径はほぼ同じで直径 0.2～0.3 mm である。しかし泥球の表面には中核の砂粒より大きい砂粒が付着していたので，0.35 mm の篩に残留する程度の大きさの砂粒でも泥球の発生原因となりうる。

一般に泥球は表層部で不整塊状をなし大小のものが雑然として砂層内に混在していたが，砂層深度 16～30 mm では球状のものが多く，径も小さかった。砂層深度 30 cm 以下では楕円球状に変化し，その径も大きくなっているが，数的には深層部に至るほど減小している。この形状の変化は主として砂層の圧縮と関係があり，均等係数の小なる砂層ほど楕円球状への変化が早く，その偏平度も大きい。均等係数の大なる砂層では泥球が大きく，しかもその数は表層部と中層部に多く，深層部には一般に少ない。また均等係数の小なる砂層では一般に泥球は小さく，その数は深層部に多い。このような泥球の分布や大きさの変化は砂粒の粒度に対する逆流洗浄速度の適否，膨脹高と洗浄排水トラフの高さとの関係の良否，砂層の圧密の度合によって異なってくる。

逆流洗浄のみの場合は，砂層内部に抑留された汚泥をすべて取除くことができないので，汚泥が少こしずつ砂層内に累積されていく。これらの汚泥の大部分は逆流洗浄によって次第に表層部に集積されるが，表層部には微細砂粒が多く，膠状性の汚泥はこれらの微細砂粒を中核として結合し，逆流洗浄と濾過とによる砂層のゆるみと圧縮との繰り返しをうけて泥球に生長していく。泥球と普通の汚泥との区別は，汚泥は中核を有せず，比較的弱体で容積が増加しても比重はほとんど増加しなく，洗浄時に下層部に侵入することはない。これに対して泥球は濾過と逆流洗浄の繰り返しによって容積，比重とも増加していき，これが逆流洗浄時に深層部に侵入していく要因となる。

泥球は以上のように微細な砂粒が中核となって発生するが，微細砂粒が皆無に近い場合でも泥球は発生するようである。このことについて大阪市の実験[10]があるが，洗浄後の残留汚泥量が累積していく場合には，その汚泥は圧密されていくため，設計内の粒度のものでも泥球の

表-10　逆流洗浄速度の設計値

均等係数	膨脹比(%)	逆流洗浄速度 (cm/分) 0.45	0.55	0.65	0.80
1.6	20	65	76	88	123
	30	87	98	120	160
1.4	20	60	72	82	116
	30	79	92	113	150
1.2	20	57	67	77	104
	30	70	82	98	140

中核となりうる。それゆえ泥球の発生を最小限にとどめるには，微小砂粒を取り除くことも必要であるが，それ以上に洗浄後の残留汚泥量をなるべく減少させることが最も重要な課題である。

〔5〕 総　括

以上述べたごとく，急速濾過の洗浄効果を最大に発揮するには，膨脹高，膨脹比をある範囲内におかなければならない。この数値は低水温時と高水温時では大きな差異がある。ある与えられた粒度の砂層に対する逆流洗浄速度の適正値はもっとも条件の悪い高水温時において少なくとも20%以上の膨脹比が得られるものでなければならない。かくすれば同一逆流洗浄速度では低水温時には30% 以上の膨脹比が期待できる。逆流洗浄速度を大として膨脹比が過大となると砂粒間の摩擦が減少して，砂粒と汚泥との分離が十分に行なわれなくなるし，逆流洗浄速度を過小にすると膨脹比も小さくなり，砂粒間の摩擦の機会を少なくして汚泥の排出が困難となる。したがって逆流洗浄速度の適正値として設計には高水温時における膨脹比が 20~30% の範囲にあり，かつ低水温時には 50% 以内にとどまるよう定めるべきである。高水温時において膨脹比が 20% および30%となるような逆流洗浄速度の設計値は表-10 に示すとおりである。設計で 25% となるごとき逆流洗浄速度を採用すれば，低水温時には38%の膨脹比が得られる。低水温時には濾過前処理がどうしても完全に行なわれがたく，フロックの凝集沈澱状況も不良であるから，フロックの濾過池への流入は多くなるが，膨脹比が大となって汚泥の排出が円滑に行なわれるので，かえって好都合になる。また粒度の大なる砂層では，小なるものに比べ濾過による圧密の度が少なく，洗浄効果もよいから，逆流洗浄速度の設計値をやや小さ目にしてもさしつかえない。

洗浄時間は逆流洗浄速度の決定によって，自から決定される。洗浄終了時間は前に述べたような洗浄排水濁度 10 度，または洗浄排水 1l 当りの汚泥量を 1 ml 以下とすればさしつかえない。この場合逆流洗浄速度が大なれば洗浄時間も短縮されるが，前に述べたように一定の範囲があるので，表-9の結果を用いた場合，洗浄時間は有効径 0.45 mm，0.55 mm の場合は 4 ~ 5 分，有効径 0.80 mm の場合は 3 ~ 4 分で十分である。

4.　粒度と濾過効果

〔1〕 均等係数の異なる場合

（i） 初期損失水頭

細粗の砂粒がまったく混合された不成層の状態では砂層内の初期損失水頭は理論的には砂層の深さに比例して増加する。しかし逆流洗浄を 1 度でも行なえば，砂層内各層の空隙率は変化してしまうし，逆流洗浄によって砂層内に抑留された汚泥の全部を取除くことはできないから，どうしても初期損失水頭は変化する。同一有効径で3種の均等係数の初期損失水頭の変化は図-17 に示すとおりである。初期損失水頭は有効径が小なる砂層ほど大となり，かつその変化も著しい。均等係数の相違による初期損失水頭の差は有効径 0.45 mm で 6.5 ~16cm，有効径 0.55 mm で3.5~7.5 cm，有効径 0.80 mm で 2.0~3.5 cm である。

不成層の状態，すなわち細粗の砂粒がまったく混合しているときは，均等係数が大なるほど空隙率は小であるから，初期損失水頭は大となる。しかし逆流洗浄を行なって成層化されて来て砂層の空隙率も変化するから初期損失水頭も変る。この変化は均等係数の小なる砂層の方が少ないが，それでも本実験においては均等係数 1.2 で有効径 0.45 mm の砂層では 3 ~ 4 cm 程度の差異が認

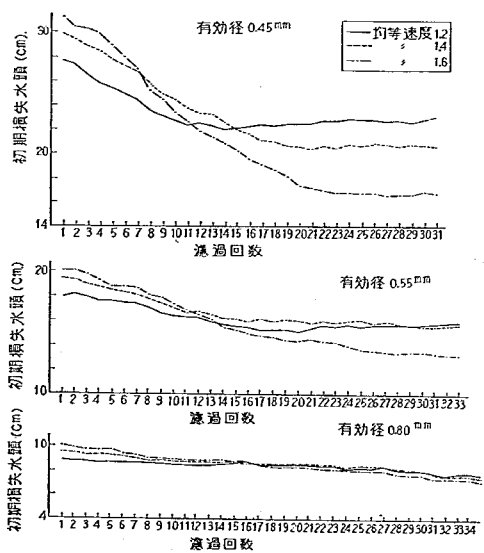


図-17　初期損失水頭（砂面下 560 mm のもの）

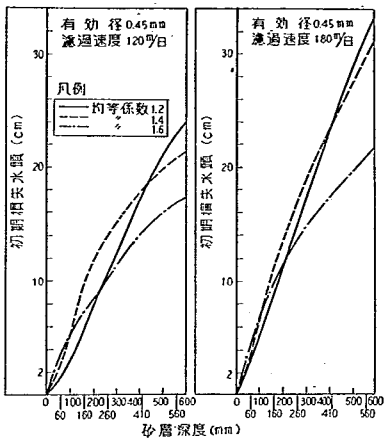


図-18　初期損失水頭

められた。

均等係数1.2の砂層の初期損失水頭の一般的傾向は，不成層からやや成層されるまでは初期損失水頭は漸減するが，そのうちに表層部に汚泥が集積してくるので，やや増加してくる。均等係数1.4の砂層の初期損失水頭は不成層からやや成層化されるまでは漸減するが，その割合は 1.2 の場合よりもやや大きく，また減小期間も長い。均等係数1.6の砂層では不成層時に初期損失水頭は最大値を示すが，逆流洗浄回数を重ねるにつれて極度に減少し，しかもその減少期間は長い。しかし均等係数 1.4 と 1.6 の砂層は表層部に汚泥が集積すると初期損失水頭の減少割合もにぶってくる。

砂層内部の初期損失水頭の変化は当初はほぼ直線に近いものであったが，時間の経過とともに表層部に細砂が，深層部には粗砂が集積してくるので，一般に表層部付近は急コウ配に，深層部は緩コウ配で変化していく。この傾向は均等係数の大なる砂層ほど著しい。図-18は有効径 0.45mm，均等係数 1.6，1.4，1.2について同時に濾過を開始したときの砂層深度別の初期損失水頭を図示したものである。逆流洗浄速度は 90cm/分とし，濾過回数 25 回目の初期損失水頭で，成層化が相当進んでいるので，均等係数 1.2 の砂層では表層部から深層部の初期損失水頭は均等係数1.4および1.6の砂層におけるものよりもほぼ直線的に増加しているが，均等係数1.4および1.6の砂層では表層部の損失水頭が深層部より大であるため曲線となっている。濾過速度を 120m/日と180m/日として比較をしたが，傾向としてはほぼ同じであり，各測点間の損失水頭が増加している。

均等係数の相違による初期損失水頭は，表層部では均等係数1.4および1.6の砂層においては初期損失水頭は大となっているが，深層部では均等係数1.2が大となる傾向を示し，全体としては均等係数1.2の砂層がもっとも大となり，1.4 の砂層はこれにつぐ。有効径 0.55mm と 0.80mm の砂層でも有効径 0.45mm と同様な傾向を示すが，有効径 0.45mm の砂層に比して各層の損失水頭は減少している。とくに有効径 0.80mm の砂層では均等係数の相違による初期損失水頭の差はあまり明瞭でない。

初期損失水頭は砂層が不成層の場合と成層の場合とでは，その値を異にすることは本実験でも確められたが，砂層が不成層の場合には一般に初期損失水頭が大で，均等係数が大なるほど著しい。しかし成層化が進んでくると，初期損失水頭は減少し，その減少率は均等係数が大なるほど高い。そのため均等係数が1に近い砂層と2に近い砂層とを比較した場合，初めは2に近い砂層の方が初期損失水頭が大となるが，成層化が進むにつれてこの順序は逆となる。均等係数が1に近い砂層は不成層，成層にかかわらず表層部から深層部にいたるまでの

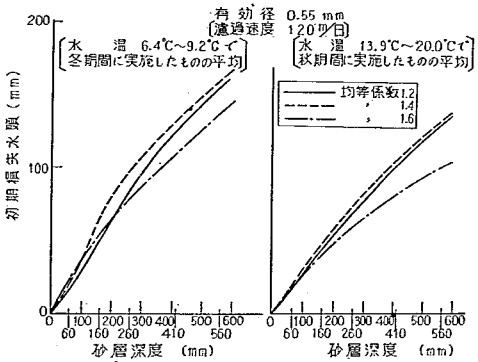


図-19　初期損失水頭

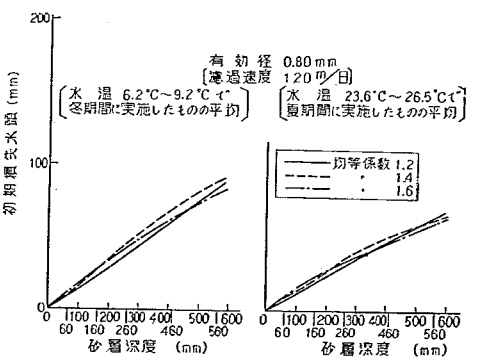


図-20　初期損失水頭

初期損失水頭はほぼ直線的に増加していくのに対して，均等係数が2に近い砂層では直線的から1/2乗に近い変化を示す。

初期損失水頭は水温によっても影響をうける。これは水の粘性によるものであるが，水の粘性は水温の増加に伴い急激に減少するから，砂層の初期損失水頭は動粘性係数に比例して減少することになる。図-19，図-20は有効径 0.55 mm および 0.80 mm について冬期と夏期の実験結果を比較したものであるが，高水温時には初期損失水頭の減少が著しく，この減少率は有効径の小なるものほど大きくなっている。

急速濾過の損失水頭に関しては，Hazen[11]，Miller[12]，Hulbert と Feben[13]，Fair と Hatch[14] の共同研究のほか，現在よく使用されている Fair の研究[15] がある。また一般の流体に関しては Hatch[16] および Rose[17][18][19][20] の詳細な研究がある。Fair の研究は過去の Fair と Hatch の共同研究と Rose の一般流体の損失水頭の研究から砂層の損失水頭に関する実験式を与えている。Fair は損失水頭と砂層厚との比を

$$(h/\ell)=\phi\left\{\left(\frac{vd}{\nu}\right)\left(\frac{v^2}{gd}\right)(f)\right\} \quad \cdots\cdots(7)$$

ここに，　h：損失水頭

ℓ：砂層厚

v：砂層を流下する流速

d：砂層の特性を表わす径$=(6V/A)$

V：容積，A：体積

ν：動粘性係数

g：重力の加速度

f：空隙率

さらに Rose の粒度をそろえた平滑な球状粒子からなる濾層における実験によって

$$\left(\frac{h}{\ell}\right)\propto\left(\frac{v^2}{gd}\right),\quad \left(\frac{h}{\ell}\right)\propto\left(\frac{1}{f^4}\right)$$

が成立し，また (vd/ν) はレイノルズ数の関数たる抵抗係数 C_D を使用し，C_D の 1.067 倍に等しくなるとしている。また粒子の空隙率としては Kozeny が提案し，1933年の Fair と Hatch の共同研究において使用してきた $(1-f)^2/f^3$ の代りに $1/f^4$ を使用している。これは前記の Rose の研究によって $(h/\ell)\propto 1/f^4$ となるからで数値としては $(1-f)^2/f^3$ の7倍位になるとしている。d の表わし方としてはやはり Kozeny の平均直径の考え方，すなわち篩目 d_1 と d_2 との間の幾何平均径をとって

$$d=\sqrt{d_1\cdot d_2} \quad \cdots\cdots(8)$$

を使用している。それゆえ(7)式は(8)式のように改められる。

$$\frac{h}{\ell}=1.067\frac{C_D}{g}\cdot\frac{1}{f^4}\cdot\frac{v^2}{d}$$

$$=0.178\frac{C_D}{g}\cdot\frac{v^2}{f^4}\cdot\frac{A}{V} \quad \cdots\cdots(8)'$$

A/V の数値としては 1933 年の研究での

$$\frac{A}{V}=\frac{S}{d} \quad \cdots\cdots(9)$$

を(10)式に改め，α/β は砂粒の形状によって表-11[21] を与えている。

$$\frac{A}{V}=\frac{\alpha}{\beta}\cdot\frac{1}{d} \quad \cdots\cdots(10)$$

不成層の場合の A/V は砂層内全層にわたって砂粒が均一に分布しているものとすると，(11)式で表わされる。

$$A/V=(\alpha/\beta)\int_{p=0}^{p=1}\frac{dp}{d} \quad \cdots\cdots(11)$$

ここに，　dp：粒径 d なる砂粒の分布割合

したがって篩分百分率によって砂粒の分布構成量 p がわかっている場合は(11)式は(11)′式で表わされる。

$$A/V=(\alpha/\beta)\,\Sigma\, p/d \quad \cdots\cdots(11)'$$

(8)式は(12)式に改められる。

$$\frac{h}{\ell}=0.178\frac{C_D}{g}\cdot\frac{v^2}{f^4}\left\{\left(\frac{\alpha}{\beta}\right)\Sigma\frac{p}{d}\right\} \quad \cdots\cdots(12)$$

表-11　砂粒の形状係数

砂粒の形態	β	α/β	φ
圭角に富むもの	0.64	6.9	0.81
尖鋭なもの	0.77	6.2	0.85
すりへったもの	0.86	5.7	0.89
丸味をおびたもの	0.91	5.5	0.91
球体	0.52	6.0	1.00

$\varphi=A_0/A=\pi d_0^2/\alpha d^2$

d_0：等容積の球体の直径

A_0：上記の表面積

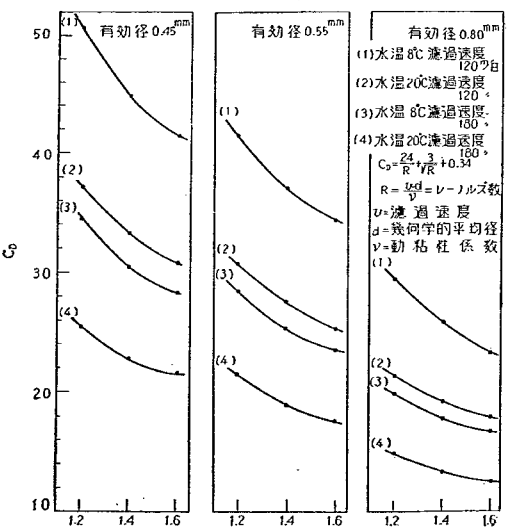


図-21　有効径別の抵抗係数 C_D（不成層の場合）

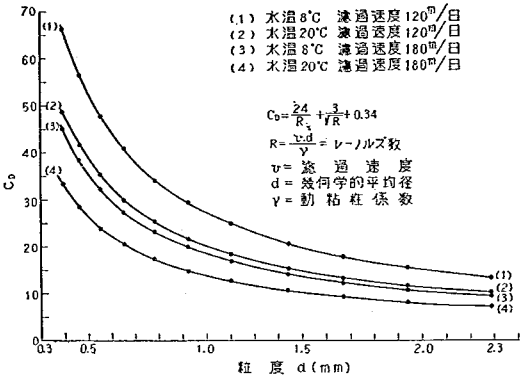


図-22　粒径と抵抗係数 C_D（成層の場合）

成層時には上層の小さい砂粒の層から下方に順次大きな砂粒の層と同一径の砂粒が別々の層を形成するものと仮定する。それぞれの層の空隙率は均一であるとすると $d\ell = \ell\, dp$ となるから

$$\frac{dh}{d\ell}=0.178\frac{C_D}{g}\cdot\frac{v^2}{f^4}\cdot\frac{A}{V}=k\cdot C_D\cdot\frac{\alpha}{\beta}\frac{1}{d}$$

ここに，　k：常数

総損失水頭 h は(13)式で表わされる。

$$h=\int_0^h dh=k\left(\frac{\alpha}{\beta}\right)\int_0^h C_D\frac{d\ell}{d}$$

$$=k\left(\frac{\alpha}{\beta}\right)\ell\int_{p=0}^{p=1}C_D\frac{dp}{d}\quad\cdots\cdots(13)$$

相隣れる篩目間の粒子は大きさが均一と仮定すれば

$$\frac{h}{\ell}=k\left(\frac{\alpha}{\beta}\right)\Sigma C_D\frac{p}{d}$$

となり，均一な砂粒の濾層に対しては表面積-体積比と抵抗係数との積は砂層全体について

$$C_D'\frac{A'}{V'}=\left(\frac{\alpha}{\beta}\right)\Sigma C_D\frac{p}{d}$$

で表わされる。したがって(8)式は(14)式に改められる。

$$\frac{h}{\ell}=\frac{0.178}{g}\cdot\frac{v^2}{f^4}\cdot C_D'\frac{A'}{V'}$$

$$=\frac{0.178}{g}\cdot\frac{v^2}{f^4}\left\{\frac{\beta}{\alpha}\Sigma C_D\frac{p}{d}\right\}\quad\cdots\cdots(14)$$

本実験の場合，濾過砂を搬入後，相当の期間にわたって実験を継続したので，砂層は不成層から成層に変化している。それで不成層，成層の両者の状態について計算することにする。不成層時には大小の砂粒が表層部から深層部に至るまで，均一に混合されているものとすると有効径別の抵抗係数 C_D は図-21のとおりとなる。また成層時には表層部から深層部へ小砂粒から大砂粒とそれぞれ均一粒径の層をなしているものと仮定すれば，砂粒の粒径と抵抗係数 C_D との関係は図-22のとおりとなるから本実験についての有効径別の抵抗係数 C_D と（篩分百分率/幾何平均径）との積の総和は図-23となる。形状係数 α/β については表-10のうち主角に富む場合として 6.9 をとり，水温 8°C および 20°C，濾過速度 120 m/日および 180 m/日について，(12)，(14)式により初期損失水頭を計算し，本実験結果と比較すると図-24～図-27に示すとおりとなる。これよりみると，有効径 0.45 mm は比較的合致しているが，有効径の大なるほど，また均等係数の大なるほど両者間の差異は大きい。

一般に実測値が計算値を上廻るのは計算値には残留汚泥による損失水頭を見込まないためであるが，残留汚泥

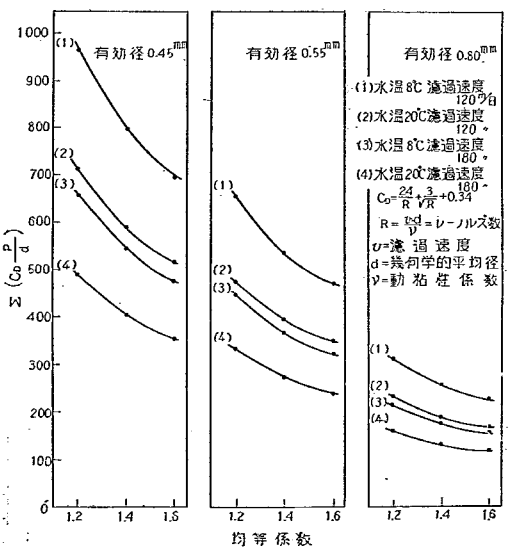


図-23　有効径別の $\Sigma\left(C_D\frac{p}{d}\right)$ の値（成層の場合）

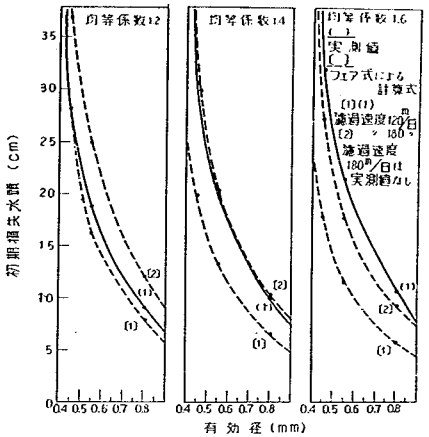


図-24　初期損失水頭の実測値とフェア式による計算値（不成層80°C）

量は有効径が大なる場合には有効径の小なる場合よりも減少するはずであるから，残留汚泥以外の誤差が現われるようである。この場合最も問題となるのは成層化の進行状態と計算上に使用する空隙率である。これは 2.〔5〕で述べたように条件によって非常に異なった値を示すので，空隙率にいかなる数値を与えた場合に実際の砂層とほぼ等しい条件になるか，その判断が非常にむずかしい。これは膨脹高，膨脹比の計算と同様である。また Fair 式を使用する場合，実際の粒子の沈降は多粒子の干

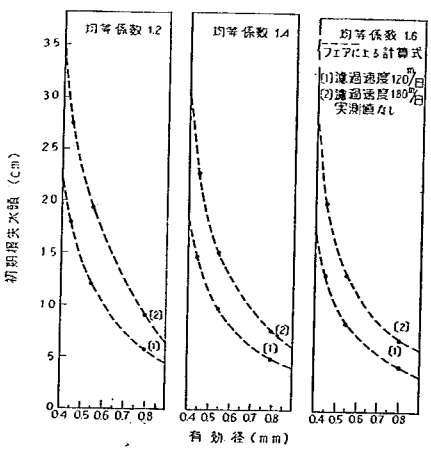


図-25　初期損失水頭のフェア式による計算値（不成層 20°C）

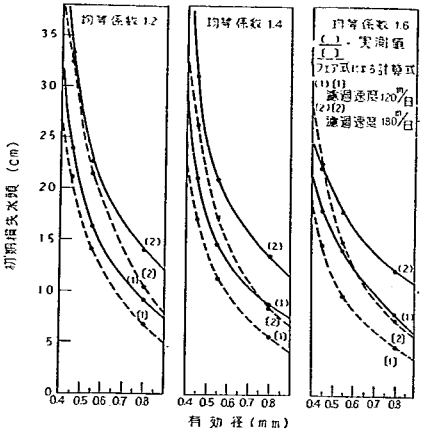


図-26　初期損失水頭の実測値とフェア式による計算値（成 8°C）

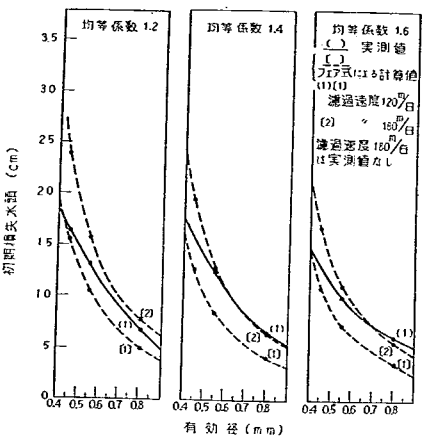


図-27　初期損失水頭の実測値とフェア式による計算値（成層 20°）

渉沈降となるので，Camp の計算式より求めた値と差異を生じ，また多粒子の沈降と粒子間の空隙を水が或る速度をもって通過する状態とは異なるものと考えられる。また Fair式 では不成層時に大小の砂粒が均一に混合されたものとし，成層時には深層部の大粒径の層から表層部の微小砂粒の層までいずれの層も均一な径からなるものとして計算しているが，実際の場合は砂層の噴出（Sand Boil）が生じたり，また表層部の方も攪乱されるので，完全な成層状態とはならないため実測値と Fair式による計算値は一致しない。

（ii）濾過持続時間

不成層時における砂層の初期損失水頭は有効径が同一

表-12A　損失水頭 50 cm ごとにおける濾過経過

有効径	濾過条件		原水濁度	水温	均等係数 1.6					
	濾過速度	砂面上水位			50 cm まで	100 cm まで	150 cm まで	200 cm まで	250 cm まで	最終まで
	m/日	m	度	°C	時 分	時 分	時 分	時 分	時 分	時 分
0.45	120	1.1	87.0	10.2	1.37	2.10	2.57	3.13	—	3.18
	120	1.8	59.6	9.8	1.13	2.18	3.16	3.54	4.26	4.46
	180	1.8	66.0	10.3	0.49	2.10	3.20	4.31	5.08	5.39
	180	1.1	52.0	10.1	0.59	2.21	2.50	3.20	—	3.20
0.55	120	1.1	79.5	8.0	1.49	3.03	3.41	4.06	—	4.14
	120	1.8	109.5	7.7	1.34	2.16	2.36	2.46	2.53	3.01
	180	1.8	76.8	7.6	0.35	1.15	1.28	1.34	1.41	1.43
	180	1.1	363.3	8.3	0.18	0.43	0.56	1.05	—	1.05
0.80	120	1.1	90.4	7.5	2.26	3.25	3.59	4.27	—	4.38
	120	1.8	69.0	7.8	1.50	2.34	3.19	3.47	4.06	4.19
	180	1.8	100.0	8.5	0.39	1.07	1.21	1.32	1.47	1.53
	180	1.1	95.0	9.6	1.37	2.34	3.19	3.47	—	3.47

表-13A　損失水頭 50 cm ごとにおける濾過

有効径		均等係数 1.6						均等	
		50 cm まで	100 cm まで	150 cm まで	200 cm まで	250 cm まで	最終まで	50 cm まで	100 cm まで
		時 分	時 分	時 分	時 分	時 分	時 分	時 分	時 分
0.55	1	11.20	20.15	25.24	29.30	—	30.15	—	—
	2	9.45	17.56	23.45	27.54	31.08	32.55	—	—
	平均						31.35		
0.80	1	15.40	25.30	32.15	37.25	—	39.07	20.25	30.10
	2	14.30	22.40	28.55	33.10	—	34.08	15.15	23.20
	平均						35.48		

表-12B　濾過持続時間の均等係数に対する比

濾過条件		有効径 0.45 mm		有効径 0.55 mm		有効径 0.80 mm	
濾過速度	砂面上水位	均等係数 1.6	均等係数 1.4	均等係数 1.6	均等係数 1.4	均等係数 1.6	均等係数 1.4
m/日	m	%	%	%	%	%	%
120	1.1	100.0	102.0	95.9	88.0	93.0	94.4
120	1.8	113.5	111.5	85.4	89.1	94.5	91.1
180	1.8	110.0	109.5	78.8	82.5	91.9	108.1
180	1.1	107.5	104.8	72.2	80.0	95.0	101.6
平均		108.3	107.6	83.1	84.9	93.6	98.8

であれば，均等係数の大なるほど大となるが，濾過持続時間についてはほとんど差が無い。通常濾過砂使用開始に当っては数回の逆流洗浄後に濾過池の運転を開始するので，その間に成層化はいくらか進行して，微小砂粒の表層面への移動が行なわれる。この微小砂粒は均等係数の大なる砂層ほどその量が多いので同じ逆流洗浄速度で洗浄を行なえば，均等係数の大なる砂層の膨脹比は小なるため，微小砂粒の表層部への集積量は均等係数の大小にかかわらずほとんど変らない。これが運転開始当初に砂層の初期損失水頭に差異があるにもかかわらず濾過持続時間に差異を生じない理由である。このような状態は長く続かず，やがて均等係数の大なる砂層の濾過持続時間が短縮されてくる。これは砂層内に含まれる微小砂粒や設計上の最小粒径の砂粒の量が多いためで，これらの砂層厚が濾過持続時間を左右する。したがって濾過持続時間は初期損失水頭の大きさに関係するよりも表層部における閉塞の度合に密接な関係がある。粒度の同一の砂層においては初期損失水頭が小さければそれだけ濾過持続時間は増加するが，砂層内の損失水頭は後述のように時間経過とともに急激に増加していくので初期損失水頭の影響は少ない。

本実験の前半においては沈澱池を設けず，生成されたフロックを濾過池に流入させて実験したので濾過持続時間は極端に短縮している。濾過持続時間の平均値は 表-12 のとおりであるが，これは冬期の実験で水温が低く，しかも河川の水質が工場廃水等によって汚濁された場合であるので，このような場合にはフロックの生成が不良となって濾過水水質が悪化した例もある。本実験の後半

時間の平均値（沈澱池のない場合）

均等係数 1.4						均等係数 1.2					
50cm まで	100cm まで	150cm まで	200cm まで	250cm まで	最終まで	50cm まで	100cm まで	150cm まで	200cm まで	250cm まで	最終まで
時 分	時 分	時 分	時 分	時 分	時 分	時 分	時 分	時 分	時 分	時 分	時 分
1.26	2.09	2.51	3.15	—	3.22	1.19	2.23	2.56	3.14	—	3.18
1.05	2.13	2.59	3.49	4.24	4.42	0.53	2.05	2.49	3.29	3.55	4.12
0.35	1.56	3.06	4.23	5.09	5.37	0.19	1.36	2.34	3.50	4.40	5.08
0.46	2.14	2.46	3.15	—	3.15	0.29	2.03	2.37	3.06	—	3.06
1.38	2.46	3.21	3.46	—	3.53	1.43	3.08	3.50	4.18	—	4.25
1.36	2.27	2.57	3.07	3.18	3.28	1.30	2.27	2.51	3.06	3.21	3.32
0.36	1.17	1.29	1.36	1.45	1.53	0.34	1.27	1.45	1.58	2.15	2.17
0.22	0.51	1.03	1.12	—	1.12	0.26	1.07	1.22	1.30	—	1.30
2.30	3.25	4.00	4.29	—	4.42	2.44	3.45	4.19	4.49	—	4.59
1.53	2.31	3.11	3.37	3.55	4.05	1.41	2.35	3.17	3.55	4.16	4.29
0.43	1.12	1.31	1.57	2.07	2.13	0.42	1.12	1.28	1.44	1.57	2.03
1.49	3.01	3.32	4.03	—	4.03	1.43	2.48	3.28	3.59	—	3.59

弱過時間（アクセレーターを設けた場合）

係数 1.4				均等係数 1.2					
150cm まで	200cm まで	250cm まで	最終まで	50cm まで	100cm まで	150cm まで	200cm まで	250cm まで	最終まで
時 分	時 分	時 分	時 分	時 分	時 分	時 分	時 分	時 分	時 分
—	—	—	—	10.15	20.15	26.00	30.00	—	31.52
—	—	—	—	10.00	19.33	25.40	29.45	33.42	36.20
									33.35
37.55	43.00	—	43.54	17.40	27.30	35.10	41.00	—	42.52
29.50	34.05	—	35.10	16.20	26.55	33.35	37.40	—	38.40
			39.02						40.20

表-13B　濾過持続時間の均等係数 1.2 に対する割合

有効径 0.55mm			有効径 0.80mm			
	均等係数 1.6	均等係数 1.2		均等係数 1.6	均等係数 1.4	均等係数 1.2
1	98.00	100	1	93.13	104.52	100
2	90.59	100	2	88.02	90.95	100
平均	94.00	100	平均	91.62	98.02	100

はアクセレータを設けて濾過を行なったが，実験期間が夏期となったので水温も高くフロックの凝集もよく行なわれたので濾過持続時間は前期に比し非常に増加している。その結果は表-13 に示すとおりである。表-12 および表-13 は有効径が同じで均等係数がそれぞれ，1.6，1.4，1.2 の3種の濾過砂を用いて同一条件の下に実施したもので，同一実験時についての比較はできるが，原水の水質，濾過速度，砂面上水深の異なる場合の比較，または有効径の異なる場合の比較は条件が異なるので，これらの結果から即断することはできない。同時に実施した実験結果からは有効径 0.45mm では均等係数の大なる方が濾過持続時間が増加し，また有効径 0.55mm，0.80mmでは均等係数の小なる方が濾過持続時間が増加する傾向を示している。有効径 0.45mm の砂層は 3. で述べたように膨脹比が過大であったことと，長期間予備実験を行なったため，微小砂粒のみならず設計上の小砂粒までも流出したのでその不足分を補砂して濾過を継続したので，均等係数の大小に応じた微小砂粒層の厚さとならなかったため，粒径の大なる均等係数の大なる砂層の濾過持続時間が均等係数の小なる砂層のそれより増加したのである。その反面有効径 0.55mm，0.80mm の砂層では予備実験期間が割合短かかったことと，標準として用いた逆流洗浄速度 90cm/分 では微小砂粒の流出量や砂層のよごれも少なかったため，砂層の表層部の微小砂粒や小砂粒の厚さが濾過持続時間の長短を左右したのである。

濾過持続時間は砂面上水深および濾過速度に関係する。水道施設規準[22]では砂面上水深1.0 m 濾過速度120 m/日～150 m/日 を標準としている。砂面上水深を大とした方が負水頭が減少するので最近では砂面上水深を増加させる傾向がある。本実験では砂面上水深を 1.1 m と 1.8 m の双方について実験を行なったが，砂面上水

実施月日			2月 18日		
濾過開始時間			午前9時5分		
均等係数	濾過関係 速度	濾過関係 水位	逆流洗浄 速度	逆流洗浄 時間	凡例
1.6	120m/日	1.8m	0.9m/分	4.0分	—·—
1.4	120	1.8	0.9	4.0	— — —
1.2	120	1.8	0.9	4.0	———

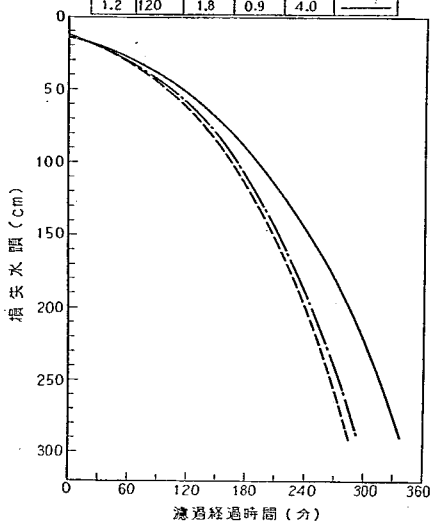


図-28A 損失水頭（有効径 0.80 mm）の比較図

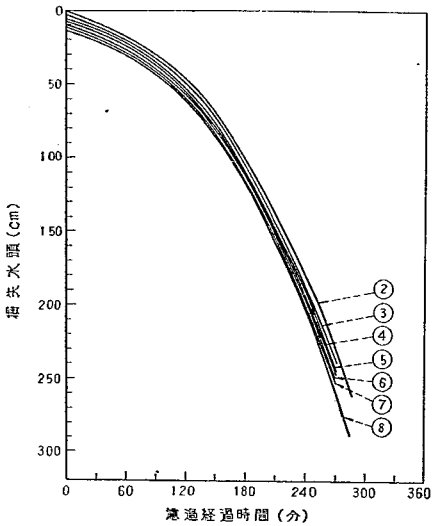


図-28C 損失水頭（均等係数 1.4）

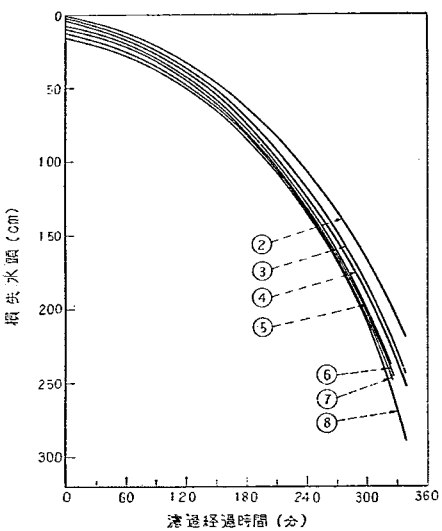


図-28B 損失水頭（均等係数 1.6）

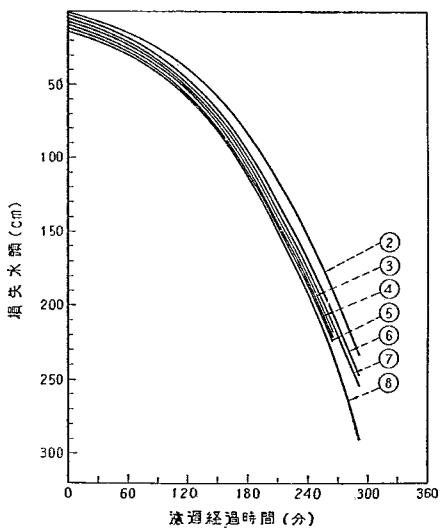


図-28D 損失水頭（均等係数 1.2）

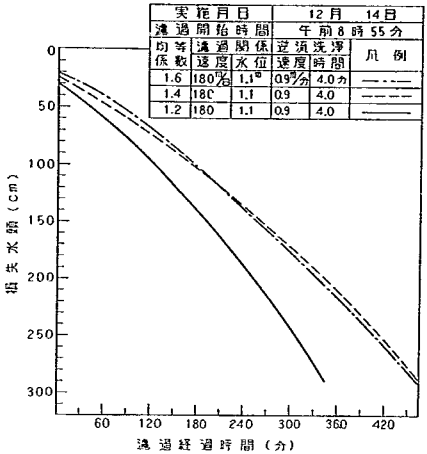


図-29A　損失水頭（有効径 0.45mm）の比較図

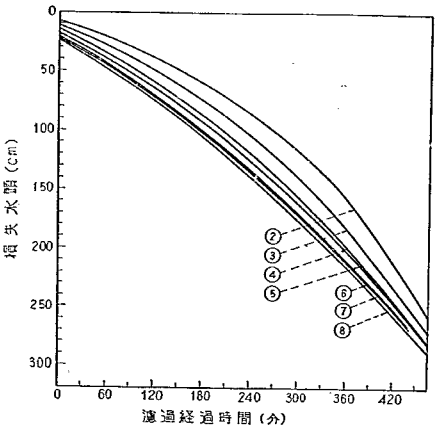


図-29C　損失水頭（均等係数 1.4）

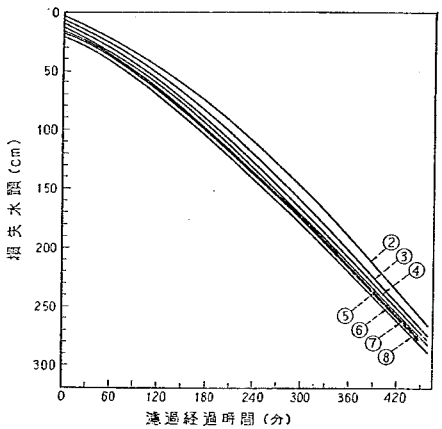


図-29B　損失水頭（均等係数 1.6）

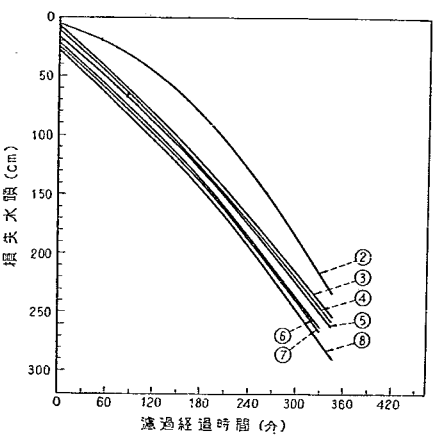


図-29D　損失水頭（均等係数 1.2）

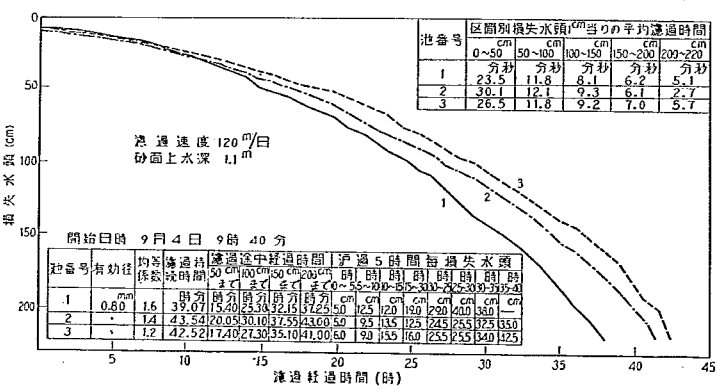


図-30A　損失水頭の比較

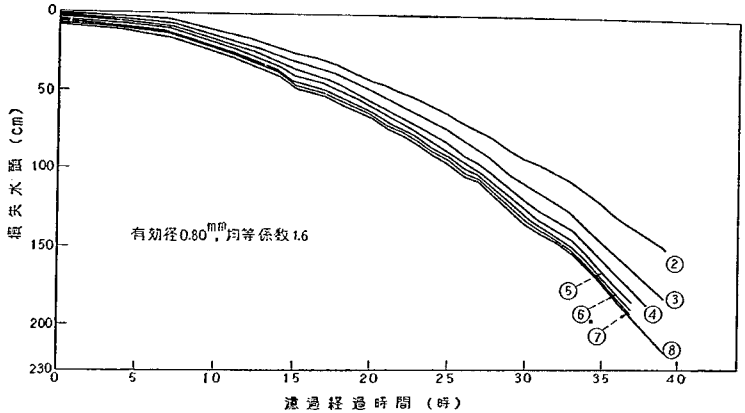


図-30B　1号池の損失水頭

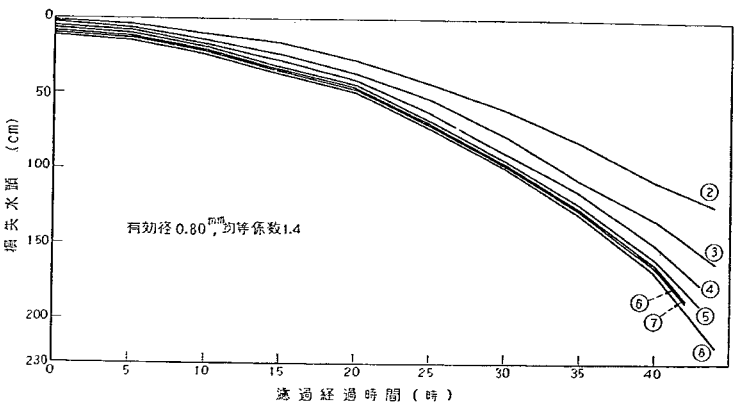


図-30C　2号池の損失水頭

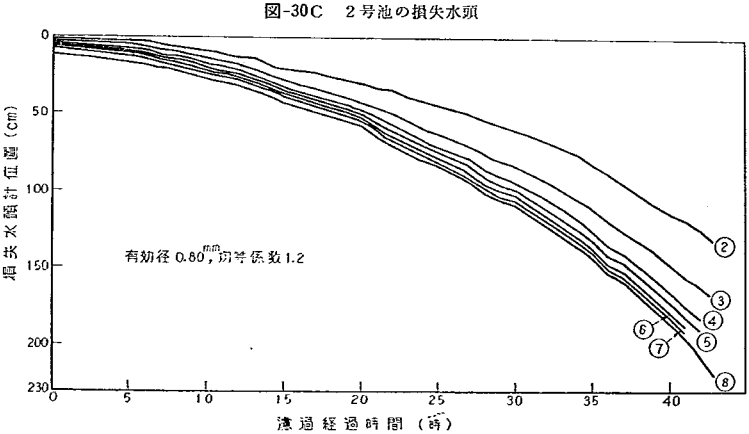


図-30D　3号池の損失水頭

表-14A　濁度，色度，過マンガン酸カリ消費量の平均値

有効径	濾過関係		洗浄関係		原水			均等係数 1.6			均等係数 1.4			均等係数 1.2		
(mm)	濾過速度	砂面上水位	逆洗浄速度	逆洗浄時間	濁度	色度	過マンガン酸カリ消費量	濁度	色度	過マンガン酸カリ消費量	濁度	色度	過マンガン酸カリ消費量	濁度	色度	過マンガン酸カリ消費量
	m/日	m	m/分	分	度	度	ppm	度	度	ppm	度	度	ppm	度	度	ppm
0.45	120	1.1	90	4	35.00	27.17	38.55	0.97	9.83	19.02	0.55	10.08	19.53	0.93	9.67	19.08
	120	1.8	90	4	59.00	35.50	68.28	1.90	13.00	35.72	1.39	13.00	36.44	1.20	13.00	36.12
	180	1.8	60	6	64.25	41.50	65.25	0.98	17.00	39.83	0.88	17.00	37.93	0.48	16.50	36.99
	180	1.1	90	4	74.80	35.00	72.32	6.66	11.00	42.23	6.26	11.00	40.97	4.74	11.00	40.80
	平均				58.26	34.79	61.23	2.63	12.71	34.20	2.27	12.77	33.72	1.84	12.54	33.25
0.55	120	1.1	90	4	84.00	48.14	77.67	2.25	17.57	52.11	1.91	17.43	49.76	1.53	17.28	47.51
	120	1.8	90	4	86.40	30.60	87.75	1.40	10.60	50.83	1.24	10.20	47.54	1.22	10.40	46.28
	180	1.8	60	6	91.50	40.00	96.94	1.85	14.67	60.48	1.58	14.50	59.64	1.33	14.67	58.69
	180	1.1	90	4	308.50	51.25	138.53	2.25	18.50	70.18	2.08	18.50	68.28	1.93	18.75	66.07
	平均				142.60	42.50	100.22	2.01	15.34	58.40	1.70	15.16	56.31	1.50	15.28	54.64
0.80	120	1.1	90	4	90.86	33.71	94.47	7.70	12.43	48.72	8.21	12.43	49.13	6.70	12.29	49.36
	120	1.8	90	4	77.33	36.67	82.71	3.90	13.67	57.11	4.38	13.83	58.69	2.25	13.83	58.79
	180	1.8	60	6	93.33	46.66	104.84	6.83	20.00	70.81	6.10	19.33	68.28	4.83	19.33	69.54
	180	1.1	120	3	94.60	47.00	98.62	8.40	22.00	70.62	8.10	21.40	72.83	5.90	21.40	73.27
	平均				89.03	41.01	90.16	6.71	17.03	61.82	6.70	16.75	62.23	4.92	16.71	62.74

表-14B　濁度，色度，過マンガン酸カリ消費量の除去率と均等係数 1.2 に対する比

有効径	濾過関係		原水に対する比（単位 %）									均等係数 1.2 に対する比（単位 %）					
			均等係数 1.6			均等係数 1.4			均等係数 1.2			均等係数 1.6			均等係数 1.4		
(mm)	濾過速度	砂面上水位	濁度	色度	過マンガン酸カリ消費量	濁度	色度	過マンガン酸カリ消費量	濁度	色度	過マンガン酸カリ消費量	濁度	色度	過マンガン酸カリ消費量	濁度	色度	過マンガン酸カリ消費量
	m/日	m															
0.45	120	1.1	97.23	63.82	50.66	98.43	62.93	49.34	97.34	64.41	50.51	99.8	99.7	100.1	101.0	97.8	97.6
	120	1.8	96.78	63.38	47.69	97.63	63.38	46.63	99.64	63.38	47.10	97.1	100.0	101.2	98.2	100.0	99.0
	180	1.8	98.47	59.04	39.42	98.63	59.04	42.31	99.25	60.24	43.74	99.2	98.1	90.4	99.4	98.1	96.8
	180	1.1	91.10	68.57	41.61	91.63	68.57	43.35	93.66	68.57	43.58	97.4	100.0	95.5	97.9	100.0	99.5
	平均		95.90	63.70	44.85	96.58	63.38	45.41	97.47	64.15	46.23	98.4	99.5	96.8	99.2	99.0	98.2
0.55	120	1.1	97.32	63.50	32.91	97.73	63.79	35.93	98.18	64.10	38.83	99.0	99.0	84.7	99.5	99.5	92.4
	120	1.8	98.36	65.36	42.07	98.56	66.67	45.82	98.59	66.01	47.26	99.6	98.9	89.1	100.0	101.0	97.0
	180	1.8	97.98	63.33	37.61	98.27	63.75	38.49	98.55	63.33	39.46	99.5	100.0	95.4	99.8	100.6	97.5
	180	1.1	99.17	63.90	49.34	99.35	63.90	50.78	99.37	63.41	52.34	99.8	100.8	94.2	100.0	100.7	97.0
	平均		98.21	64.02	40.48	98.48	63.13	42.76	98.67	56.71	44.47	99.5	99.7	91.0	99.8	100.5	96.0
0.80	120	1.1	91.53	63.13	34.58	90.96	63.13	34.03	92.63	63.54	33.72	99.0	99.4	102.6	98.2	99.4	101.0
	120	1.8	93.52	60.73	31.48	93.09	60.37	29.73	96.42	60.37	29.61	97.0	100.6	106.3	96.5	100.0	100.4
	180	1.8	92.29	58.37	32.84	93.21	58.37	35.02	94.73	58.37	33.65	97.4	100.0	97.6	98.4	100.0	104.1
	180	1.1	91.01	53.56	38.81	91.39	54.65	26.35	93.72	54.65	25.75	97.2	98.0	111.9	97.5	100.0	102.3
	平均		92.10	58.95	31.93	92.16	59.13	31.28	94.38	59.23	30.68	97.7	99.5	104.0	97.8	99.8	102.0

表-15A 定期水質試験成績

有効径	均等	濁度（度）			色度（度）			過マンガン酸カリ消費量（ppm）		
(mm)	係数	原水	未濾水	濾過水	原水	未濾水	濾過水	原水	未濾水	濾過水
0.80	1.6	52.25	17.68	1.06	33.00	26.00	10.06	40.86	25.57	15.29
	1.4	53.55	20.83	1.12	31.55	24.55	10.38	39.75	25.53	15.17
	1.2	52.20	19.99	1.02	32.90	25.10	10.65	43.24	26.08	14.48
0.55	1.6	40.10	18.11	0.54	16.86	7.78	5.23	29.91	20.00	13.53
	1.4	40.10	18.11	0.52	16.86	7.78	4.60	29.91	20.00	13.10

表-15B 除去率と均等係数 1.2 に対する比

有効径	均等係数	未濾水に対する濾過水の除去率（%）			均等係数 1.2 に対する比（%）		
(mm)		濁度	色度	過マンガン酸カリ消費量	濁度	色度	過マンガン酸カリ消費量
		%	%	%	%	%	%
0.80	1.6	94.00	61.31	40.20	99.1	106.5	90.4
	1.4	94.62	57.72	40.57	99.7	100.3	91.2
	1.2	94.90	57.57	44.48	100.0	100.0	100.0
0.55	1.6	97.02	32.78	32.35	99.9	80.2	93.8
	1.4	97.13	40.87	34.50	100.0	100.0	100.0

深を大としても濾過損失水頭が時間経過とともに急激に増加するため濾過持続時間は砂面上水深に比例して増加することにはならない。濾過速度については本実験の結果では判断できないが，日本水道協会濾過砂調査委員会の委託で実施した京都市の実験結果[23][24]からみると，120 m/日を基準として 150 m/日では 20%，180 m/日では 40% 程度濾過持続時間が減少するものとみられる。

(iii) 損失水頭

砂層の閉塞の状態を層ごとに知るために本実験では7本の損失水頭管を濾過池に取付けた。砂層内部の損失水頭は表層部の増加が著しく，砂層表面下 15 cm 以下ではそれほど大きくならない。この表層部と深層部の差異が大きい場合には濾過効果は不良となる。すなわち表層部でのフロックの抑留量が非常に多い場合には濾過持続時間が極端に短縮し，また深層部の負荷が過大となる場合には濾過水水質が悪化する。本実験の場合冬期において沈澱池を設置しない場合と夏期においてアクセレータをを設置した場合の双方について濾過池全体の損失水頭と砂層内部の損失水頭の変化を調べた。この代表的な例を，2, 3 挙げると図-28～図-30* に示すとおりである。図-28 は沈澱池を設置せずに行なった実験でフロックの生成状態が良好であるため，フロックの表層面での抑留量が非常に多く，したがって有効径 0.80 mm の砂層にもかかわらず，5～6時間で濾過は終了している。このような場合濾過水水質は良好となるが，同図B～Dに示すように砂層の閉塞は表層面下 6 cm でほとんど全部行なわれることとなり，以下の砂層は有効に働いていない。図-29 はやはり沈澱池を設置せずに行なった実験であるが，フロックの生成が不良であるため，砂層表層部での抑留量が少なく，フロックは表層部を通過してしまい深層部での負荷が増加し，このため砂層内でのフロック抑留限度を越え，濾過水中にフロックが現われた場合である。このような場合には同図B～Dに示すように砂層最深部でも損失水頭が増加し，汚泥の抑留が確認される。図-30 はアクセレータを取付けた場合で，濾過持続時間は 38～42 時間と増加し，濾過水水質も非常に良好となった場合である。このような時には全濾層の損失水頭の変化は，ほぼ直線に近い形で降下することになる。このような場合でも砂層表層部のフロック抑留負荷は，深層部のそれに比べて大きなものとなる。同図B～Dに

表-16 濾過持続時間の平均値と濾過持続時間の有効径

濾過条件		原水	原水	有効径 0.45 mm 均等係数 1.2						有効径	
濾過速度	砂面上水深	濁度	水温	50 cm まで	100 cm まで	150 cm まで	200 cm まで	250 cm まで	最終まで	50 cm まで	100 cm まで
m/日	m	度	度	時 分	時 分	時 分	時 分	時 分	時 分	時 分	時 分
120	1.1	104.0	11.7	0.51	1.53	2.44	3.21	—	3.33	1.39	2.59
120	1.8	80.1	12.9	0.38	1.52	2.53	3.53	4.50	5.29	1.10	2.58
180	1.8	108.0	13.2	0.14	0.45	1.00	1.10	1.24	1.30	0.28	0.59
180	1.1	96.0	11.7	0.15	0.53	1.07	1.20	—	1.20	0.28	1.07

＊ 図中の③～⑧番号は 2〔1〕実験装置のうち損失水頭計の項で示したものと同一である。

示すように層別の損失水頭は時間経過とともに増加し，汚泥の抑留量の増加が認められる。

沈澱池においてフロックの沈澱が良好に行なわれる場合には，濾過池に流入するフロックはごく小形のもので，その量も極端に減少するため，濾層内でのフロックの抑留も表層部から深層部までほぼ均等に分布し，また流入するフロックの量も非常に少ないから単位時間当りの損失水頭の増加率もごく微小なものとなる。しかしこのような場合でも，砂層の空隙はフロックの砂粒への付着によって次第に減小することとなるため，単位時間当りの損失水頭は漸増することにはなる。それゆえ砂面上水深を増加させて濾過持続時間の増加をはかることは，このような濾過前処理が良好に行なわれている場合でもあまり有利とはならず，砂面上水深の増加は許容しうる負水頭が得られる範囲にとどめるべきである。沈澱池が設置してある場合でも，フロックの凝集が不良な場合には図-29 と同様な結果を示すことになり，また沈澱池の容量効率が不良と認められる場合には設計よりも大形のフロックが濾過池に流入し，ために図-28 と同様な結果を示し，濾過持続時間は極端に短縮する。それゆえ濾過持続時間の増加をはかるためには，フロックの凝集沈澱を含めた濾過前処理が急速濾過法の経済性を大きく左右することになる。

(iv)　濾過水の水質

濾過持続時間は不成層時には均等係数の大なる砂層ほど長く，また成層時にはこの順位が逆となり，均等係数の小なる砂層ほど長くなる傾向となったが，濾過水の水質もこれと相似の傾向を示している。表-14 および 表-15 アクセレータを設置せず濾過を行なった場合で，ほぼ成層化された砂層を使用した場合の例である。本実験に使用した原水は 2 において述べたごとく，荒川の下流で悪質工場廃水の流入する新河岸川の影響をうけているため，特別の濾過前処理を実施しても，上水道の水質規準に適合させることは困難である。そのため濾過水の水質も不良であるが，本実験においては砂粒の粒度の差異による濾過水の水質がどのように影響をうけるか，その傾向を調べるために水質の比較を行なったものである。

本実験の結果では表-13, 表-14 に示すように均等係数の小なる砂層の濾過水の水質は良好となる傾向がある。設計上の最小粒径が同一の砂層では，表層部の抑留汚泥量はほぼ同様となるが，砂層内部のフロックの抑留能力が水質的に微小な変化を与える。すなわち微小フロックの流下を阻止し抑留することが可能な個所の多少が濾過水の水質に影響を与える。これは空隙率によって表わされるものではなく，フロックの付着に対しては砂粒の表面積，またフロックの沈積を可能ならしめる砂粒間の空隙部が問題となる。したがって粒度の小なる砂層は上記の条件を満たすこととなるから，粒度が全体として小なる砂層ほど濾過水の水質は良好となる。そこで，その他の条件が等しく，有効径が同じであれば，均等係数の小なる砂層ほど濾過水の水質は優れている。

不成層時には砂層は大小の砂粒が混合した状態にあるから砂粒の表面積に付着するという条件は成層時と同様であるが，砂粒間の空隙は砂層全体を通じて同一であるから水質上はかえって良好な結果を与える。したがって不成層時には均等係数の違いによる濾過水の水質はほとんど差が無く，場合によっては細粗の砂粒が適当に混合している均等係数の大なる砂層ほど濾過水の水質が良好となることがある。表-13 の有効径 0.80 mm の過マンガン酸カリ消費量の測定結果や京都市の実験結果[35]はこの傾向を示している。しかし全体的にみると，有効径が同じで均等係数が異なる砂層の水質はあまり差異が無く，同一有効径で均等係数 1.7 以下ならば，濁度にして 3%，色度で 2%，過マンガン酸カリ消費量で 8% 程度の差異であり，後述の有効径の差異の影響が大きい。濾過速度を大とすれば，フロックの砂粒間での阻止抑留能力が低下するので，濾過水の水質の低下が予想れさる。この点本実験では確められなかったが，横浜市の実験[35]では僅少であるが，この傾向が現われている。しかし濾過速度を大にした場合，それに応じた濾過前処理施設を有する場合には，砂層表層部でのフロックの抑留負荷の急増によって濾過持続時間の短縮による影響の方が大きく現われ，濾過水の水質の変化は割合少ないものと考えられる。

〔2〕　有効径の異なる場合

(i)　濾過持続時間

0.45 mm に対する比（沈澱池を設置しない場合）

0.55 mm 均等係数 1.2				有効径 0.80 mm 均等係数 1.2						有効径 0.45 mm に対する比	
150 cm まで	200 cm まで	250 cm まで	最終まで	50 cm まで	100 cm まで	150 cm まで	200 cm まで	250 cm まで	最終まで	有効径 0.55 mm	有効径 0.80 mm
時 分	時 分	時 分	時 分	時 分	時 分	時 分	時 分	時 分	時 分		
3.41	4.01	—	4.08	2.16	3.41	4.17	4.47	—	4.58	116.5	140.0
4.33	5.51	6.52	7.40	2.27	4.52	6.43	8.10	9.16	10.06	127.7	184.1
1.12	1.27	1.44	1.50	0.42	1.18	1.43	2.02	2.20	2.25	122.3	161.0
1.26	1.46	—	1.46	0.56	1.32	1.56	2.10	—	2.10	132.5	162.4
								平均		129.3	161.4

表-17　濾過持続時間と有効径 0.45 mm に対する比率（沈澱池を取付けた場合）

有効径 (mm)	均等係数	濾過持続時間	濾過経過時間 50cm まで	100cm まで	150cm まで	200cm まで	比率 (%)
		時 分	時 分	時 分	時 分	時 分	
0.45	1.2	18.30	7.15	12.30	15.08	18.05	100
0.55	1.2	21.50	9.23	15.10	18.50	21.08	118
0.80	1.2	45.50	17.00	26.38	36.15	44.44	248

（注）濾過速度　120 m/日
砂面上水深　1.1 m

均等係数が同一であれば，有効径が大なるほどその空隙率は小となるが，その反面砂層の空隙断面積は大となる。砂粒搬入当初の空隙はいずれの深さにおいてもほぼ等しくなるが，成層化されるにしたがって，空隙断面積も表層ほど小さく，深層に至るほど大となる。それゆえ有効径の大なる砂層では有効径の小なる砂層よりも成層後の空隙断面積が相対的に大となり，しかも空隙率も全体として大となるから，濾過持続時間は増加する。したがって濾過池に流入するフロックの径が表層部の空隙断面積よりも小さい場合には，砂粒に付着するものを除いて大部分のフロックは砂層の内部まで侵入して砂層内部のいずれかで抑留されるが，フロックの径がこの空隙断面積よりも大なる場合には，フロックは砂層の表層部に累積していくので，表層部の閉塞のみによって濾過が終了してしまう。有効径が小なる場合は空隙断面積が小となるため，表層部でのフロックの抑留量は増加することになる。

本実験に使用した濾過砂のうち，均等係数 1.2 で有効径 0.45 mm, 0.55 mm, 0.80 mm の砂粒の最小粒径のものを球と仮定しての空隙断面積は下記のとおりとなる。

有効径 0.45 mm　最大 0.026 mm²　最小 0.005 mm²
有効径 0.55 mm　最大 0.038 mm²　最小 0.007 mm²
有効径 0.80 mm　最大 0.108 mm²　最小 0.020 mm²

逆流洗浄を終了させた直後，砂粒は徐々に沈降していくが，そのさいの砂粒のおさまり如何で表層部の空隙は変化することになる。それで厳密には濾過前処理の効果が同一な場合でも濾過池内での砂粒のおさまり方の変化によって濾過持続時間は変化する。しかし逆流洗浄直後では空隙断面積は最大に近く，変化量も割合少ないものであるから，濾過持続時間に大きな影響を与える要素は砂粒が同一におさまった場合での空隙断面積による差異による影響が大きく現われてくる。表-15, 表-16 は均等係数 1.2 の 3 種の有効径の濾過持続時間を比較したものであるが，有効径 0.45 mm の砂層に対してアクセレータを設置しない場合には，有効径 0.55 mm で約 30 % 増，0.80 mm で約 60% 増，アクセレータを設置した場合には有効径 0.55 mm で約 18% 増，有効径 0.80 mm で約 148% 増となっている。それゆえアクセレータを設置した場合には，表層部の空隙断面積と濾過持続時間とはほぼ比例することになる。アクセレータの設置のない場合には，フロックの全量を濾過池に流入させることとなるため，その時のフロックの生成状態によっても大きな影響をうけることとなり，濾過持続時間の差異はその場合に応じて種々に変化する。しかし通常の急速濾過施設はほぼ完全な濾過前処理装置を有するので，このような場合には表-16 のように表層部の空隙断面積にほぼ比例するだけの濾過持続時間の相違が現われるものと予想される。

（ii）損失水頭

粒度が大なるほど，微小フロックの砂層深部への侵入量が増加していくが，フロック形成が良好な場合には，肉眼視できるフロックが濾過水中に現われることはほとんど無い。これは砂層内部で微小フロックが抑留されるためで，粒度が大なるほど砂層内部で，フロック抑留量が増加し，深層部に侵入する傾向が強くなる。有効径が大で，均等係数が小なるほど砂層表面での閉塞は割合少なくなるので砂層内の汚泥分布も比較的均一化する傾向がある。これに対して有効径が小で，均等係数が大なる砂層では，砂層表面において抑留されるフロックの量は多くなるため，内部に侵入するフロックは僅少で，砂層表面における負荷は大きく，濾過はほとんど砂層表面の閉塞のみで終了してしまうことになる。

図-31 はアクセレータを設置しない場合における濾過池の損失水頭の変化を図示したものであるが，濾過池に流入したフロックの量が多いのと，そのフロックの径が大なるため砂層表面での閉塞が著しい。そのため砂層の有効径の相違による濾過持続時間の差異は比較的小さいものとなった。これを砂層内部における損失水頭の変化についてみると，同図B～Dに示すごとく，砂層深度 6 cm における損失水頭計⑧が時間経過にともなって急コウ配で降下していき，他の損失水頭計は②とほとんど同じ間隔で降下している。これは砂層深度 6 cm 以下の砂層における汚泥抑留量はほとんど無いことを示すもので，水質的には非常に安全側となるが，濾過持続時間は短縮するから濾過水量は減少する。これに対して図-32 はアクセレータを設置した場合の例であるが，有効径の相違による砂層の閉塞状態がはっきり現われている。しかし，この場合でも時間の経過とともに損失水頭は急コウ配に変化していくが，その割合は 図-31 よりも少なく，また有効径が大なるほどそのコウ配は緩やかとなり，有効径 0.80mm ではほとんど直線に近い降

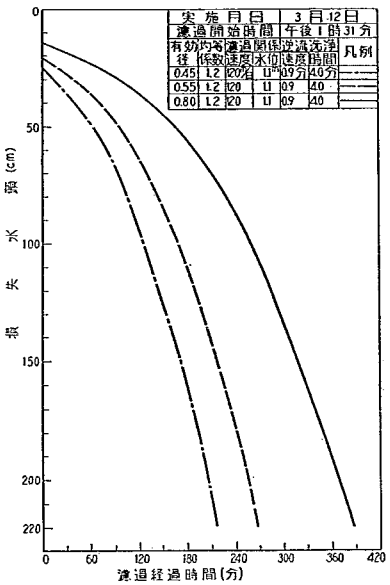


図-31A　損失水頭の比較

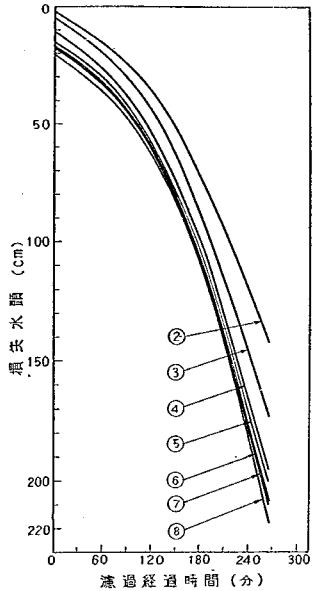


図-31C　損失水頭
(有効径 0.55mm 均等係数 1.2)

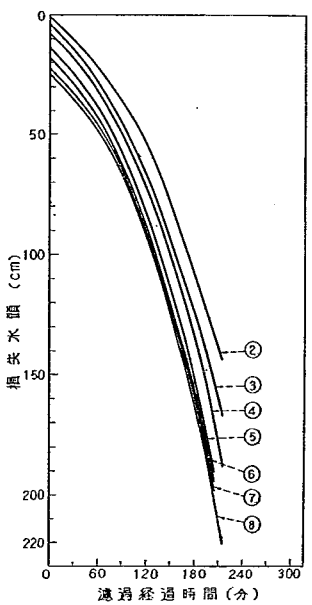


図-31B　損失水頭
(有効径 0.45mm 均等係数1.2)

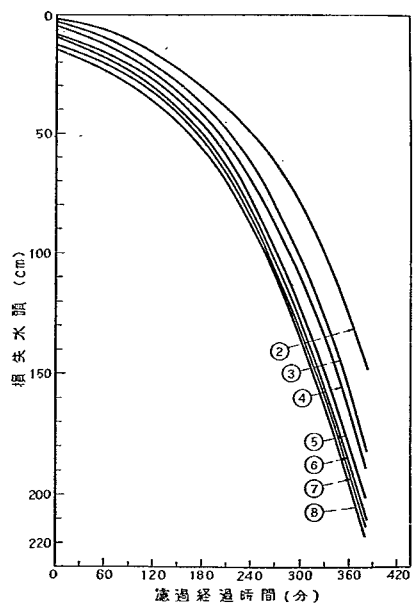


図-31D　損失水頭
(有効径 0.80mm 均等係数 1.2)

開始日時 8月28日9時34分（No.4）.

池番号	有効径	均等係数	濾過時間	濾過経過時間 50cm	100cm	150cm	200cm
1	0.45	1.2	18.30	7.15	12.30	15.08	18.05
2	0.55	1.2	21.50	9.23	15.10	18.50	21.08
3	0.88	1.2	45.50	17.00	26.38	36.15	44.44

池番号	濾過5時毎損失水頭 0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	凡例
1	20	30	71	—	—	—	—	—	—	—
2	13	24	46	74	—	—	—	—	—	---
3	6	10	17	23	25	26	24	36	24	---

池番号	損失水頭1cm当りの平均濾過時間 0~50cm	50~100cm	100~150cm	150~200cm	200~220cm
1	14.5分	6.3分	3.2分	3.5分	1.3分
2	16.6分	6.9分	4.4分	2.8分	2.2分
3	34.0分	11.6分	11.5分	10.2分	3.4分

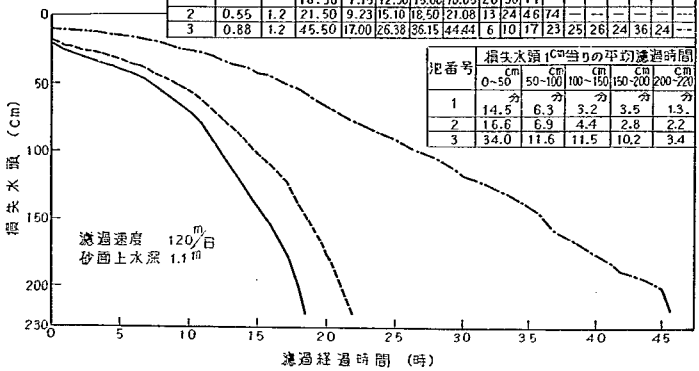


図-32A 損失水頭の比較

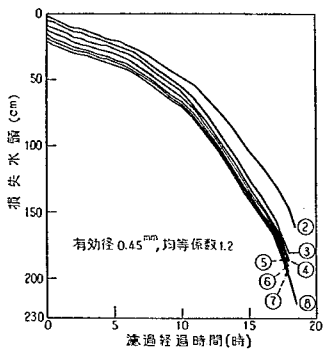


図-32B 1号池の損失水頭

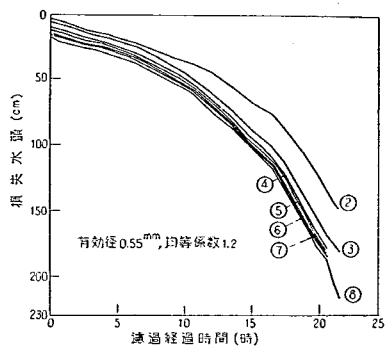


図-32C 2号池の損失水頭

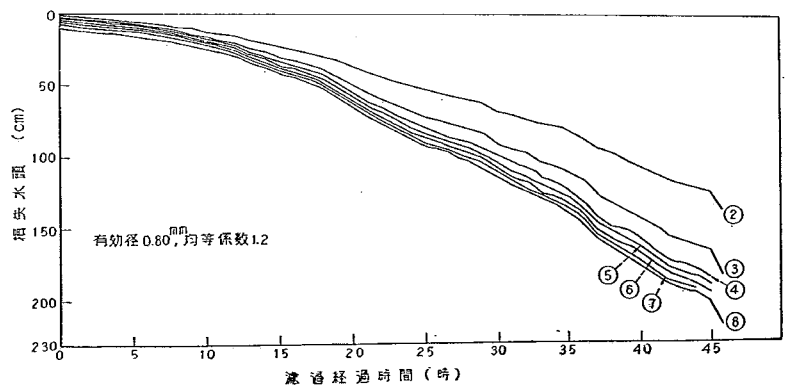


図-32D 3号池の損失水頭

下状態を示している。この変化の割合を5時間ごとの損失水頭についてみると，濾過開始直後の5時間で有効径 0.45 mm で 20 cm，有効径 0.55 mm で 13 cm，有効径 0.80 mm で 6 cm となっているが，最後の 5 時間では有効径 0.45 mm で 71 cm，有効径 0.55 mm で 74 cm，有効径 0.80 mm で 24 cm と損失水頭の増加は有効径の大小にかかわらず最初の3倍となっている。また損失水頭 1 cm 当りの平均濾過時間では有効径 0.45 mm では最初の 50 cm で 14.5 分，最後の 20 cm で 1.3 分，有効径 0.55 mm ではそれぞれ 16.6 分，2.2 分，有効径 0.80 mm ではそれぞれ 34 分，3.4 分となっており，いずれの有効径でも最終の損失水頭 1 cm 当りの時間は最初の 1/10 程度にとどまっている。このように損失水頭の増加率および損失水頭 1 cm 当りの時間の増加率はほぼ同一となっても，その絶対値において大きな差異があるため，有効径 0.45 mm，0.55 mm では損失水頭の増加が肉眼視できるほどに変化しているが，有効径 0.8 mm では降下率は濾過経過時間にほぼ比例してほとんど直線に近いものとなっている。有効径 0.45 mm，0.55 mm の場合でも有効径 0.80 mm の場合と相似の傾向を示すこともあるが，一般には図-32 と同様な結果を示すことが多い。

濾過開始後，時間の経過にともなって砂層の表層部にはフロックが砂粒に付着したり，抑留されることによって，それらを含む砂粒間の空隙断面積は漸減の傾向を示すが，これによって微細なフロックを阻止する能力は大となるから，表層部においてフロックが抑留される場合には，濾過水の水質も比較的安定している。これに対してフロックが表層部を通過して多量に砂層内部に侵入するような場合には，砂層内部において相当量のフロックは抑留されるにしても，一定の限度を越えると濾過水中にフロックの流出をみることになる。このことについては前節においても述べた。それでフロックの凝集が悪い等の濾過前処理に欠陥のある場合には，表層部の負荷をさらに増加させて，フロックの砂層内部での抑留量を減じる等の対策をしなければならなくなる。このようなことは不経済となるし，またたえず危険がともなうことになる。

成層化された砂層では表層部の砂粒は粒度が小さく，深部に至るほど粒度が大となっているので，濾過機能が自然と安全側に保たれるようになっているから，砂層全体の有効径の大小は砂層内各層の粒度の大小に相対的に影響するとしても，同一条件で濾過した場合，濾過水の水質に大きな差異は生じない。しかし濾過持続時間を増大させるため，砂層の粒度はいくら大にしてもよいわけでなく，少なくとも砂層の表層部にフロックの大部分が抑留されるようでなければならない。しかし濾過持続時間を大とするために砂層の粒度を過大にして濾過水の水質を低下させることはもちろん得策ではないが，水質のみにとらわれて粒度の小なる砂層を使用し，濾過持続時間を短縮させることは不利となる。

(iii) 濾過水の水質

均等係数が同一な場合，有効径が大なる砂層の濾過持続時間は増加するが，濾過水の水質はやや低下する傾向がある。しかしこの低下の度合は濾過持続時間の相違に比して極く僅かなものである。

表-18 と表-19 はアクセレータを設置しない場合と設置した場合との濾過水の水質を示したものであるが，ともに濁度の変化は少なく，色度，過マンガン酸カリ消費量にはっきりした差異が現われている。色度，過マンガン酸カリ消費量として表わされるものが有機質であることから，有効径の大なる砂層は小なる砂層より有機質の除去について劣っているとみることができる。

水中の有機物質の多くは凝集剤の適量の注加によってフロックとなしうるが，これらのうち，微細なフロックは砂層で抑留されないで，濾過水中に現われる傾向がある。微細フロックの砂層での阻止抑留能力は有効径が大なるほど小さいから有効径の大なる砂層ほど濾過水の水質が不良となる。

濁度については砂層の粒度，とくに有効径の大小による相違は濾過水に大きな差は生じなかったが，無機質の浮遊物でも凝集が不完全であるとか，原水中に有機物を多量に含有する場合には，フロックの生成が十分でなく，沈澱池で除去されずに濾過池に流入すれば，ときには濾過水中に濁度が現われることもあるので，とくに凝集，沈澱などの濾過前処理に注意しなければならないことになる。

〔3〕 総　括

濾過持続時間はその他の条件が同一であれば，未濾水の水質と砂層の粒度に支配される面が大きい。このうち未濾水の水質はその時の原水の水質および水温に応じて凝集剤の適正な注入フロック形成の方法および沈澱池の容量効率の増加等の処置を講ずることによって良好に保つことができる。わが国でもこの方向について多くの研究があり，濾過前処理技術はここ数年間に非常に進歩して来た。砂層の粒度については成層後の砂層の状況によって濾過持続時間は左右される。すなわち，砂層の表層部の空隙断面積の大きさと最小粒径の砂粒の厚さおよび表層部以下の砂層の汚泥抑留能力に支配される。砂層の表層部の空隙断面積は微小砂粒径や設計上の最小砂粒径によって決まり，フロックの抑留量はこの表層部の状況如何により定まることが多い。それで表層部における汚泥抑留量が過大となり，損失水頭が急増するようになれば濾過持続時間は短縮するので，ある程度表層部以下の砂層においてもフロックの抑留が行なわれるような粒度組成の砂層が，濾過持続時間の増加をはかるのに適当し

表-18A　濾過水の水質比較（沈澱池を設置しない場合）

濾過関係		洗浄関係		原水			有効径 0.45mm 均等係数 1.2			有効径 0.55mm 均等係数 1.2			有効径 0.80mm 均等係数 1.2		
濾過速度	砂面上水深	逆洗浄		濁度	色度	過マンガン酸カリ消費量	濁度	色度	過マンガン酸カリ消費量	濁度	色度	過マンガン酸カリ消費量	濁度	色度	過マンガン酸カリ消費量
m/日	m	cm/分	分	度	度	PPm	度	度	PPm	度	度	PPm	度	度	PPm
120	1.1	90	4.0	104.00	50.00	110.96	1.40	21.00	66.70	1.98	22.75	69.55	4.73	24.50	75.55
120	1.8	90	4.0	80.83	65.00	136.98	11.85	30.33	89.98	15.78	32.83	95.94	21.27	33.50	102.26
180	1.8	90	4.0	92.00	42.00	101.23	6.08	19.50	62.59	8.43	21.00	68.91	11.93	22.75	74.60
180	1.1	90	4.0	93.33	43.33	94.93	1.73	20.33	59.85	3.27	20.67	66.98	5.23	24.33	69.54
平		均		92.54	50.08	111.03	5.27	22.79	69.78	7.37	24.31	75.35	10.79	26.27	80.49

表-18B　濁度その他の除去率と有効径 0.45mm に対する比（%）

濾過関係		原水に対する除去率									有効径 0.45mm 均等係数 1.2 に対する比					
		有効径 0.45mm 均等係数 1.2			有効径 0.55mm 均等係数 1.2			有効径 0.80mm 均等係数 1.2			有効径 0.55mm 均等係数 1.2			有効径 0.80mm 均等係数 1.2		
濾過速度	砂面上水深	濁度	色度	過マンガン酸カリ消費量	濁度	色度	過マンガン酸カリ消費量	濁度	色度	過マンガン酸カリ消費量	濁度	色度	過マンガン酸カリ消費量	濁度	色度	過マンガン酸カリ消費量
m/日	m															
120	1.1	98.65	58.00	39.89	98.10	54.50	37.32	95.45	51.00	31.83	99.4	94.0	93.6	96.8	87.9	79.8
120	1.8	85.34	53.44	34.31	80.48	49.49	29.96	73.69	48.46	25.35	94.3	92.8	87.3	86.3	90.9	73.9
180	1.8	93.39	53.57	38.17	90.84	50.00	31.93	87.03	45.83	26.31	97.3	93.3	83.7	93.2	85.6	68.9
180	1.1	98.15	53.08	36.95	96.50	52.30	29.44	94.40	43.85	26.75	98.3	98.5	79.7	96.2	82.6	72.4
平	均	93.88	54.50	37.33	91.48	51.57	32.16	87.64	47.29	27.56	97.4	94.6	86.2	93.4	86.8	73.8

表-19A　濾過水の水質比較（沈澱池を設置した場合）

有効径 (mm)	均等係数	濁度（度）			色度（度）			過マンガン酸カリ消費量（ppm）		
		原水	未濾水	濾過水	原水	未濾水	濾過水	原水	未濾水	濾過水
0.45	1.2	217.11	85.14	0.14	32.85	22.85	3.71	30.39	18.15	5.78
0.55	1.2	195.00	79.50	0.21	33.12	23.12	4.75	29.44	18.73	6.96
0.80	1.2	174.00	71.80	0.92	32.50	22.00	7.00	25.35	16.79	7.56

表-19B　濁度その他の除去率と有効径 0.45mm に対する比（%）

有効径 (mm)	均等係数	未濾水に対する濾過水の除去率			有効径 0.45mm に対する比		
		濁度	色度	過マンガン酸カリ消費量	濁度	色度	過マンガン酸カリ消費量
0.45	1.2	99.84	83.76	68.15	100	100	100
0.55	1.2	99.74	79.46	62.84	99.9	94.9	92.2
0.80	1.2	98.65	68.18	54.97	98.8	81.4	80.7

ていることになる。この点有効径の大なる砂層は小なるものよりも経済的であるといえる。

砂面上水深については，これを増加させても損失水頭が時間の経過とともに急増する傾向があるから，砂面上水深を大にしてもその割合に濾過持続時間は増加しない。しかし砂面上水深が 1.0 m 以下とする場合には負水頭が過大となるから濾過水頭を小さくすることを余儀なくされるのでできるだけこれを避けなければならない。濾過速度を大にすれば濾過持続時間は短縮する。濾過速度を大にすることによる利害得失は同時試験を実施しなかったので明確でないが，総濾過水量の比較，洗浄水量と濾過水量との比率等から検討すべきである。

砂層の成層，不成層によって同じ粒度の砂層でも濾過持続時間は異なる。同一有効径の場合は均等係数の小なる砂層ほど速やかに変化して成層後の安定した状態になるが，均等係数の大なる砂層は成層化が遅れるので安定した状態にはなかなか達しない。均等係数の大なる砂層の場合はこのような欠点があるため，最近では成層後微小砂粒をかき取ったり，または洗浄排水トラフより流出させるようにしているところもある。

濾過水の水質と砂層の粒度との関係は一般に粒度が小なるほど濾過水の水質は良好となる。ところが濾過持続時間は砂層の粒度が大なるほど増大するので，濾過水の水質を一定の制限下におくならば，その範囲内において濾過持続時間をできるだけ増大させるような粒度を選定しなければならない。実験の結果では成層後は有効径が同一ならば均等係数の小なる砂層ほど濾過持続時間は増加し，濾過水の水質も良好となる傾向を示した。また同一均等係数であれば有効径の大なる砂層の濾過持続時間は大となるが，濾過水の水質はやや低下する傾向にある。色度，過マンガン酸カリ消費量として表わされる有機物の除去率は粒度の小なる砂層ほど大であり，無機物が主体たる濁度の除去率は粒度の相違による影響が少ない。

5. 表面洗浄併用時の洗浄効果

〔1〕 表面洗浄開始時間

(i) 表面洗浄開始時間と逆流洗浄開始時間との関係

表面洗浄は噴射水によって主として砂層の表層部の圧密された抑留汚泥を粉砕してときほごし，あらかじめ砂粒と汚泥を分離しておいて，逆流洗浄による洗浄効果を高めるために行なうものであるから，逆流洗浄よりも早く開始しなければならないことはもちろんであるが，逆流洗浄開始よりも必要以上に早く開始させた場合にはその洗浄水量に無駄を生じたり，また表面洗浄の影響が砂層の中層部以下に及ばないうちに洗浄を終了させることになる。また逆に逆流洗浄開始と同時，あるいはその直前より実施した場合には，表層部の汚泥の粉砕がまだ不完全なうちに逆流洗浄水が上昇してくるため，洗浄排水トラフにおける洗浄排水汚泥量の最大到達時間が遅れ，ひいては汚泥量の減少率も低下し，表面洗浄併用による効果が減殺されることになる。それで表面洗浄開始時間をいろいろかえて，洗浄汚水中の汚泥量の変化から表面洗浄と逆流洗浄開始時間との関係を調べたものは図-33，図-34，図-35 に示すとおりである。

実験では洗浄排水トラフに流入する汚水中の汚泥量を逆流洗浄時間中に 15 秒ごとに採取して図示したが，実験は固定式表面洗浄を使用し，次の 5 項目の場合について調べた。

(1)逆流洗浄のみの場合

(2)表面洗浄と逆流洗浄とを同時に開始した場合

(3)表面洗浄を逆流洗浄より15秒前から開始した場合

(4)表面洗浄を逆流洗浄より30秒前から開始した場合

(5)表面洗浄を逆流洗浄より60秒前から開始した場合

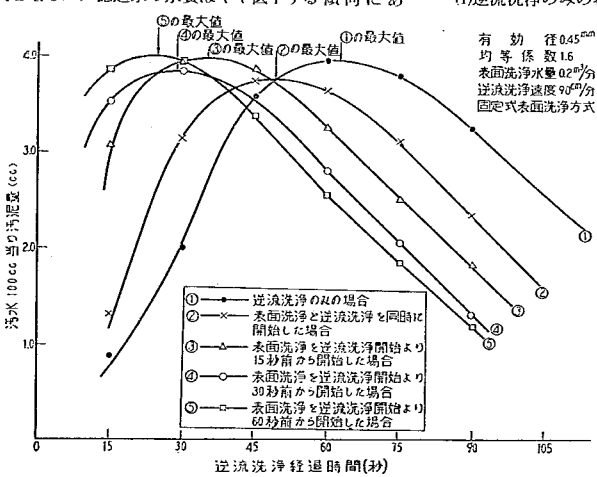


図-33　表面洗浄開始時間と洗浄排水汚泥量の関係

図-33 は均等係数 1.6，有効径 0.45 mm の砂層について実験したもので，膨脹比は約 43 %である。(1)の場合には洗浄排水の汚泥量の時間的変化が全体として遅れて現われ，その最大値は逆流洗浄開始後 62.5 秒となっている。したがって 1 回の洗浄を終了するのに 140 秒余を要することになる。表面洗浄を

併用した場合は，いずれも(1)の場合よりも最大値が早く現われており，その最大値は(2)の場合 49 秒，(3)の場合 35 秒，(4)の場合 28.5秒，(5)の場合 24.5秒となっている。したがって1回の洗浄を終了させるには逆流洗浄開始後おそくて 120 秒，早いものは 90 秒である。表面洗浄を併用させることによって逆流洗浄のみの場合より洗浄が速やかに終了させ得るし，表面洗浄開始時間も逆流洗浄に先立つこと 15 秒，30 秒，60 秒前と早目にすることによって洗浄の終了も速やかとなる。

図-34 は均等係数 1.6，有効径 0.55mm の砂層について実験したもので，膨脹比は 34 % である。傾向としては図-33 の場合と同様である。ただ表面洗浄を逆流洗浄開始 15 秒，30 秒，60 秒とした場合の相違は有効径 0.45mm よりも少ない。また最大値もいくぶん大となり，最大値の到達時間も一般に有効径 0.45mm の場合より早目に出現している。

図-35 は均等係数 1.6，有効径 0.80mm の砂層について実験したもので膨脹比は 20% 程度であるが，傾向としても図-33～34 と同様であり，表面洗浄開始時間 15 秒と 30 秒との相違は有効径 0.55mm の場合よりも相当少ない。しかし有効径 0.55mm の場合よりも最大値はさらに大で，最大値到達時間も有効径 0.55mm に比べ早目に出現している。

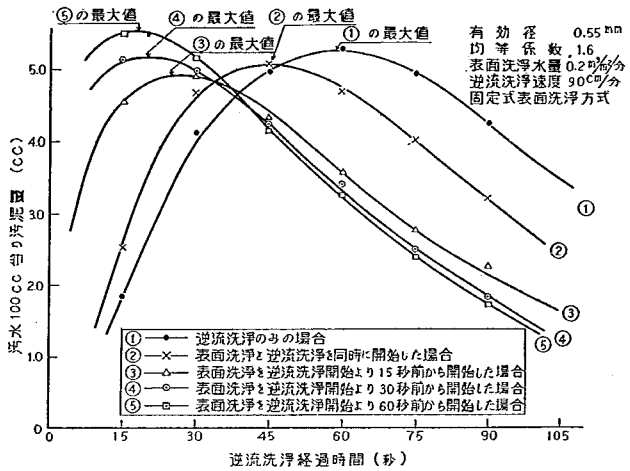


図-34　表面洗浄開始時間と洗浄排水汚泥量の関係

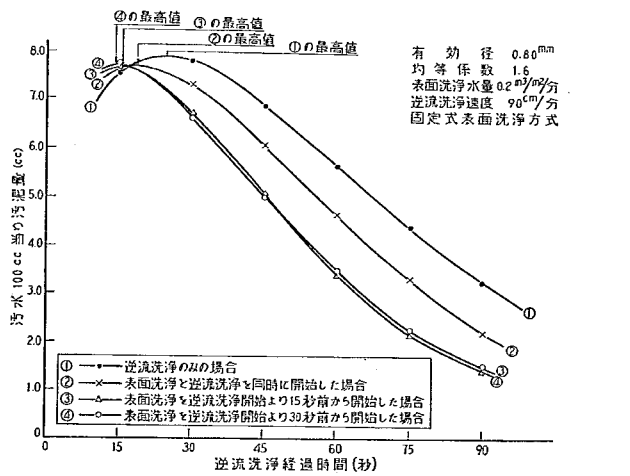


図-35　表面洗浄開始時間と洗浄排水汚泥量の関係

図-33～図-35 についてみると，洗浄排水汚泥量が最大値に到達した以後の減小曲線部などの曲線でもほぼ平行なものとなっており，したがって汚泥量の最大値到達時間を用いて洗浄終了時間を推定することができる。それゆえ各粒度の場合について洗浄排水汚泥量最大値到達時間と逆流洗浄開始に先立ち実施する表面洗浄開始時間との関係を図示すると図-36 に示すとおりとなる。これによると有効径 0.45mm と 0.55mm は曲線が急で，表面洗浄の開始時間が，洗浄時間に大きな影響を与えていることを示し，この場合は逆流洗浄開始前 60 秒前後が適当で，少なくとも 30 秒前から開始する必要がある。有効径 0.80mm については曲線も緩やかであまり大きな差異は認められないが，経済的には 30 秒前に表面洗浄を開始する必要がある。

また図-33，図-34，図-35 に示した結果では逆流洗浄に先立ち実施する表面洗浄開始時間を 60 秒前まで（ただし有効径 0.80mm では 30 秒前）としたが，この開始時間を 60 秒以前としてもその効果はほとんど変らない。この実験結果のうち有効径 0.45mm については図-37 に示すとおりである。

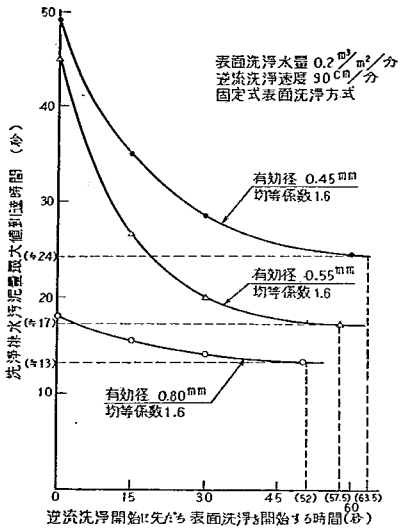


図-36　表面洗浄の開始時間

以上のことから，表面洗浄を併用すれば逆流洗浄のみの場合よりも洗浄効果が著しく高く，その効果は洗浄効果の比較的悪い有効径の小なるものほど著しいことがわかった。したがって，表面洗浄開始時間は粒度に応じて30～60 秒前とすべきであるが，いずれの場合にしても一定限度以上にあまり早すぎても効果は変らずかえって洗浄水量に無駄を生ずることになる。

（ii）　表面洗浄と逆流洗浄速度との関係

表面洗浄を併用する場合，その開始時期が定まればその洗浄効果をより高める逆流洗浄速度はどの程度にすべきかということが問題となる。そこで固定式表面洗浄方式を用い，表面洗浄水量を 0.2 m³/m²/分 とし，表面洗浄開始時期を逆流洗浄開始前 60 秒として逆流洗浄時の洗浄排水汚泥量の調査を行なった結果の 1 例は 図-38, 図-39, 図-40 に示すとおりである。これらの実験についてみると，有効径の如何にかかわらず，逆流洗浄速度 90 cm/分 の場合は 60 cm/分 に比較して 洗浄排水汚泥量の最大値の出現が早くて洗浄の終了もすみやかであり，60 cm/分 の場合は 洗浄排水汚泥量の減少も緩やかである。有効径 0.80 mm の場合は 120 cm/分についても実験を行なったが，図-36 に示したように 90 cm/分の場合よりも洗浄の終了が早い。すなわち表面洗浄を併用する場合でも砂層の粒度に応じた膨脹比を与える逆流洗浄速度とすべきであって，逆流洗浄のみの場合と同様の大きさとする必要がある。

〔2〕　表面洗浄時間と水量

表面洗浄水量は水道施設基準[27]によれば固定式の場合 0.2 m³/m²/分，回転式の場合 0.05～0.1 m³/m²/分 となっている。しかし表面洗浄時間については取り決めが無いので通常 4 分程度としているところが多い。表面洗浄時間ならびに表面洗浄水量はその効果を表層面のみにとどめるか，中層部以下に及ぼすかによって変ってくる。逆流洗浄開始に先立ち表面洗浄を併用することによって汚球の発生原因となる砂層の表層部に残留する汚泥量を極力減少させうることはもちろんであるが，逆流洗浄中にも表面洗浄を行なうことによって中層部以下の砂粒の摩擦，衝突の機会を増し，中層部以下の砂粒に付着した汚泥の分離をたすける。したがって逆流洗浄のみによる洗浄を行なって来た濾過池に表面洗浄装置を設置して表面洗浄を併用すれば，泥球の発生を防止するばかりでなく，洗浄回数を重ねるにしたがって相当深部まで侵入していた既存の泥球の除去にも効果を発揮する。

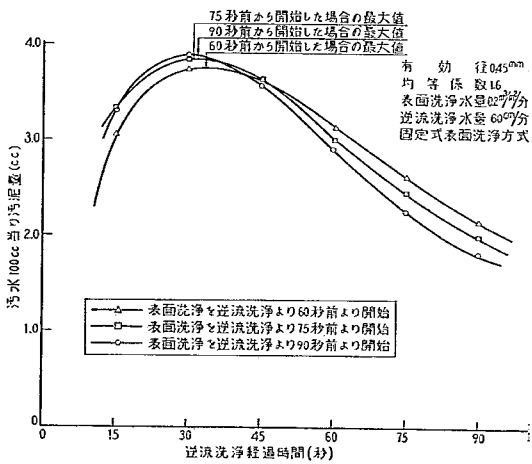


図-37　表面洗浄開始時間と洗浄排水汚泥量の関係

このような既存の泥球の除去によって砂層の清浄度は高度に保たれるほか，表面洗浄には逆流洗浄時間を短縮させる効果がある。すなわち逆流洗浄のみの場合は砂層を膨脹させた後，砂粒間の摩擦力だけによって砂粒と汚泥を分離して比重の軽い汚泥のみを上昇させ排除するのであるが，表面洗浄を併用した場合には噴射水によって表層部の汚泥を粉砕するとともに膠着した砂粒と汚泥の分離を促進し，さらに逆流洗浄中の噴射水によって砂粒間の摩擦衝突を助成して中層部以下の汚泥の排除を容易にするから，逆流洗浄のみの場合に比べて洗浄排水トラフよりの洗浄排水汚泥量の最大値到

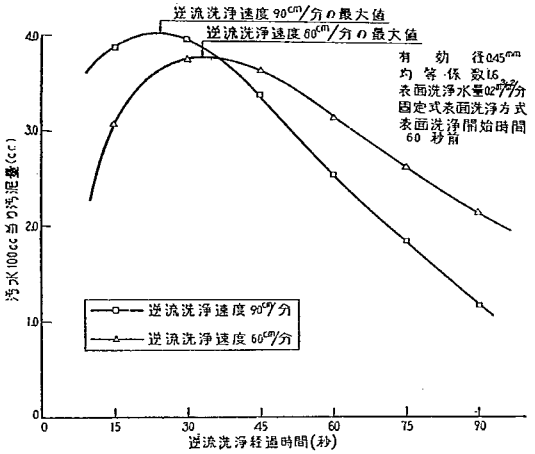


図-38 表面洗浄開始時間と洗浄排水汚泥量の関係

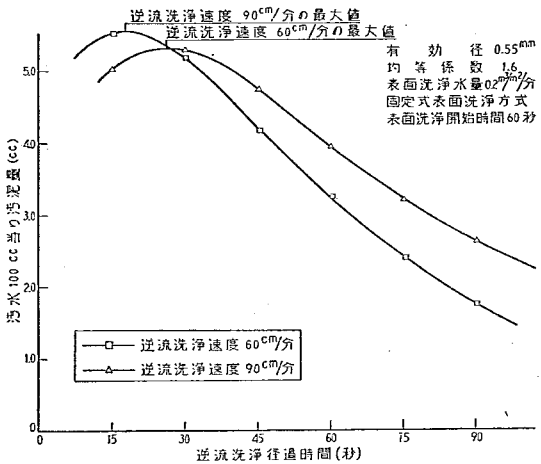


図-39 表面洗浄開始時間と洗浄排水汚泥量の関係

達時間は早くなり，しかも最大値出現後の汚泥排出も速やかに行なわれる。したがって洗浄が早く終了するので逆流洗浄時間の短縮が図れるのである。図-41 はこの1例を示したもので，逆流洗浄速度を 90cm/分 とした場合，汚泥排出に要する時間は逆流洗浄のみの場合4分を必要とするのに，表面洗浄を併用した2池では 2.5 分～2.7 分で汚泥の排出は全部終了している。このように洗浄が早く終了するので逆流洗浄時間の短縮が図れるのである。しかし，この逆流洗浄時間の短縮には，逆流洗浄速度，表面洗浄方式，表面洗浄時間とその水量が関係する。それで固定式，回転式表面洗浄のおのおのについて表面洗浄時間とその水量について調査した。

（i） 固定式表面洗浄の場合

表面洗浄水量 0.2 m³/m²/分，逆流洗浄速度 90 cm/分，表面洗浄は逆流洗浄開始前1分として，表面洗浄時間を変化させ洗浄排水汚泥量の変化を調査した。これらの結果の1例は図-42，図-43，図-44 に示すとおりである。表面洗浄時間は 1.5 分よりも，2.5 分，3.5 分と長くした方が洗浄の終了が早いが，有効径 0.45 mm，0.55 mm では膨脹比がそれぞれ 43% と 34% で逆流洗浄時間の 2.5 分，と 3.5 分とではほとんど差異がないから，表面洗浄時間は 2.5 分で足り，そのうえ逆流洗浄時間も 2.5

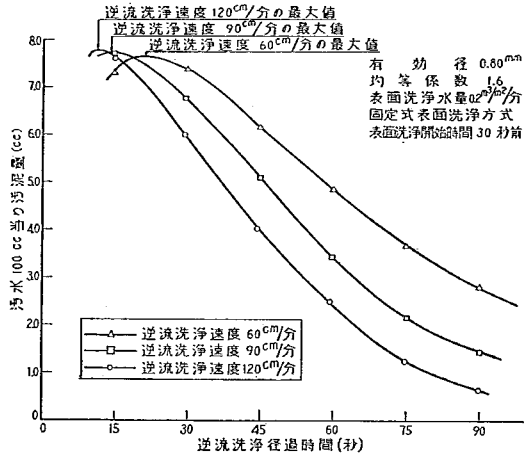


図-40　表面洗浄開始時間と洗浄排水汚泥量の関係

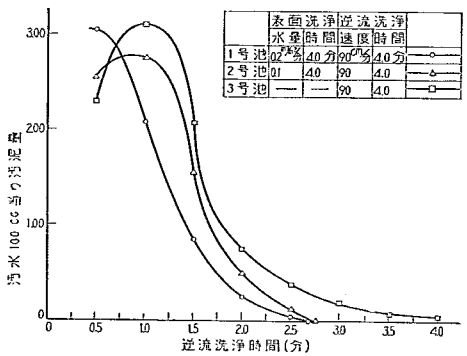


図-41　逆流洗浄のみの場合と表面洗浄併用の場合との洗浄排水汚泥量の比較

分で十分という結果になっている。有効径 0.80 mm では膨脹比が 20% であるが，表面洗浄時間は長いほど洗浄の終了が早いことを示しており，逆流洗浄時間も 4 分程度必要である。この場合は濾過持続時間も長いし，砂層による汚泥の抑留量も多く，しかも汚泥が砂層の相当深部まで侵入しているため，その排出が遅れた。したがって表面洗浄時間は砂層の粒度によって変化させるべきであり，逆流洗浄速度も粒度に対応した最適値とすべきである。もし逆流洗浄速度を最適値よりも小さくする場合には，膨脹比も小さく，汚泥の排出が遅れるから，表面洗浄時間を増加させても砂層深部の汚泥の排出は困難で，表面洗浄を併用してもその効果は十分発揮できないことになる。

つぎに表面洗浄時間を 2.5 分，逆流洗浄速度 90 cm/分，表面洗浄は逆流洗浄開始前 1 分として，表面洗浄水量を変化させて洗浄排水汚泥量の変化を調査した結果の 1 例は図-45，図-46，図-47 に示すとおりである。この実験からは一応表面洗浄水量が大であるほど洗浄排水汚泥の排出は早くなるが，有効径 0.45 mm，0.55 mm では逆流洗浄開始後 2.5 分では 0.25 m³/m²/分 でも 0.20 m³/m²/分 でもほとんど差はない。しかし両者とも逆流洗浄開始後 2.0 分では汚泥排出が全部終了していない。また表面洗浄水量が 0.1 m³/m²/分 の場合には逆流洗浄時間は 3 分以上としなければ洗浄効果を同等に保てない。したがって水道施設基準[28]に定められた 0.2 m³/m²/分 なる数値は有効径 0.45 mm，0.55 mm 程度の砂層の表面洗浄に適している。有効径 0.80 mm の例では逆流洗浄開始 4 分後の汚泥量は表面洗浄水量 0.2 m³/m²/分 と 0.25 m³/m²/分 とはほぼ同様となっているが，0.25 m³/m²/分 の場合の汚泥量の減小率が大きく，この場合には 3.5 分程度で逆流洗浄を終了させることも可能である。それゆえ有効径 0.80 mm のような粒度の大なる砂層を

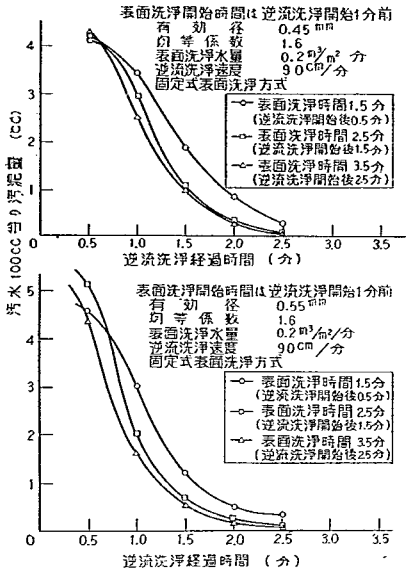


図-42　表面洗浄時間と洗浄排水汚泥量の関係

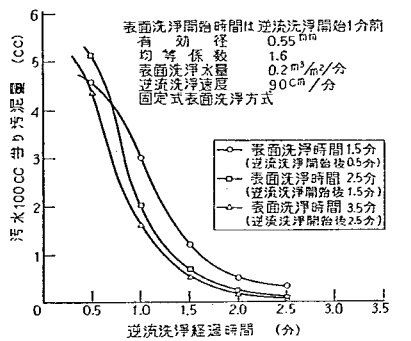


図-43　表面洗浄時間と洗浄排水汚泥量の関係

使用し，逆流洗浄時間を短縮しようとする場合には表面洗浄水量を 0.25～0.30 m³/m²/分 とした方がよい。

以上の結果を総合すると，有効径 0.45 mm，0.55 mm のような比較的小なる有効径の濾過砂を使用する場合には，表面洗浄時間を 2.5 分，逆流洗浄時間を 2.5 分とすれば，表面洗浄水量は 0.2 m³/m²/分 が適当であり，逆流洗浄時間を 3.5～4.0 分とすれば表面洗浄水量は 0.1 m³/m²/分 でも同様の効果が得られる。有効径 0.80 mm の場合には逆流洗浄速度 90 cm/分 では膨脹比が低水温時には約 20%，高水温時には約 14% で不足するから表面洗浄効果は深層部にまで及ばず，逆流洗浄効果にたよる面がどうしても多くなるから，この場合表面洗浄時間

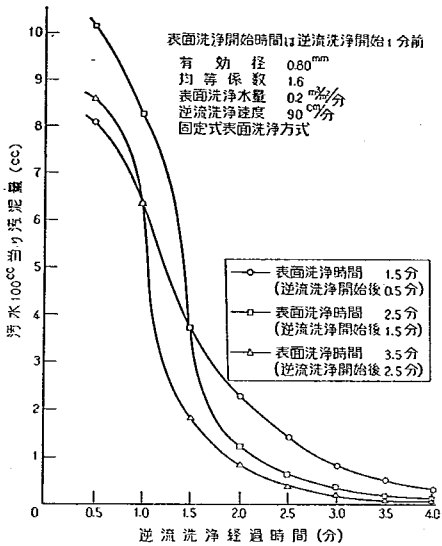


図-44　表面洗浄時間と洗浄排水汚泥量の関係

を 2.5 分，洗浄水量を 0.2 m³/m²/分 とすれば，逆流洗浄時間の 4 分間は是非必要で，逆流洗浄時間の短縮をはかるとき，または効果ある洗浄を行なう場合には表面洗

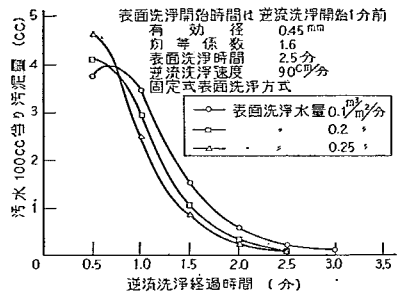


図-45　表面洗浄水量と洗浄排水汚泥量の関係

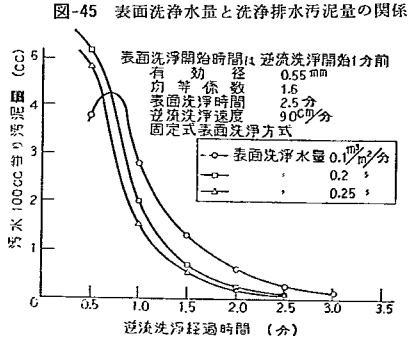


図-46　表面洗浄水量と洗浄排水汚泥量の関係

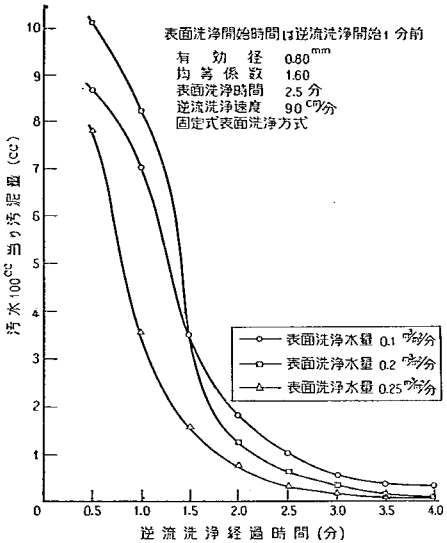


図-47　表面洗浄水量と洗浄排水汚泥量の関係

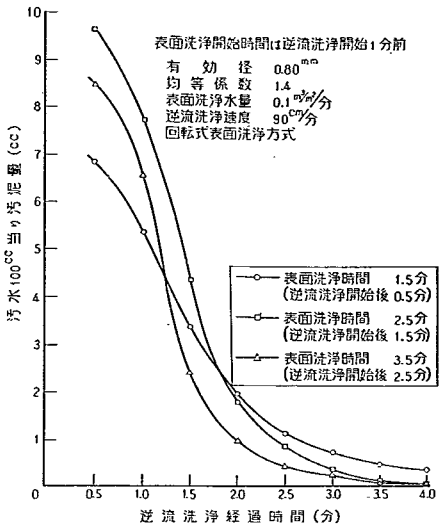


図-50　表面洗浄時間と洗浄排水汚泥量の関係

浄水量は 0.25～0.30 m³/m²/分 とするのが適当である。

(ii) 回転式表面洗浄の場合

表面洗浄水量を 0.1 m³/m²/分，逆流洗浄速度を 90 cm/分，表面洗浄開始時期は逆流洗浄開始前 1 分として

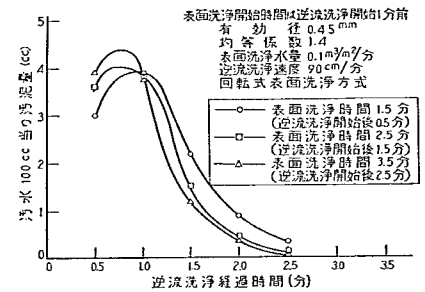


図-48　表面洗浄時間と洗浄排水汚泥量の関係

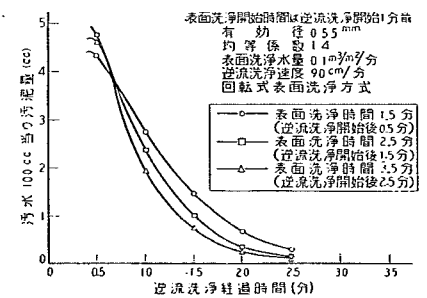


図-49　表面洗浄時間と洗浄排水汚泥量の関係

表面洗浄時間を変えて，洗浄排水トラフからの洗浄排水汚泥量の変化を求めたものの 1 例は図-48, 図-49, 図-50 に示すとおりである。

表面洗浄時間 1.5 分は 2.5 分，3.5 分に比べて常に汚泥排出効果が劣っている。有効径 0.45 mm，0.55 mm では逆流洗浄開始後 2.5 分経過すれば，表面洗浄時間 2.5 分でも 3.5 分でもほとんど差異は認められない。しかし有効径 0.80 mm の場合では汚泥が砂層深部まで侵入しており，しかも逆流洗浄速度 90 cm/分 では膨脹比は 20% となるから，逆流洗浄時間を 4.0 分とすれば，表面洗浄水量が多いほど好結果が得られる。もし膨脹比を有効径 0.45 mm，0.55 mm の砂層の場合と同様に 35 % とすれば逆流洗浄時間を短縮することもできる。

表面洗浄時間を 2.5 分とし，逆流洗浄速度を 90 cm/分，表面洗浄開始時期を逆流洗浄開始前 1 分として，表面洗浄水量を変えて，洗浄排水汚泥量の時間的変化を求めたものの 1 例は図-51, 図-52, 図-53 に示すとおりである。この場合も固定式表面洗浄の場合と同様表面洗浄水量の多い方が優れた結果を示している。水道施設基準[29]では回転式表面洗浄の場合は噴射水量 0.05～0.10 m³/m²/分 として固定式表面洗浄の 1/4～1/2 でよいことになっているが，やはり水量の多い方が効果がある。有効径 0.45 mm と 0.55 mm の場合は表面洗浄水量が 0.1 m³/m²/分 ではいずれも逆流洗浄時間 2.5～3.0 分で洗浄は終了しており，表面洗浄水量が 0.05 m³/m²/分 の場合は 0.1 m³/m²/分 以上の場合に比して 0.5 分以上余計に逆流洗浄を行なわなければならない。有効径 0.80

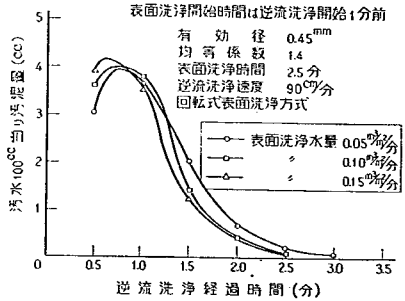


図-51 表面洗浄水量と洗浄排水汚泥量の関係

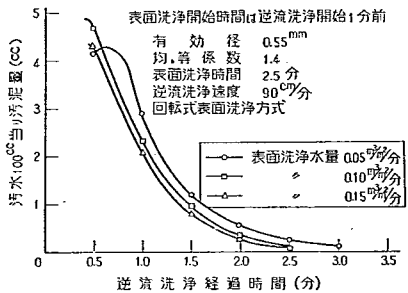


図-52 表面洗浄水量と洗浄排水汚泥量の関係

mmの場合は逆流洗浄速度が90cm/分では表面洗浄水量を0.15 m³/m²/分としても逆流洗浄時間は4.0分間以上を必要とする。

〔3〕 表面洗浄併用時の逆流洗浄速度と洗浄時間

水道施設基準[20]によれば表面洗浄併用時の逆流洗浄速度は40～60cm/分，洗浄時間は4～6分間をきめている。この数値は逆流洗浄のみの場合に比べ，逆流洗浄速度は2/3に減小させてもよいことを示している。しかしながら，本章〔1〕で述べたように逆流洗浄速度を減小させると，汚泥排出に遅れを生じ，この遅れは図-38，図-39，図-40に示したように洗浄排水汚泥量の最大値到達時間の遅れとその後の汚泥量の減小割合の遅れの双方によってその不利益が非常に大きなものとなるから，表面洗浄を併用しても逆流洗浄のみの場合よりも小さくしない方がよい。それゆえ表面洗浄を併用した場合でも逆流洗浄速度はその砂層の粒度に適合したものとしておいて，その上で洗浄時間，洗浄水量の節約を考慮する方が当を得たものとなる。逆流洗浄時間と洗浄時間とは逆比例的な関係があって逆流洗浄速度を小にした場合は洗浄時間を増加させる必要があるが，この逆流洗浄速度を小さくすれば濾層内部の汚泥排出が非常に困難なものとなる。

回転式表面洗浄方式により，表面洗浄水量を0.1 m³/m²/分，表面洗浄開始時期を逆流洗浄開始前1分として

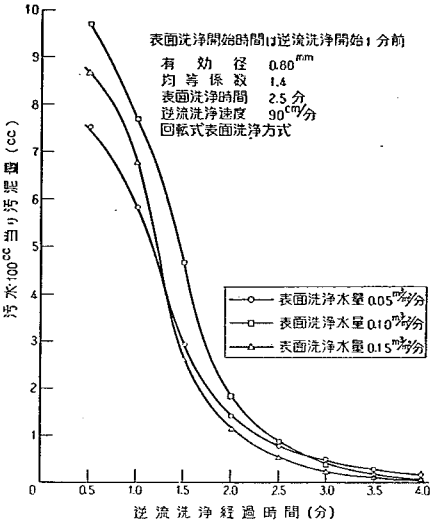


図-53 表面洗浄水量と洗浄排水汚泥量の関係

逆流洗浄速度を変えて洗浄排水汚泥量の時間変化を求めたものの1例は図-54，図-55，図-56に示すとおりである。これについてみると逆流洗浄速度は60cm/分より

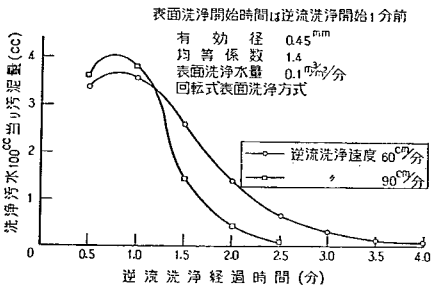


図-54 表面洗浄併用時の逆流洗浄速度と洗浄排水汚泥量の関係

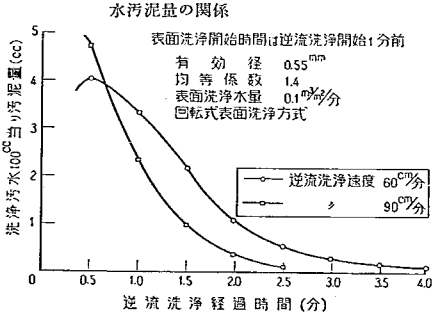


図-55 表面洗浄併用時の逆流洗浄速度と洗浄排水汚泥量の関係

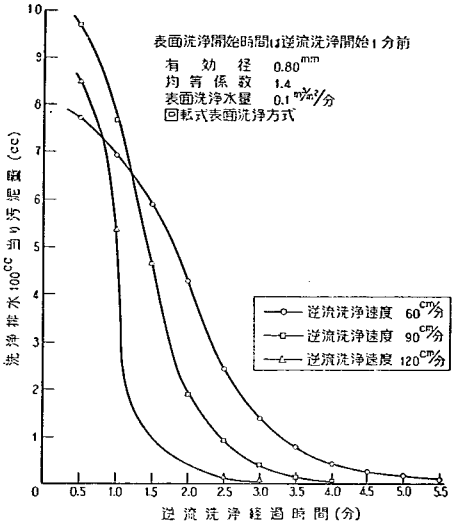


図-56　表面洗浄併用時の逆流洗浄速度と洗浄排水汚泥量の関係

表-20　逆流洗浄時間

有効径	均等係数 \ 逆流洗浄速度 (cm/分)	60	90	120
		分 秒	分 秒	分 秒
0.45	1.4	3.40	2.30	—
0.55	1.4	3.50	2.30	—
0.80	1.4	5.30	3.30	2.30

表-21　洗浄水量

有効径	均等係数 \ 逆流洗浄速度 (cm/分)	60	90	120
		m³/m²	m³/m²	m³/m²
0.45	1.4	2.45	2.50	—
0.55	1.4	2.55	2.50	—
0.80	1.4	3.55	3.40	3.25

（注）　本数値は逆流洗浄水量と表面洗浄水量を加えたものである

90 cm/分 の方が洗浄の終了が早く，有効径 0.80 mm では 120 cm/分 とした時が最も良好である。これらの実験から洗浄排水 1 l 当りの30分間沈澱汚泥量を 1 ml 以下に保つためには，少なくとも表-20 のような逆流洗浄時間が必要である。またこの場合の洗浄水量は表面洗浄水量をも加えて表-21 のとおりであるから，有効径 0.45 mm，0.55 mm，0.80 mm に対応した逆流洗浄速度はそれぞれ 60 cm/分，90 cm/分，120 cm/分 が適当していることがわかり，結局砂層の粒度に応じた最小限の洗浄水量が得られる逆流洗浄速度を採用すべきである。

〔4〕　**表面洗浄と砂層の汚染度**

（i）　**砂層の汚染**

表面洗浄を併用すれば逆流洗浄速度が適正値より小さ

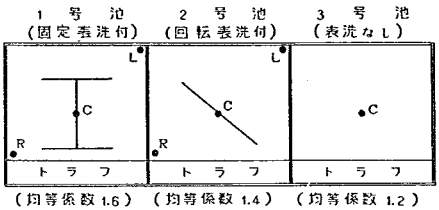


図-57　濾過砂採取位置

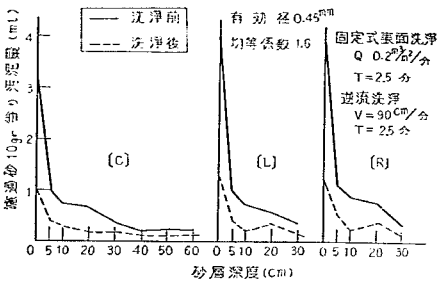


図-58A　洗浄前後の砂層深度別汚泥量

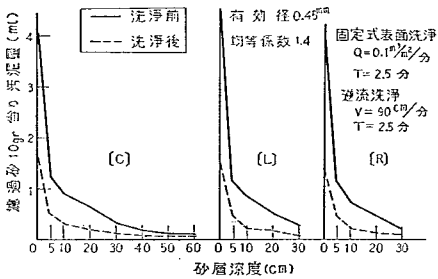


図-58B　洗浄前後の砂層深度別汚泥量

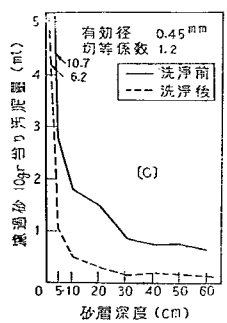


図-58C　洗浄前後の砂層深度別汚泥量

くても汚泥の排除が可能であり，一般的には逆流洗浄のみの場合よりも砂層内部，とくに表層部の清浄度を高く保つことができる。しかも表面洗浄を逆流洗浄開始後も継続すると，逆流洗浄の上昇流に乗って浮揚して来た汚

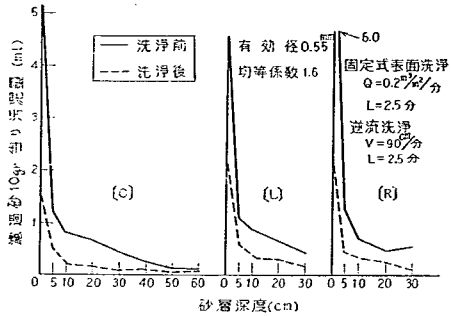


図-59A　洗浄前後の砂層深度別汚泥量

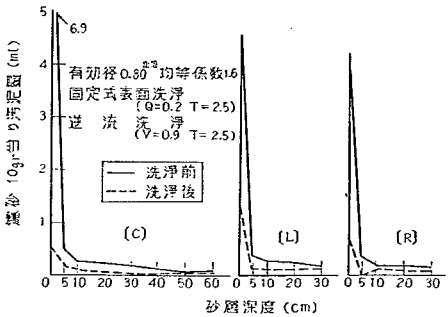


図-60A　洗浄前後の砂層深度別汚泥量

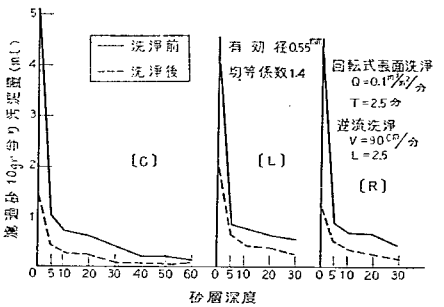


図-59B　洗浄前後の砂層深度別汚泥量

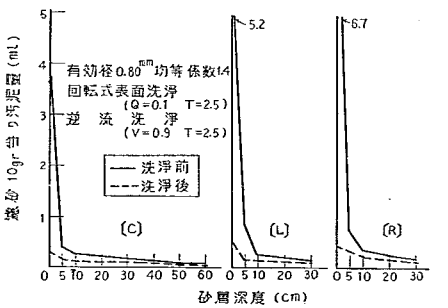


図-60B　洗浄前後の砂層深度別汚泥量

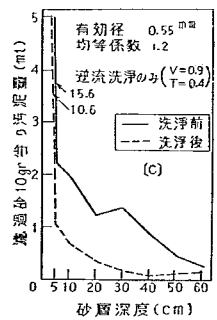


図-59C　洗浄前後の砂層深度別汚泥量

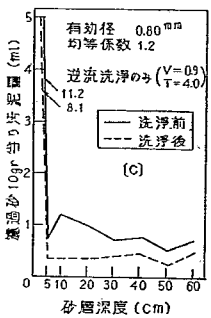


図-60C　洗浄前後の砂層深度別汚泥量

染された砂粒の摩擦，衝突の機会を増加させ，砂粒と汚泥の分離が容易となるのでその効果は砂層の中層部以下にも及ぶ。また逆流洗浄のみの場合には表層部における残留汚泥量が非常に多くなり，濾過池上部からは砂粒が見えないくらいの状態になるが，表面洗浄の併用によってこれらの汚泥量は極端に減少してくる。

固定式表面洗浄を併用した場合，回転式表面洗浄を併用した場合，および逆流洗浄のみの場合について洗浄前後の砂層深度別汚泥量を求め，砂層の清浄度を調べたのが図-58，図-59，図-60 である。濾過砂の採取位置は図-57 に示すように表面洗浄を併用した2池では中央部以外に両隅部でも表層部以下 30cm までの試料を採取した。図-58～60 を基にして洗浄による汚泥の除去率を示したものが図-61，図-62，図-63 である。

一般的にいうと，逆流洗浄のみの3号池では砂層表面から 5cm までは，洗浄前後のいずれにおいても汚泥量が著しく多い。すなわち逆流洗浄のみでは洗浄回数を重ねても表層部には常に多量の汚泥が残留し，しかもこの汚泥量は漸時増加の傾向を示す。これに比して表面洗浄を併用した 1，2 号池では有効径の大小にかかわ

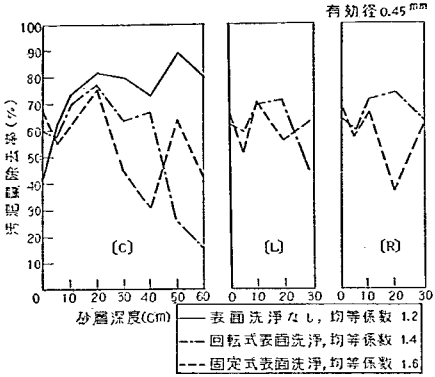


図-61　砂層の洗浄による汚泥の除去率

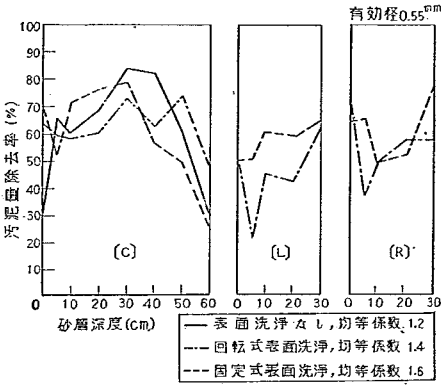


図-62　砂層の洗浄による汚泥の除去率

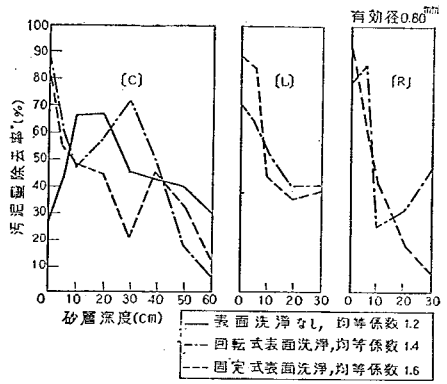


図-63　砂層の洗浄による汚泥の除去率

らず，表層部に残留する汚泥量は非常に少なく，表層部以下でもその清浄度は高い。表面洗浄を併用した場合にはこのように清浄度は非常に高いこととなるが，洗浄前の汚泥量が少ないため洗浄除去率としては逆流洗浄のみの場合の方が高くなっている例もあるが，全般的に表面洗浄併用の効果は非常に大きい。さきに〔3〕で洗浄排水汚泥量の時間的変化の実験から，逆流洗浄時間ならびに洗浄水量を減小させうることを述べたが，このように洗浄時間，洗浄水量を減小させても，砂層内部の清浄度は非常に高いものとなる。これらはいずれも濾過池に流入する汚泥量，排出または残留する汚泥量を数値的に確めたものではない。すなわち洗浄時間は洗浄能力の範囲内での汚泥の排出が終了すれば，洗浄は終了したものとして，逆流洗浄のみでも表面洗浄併用の場合でも残留汚泥量に無関係に決めている。したがって逆流洗浄時間は，除去可能な汚泥を排除するために必要な時間で，除去可能か否かは逆流洗浄のみの場合は，その粒度と逆流洗浄速度により決まり，表面洗浄併用の場合は表面洗浄時間，水量と方式ならびに粒度と逆流洗浄速度の関係からきまることになる。

(ii)　表面洗浄方式と砂層の洗浄効果

逆流洗浄のみの場合には，逆流洗浄速度 90 cm/分 で4分間洗浄を実施しても，砂層内の汚泥は漸次増加していく傾向にある。この場合逆流洗浄時間4分というのは汚泥排出のすべてが終了する時間であり，これ以上逆流洗浄を継続しても砂層内の汚泥排出には効果がない。しかし表面洗浄は逆流洗浄を開始する1分前に開始して，あらかじめ表層部に膠着した汚泥を粉砕しておいて逆流洗浄の上昇流によって汚泥の排出を早めるので，それだけでも逆流洗浄時間を短縮できる。かつまた表面洗浄水が加わるので膨脹比も逆流洗浄のみの場合よりもやや増加することになるから，その膨脹比の増加分に相当するものだけ逆流洗浄速度を減小させることもできる。ただし表面洗浄は逆流洗浄よりも早く開始するかわり，早く終了するから，この表面洗浄終了後は膨脹比がそれだけ低下して汚泥排出も減少するから，表面洗浄併用時の逆流洗浄速度は逆流洗浄のみの場合と同じ速度としておくのが望ましい。

固定式表面洗浄の場合は，回転式表面洗浄より水量を2～4倍とするのが普通である。しかしその噴射水圧は1～1.2 kg/cm² でよいため逆流洗浄ポンプまたは高架水槽で間に合う。しかし回転式表面洗浄の噴射水圧は 3～4 kg/cm² と非常に高く，ために多段タービンポンプのような高揚程ポンプを使用しているが，表面洗浄水量の少ない回転式が水量の多い固定式と同等の効果を上げるのは強力な噴射水圧によって，噴射回転管を回転させると同時に噴射水によって砂粒と汚泥を分離し，砂層を撹拌して砂粒の衝突回数を増加させるからである。

表層面における汚泥除去の効果を比較するため，表面洗浄水量を，固定式で 0.2 m³/m²/分，回転式で 0.1 m³/m²/分 とし，洗浄前後の表層部の洗浄効果を調べたのが

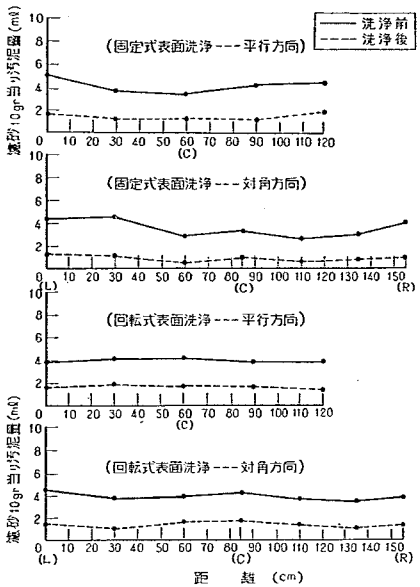


図-64　砂層表層部の汚泥分布（有効径 0.45 mm）

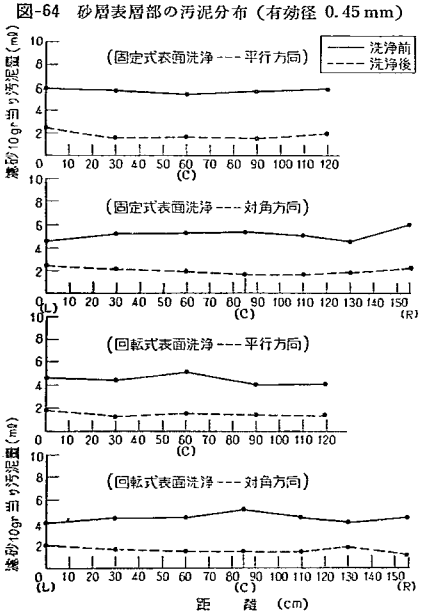


図-65　砂層表層部の汚泥分布（有効径 0.55 mm）

図-64，図-65，図-66 である。表層部は汚泥も多く，しかも砂粒は小さくて攪乱されやすいので，はっきりした比較はできないが．回転式表面洗浄は有効径 0.80 mm のような粒度の大なる砂層に適しており，固定式表面洗浄は有効径 0.45 mm のような粒度の小なる砂層に適している。急速濾過池の隅部の洗浄はなかなか均一に行なわれがたいのであるが，この点については回転式表面洗浄が優れている。実験結果では有効径 0.55 mm では僅かではあるが回転式表面洗浄の方が全体として清浄度において優れている。

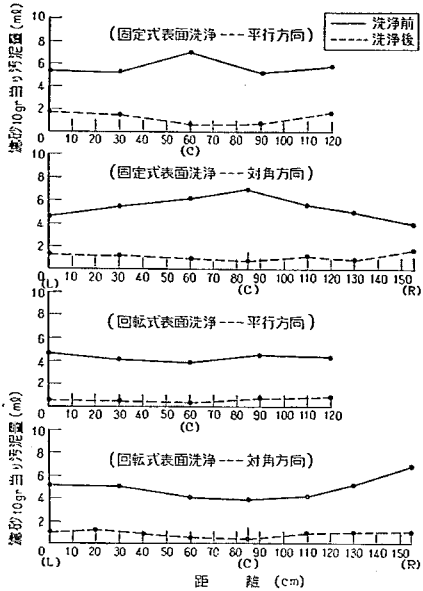


図-66　砂層表層部の汚泥分布（有効径 0.80 mm）

回転式表面洗浄は噴射水圧が大であるため，粒度の大なる砂層はともかくも，粒度の小なる砂層の場合には砂粒が飛散してかえって適当な摩擦が与えられない。これに対して固定式表面洗浄は噴射水の水量が多いから砂粒間の摩擦を増大させるには効果があるが，噴射水圧が低いので汚泥を砂粒から剥脱さるることにおいて劣るから粒度の大なる砂層には回転式表面洗浄の方が優れた結果を与える。したがって有効径 0.45 mm～0.55 mm では固定式表面洗浄，有効径 0.50 mm～0.80 mm では回転式表面洗浄を採用するのがよい。ただ回転式表面洗浄は高揚程ポンプを必要とするため在来の高架水槽または逆流洗浄用ポンプを利用して行なうことができないので，両方式の選択にはこの点も合せ考慮する必要がある。

(iii)　粒度と砂層の洗浄効果

表面洗浄を併用した場合には，いずれの粒度でも砂層の清浄度が高くなるため逆流洗浄のみの場合に比べると洗浄効果の差はあまり大きくない。逆流洗浄のみの場合には，一般に有効径の小なる濾過砂は大なるものに比べて洗浄効果は劣る。これは泥球の発生と発達によるものと，濾過による圧縮が大きいため砂粒と汚泥の分離が行

なわれ難く，また砂粒に付着した汚泥が逆流洗浄中に砂粒の衝突や摩擦によってもなかなか除去されない点にあった。しかし表面洗浄の併用によって圧縮された汚泥と砂粒の分離が容易となるばかりでなく，表面洗浄を逆流洗浄開始後も続行することにより，砂粒の摩擦も十分に行なわれるので，中層部以下の砂粒の洗浄度も比較的高くなって，泥球もほとんど発生しない。

このため表面洗浄を併用した場合には，有効径の小なる砂層ほど洗浄効果は高くなる。図-64～図-66 のとおり砂層表面についても，また図-58～図-60 に示すとおり，有効径の相違による清浄度の差はあまりない。したがって逆流洗浄のみの場合の洗浄効果と比較すれば，表面洗浄を併用して効果の著しいのは有効径の小なる砂層であり，有効径の小なる砂層には表面洗浄は欠くことができないものといえる。しかし有効径の大なる砂層でも逆流洗浄のみでは泥球の発生する可能性があるし，表層面における汚泥と砂粒の分離は逆流洗浄のみではこれらを解決することはできないし，また汚泥の洗浄排水トラフよりの排出が迅速に行なえる等多くの利点を有しているため，表面洗浄は有効径の大なる濾過砂の場合についても実施するのが適当である。

（iv）泥球の発生防止

表面洗浄を併用した場合には，砂層内部に残留する汚泥量は全体として非常に減少してくる。しかもこの残留汚泥量は砂層の粒度による差異は非常に少ない。逆流洗浄のみの場合には，粒度が大なる砂層ほど洗浄効果が良好で泥球の発生率も低い。泥球は濾過による砂層の圧縮と逆流洗浄による適当な摩擦および衝突の繰返しによって球形または円盤形となり，砂層の深部に至るほど一般に密度も大となっていく。この泥球はどの粒度の砂層においても同様であるが，中核となるべき細砂の量により発生量が異なり，細砂量の少ない場合には濾層内部の残留汚泥はそのままの形で長期間存在する。このような細砂の量は有効径の小なるほど，また均等係数の大なるほど当然多くなるが，しかし相当大きな粒度の砂層でも細砂をある程度は含むので，泥球をまったく発生させない砂層はありえない。この細砂の量を皆無とすることは非常にむずかしく，洗砂，篩分け袋詰めその他の作業中に細砂がどうしても含有されることになる。

このほか問題となるのは表層部に残留する汚泥である。これらの汚泥は膨脹比が小なる場合には洗浄排水トラフより排出されないで残り，濾過を継続することによって次第に泥球的な要素を含んでいく。この汚泥は将来とも泥球となることはほとんどないが，時間経過とともに圧密されていくので，逆流洗浄により排出される可能性はますます低くなり，濾過回数の増加とともに累積していく。

表面洗浄の併用によって泥球や圧密された汚泥を破壊し，洗浄排水トラフより排出させることは可能となるが，表面洗浄でも砂層の深部に抑留された泥球を粉砕し排出させることは容易ではない。このためには泥球発生前の汚泥の状態にあるとき，ないしは泥球となっても表層部付近に存在するときに粉砕しておくことが必要である。濾過砂使用開始当初から表面洗浄を併用すれば，泥球の発生量は有効径 0.45 mm のような微小砂粒を多く含む砂層でもその発生量はごく僅かなものとなる。また逆流洗浄のみ実施していた濾過池でも，ある時期より表面洗浄を併用した場合には，砂層内部の汚泥や泥球が相当減少していく。図-58～図-60 の例で逆流洗浄のみの場合と中途より表面洗浄を実施した場合との残留汚泥量を比較すると表面洗浄を併用した1，2号池では極端に減少しているのに対して，逆流洗浄のみの3号池では漸増の一途をたどっている。表面洗浄を 10 回実施しただけでこのような差異を生じている。これらのことは大阪市の実際池における実験[31]でも同じような裏付がなされている。このように表面洗浄を併用すると濾層内部の清浄度は非常に高いものとなるが，反面表面洗浄によって泥球が破壊されて砂層表面に微小砂粒がそのままの形で堆積し，そのため濾過持続時間が逆流洗浄のみの場合よりも短縮したり，また表面洗浄の噴射圧によって微小砂粒のほか，設計上の小砂粒も飛散流出し，補砂を必要とする事態も生ずることがある。

〔5〕総　括

表面洗浄は逆流洗浄開始前 30 秒ないし1分前から開始すべきであって，これらの時期の選定は粒度によって異なるものとみる。すなわち有効径の小なるものほど濾過による砂層の圧縮率が大きく，そのため開始時期を早める必要がある。しかし，いずれの粒度の場合も1分以上も前から表面洗浄を開始しても効果なく，逆に洗浄水量などで不経済となる。

表面洗浄水量ならびに洗浄時間はいずれの場合も，水量が多いほど，また洗浄時間が長いほど好結果が得られた。しかし固定式表面洗浄で表面洗浄水量を同一として洗浄時間を変化させた場合の実験では，小粒度の場合は 2.5 分で十分であり，大粒度の場合には 3.5 分程度必要としている。また洗浄時間を同一とし，表面洗浄水量を変えて行なった実験では，表面洗浄水量は小粒度の場合は 0.2 m^3/m^2/分 で十分であり，大粒度の場合は 0.25 m^3/m^2/分 以上を必要とする。それゆえ水道施設基準に定められている数値は有効径の小なる場合に適しているが，有効径の大なる場合には表面洗浄水量は 0.25 m^3/m^2/分 以上とした方がよい。また洗浄時間については水道施設基準ではなんの取りきめもないが，有効径の小なる場合には 2.5 分で十分であるが，有効径の大なるほど洗浄時間を長くしなければならない。回転式表面洗浄の場合についても同様のことが言える。ただ表面洗浄水量

は水道施設基準では 0.05～0.1 m³/m²/分 となっているが，有効径の小なる場合でも 0.1 m³/m²/分 の方がよく，有効径の大なる場合には 0.15 m³/m²/分 以上あった方がよい。いずれにしても表面洗浄水量およびその洗浄時間は逆流洗浄速度と密接な関係があり，逆流洗浄速度が最適値よりも相当下廻わる場合には，その水量，時間とも大とする必要があり，しかもその効果は表層部付近にしか及ばない。

そのため逆流洗浄速度は 3. で求めた最適値を表面洗浄併用の場合にも採用する必要がある。このようにした場合には総洗浄水量も少なくてすみ，しかも洗浄効果を高度に保ちうる。

表面洗浄の併用によって表層部に残留する汚泥量は極端に減少することが大きな効果である。しかも中層部以下の砂層においても表面洗浄を併用した濾過池の残留汚泥量は比較的少ない。また表面洗浄を併用すれば泥球の発生の少ない有効径の大なる砂層でも表層部の汚泥除去，洗浄水量の節減等の効果がある。

表面洗浄方式としては洗浄前後の砂層の清浄度から判断すると，表面洗浄水量を 0.2 m³/m²/分 とした固定式表面洗浄方式は有効径 0.45～0.55 mm のように粒度の小なる砂層に適し，表面洗浄水量を 0.1 m³/m²/分 とした回転式表面洗浄方式は，有効径 0.55 mm 以上の粒度の大なる砂層に適している。

6. 表面洗浄併用時の濾過効果

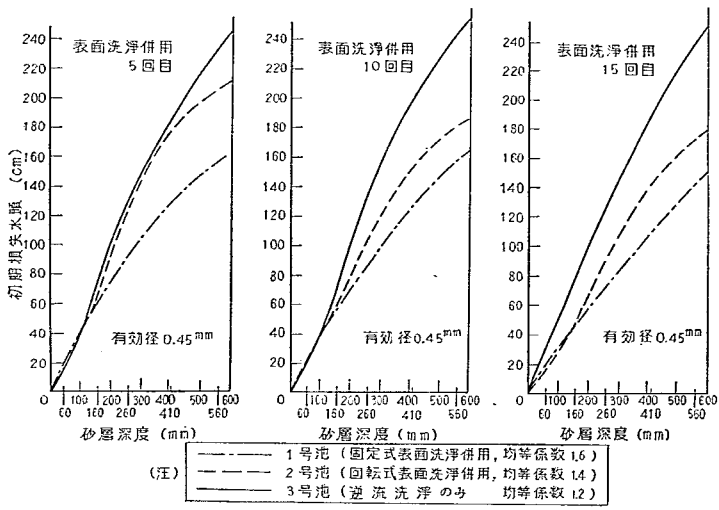


図-67　初期損失水頭の推移

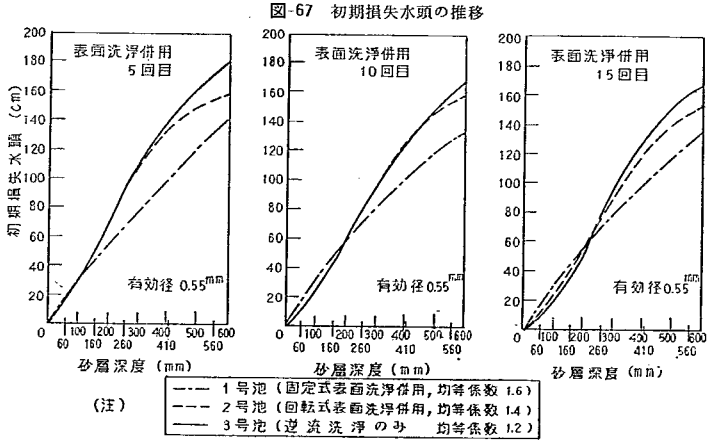


図-68　初期損失水頭の推移

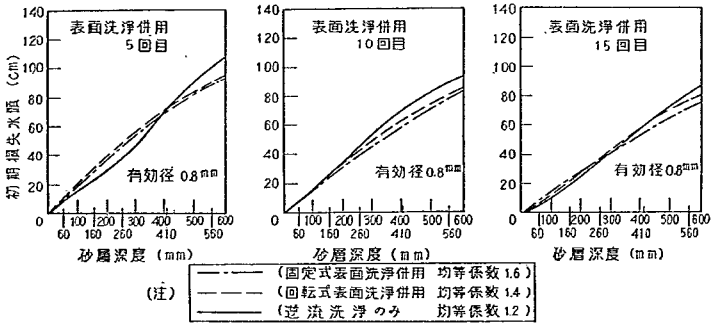


図-69　初期損失水頭の推移

〔1〕 初期損失水頭の減少

（i） 逆流洗浄のみの場合との比較

濾過砂を濾過池に搬入した当初は大小の砂粒が混合した状態にあるから空隙率は通常小なる値を示すが，逆流洗浄の実施によって大きい砂粒は深層部へ，小さい砂粒は表層部へと移動して，いわゆる成層化が進行していく。そのため空隙率も成層化の途中において種々変化していく。4. で述べたように空隙率が増加すれば，初期損失水頭は減少していく。この減少の割合は均等係数が同じであれば有効径が小なるほど大となり，また同一有効径の場合は均等係数が大なるほど大となる傾向がある。しかし逆流洗浄のみの場合には砂層内の汚泥残留量が多く，しかもその量は累加していく傾向にあるから，初期損失水頭は空隙率の増加に逆比例して減少することにはならない。しかも適正な逆流洗浄速度を与えなければ粒度の大なる砂層ほど成層化が遅れる。

表面洗浄を併用した場合には 5. で述べたように砂層内部の清浄度が高くなるから，逆流洗浄のみの場合よりも初期損失水頭が減少し，かつ成層化が進行して空隙率が増加する。図-67, 図-68, 図-69 は逆流洗浄のみを継続していた濾過池に表面洗浄を併用した場合の初期損失水頭の推移と，逆流洗浄のみを引続いて実施した濾過池のそれと対比して示したものである。逆流洗浄のみの3号池（均等係数 1.2）の初期損失水頭はこの期間ではあまり変化はないが，やや増加の傾向がある。しかし表面洗浄を併用した1号池（均等係数 1.6 で固定式表面洗浄方式）と2号池（均等係数 1.4 で回転式表面洗浄方式）では初期損失水頭は漸減している。この傾向は有効径の小なるほど強く現われている。すなわち表面洗浄を併用した場合には，砂層の清浄化とともにその成層化を促進する役目をはたしていることがわかる。

このように表面洗浄を併用すれば砂層内の残留汚泥量はごく僅かとなって，その累積を防止するほかに，砂層の成層化を促進するため初期損失水頭は減少するが，この両者のうちこの減少に関係する割合は前者の方が大きく，後者はごく僅かである。しかし後者についても同一逆流洗浄速度の場合には均等係数が大なるほど減少の割合はやや大きい。濾過池使用開始当初より表面洗浄を併用した場合には成層化が促進されるので，逆流洗浄のみの場合より早く成層状態に達し，しかも砂層内部の清浄度は高くなるので，初期損失水頭は逆流洗浄のみの場合より急激に減少する。

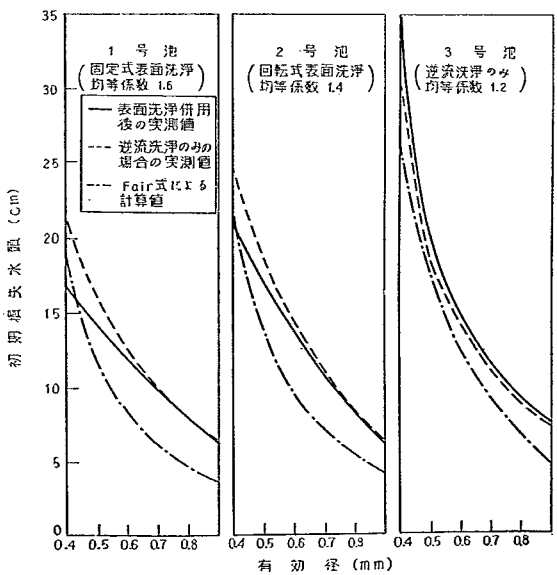


図-70　表面洗浄併用前後の初期損失水頭の変化

（ii） 粒度と初期損失水頭

初期損失水頭は有効径，均等係数によって，やや一定の傾向を示す。すなわち有効径が大なるほど初期損失水頭は小さく，また不成層から成層に至る間の変化の割合は小さい。また均等係数が大なるほど初期損失水頭の変化量が大きく，不成層から成層に至る間に大きく減少する。このため有効径が同一で均等係数の異なる3種の砂層の初期損失水頭は図-17 に示すように不成層時には均等係数が大きい砂層ほど初期損失水頭が大となったが，成層化が進むにつれて順位が入れかわり，成層時には均等係数が大なる砂層ほど初期損失水頭は小となった。このような現象は表面洗浄を併用した場合についても起こり，しかも逆流洗浄のみの場合より成層化が急速に進行する。それと濾層内部の清浄度が高くなることからも，初期損失水頭は急速に減少する。表面洗浄併用前後の初期損失水頭の変化を均等係数別に対比したのが図-70 である。これをみると表面洗浄を併用した 1，2 号池においては表面洗浄併用後では初期損失水頭は減少したが逆流洗浄のみの3号池では逆に増加している。3号池における初期損失水頭の増加率は有効径の如何にかかわらずほぼ同様であるが 1，2 号池では有効径の小なるほど，また均等係数の大なるほどその減少率は高い。また図-70 では実測値と Fair 式による計算値との比較を行なったが，これによると，実測値と計算値はかならずしも一致しない。ただ1号池と2号池における有効径 0.45 mm の砂層の損失水頭だけが比較的近似の値を示している。計算値では，砂層は汚泥が残留しないものとし，空隙率の算定も完全な成層の砂層として算定したが，実際池では完全な成層はありえなく，しかも残留汚泥が増加する傾向があるため，実測値と Fair 式による計算結果とに差を生じたのである。

〔2〕 濾過持続時間と損失水頭

（i） 逆流洗浄のみの場合との比較

表面洗浄を併用した場合には砂層内部の清浄度が高くなるし，また初期損失水頭もいくらか減少するので，濾過持続時間の増加が予想されたが，結果としては逆に濾過持続時間は減少した。この減少率は表-22 と逆流洗浄のみの3号池と比較した表-23 に示すように，粒度の大なる砂層ほど大きい。しかし有効径0.80 mmではこの減少はほとんどない。また表面洗浄方式の比較では回転式表面洗浄の方が濾過持続時間がやや，短くなっている。このような濾過持続時間の短縮は，表面洗浄併用前に微小砂粒を含有して残留していた汚泥が，表面洗浄によって急速に分離されて流出し，微小砂粒の大部分が砂層の表層部に残ったために濾過池の表層部の閉塞が早められて濾過持続時間が短かくなったものである。しかし，これは一時的な現象で，5～6ヵ月経過すると濾過持続時間はだんだん回復してくる。大阪市[32][33][34][35]では表面洗浄併用池と逆流洗浄のみとの濾過持続時間の比較を長期間にわたって実施したが，それによると表面洗浄の併用後4ヵ月間は濾過持続時間が短かくなっているが，その後は一部の例外を除いて表面洗浄併用池の方の濾過持続時間が増加している。このように数ヵ月経過後に濾過持続時間が増加してくるのは，表層部における微小砂粒が徐々に洗浄排水トラフから流出したからである。

汚泥と微小砂粒の分離は表面洗浄方式によってやや異なるが，一般に回転式表面洗浄による影響が大きく，濾過持続時間の一時的な短縮率も大きい。逆流洗浄のみの場合には微小砂粒と汚泥の分離が十分行なわれなく，これらのものが泥球状として存在しているので，表層部に残留する微小砂粒はほとんど汚球の中核となってしまい，ために濾過持続時間に対しては好結果を与える。しかし表面洗浄を併用すれば汚球の形成はほとんど行なわれなく，成層化の進行も早いので，微小砂粒は短期間で表層部に集積し，このため表層面の空隙断面積が減少して濾過持続時間が短縮するがこの微小砂粒は表面洗浄噴射水によって飛散流出するので濾過持続時間は次第に回復する。飛散流出する微小砂粒の砂層厚に及ぼす影響はごく僅かなものであるが，しかし大阪市の実験[35]では約3年で補砂する必要が生じたほど砂層厚が減少した例もある。このように表面洗浄の併用によって濾過持続時間は増加するが，これは微小砂粒の流出によって生ずるもので，逆流洗浄のみの場合に泥球によって微小砂粒がその性状を変え，濾過持続時間が増加するのと意味はまったく異なる。一般に濾過砂は洗浄を重ねていくにしたがって有効径は大に，均等係数は小となる傾向があるが，表面洗浄併用によってこの傾向は著しくなる。

（ii） 粒度と濾過持続時間

逆流洗浄のみの場合の中途より表面洗浄を併用すれば，当初濾過持続時間が短縮して数ヵ月経過後に回復してくるが，このような傾向は有効径の小なる砂層ほど大きい。また均等係数の相違による濾過持続時間の短縮については，前掲の表-22，表-23 の例では均等係数 1.4 の方が，均等係数 1.6 よりも短縮率は大となったが，これは表面洗浄装置による差異が現われたもので，同一表面洗浄装置の使用の場合には，均等係数の大なる砂層は微小砂粒量が多いから濾過持続時間の短縮率は増加する。回転式表面洗浄は固定式表面洗浄に比して表面洗浄併用当初の濾過持続時間短縮の割合は大きくなるが，微小砂粒の飛散流出量が多いから，その回復は早くなる。しかし有効径の大なる砂層では濾過持続時間の短縮は急に起らず，その成層化とあいまって徐々に行なわれ，また回復も有効径の小なるものより遅れる。同一有効径であれば，均等係数の小なる砂層は粒度が全般的に小さく，微小砂粒の量は少ないが，逆流洗浄による膨脹比は大となるため成層化は早く行なわれる。これに対して均

表-22 損失水頭と濾過持続時間

有効径(mm)	池番号 / 損失水頭 / 回数	1号池（固定式表面洗浄 均等係数 1.6） 50 cm まで	100 cm まで	150 cm まで	200 cm まで	最終まで	2号池（回転式表面洗浄 均等係数 1.4） 50 cm まで	100 cm まで	150 cm まで	200 cm まで	最終まで	3号池（逆流洗浄のみ 均等係数 1.2） 50 cm まで	100 cm まで	150 cm まで	200 cm まで	最終まで	原水濁度（度）	原水水温（°C）
0.45	1～5回	1.29	2.21	3.02	3.37	3.38	1.17	2.05	2.38	3.06	3.17	1.14	2.09	2.52	3.30	3.41	72.5	9.5
	6～10回	1.36	2.26	2.59	3.28	3.37	1.17	2.08	2.39	3.03	3.10	1.20	2.23	3.03	3.53	4.04	63.0	9.0
	11～15回	1.36	2.25	3.39	4.17	4.25	1.22	2.38	3.21	3.55	4.06	1.15	2.44	3.35	4.22	4.33	110.0	7.8
	平均	1.34	2.26	3.13	3.47	3.53	1.19	2.17	2.53	3.21	3.31	1.16	2.25	3.10	3.55	4.06	81.9	8.8
0.55	1～5回	1.06	1.24	1.33	1.39	1.42	1.03	1.20	1.29	1.36	1.38	1.17	1.41	1.53	2.02	2.06	108.3	7.6
	6～10回	1.27	2.08	2.31	2.49	2.56	1.02	1.35	2.17	2.33	2.39	2.07	3.06	3.26	3.38	3.43	55.0	8.1
	11～15回	1.36	2.28	2.56	3.12	3.17	1.27	2.07	2.38	3.02	3.08	1.55	3.04	3.28	3.41	3.52	72.0	7.6
	平均	1.20	2.00	2.20	2.33	2.38	1.11	1.41	2.08	2.24	2.28	1.48	2.37	2.56	3.07	3.14	78.4	7.8
0.80	1～5回	3.31	5.49	7.15	8.14	8.50	3.27	5.37	7.17	8.31	8.51	3.09	5.28	7.06	8.28	8.51	66.5	9.1
	6～10回	1.20	1.51	2.02	2.07	2.11	1.18	1.48	1.59	2.06	2.09	1.06	1.41	1.55	2.06	2.09	78.7	8.4
	11～15回	1.53	2.17	2.36	2.46	2.50	1.48	2.10	2.27	2.41	2.45	1.48	2.13	2.32	2.42	2.48	60.7	8.8
	平均	2.15	3.19	3.58	4.22	4.37	2.11	3.12	3.54	4.26	4.35	2.01	3.07	3.51	4.25	4.36	68.6	8.8

濾過条件　砂面上水深 1.1 m　濾過速度 120 m/日
逆流洗浄速度　90 cm/分
表面洗浄条件は右記表のとおり

方式 / 回数	固定式表洗 水量	固定式表洗 時間(分)	回転式表洗 水量	回転式表洗 時間(分)
1～5回	0.2	2.5	0.1	2.5
6～10回	0.1	2.5	0.05	2.5
11～15回	0.1	2.5	0.1	2.5

表-23 表面洗浄併用池の濾過持続時間の短縮率（%）

回数 / 有効径 / 池番号	0.45 1号池（固定表洗）均係 1.6	0.45 2号池（回転表洗）均係 1.4	0.55 1号池（固定表洗）均係 1.6	0.55 2号池（回転表洗）均係 1.4	0.80 1号池（固定表洗）均係 1.6	0.80 2号池（回転表洗）均係 1.4
1～5回	98.6	87.0	81.0	77.8	99.9	100.0
6～10回	89.0	77.9	79.0	71.3	101.6	100.0
11～15回	97.1	90.2	85.0	81.0	101.1	98.3
平均	94.9	85.0	81.7	76.7	100.9	99.4

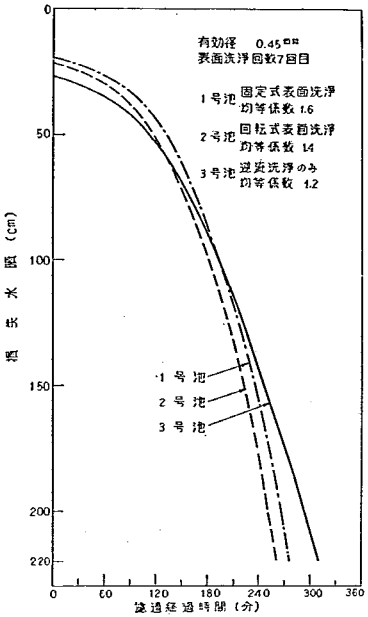


図-71A 損失水頭の比較

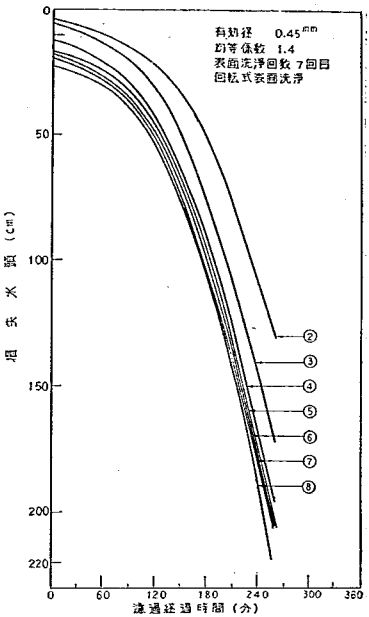


図-71C 2号池における損失水頭の変化

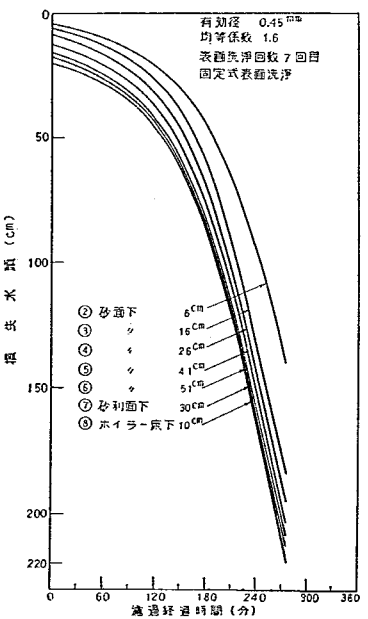


図-71B 1号池における損失水頭の変化

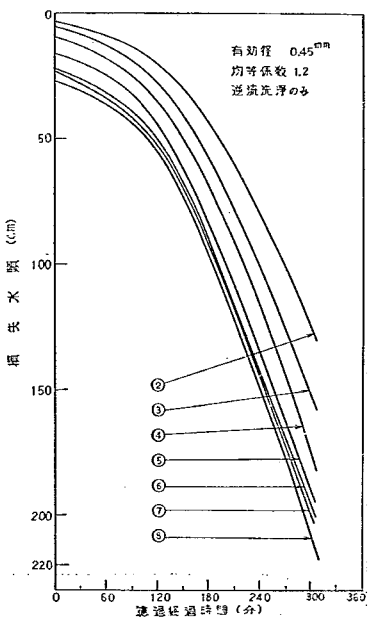


図-71D 3号池における損失水頭の変化

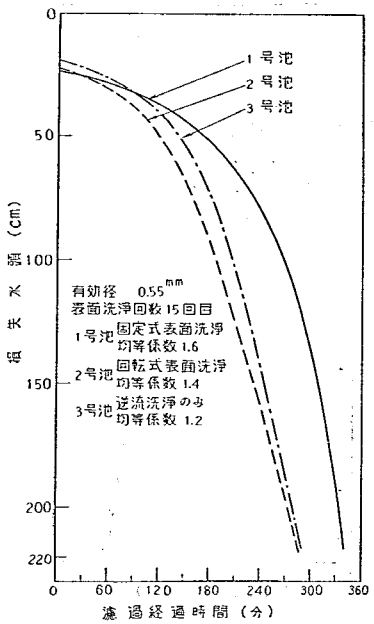


図-72A　損失水頭の比較

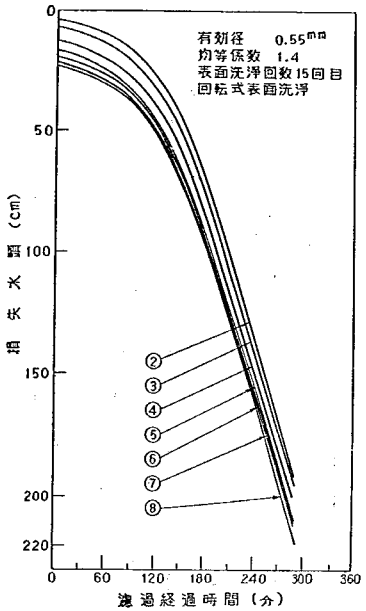


図-72C　2号池における損失水頭の変化

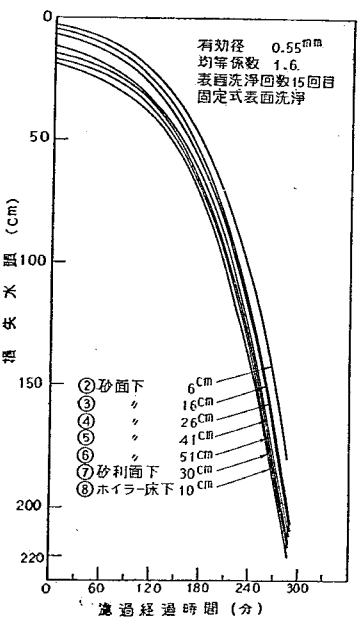


図-72B　1号池における損失水頭の変化

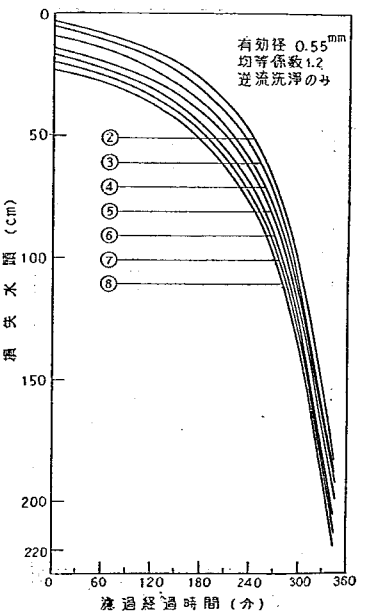


図-72D　3号池における損失水頭の変化

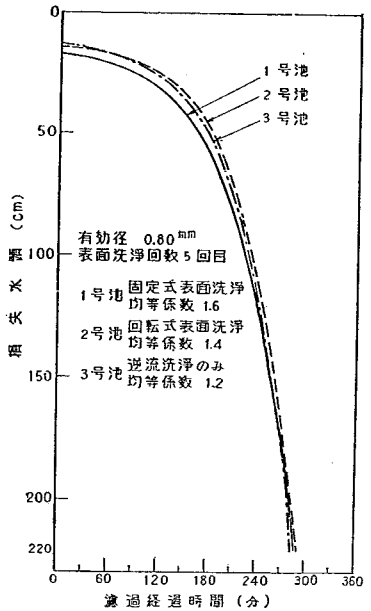


図-73A 損失水頭の比較

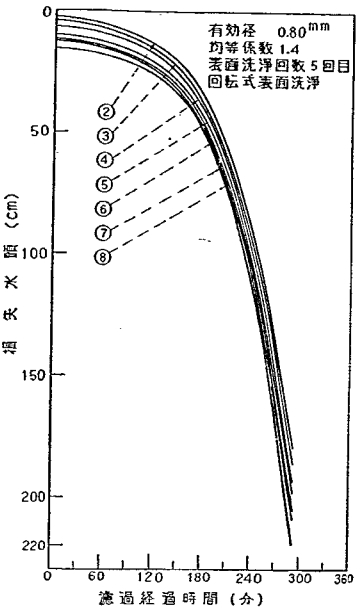


図-73C 2号池における損失水頭の変化

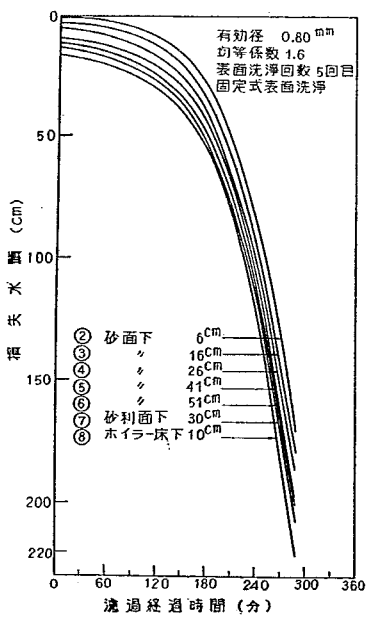


図-73B 1号池における損失水頭の変化

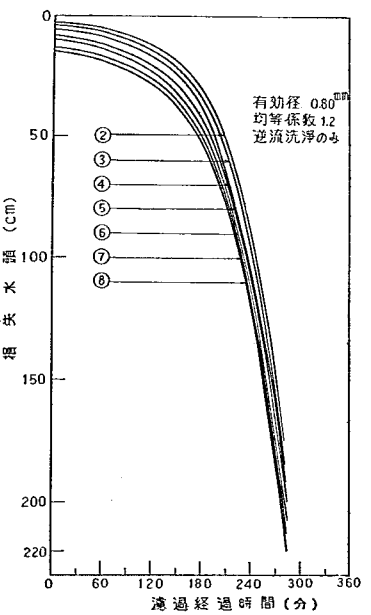


図-73D 3号池における損失水頭の変化

等係数の大なる砂層では，粒度が全般的に大きく，同一逆流洗浄速度では膨脹比も小なるため成層化の進行は遅れる。このため濾過持続時間の短縮は同一有効径の場合でも均等係数によって異なり，均等係数の小なる砂層は濾過持続時間の短縮が急激にしかも早く起こり，短縮の期間も短くその回復も急速に行なわれるが，均等係数の大なる砂層では短縮は徐々に行なわれ，短縮期間も長く，その回復も遅れる。

(iii) 損失水頭の傾向

表面洗浄を併用すると濾過持続時間が短縮されるが，この状態は損失水頭計によって測定した。図-71, 図-72, 図-73 のうち，Aは損失水頭の比較を行なったものであり，B～Dは濾層内部の損失水頭の変化を示したものである。1号池は均等係数 1.6 で固定式表面洗浄を，2号池は均等係数 1.4 で回転式表面洗浄を併用し，3号池は均等係数 1.2 で引続き逆流洗浄のみを実施したものである。有効径 0.45 mm，0.55 mm の砂層では 1，2 号池では表層面での閉塞が速やかなため急激に降下している。この降下の傾向は表面洗浄回数の増加とともに3号池の損失水頭の変化に近づいていく。有効径 0.80 mm では均等係数による差も表面洗浄回数による変化も少ない。数回の表面洗浄によってまず残留汚泥のほとんどが除去され，砂層内部の清浄度が非常に高くなると同時に，表面洗浄によって集積された表層部の微小砂粒が洗浄排水トラフより飛散流出して，損失水頭の増加が減ずるので濾過持続時間は次第に回復してくる。そのため損失水頭計の変化も，表層部のみでなく，砂層深部 16 cm 以下の損失水頭の増加率も高くなり，その分だけ濾過持続時間も増加する。濾過持続時間の回復度は逆流洗浄速度のほか，洗浄排水トラフの高さによっても異なる。表面洗浄時には表層部の砂粒のうち飛散するものが多く，したがって洗浄排水トラフの高さを逆流洗浄のみの場合より 20% 程度引き上げても流出する量が多く，この状態は微小砂粒の存在する限り続く。それ故トラフの高さを逆流洗浄のみの場合と同一にしておけば，設計上の小粒径の砂粒の流出もまぬかれえず，ついには補砂の必要性が生じてくる。

〔3〕 濾過水の水質

一般的な傾向として急速濾過池の使用開始当初は，均等係数の大なる砂層ほど濾過持続時間が長く，しかも濾過水の水質が良好となるが，表面洗浄を併用すると微小砂粒の消長に伴ってこの状態は逆になり，均等係数の小なる砂層ほど濾過持続時間が長く，しかも濾過水の水質が優れたものとなる。このような状態は逆流洗浄のみの場合でもありえたが，表面洗浄併用の場合には，均等係数の大なる砂層が有利となる期間はごく短い。

表面洗浄の併用によって洗浄効果が著しく改善されることははっきりしているが，これが水質に与える影響は表-24～25 に示すとおり割合少ない。表-24 によると有効径の小なる砂層ほど濾過水の水質は良好となっているが，均等係数別には大きな差はない。ただ有効径の大なる砂層では均等係数の小なる砂層の濾過水がやや優れている。表-25 は表面洗浄を併用した均等係数1.6, 1.4 の砂層と逆流洗浄のみの均等係数 1.2 の砂層とを比較したものであるが，濁度，色度の除去に関しては逆流洗浄のみの場合と表面洗浄併用時とではほとんど差がない。過マンガン酸カリ消費量については若干の相違があり，有効径 0.45 mm ではいくらか低下しているが，他の有効径では優れており，有効径 0.45 mm の低下率からみて，表面洗浄併用によって濾過水の水質が悪化することはほとんど生じない。

大阪市での実験結果[37][38][39][40][41]でも濾過水の水質に差はほとんど生じておらず，したがって表面洗浄併用直後に若干の差異が現われても，砂層の安定した以後はほとんど変化がない。この大阪市の実験では約3年間で補砂の必要があったほど，小砂粒が流出したが，表層部の小砂粒の流出は濾過持続時間の増加に好影響を与えるが，濾過水の水質にはなんらの変化も与えていない。この点については 4. において述べたように濾過池の早期閉塞と濾過水の水質とは直接関係がなく，濾過持続時間は表層部の状態に大きく影響されるが，濾過水の水質は砂層全体の汚泥抑留能力に左右されるためである。

〔4〕 総　括

表面洗浄の併用によって砂層の表層部に集積していた微小砂粒を含んだ泥球状の汚泥の分離が急速に進行し，また中層部以下の泥球も破壊されて微小砂粒は短期間のうちに表層部に集積された状態になり，これがために濾過による表面閉塞が起りやすくなって濾過持続時間が短縮される。しかも，これらの現象は表面洗浄の併用による砂層の成層化にも関係を有する。この濾過持続時間の短縮は強力な噴射水圧を利用できる回転式表面洗浄を採用する場合にその傾向が強く，また有効径の小なる砂層ほど同一逆流洗浄速度のもとでは膨脹比が大となる関係上，この傾向が著しい。

表面洗浄を併用したため生ずる濾過持続時間の短縮は一時的なもので，微小砂粒が除々に洗浄排水トラフより流出していくにつれ，表層部における閉塞は減少し，濾過持続時間は平常通り回復していく。この濾過持続時間の回復は表層部の微小砂粒の洗浄排水トラフよりの飛散流出によって起るものであるから逆流洗浄速度と洗浄排水トラフ高さとの関係によってその量は増減し，ときには微小砂粒以外の砂粒までも流出して補砂の必要を生ずることもある。

表面洗浄併用当初の濾過持続時間の変化は有効径の小なる砂層ほど大きい。しかし有効径の小なる砂層では設計上の膨脹比も十分とり得るので，微小砂粒量の流出も

表-24A　表面洗浄併用期間中の原水と濾過水の水質

有効径 (mm)	回数	原水			1号池の濾過水			2号池の濾過水			3号池の濾過水		
		濁度	色度	$KMnO_4$ 消費量	濁度	色度	$KMnO_4$ 消費量	濁度	色度	$KMnO_4$ 消費量	濁度	色度	$KMnO_4$ 消費量
0.45	1～5回	67.60	34.20	80.67	1.26	14.60	43.37	0.90	14.40	43.50	0.96	15.00	41.24
	6～10回	80.80	32.40	76.37	0.78	12.00	43.24	0.76	12.20	42.11	0.90	12.40	42.23
	11～15回	110.00	28.50	68.91	1.30	8.50	36.03	1.20	8.50	35.40	1.20	8.00	34.14
	平均	86.13	31.70	75.32	1.11	11.70	40.88	0.95	11.70	40.34	1.02	11.80	39.20
0.55	1～5回	186.86	49.29	93.44	1.49	16.14	51.93	1.40	16.29	49.76	1.31	16.14	49.88
	6～10回	55.00	30.50	67.63	0.80	10.50	41.41	0.55	10.50	41.10	0.50	10.00	42.99
	11～15回	76.00	33.00	67.01	2.50	11.00	42.67	1.25	10.50	42.68	1.10	10.50	40.78
	平均	99.95	37.60	79.03	1.60	12.55	45.34	1.07	12.43	44.51	0.97	12.21	44.55
0.80	1～5回	61.00	46.00	98.24	11.26	20.13	67.04	10.69	20.13	67.88	9.14	20.13	68.47
	6～10回	78.67	34.33	82.61	2.67	13.00	52.89	3.50	13.00	56.06	1.90	13.00	57.11
	11～15回	60.67	40.00	88.09	5.33	17.00	56.90	6.00	17.33	63.64	3.37	17.33	65.33
	平均	68.45	40.11	88.09	6.42	16.71	58.94	6.73	16.82	62.53	4.80	16.82	63.64

（注）1号池……固定式表面洗浄併用　均等係数1.6の濾過砂を使用
2号池……回転式表面洗浄併用　均等係数1.4の濾過砂を使用
3号池……逆流洗浄のみ　均等係数1.2の濾過砂を使用

表-24B　濁度，色度，$KMnO_4$ 消費量の除去率

有効径 (mm)	回数	原水に対する除去率 (%)								
		1号池			2号池			2号池		
		濁度	色度	$KMnO_4$ 消費量	濁度	色度	$KMnO_4$ 消費量	濁度	色度	$KMnO_4$ 消費量
0.45	1～5回	98.14	57.31	46.24	98.67	57.89	46.08	98.58	56.14	48.88
	6～10回	99.03	62.96	43.38	99.09	62.35	44.86	98.89	61.73	44.70
	11～15回	98.82	70.18	47.57	98.91	70.18	48.63	98.91	71.93	50.44
	平均	98.83	63.09	45.72	98.90	63.09	46.44	98.82	62.78	47.96
0.55	1～5回	99.20	67.26	44.42	99.25	66.95	46.75	99.30	67.25	46.62
	6～10回	98.55	65.57	45.96	99.00	65.57	46.37	99.09	67.19	43.90
	11～15回	96.71	66.67	36.32	98.36	68.18	36.31	98.55	68.18	39.14
	平均	98.15	66.50	42.23	98.87	66.90	43.14	98.98	67.54	43.22
0.80	1～5回	81.54	56.46	31.76	82.48	56.46	30.90	85.02	56.46	30.30
	6～10回	98.86	62.13	35.98	95.55	62.13	32.14	97.58	62.13	30.87
	11～15回	91.21	57.50	35.41	90.11	56.68	27.76	94.46	56.68	25.84
	平均	90.54	58.70	34.38	89.38	58.42	30.27	92.35	58.42	29.00

早く，したがってその回復も早くなる。また均等係数別では，小なるほど微小砂粒の量が少なく，また同一逆流洗浄速度の場合には膨脹比も大となるため，短縮期間も短くなる。

表面洗浄の併用によって濾過水の水質にはほとんど差異は生じない。すなわち濾過水の水質は濾過砂の粒度並びに濾過前処理水の水質によってきまってくる。

このように濾過持続時間の短縮または回復が濾過水の水質にはほとんど影響を及ぼさないのは濾過持続時間が主として表層部の閉塞によって左右されるが，濾過水の水質はこれには無関係だからである。濾過池に流入するフロックは主として砂層の表層部に抑留されるが，この表層部の砂粒が小なるほど，フロックの阻止抑留が大となって，これが損失水頭を大ならしめて濾過持続時間が短縮されるが，ある限度内でできるだけ砂粒の大きさを大とすれば砂層全体でフロックを阻止抑留するので濾過持続時間は増加する。したがって濾過水の水質を出来るだけ良好に保ち，かつ濾過持続時間を長くするのは砂層の粒度全体の問題であり，表層部における微小砂粒の存在は濾過持続時間を短縮させる如き障害を与えるのみで濾過水の水質には好結果を与えるものではない。

表-24C　3号池に対する除去率の比率

有効径 (mm)	回数	3号池に対する比率(%)					
		1号池			2号池		
		濁度	色度	$KMnO_4$ 消費量	濁度	色度	$KMnO_4$ 消費量
0.45	1～5回	99.5	102.0	94.6	100.0	103.0	94.4
	6～10回	100.1	102.0	97.2	100.2	100.9	100.2
	11～15回	99.9	97.7	94.4	100.0	97.6	96.5
	平均	99.8	100.6	95.4	100.1	100.5	97.0
0.55	1～5回	100.0	100.0	95.3	99.9	99.5	100.2
	6～10回	99.5	97.6	104.7	99.9	97.7	105.5
	11～15回	98.1	97.8	92.8	99.8	100.0	92.8
	平均	99.2	98.5	97.6	99.9	99.1	99.5
0.80	1～5回	96.0	100.0	104.6	97.2	100.0	101.9
	6～10回	101.2	100.0	119.2	97.9	100.0	104.0
	11～15回	96.6	101.4	137.0	95.5	100.0	107.1
	平均	97.9	100.5	120.3	96.9	100.0	104.3

表-25　1号池および2号池の逆流洗浄のみと表面洗浄併用時の濾過水の比較

有効径 (mm)	項目	1号池（均等係数 1.6）			2号池（均等係数 1.4）		
		濁度	色度	$KMnO_4$ 消費量	濁度	色度	$KMnO_4$ 消費量
0.45	逆流洗浄時	98.5	98.9	100.7	99.6	98.9	98.3
	表面洗浄併用時	99.8	100.6	95.4	100.1	100.5	97.0
	差引	+1.3	+1.7	−5.3	+0.5	+1.6	−1.3
0.55	逆流洗浄時	99.3	99.0	86.9	99.8	100.3	94.7
	表面洗浄併用時	99.2	98.5	97.6	99.9	99.1	99.5
	差引	−0.1	−0.5	+10.7	+0.1	−1.2	+4.8
0.80	逆流洗浄時	98.0	100.0	104.5	97.4	100.0	100.7
	表面洗浄併用時	97.9	100.5	120.3	96.9	100.0	104.3
	差引	−0.1	+0.5	+15.8	−0.5	0	+3.6

但し3号池の濾過水を100としての比較

7. 結論

〔1〕 粒度と洗浄効果および濾過効果

(1) 砂層の膨脹は粒度，逆流洗浄速度，水温によって著しく変化する。洗浄効果をあげるためには粒度と水温に適応した逆流洗浄速度を与えなければならないが，一般には砂層の膨脹と関係づけて表-10 のような逆流洗浄速度の設計値を定めるべきである。すなわち，ある粒度の砂層に適正な逆流洗浄速度は膨脹比の小となる高水温時における砂層の膨脹比が 20～30% の範囲にあり，かつ低水温時においても 50% 以内にとどまるものとすべきである。

(2) 洗浄時間は高水温時においてある与えられた粒度の砂層に適正な逆流洗浄速度をもって洗浄したときに，汚泥排出が終了するまでの時間をもって設計上の洗浄時間とすべきである。このような場合洗浄時間は有効径 0.45 mm，0.55 mm では 4～5 分，有効径 0.80 mm では 3～4 分で十分である。ただし運営において条件の良い場合の洗浄時には洗浄時間の短縮も可能である。

(3) 濾過持続時間は濾過速度その他の条件が同じであれば未濾水の水質と砂層の粒度に左右される。未濾水の水質は原水の水質と濾過前処理の良否によって定まる。砂層の粒度が濾過持続時間に及ぼす影響は砂層の成層化の状態によって異なるもので，砂層の表層部における汚泥抑留能力，すなわち砂層の表層部の空隙断面積の大きさと，最小粒径の砂粒の厚さおよび表層部以下の砂層の汚泥抑留能力に支配される。

汚泥の抑留量は表層部において最も多いのであるが，この抑留量が大となれば損失水頭が急激に増加して濾過

持続時間が短縮されるから，ある程度表層部における汚泥の抑留量を減らして表層部以下の砂層において相当量の抑留を行なうようにすると濾過持続時間は増大する。

実験の結果からは均等係数が同一であれば，有効径の大なる砂層ほど濾過持続時間は大となる。有効径が同一であれば均等係数が小なる砂層ほど濾過持続時間は増加されるがその差は少ない。したがってなるべく有効径を大にして，均等係数が小となる砂層を使用すれば濾過持続時間は増加する。

(4) 砂層の成層化の状態は逆流洗浄回数，逆流洗浄速度，洗浄時間および砂層の粒度によって異なるが，粒度に適応した逆流洗浄条件を与えなければ，いつまでも砂層は不安定な状態を続ける。たとえば不成層の状態では砂層の粒度と濾過持続時間との関係は成層後と逆な結果を示す。砂面上水深を大にしても損失水頭は時間経過とともに急激に増加するからその割合に濾過持続時間は増加しないが，濾過水頭を同じにすれば負水頭を小さくする効用がある。

初期損失水頭は砂層の表層部の微少砂粒と設計上の最小粒径の砂粒層の厚さに左右されるが，濾過持続時間は表層部の空隙断面積と砂層の汚泥抑留量に左右されるので初期損失水頭が大となっても濾過持続時間が短縮するとは限らない。

(5) 砂層が成層化された状態では有効径が同一であれば均等係数の小なる砂層ほど濾過持続時間が増加し，濾過水の水質も良好となる傾向を示したが水質の相違は比較的小さい。また均等係数が同一な場合には有効径の大なる砂層ほど濾過持続時間は増加するが，濾過水の水質，特に有機質の除去は低下する傾向にある。しかしその低下率は濾過持続時間の大となる割合に比べると極めてわずかである。

しかし砂層が不成層の場合には均等係数の大なる砂層でも濾過水の水質が良好で濾過持続時間も増加する傾向を示し，成層時と逆な結果を示すこともある。

色度，過マンガン酸カリ消費量で表わされる有機物の除去率は粒度の小なる砂層ほど大であり，濁度で表わされる無機物の除去は砂層の粒度にそれほど影響されない。また濾過速度を大にすれば濾過水の水質が低下する傾向にある。

(6) 泥球は微小砂粒を中核とした汚泥が濾過と逆流洗浄の繰返しを受けて次第に圧密されて発生する。砂層の粒度に適応した逆流洗浄速度と洗浄時間が与えられれば粒度が大なる砂層においては泥球の発生は比較的少ないが，粒度の小なる砂層においては微小砂粒を多く含有するので，泥球の発生も比較的多く，かつ砂層の残留汚泥量の累積が避けられず，砂粒の泥状被膜も増大していく傾向にある。

(7) 以上を総合して考察すると，濾過前処理方法の進歩した今日ではなるべく有効径が大で，均等係数の小なる砂層の使用が有利である。しかし均等係数を小にすると篩分け時に歩どまりが悪く，不経済となるし，また濾過砂の購入価格が高くなるのでこれらの点を勘案して均等係数は 1.3 程度とすることが望ましい。

〔2〕 表面洗浄併用時の粒度と洗浄効果および濾過効果

(1) 表面洗浄を併用する場合にはその開始時期を逆流洗浄開始前 1 分とすることが望ましく，少なくとも30秒前とする必要がある。これを 1 分以上とすることは洗浄効果がそれほどあがらないから洗浄水量の無駄となる。

(2) 固定式表面洗浄方式では砂層の粒度に適応した逆流洗浄速度を採用し，表面洗浄開始を逆流洗浄開始前 1 分とすれば，表面洗浄時間は全体として 2.5～3.5 分でたりる。

また表面洗浄時間を 2.5 分とし，逆流洗浄その他の条件が同じであれば，有効径 0.55 mm 以下の砂層に対しては 0.2 $m^3/m^2/分$ の表面洗浄水量で十分である。これ以上の粒度の砂層の場合は 0.25～0.30 $m^3/m^2/分$ 程度とする必要がある。

回転式表面洗浄方式の場合でも表面洗浄時間は 2.5 分で十分であるが，表面洗浄水量は有効径 0.55 mm 以下は 0.1 $m^3/m^2/分$，それ以上の粒度にありては 0.15 $m^3/m^2/分$ 程度とする必要がある。

(3) 表面洗浄を併用した場合でも逆流洗浄のみの場合と同様の粒度に適応した逆流洗浄速度を採用すれば，なおいっそうの表面洗浄併用の効果が期待される。とくに表面洗浄を逆流洗浄の終了するまで続行しない点を考慮して水道施設基準の示す逆流洗浄のみの場合におけるよりも逆流洗浄速度を小にすることは必ずしも有利でない。それよりも逆流洗浄時間を短縮する方が洗浄水量および洗浄効果の点で有利となる。

(4) 粒度の異なる砂層に対して表面洗浄を併用した場合の粒度による洗浄効果の差は限られた実験結果からははっきりしない。ただ逆流洗浄のみの場合に比較して砂層表面から 5cm までの深度における汚泥量の減少は洗浄前後のいずれにおいても著しい。しかし 5cm以下の砂層では表面洗浄併用の有無による洗浄前後の砂層の清浄度には判然だる差異は認められなかった。また表面洗浄の併用によって表層部の残留汚泥量は極端に減少するほか，併用前に発生していた泥球もほとんど破壊され，新発生の泥球もほとんど認められなかった。

(5) 表面洗浄を併用した場合には成層化の進行が急速となり，また砂層表層部の微小砂粒を含んだ泥球状の汚泥や泥球が破壊されて微小砂粒の表層面における集積量は増加するため濾過持続時間は短縮してくる。しかし微小砂粒は洗浄時に飛散流出することが多く，それに伴い濾過持続時間も回復してくる。そして長期間の使用の場

合には濾層内部の清浄度も高いので，逆流洗浄のみの場合より濾過持続時間は増加する。

(6) 表面洗浄を併用すれば砂層部における微小砂粒の集積，消滅があいついで生じ，これによって濾過持続時間に変化を生ずるが濾過水の水質にはほとんど変化を生じない。これは濾過水の水質が濾過砂の粒度と濾過前処理に主として左右されるからである。すなわち表層部における微小砂粒の存在は濾過持続時間には影響を与えるが，濾過水の水質にはほとんど影響を与えない。砂層の安定した状態においては濾過水の水質をできるだけ良好に保ち，かつ濾過持続時間を増加させるのは濾過前処理と砂層の粒度に関係することが多く，表面洗浄は砂層の清浄度を高く保ち急速濾過池のトラブルを少なくする。

(7) 以上の結果表面洗浄併用の場合においても砂層の粒度については，有効径を大に，均等係数を小とすることが望ましい。

表面洗浄方式としては有効径 0.55 mm 以下の砂層には固定式表面洗浄が適しており，有効径 0.55 mm 以上の砂層には回転式が適している。

〔なお本実験結果の一部は昭和 33 年5月，昭和34年5月および昭和 36 年4月の日本水道協会研究発表会，ならびに土木技術資料（昭和34年6月号）で発表した。〕

参 考 文 献

1) "水道施設基準解説" 日本水道協会，(1958) p. 182～4

2) A. W. W. A. "Tentative Standard Specification for Filtering Materials." J. A. W. W. A. Vol. 41, No. 3, p. 289～304 (1948)

3) Rose, H. E. "On the Resistance Coefficient Reynolds Number Relationship for Fluids Flow Through a Beds of Granular Materials" Proc. Inst. Mech. Engrs. Vol. 160, p. 493～511 (1949)

4) Riddick, T. M. "Filter Sand" J. A. W. W. A., Vol. 32, p. 121～32 (1940)

5) Baylis, J. R. "Nature and Effects of Filter Back Washing" J. A. W. W. A., Vol. 51, p. 126～56, (1959)

6) Fair, G. M. and Geyer, J. C. "Water Supply and Wastes Water Disposal" John Wiley and Sons Inc. p. 676～79 and p. 584～8, (1956)

7) 鵜見一之 "下水道" 日本水道協会 p. 270～7

8) 酒井清太郎 "急速濾過池における砂層の膨脹についての実験的考察,, 水道協会雑誌第317号 p. 22～5 (昭和 36 年2月)

9) 近藤正義 "急速濾層内の泥球分布" 大阪市水道局水質試験所調査報告並びに試験成積　第3集　p. 3～14 (昭和 26 年度)

10) 吉本 豊 "急速試験濾過池における濾砂粒度に関する実験" 同上　p. 39～48

11) Fair, G. M. and Geyer J. C. "Water Supply and Wastes Water Disposal" John Wiley and Sons Inc. p. 672～3 (1956)

12) Miller, C. N. "An Approximate Formula Calculating the Discharging Capacity of Rapid Sand Filter Wash Water Throughs" Water Purification by J. M. Ellms p. 465～9 (1940)

13) Hulbert, R. and Feben, D. "Hydraulics of Rapid Filter Sand" J. A. W. W. A. Vol. 25, No. 1, p. 19～65 (1933)

14) Fair, G. M. and Hatch, L. P. "Foundamental Factors Govering the Stream Line Flow of Water Through Sand." J. A. W. W. A. Vol. 25, No. 11, p. 1551～65 (1933)

15) 11) と同じ　p. 670～6

16) Hatch, L. P. "Flow Through Granular Media" Applied Mechanics. Vol. 7, No. 3, p. A-109～12

17) Rose, H. E. "An Investigation into the Laws of Flow of Fluids Through Beds of Granular Materials." Proc. Inst. Mech. Engrs. Vol. 153, p. 141～8 (1945)

18) Rose, H. E. "The Isothermal Flow of Gases Through Beds of Granular Materials" 同上 p. 148～53

19) Rose, H. E. "On the Resistance Coefficient Reynolds Number Relationship for Fluids Flow Through a Beds of Granular Materials." 同上 p. 154～68

20) Rose, H. E. "Further Research in Fluids Flow Through Beds of Granular Materials" Proc. Inst. Mech. Engrs. Vol. 160, p. 493～511 (1949)

21) 11) と同じ p. 668

22) 1) と同じ，p. 180 および p. 188～9

23) 濾過砂調査委員会 "急速濾過池の濾過砂に関する調査報告" 水道協会雑誌　第292号　p. 36～50 (昭和 34 年 1 月)

24) 濾過砂調査委員会 "急速濾過池の濾過砂に関する研究報告書" 水道協会パンフレット　p. 1～39

25) 23) に同じ

26) 23) に同じ

27) 1) に同じ　p. 195

28) 27) に同じ

29) 27) に同じ

30) 27) に同じ

31) 長田新平 "実際池における表面洗浄実験（中間報

告)" 大阪市水道局水質試験所調査報告並びに試験成績 第3集 p. 15～22 (昭和26年度)
32) 31) に同じ
33) 長田新平 "実際池における表面洗浄実験 (続報)" 大阪市水道局水質試験所調査報告並びに試験成績 第4集 p. 5～11 (昭和27年度)
34) 近藤正義 "実際池における表面洗浄実験(第3報)" 大阪市水道局水質試験所調査報告並びに試験成績 第5集 p. 34～36 (昭和28年度)
35) 水川健次，桝井勝 "実際池における表面洗浄実験" 第4報 大阪市水道局水質試験所調査報告並びに試験成績 第6集 p. 23～27 (昭和29年度)
36) 35) に同じ
37) 31) に同じ
38) 33) に同じ
39) 34) に同じ
40) 35) に同じ
41) 水川健次，桝井勝 "実際池における表面洗浄実験 (第5報)" 大阪市水道局水質試験所調査報告並びに試験成績 第7集 p. 25～26 (昭和30年度)

Report
of
The Public Works Research Institute
Ministry of Construction

Vol. 112, September 1962

CONTENTS

1. S. Iwama
Experimental Studies on the Structural Design of Concrete Pavement (2)
——On the Frictional Stress, End Restraint Stress and Warping Stress of Concrete Pavement—— ……(1)

2. S. Terashima and M. Kashiwaya
Experimental Studies on the Size of Filter Sand and the Surface Washing……(99)