



米國道路局で行つたコンクリート 鋪装試験方法

久野重一郎

米國道路局では、1930年一つのコンクリート試験舗装を作つて、爾來6年間に亘り詳しい調査を行つて來たのであつた。その方法は、驚くべく精密であつて、今日まで、彈性體についてやつて來たとほゞ同じ程度の試験方法を、コンクリート舗装へ適用してゐるのであつた。わが國に於ても、將來、この程度の研究が行はれていゝことだし、またさうなるべきだと思はれるので、こゝに、米國道路局でとつた試験方法の概要を紹介させて頂かうと思ふ。

1 研究の大要

1930年以來、6年間に亘り、米國道路局では、ヴァーデニア州のArlington試験場に於て、大規模の舗装研究を行つて

來た。その目的は、コンクリート鋪装版の構造學的作用を、在來よりも一層よく理解することに役立つやうな知識を得やうとする點にあつた。一層明細にいふならば、この研究は、主として次の4個の事項を明かにするために計畫されたものであつた。

1. 等厚鋪装版に對する荷重の影響。
2. 鋪装版横斷形の研究。
3. 縦横目地の荷重に對する構造學的効果。
4. 溫度及び濕度が鋪装版の大きさ、形狀、耐荷力に及ぼす影響。

等厚版上、いろいろな位置へ荷重をおいた場合の影響を研究しようとしたわけは、在來提出されてゐる唯一の鋪装版應力の理論（即ち Westergaard のもの）の實驗的證明をしようとしたことが、重なる目的であつたのである。それで、この試験では、荷重應力關係へ理論上影響を及ぼしきらうな要素の一つ一つについて、實驗的に吟味を施し、更に理論上豫想される數値を、觀測値と比較する、といふやうな方法をとることにしたのである。尙、この試験から、次のことが分るだらうといふ期待もあつた。即ち、いま一定の荷重を指定するとき（版上、どういふ位置へおいても）、それが、或る一定の最大應力を生ずる、といふやうに、均衡のとれた設置があるとすれば、それは、どんな横断形のときであるか、その形が、かなり明確に示されはしないか、と思はれたのである。

第2の横断形の研究は、主として、二つの目的があつた。一つは、在來からある種々の設計につき、その相對的經濟性を明かにしようとしたこと。もつては、横断形に關し、十分に均衡のとれた理想的な形を結論するに足るやうな資料が、

得られるであらうと考へたことである。勿論、均衡のとれた横断形(無筋のない横断形)の研究に對しては、前に記した等厚版上の荷重試験も、有要な一部を形成するわけである。

第3にあげた縦目地の構造學的作用は、從來、これに關する資料は殆どなものはないといつてよい状態である。しかも、鋪装の構造學的設計を考へる場合、目地の作用に關する知識は大變大切であるから、この項目の研究は、どうしても必要だつたのである。實驗は、まづ、普通に使はれてゐる目地の主なものについて、その構造學的有效さを示す資料を得ることと、次に、目地の構造學的作用といふ立場から見た目地幅(目地の間隙)及び連繋棒間隔の影響を明かにする、といふ二つのことを目標においた。

第4にあげた温度及び湿度の研究は、温度と湿度の變化にもとづく複雑な關係につき、これまで知られてゐるところよりも一層詳細に吟味し、その結果を、一構造物と考へての鋪装版設計へ實地に應用しようといふのである。

以上述べた目的的研究を行ふために、full-size のコンクリート鋪装版を、10種類ほど作つた。1種類のものの全面積は、長さ 12m (40')、幅 6m (20') で、横断形は各種類ごとに變へた。夫々の種類のものにつき、中央へ縦目地と横目地を設けて、4個の小版に區切つた。隣りの種類とは、完全に分離させてあつて、その一等廣い目地は、間隙 50mm、無筋式のものであつた。コンクリートは、すべて同じ配合のものを使つた。鐵筋は、全く入れなかつた。路盤については、特に注意して全體が一様の固さであるやうに地均しをした。

荷重試験、その他の研究は、この 10 種の版について行つて來たのである。その測定回数がどの位の量に達したかといふと、大ざつぱに見て、次の數字をあげができるのである。

歪の測定	30,000 回
撓みの観測	25,000
伸縮の測定	65,000
温度の観測	30,000

この中の約 10% は、夜間或は拂曉に行はれたのである。

この研究に用ひた横断形は、次の通りであつた。

1. 2段増厚式。American Association of State Highway Officials の推奨。1個。
2. 普通の縦増原式。増厚區間 1m。3 個。
3. 2重抛物線式。兩端で厚くなる形。1 個。
4. lip curb 式。兩端 2 個。
5. 等厚斷面。4 個。

横目地の設計は、次のようにした。(突附け型が多い)

1. $\left\{ \begin{array}{l} \text{柵の間隔を變へること} \\ \text{目地間隔を變へること} \end{array} \right.$ 2 個。

2. 連續鋼板 key を入れて、目地間隔を 2 様。
3. 縦増厚型にして、柄その他の連繫を入れないもの 1 個。
4. 盲目地。柄を入れたものと入れないものの 2 様。

これだけの横目地について試験したのである。これらのすべてに對し、瀝青充材を注入した。縦目地の模様は、次の通りである。

1. 厚ハシート・メタルの deformed plate で、分離したもの。
2. tarred felt で分離したもの。
3. 盲目地。コングリートへ溝をつけ、クラックが入るならば、こゝへ入るやうに考へたものである。

2 供試版の製作

舗装版の構造的的作用を試験する際に、路盤の一様性が大切であることは、最初から認められたことであった。これを十分に考へた上で場所を選定したのであつた。そして、この區域の土のもつ條件を決定しておくために、精密な土質試験を行つた。その結果によると、この土は、一様な褐色シルト・ローム (a uniform brown silt loam) といふ部類へ屬するところがわかつた。試料 25 個につき、實驗室で行つた試験によると、次のやうであつた。

表 1 路盤の土質調査

liquid limit 22-32

plasticity index

6—14

shrinkage {
ratio

16—24

1.6—1.8

moisture equivalent {
centrifuge
field19—35
18—28

試験地の最初の表土は、實は、前に行つた實験のため、剝されて居つたので、それを、全部とりのけて、全く新しい、そして亂されない表土が現はれるやうにした。その表面へ、鋪装紙を劃したわけであつた。尙、排水を十分にするため、兩側へ、深い側溝を掘り、適當な流出口を用意した。

版を設置すべき場所の路盤は、約 25 cm ほど掘り返した。そのまま約4週間放置した。その間に、數回、disk harrow で土塊をくだき、かきませた。次に、5t タンデム・ローラーで固め、更に 5t トラックへ積を積んだもの、車輪で、よく固めたのであつた。かうした表面へ、塑性をおき、最後の表面埴均しをした。路盤面の仕上げは、實に、大念、かつ正確に行つた。それは、版を打つたとき、その厚さが、正しく分ることを必要としたからであつた。かうした仕事をしてゐた期間中、毎日、路盤面へ撒水して、その湿度の保持に努めた。コンクリートを打つ直前には、更に軽い撒水を行つた。

コンクリートに用ひる材料は、注意して選んだ。配合は、曲げ強さが大きくなるやうに設計した。セメントは、純良本

標準ポルトランド・セメントであつて、こゝへ使つた全量が、製造工場の1貯槽から運ばれた。

細骨材は、石英砂であつて、幾分光沢で、角ばつたものであつた。長石、片麻岩、雲母などの粒も、いくらか混つて居つた。数回の實驗から、平均の粒度率 3.26 であつた。これらの砂は、バージニア州 Fredericksburg 附近産のものであつた。

粗骨材は、青色石灰岩を用了。これは、西バージニア州 Martinsburg 近傍の産であつた。3種の大きさに分けたものを、現場まで運び、それを、配合場で、更に希望の粒度になるやうに混合した。その割合といふのは、大體次のやうであつた。

粗骨材の配合

5 — 20 mm	25 %
20 — 30 mm	25
30 — 60 mm	50

この割合で混ぜたもの、平均粒度率は、7.65 であつた。

コンクリートの配合は、1:2:3 $\frac{1}{2}$ を採用した。これは、乾燥排水容積を計量の基礎としてである。實際には、ミキサへ材料を入れる際、水以外のものは、すべて重さで計量した。

含水量については、毎朝、堆積中から試料をとつて試験し、それに相當するだけ、投入材料及び使用水量の調整をした。

試しの混合物の結果から決めた水セメント比は、容積で 0.85 であった。(重さでは約 67%)。

コンクリートの混合には、新型のペーパー (paving mixer, size 27-E) を使ひ、1.5 分間混合した。毎朝の運轉の始めには、ミキサ中へ、規定の半分だけの量を投入し、しばらく回轉して、それを棄てるやうにした。これは、ミキサ胸の内部へ、一通り附着させ、その後の混合に不均一を生じないやうにする目的からであった。練上つたコンクリートは、路盤上へ投下、普通行はれてゐるやうな方法で、敷均した。突固めと仕上げは、スクリード 2 枚を有するフィニッシャー (finishing machine) で行つた。最後の仕上げは、手持ベルトと面取り鋸によつた。この最後のベルトがなんだら直ぐに、濡れたヅックを 2 重にかぶせ、24 時間放置した。その後、ヅックを取去つて、土を 8—10 cm の厚さに敷き、これを濕らせて、20 日間養生した。

コンクリートの物理的性質の試験が、後日に至つて必要になるかも知れない者へたので、そのコンクリートを用意する目的で、鋪装版を更に 3 個だけ餘計に打つた、尤も、この 3 個は、長さの短いものであった。

コンクリートの強さを決定するため、鋪装版 10 種の一つ一つにつき、大きさ 8 個、圓筒 5 個づゝの供試體を作つた。これらの供試體は、コンクリートを一度路盤上へ投下したもの用ひて製作した。梁は $18 \times 18 \times 75$ cm、圓筒は 15×30 cm の寸法のものであつた。初めの 24 時間は、水分が逃げないやうに保護し、その後、圓筒は飽和室へ貯藏し、梁は路肩の土中へ埋めておいた。これらは、すべて材齡 28 日で試験した。平均値は次の通りであつた。

梁	80 個	曲げ強さ	54	kg/cm ²
---	------	------	----	--------------------

圓筒 46 個 壓縮強さ 248 kg/cm²

3 試験方法

この研究に於て行つた試験方法は、大別して3群になる。

1. 荷重試験

鉢装版のいろいろな部分へ荷重を與へ、それによる歪と撓みを計測した。この目的は、

- (a) Westergaard 理論の吟味。
- (b) 鉢装横断面の研究。
- (c) 目地の構造學的効力の決定。

2. 溫度及び湿度變化による影響の観測。

溫度と濕度の變化によつて、版の大きさ、形狀、載荷能力などにどうひくかを知るために、次のやうな觀測を行つた。

- (a) 鉢装の内部及び外部に於ける溫度状態の觀測。
- (b) 溫度變化及び濕度變化にもとづく版の膨脹、收縮、反りの觀測。
- (c) 版が大きさ及び形狀を變へようとする傾向にもとづき、コンクリート中へ引起される歪の觀測。

3. 補助試験

これは、版試験の解釋に關し必要と思はれる資料を得る目的で、主に實驗室で行つた附隨的實驗である。

(a) 路盤の物理的性質。

(b) コンクリートの物理的特性。

(c) コンクリートの熱學的特性。

(d) コンクリートの強さと剛性に及ぼす温度の影響。

4 荷重試験のプログラム

一般荷重試験に移る前に、豫備試験をした。これは、等厚断面の版と、普通の縁増厚の版とで行つた。豫備試験の目的は、次のことにあつた。

1. 種々の研究に對し、荷重を與へる適當な場所を決めること。
2. 各載荷方法に対するきはどい歪を測るため、歪ゲーデをとりつける適當な位置を決めること。
3. 各荷重に對する撓みの程度を知ること。

これらの豫備試験から得た知識をもとにして、本試験の詳細な計畫を立てることができた。

この豫備試験から、一つの大切なことが分つた。それは、この試験中に計測した相對的撓みが、相對的應力を正しく示すものとばかりは考へられないことであつた。理論上は、撓みと應力は正比例してゐるものである。だが、撓みの觀測値は、それが、外見上正確であるとしても、歪の觀測値に比べると、實際上不完全な所があるらしい。即ち、撓みの觀測値中から見出しえないほどの彈性性線の差異が、應力に於ては、大きい差異を生ずることになるのであらう。

横断面均齊設計の研究に對しては、版中央の横軸に沿ふて、30 cm おきに、荷重を順々と與へた。

目地設計の研究については荷重を次の3點へ與へた。

- (a) 目地に接する點(版端)。
- (b) 版の中央點。
- (c) 版外側の自由線の中央。

かかるして、荷重が目地端にあるときの應力と、他の點へ荷重がのるときの應力とを比較しようといふのである。それでよつて、目地設計の構造學的効力につき、合理的な目安がつけられるであらうと考へた。

實驗の進行に伴つて、次のことことが分つた。或る目地は、すべての點で同様には有効でないこと、及び1年中いつでも同様に有効とはいへぬといふことである。それで、版の中心線から離れて、然かも中心線に平行な線上に沿ふて、荷重を更に與へて見たのである。すべての場合について、3個所の荷重に對し計測をした。

Westergaard が、理論的に、コンクリート鋪裝版の應力を研究した際、荷重は3様の場合を考へたものであつた。

- Case I 輪荷重が版の自由隅角へ作用する場合。

- Case II 輪荷重が版の内部で、緣から相當離れた點へ作用する場合。

- Case III 輪荷重が版の線上、隅角から相當離れた點へ作用する場合。

この試験でも、やはり上の3様に荷重を與へた。尤も、この試験は、等厚斷面の版だけについて行つた。各荷重に對して、疊と撓みの觀測を行つた。

5 載荷方法

荷重の量としては、生ずる最大應力が、コンクリートの曲げ強さ(破壊係数)の約半分程度に達するものであることが、望ましいと考へた。それから、版へ荷重を與へたそのときには、版上に他の荷重のないことが、大切であると考へた。この二つの理由から、大きい圓筒形の鋼製タンクを採用することにした。タンクは、長さ約9m、直徑約1.8mであつて、鋼製の柱上へ取付け、この柱の兩端には、夫々支柱をおいた。この兩端の支柱は、間隔約7mで、夫々2個づゝの鑄鐵製車輪を備へ、この車輪は、路肩へ敷いたレール上を移動するやうにした。これで、タンクは、試験版上を完全に跨いでゐることになり、縱方向へ自由に動いて、試験しようとする版の上へ持つて行くことができるわけである。

タンクの下面へは、重い木製枕を取付けた。この枕は、タンクの1端から他端まで、自由に移すことができるようになした。この枕を通して、版上へ荷重をかけたわけである。

タンク中へ、水を半分ほど満たすと、その反力の大きさが、版への荷重として十分である量に達することが分った。枕と版との中間へは、荷重を傳へるために、特種の裝置をおいた。まづ、版上へは、スポンデゴム製の薄い板をおいて、載荷面の不規則を避けることゝし、この板の上へ、球支承を有するペアリング・ブロックを置いた。このブロックの上へ、ボル・ペアリング入りのスクリュ・ジャッキを載せた。そして、一方、タンク下面へそへた木製枕の下へ、鋼板を當て、その下へナイフ・エッヂをおいた。このナイフ・エッヂと、スクリュ・ジャッキの中間へ、焼入れした鋼の棒を挿んだ。

この棒は、豫めキャリプレートしてあって、どれほど撓めば、荷重がいくらかといふことが、一目して分るやうになつてゐるのである。勿論、この棒へは、マイクロメータを添へてあって、スクリュ・ジャッキを適當に上げて、マイクロメータの読みを見れば、そのときの荷重が知れるといふ仕掛けなのである。

このやうな装置による載荷能力は、約 12t であった。マイクロメータ 1 目盛は、約 14kg の増加に當つてゐた。數回試験した結果、この装置による荷重の誤差は、大體 50kg 以下であることが分つた。

荷重を、直接、版へ傳へるところのペアリング・ブロックの下面は、形狀として、圓形及び半圓形の 2 種を作つた。圓形は、版の内部と版の隅角へ荷重を與へるために使い、半圓形は、目地の線又は版の自由線に沿ふて荷重を與へるときに用ひた。次に、載荷面の大きさが、應力の大きさへ影響するかどうかを見るために、いろいろな面積のブロックを作つた。即ち直徑 15, 20, 30, 40 cm などの大きさにしたのである。尤も、大部分の實驗は、直徑 20 cm の圓形載荷面をもつブロックを以てした。

版中央部へ荷重を與へたやうな場合には、載荷面直下のコンクリートの歪を測る必要があった。この目的のためには、ブロック底面へ、溝を掘つて、歪ゲージが十分入るだけの餘裕を與へた。この溝があることによつて、版の應力に差異を生ずるかとも知れぬと考へたので、それを調べた。その結果によると、荷重を一定とし、載荷面を同一に保てば、溝あるときの最大歪は、溝ないときの最大歪に等しいことが分つた。

次に、載荷時間が、コンクリートの歪に及ぼす影響を試験した。その結果によると、或る版、或る載荷位置では、最大歪に達する迄に 1~2 分間を必要とした。ところが、他の位置では、4~5 分間を要した。この試験結果から考へて、載荷後 5 分間経過してから、歪を計測する、といふ方法を、全試験に採用した。同じ理由により、1 荷重をゆるめて、次階の荷重へ移る際も、そこへ 5 分間だけ間隔をおいて、歪が十分に戻るのを待つた。この方法で測つた歪は、同じ荷重を瞬間に與へた場合よりも大きいわけである。

6 率の計測

本研究を通して、コンクリート中の歪は、記録式歪ゲーチで測つた。この歪ゲーチの詳細は、Public Roads, Dec., 1933 に記されてゐる。大體を記すと、これは、約 15 cm 長さのフレームへ、1 個の簡單なベルクランク・レバーをとりつけたものである。レバーの二つの腕は、長さが違つてゐて、短い腕は、ゲーチをとりつけたその標點の變位に應じて動くやうになつて居り、その運動が、長い方の腕へ傳へられ、腕の長さの比に相當しただけ擴大されるのである。ベルクランクの長い腕の先端には、ペンがついてゐて、それが、煤を塗つた小さい硝子板の表面へのつてゐる。腕の運動が、この硝子面へ記録されるわけである。この硝子面上の移動は、勿論、標點の變位に比例するのであるから、硝子面上の線を、コンパレーターで測るか、或は映寫装置で光學的に擴大することによつて、歪の量を知ることができるのである。ゲーチの機械的擴大率は、60:1 であつた。更に映寫装置によつて、普通 30:1 の光學的擴大率を追加した。

このゲーチは、普通に起る溫度影響を消すやうに設計したのである。それは、ゲーチのフレームに、インバー銅を使ひ、更にベルクランクの長い腕には違つた金屬を用ひて、溫度の影響を補正したものである。このゲーチの精密度は、コンクリート中の應力を、 2 kg/cm^2 程度まで正しく決定するに足るものであつた。

ゲーチは 15 cm の長さがあつたから、初めの頃、一つの疑問があつた。それは、15 cm もあるゲーチを使って、ペアリング・プレートの下の歪を正しく測れるかどうかの問題である。特殊なゲーチをいくつか作つて、試験した。その結果によると、15 cm のものでも、次の 2 條件さへ備へてゐる場合には、最大歪を正しく示すことがあつた。

- (a) ゲーチ全體及び標點が、ペアリング・プレート内部にあること。

(b) ゲーデを、プレートの1直徑の位置におくこと (弦の位置でないこと)。

理論的には、ペアリング・プレートの下の版全面には、等しい魔力は、生じてゐない筈である。もし、歪をもつと精密に測ることができると、長さ 15 cm の間に於ける歪の變化を知ることができると、然し、上に記したゲーデを以としても、少くとも、長さを 3 棟にかへた場合について、同一の最大歪を與へることが分つたのであつた。それで、15cm またはその以上のペアリング・プレートを使ふならば、15 cm のゲーデを以て、最大歪を近似的に記録することができる、とがう結論していゝことであつた。

使用に際し、ゲーデは、2 本の真鍮製の小柱の間へ装置した。この柱は、 $6 \times 6 \times 40$ mm の大きさであつて、コンクリート面へ、小孔をあけ、各試験の直前に約 25 mm 插入し、これを焼石膏で固めた。この結合材については、様々なものを使つてみた。しかし、他の材料は、時間が立つと、柱がルーズになる傾向があつて、面白くなかった。一時的に結合するといふ目的には、焼石膏で少しも差支なく、從て、これが一等便利だとして使つたわけであつた。

普通に装置した場合、歪ゲーデの軸は、コンクリート表面から約 6 mm ほど上方にあつた。このため、記録された歪の大きさは、實は、鋪装表面の歪よりも、幾分大きいものであつた。その差は、版の中立面から、ゲーデまでの距離と、鋪装面までの距離によるわけである。C、大部分の觀測値については、このゲーデ位置に對する小補正を必要とした。