

路盤とコンクリート舗装の亀裂

正員 竹下春見*

ON THE SUBGRADE AND CRACKS OF CONCRETE PAVEMENT

(JSCE Aug. 1951)

Harumi Takeshita, C. E. Member.

Synopsis Since the pavement is a structure built on subgrade in which many complexed factors to be considered are contained, it is difficult to reach a solution applying such a mere mechanical determinismical procedure as the deferential equations. From this point of view, the author has tried, in this paper, to explain the relation between subgrade and cracks of concrete pavement by the statistical analysis based on probability.

要旨 コンクリート舗装の設計を行う場合従来主として弾性論的な考え方が基礎になつて発達して来た。然し路盤そのものは充分複雑な原因により変化するのであるし、又舗装は路盤上に構築される構造物であるのでこれを一つの微分方程式の形で現象を説明する様な所謂決定論的な考え方のみでは問題を正確に把握する事は不可能と考へて蓋然性の概念をとり入れ統計論的に考へてみる事にした。本文はコンクリート舗装の亀裂を統計論的に解析し、進んで亀裂の多少と路盤との関係を説明しようと試みたもので、路盤と舗装に関する研究の一部をなすものである。本文中に現われる数式の記号は増山元三郎著「少数例の纏め方と実験計画の立て方」に従つた。

1. コンクリート舗装の亀裂

コンクリート舗装の亀裂は構造上はたいして重要なものではないとも考えられるかも知れないが、降雨の影響、交通荷重による衝撃、異物の混入、其の他コンクリートの塑性作用のため、これが重大な破壊の原因にもなるし第一素入目にも体裁の良いものではない。故にコンクリート舗装の亀裂は舗装の成績如何に関するものと云い得るであろう。亀裂を調査してみると大

別して横亀裂、縦亀裂、隅亀裂の3種になるが、縦亀裂は例えば旧道を幅員拡張した場合で旧道と拡張部の路盤支持力が均一でないような特別の場合に多く表われるが普通は余り多く表われることは少い。従つて以下述べる事は横亀裂及び隅亀裂に関する事が主になる。

調査した箇所及び舗装の様式の大要は表-1に示す如くである。

2. 横亀裂

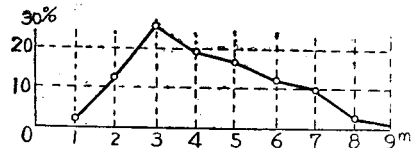
調査の結果横亀裂は大体直線状で、且つ短辺に大体平行なものが多いようである。今一つの版に全幅に亘る横亀裂が1本入るとその版は骨材の噛み合い等により応力の伝達はある程度行われるであろうが、モーメントの伝達は行われなくなり、1つの版と云うよりは2つに分れた2箇の版として働くと考へた方がよいように思われる。かくて統計的に整理すると版の縦長が短くなると亀裂は中央に生ずる確率が多くなり、縦長が長くなると1つの版について横亀裂が何本も生じ得るようになる事が分る。¹⁾

又接目及び横亀裂又は横亀裂相互間の距離を測定し度数分布図を作ると図-1に示す如くなる。

表-1

番号	場所	延長(m)	施工年度	竣工年度	工事種別	版計(m)
NQ.1	岩田中東部	1,240	昭和22年	25年	国	8×3.0×15
NQ.2	大竹町地内	1,230	21	3	全	---
NQ.3	鹿島郡大野村地内(位喜町)	2,700	昭和16~17年	7	全	---
NQ.4	鹿島郡平沢村地内	1,680	昭和7~8年	16年	郷	---
NQ.5	徳山町地内	800	昭和22年	25年	国	8×3.0×15
NQ.6	山口県玉湯町地内	1,500	全	全	全	10×3.0×15
NQ.7	下関市小月町地内	400	全	全	全	---
NQ.8	下関市長門町地内	1,500	全	全	全	---

図-1



この図においては接目又は横亀裂の間にはそれ以上の亀裂はないもののみを取つたものである。図-1によれば亀裂間隔の度数分布は非対称分布になる事が

* 建設技官，建設省中国四国地方建設局勤務

1) 建設省中国四国技術資料 Vol. 2 No. 4

分る。

龜裂間隔を x m にて表わせば $X = \log(x-c)$ とすると正規型分布になる。

予め同一の母集団に属すると思われる実測値 x_1, x_2, \dots, x_N から標本平均

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_N}{N}$$

及び

$$S = \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2$$

を求め不偏分散 u^2

$$u^2 = \frac{S}{N-1}$$

を求め、 F を Fisher の F -分布において危険率 α と自由度 $n_1=1, n_2=N-1$ とから求められる値とすれば、棄却限界は

$$\bar{x} \pm \frac{u\sqrt{(N+1)F}}{\sqrt{N}}$$

で与えられる。

故に 図-1 の数値を使つて X についての棄却限界を求めれば ($\alpha=0.05$ とする)

$$\bar{X} = 0.7603 \quad \bar{X}^2 = 0.5781 \quad S = 1.63 \quad u = 0.128$$

となる故に棄却限界は

$$\begin{aligned} \bar{X} \pm \frac{u\sqrt{(N+1)F}}{\sqrt{N}} &= 0.7603 \\ \pm \frac{0.128\sqrt{101 \times 3.94}}{10} &= 0.7603 \pm 0.269 \end{aligned}$$

その下限は 0.4913 となり、これを x に直すと $x=1.30$ となる。即ち

龜裂間隔の棄却限界の下限 = 1.30 m

版の端に荷重がのり版の端が片持梁の如く働いて生じたと考えられる龜裂は殆んど 1 m 程度以下のものであつて上記の棄却限界 1.3 m の範囲内にある。即ち、端から 1.3 m 以上の距離にある横龜裂は端に於ける横龜裂と同じ原因で生じたものとは考えられない。即ち 1.3 m は版の中央附近に於ける龜裂発生の原因と版の端に於ける龜裂発生の原因との境界をなすものと考えられる。

図-1 に示される最頻値 3.0 m は 3 m 以上の縦長の版の場合は尚横龜裂が生じ得る可能性がある事を示している。3 m 以下の龜裂があるのは端における龜裂か又は例えば 10 m 縦長の版が 5 m と 5 m に龜裂によつて分れ 5 m 縦長の版に於て 2 m と 3 m になるように龜裂が生じた場合等であると考えられる。故に最初から 3 m の横目地間隔をとつたとすれば、端に於ける龜裂は度数が非常に少い事を考えると横龜裂は非常に少いものとなるであろう。

現在吾国地方幹線道路に於いては 1 車線幅として 3 m の幅員が広く用いられているので、コンクリート版は 3 m × 3 m として設計する事が望ましい。

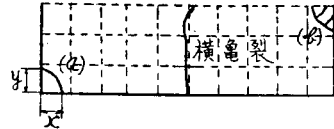
3. 隅龜裂

隅角に於ける龜裂は車輪荷重が隅角にのり、版の隅角が片持梁の如く働いて生じたものと考えられている。

反り応力により隅角が上方に持ち上げられたと考えられるとき車輪荷重が載荷されれば片持梁としての隅角は弱いものと考えられコンクリート舗装に於て隅角は最も大きな弱点と考えて差支えないようである。

調査の結果隅龜裂には 図-2 に示す如きものが観察される。図-2 に於いて (b) の如き龜裂は先づ (a) の如き龜裂が生じてから 2 次的に生じたものと考えられる。

図-2



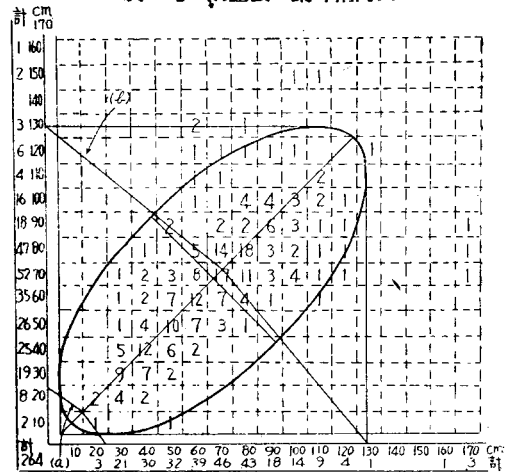
資料の整理に當つては先づ (a) の如き場合を考え版の長辺に沿つて x 、短辺に沿つて y を 図-2 の如く測定する。隅龜裂の 1 次龜裂たる 図-2 (a) の如き龜裂につき各箇所毎に個数をとると 表-2 に示す如くなる。

表-2

個所	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7	No. 8	計
個数	65	29	35	35	5	36	9	50	264

x と y との相関表を作ると 表-3 に示す如くなる。

表-3 隅龜裂の棄却楕圓面



表一3の相関表より棄却楕円面を作る。棄却楕円面を与える式は増山元三郎博士の研究によれば2次元の場合は

$$\frac{A}{N+1} (\sigma_{22} x^2 - 2\sigma_{12} xy + \sigma_{11} y^2) = 1$$

茲に $\sigma_{11} = \sum(x-\bar{x})^2$, $\sigma_{22} = \sum(y-\bar{y})^2$
 $\sigma_{12} = \sum(x-\bar{x})(y-\bar{y})$, $\Delta = \sigma_{11}\sigma_{22} - \sigma_{12}^2$
 $A = \frac{N(N-2)}{2FA}$

Fは $n_1=k=2$, $n_2=N-2$, $\alpha=0.05$ に対応する Fisher の F-分布の値

によつて与えられる。表一3よりの数値を使つて

$N=264$ $\bar{x}=0.674$ $\bar{y}=0.673$
 $\sigma_{11}=17.16$ $\sigma_{22}=17.2$ $\sigma_{12}=11.66$
 $\Delta=159.2$ $F_{202}^2=3.03$ $\alpha=0.05$

となる故に棄却楕円を与える式は

$$4.7x^2 - 2 \times 3.18xy + 4.69y^2 = 1$$

これを図示すると表一3に示す楕円になる。このとき楕円の長軸とx軸のなす角は、 $\theta=45.1^\circ$ となる。

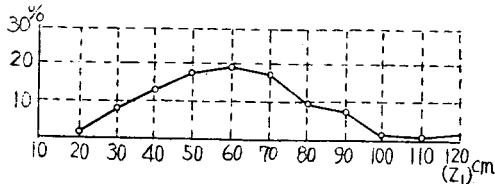
現在行われているコンクリート舗装の厚さを決定する公式は隅角に於ける公式が主となつている。

Westergaardの公式はその代表的なものであるが矩形版の隅角について考える場合に矩形と云う事を考えないで、亀裂は隅角の2等分線に垂直に起るものと仮定している。

上記の楕円の長軸が殆んど隅角を2等分すると云う結論はWestergaard等の考え方が適当であつた事を示すものである。

前述せる如く隅亀裂は $x=y$ なる如く、又隅角の2等分線に垂直となる如く生ずる傾向がある。実際に生じている亀裂は隅角の2等分線上如何なる位置に生じているであろうか。これを考究するために隅角の頂点より隅角の2等分線上の隅亀裂の位置までの距離をzで表わし、zを測定し、度数分布を求めると図一3に示す如くなる。

図一3



図一3より隅亀裂の隅角の2等分線の長さzは正規分布をなすものと仮定して $\alpha=0.05$ において棄却限界を求める。図一3の数値を使つて

$$\bar{z}=59.95 \quad s=39789.75 \quad u=20.048$$

$$\text{棄却限界} = \bar{z} \pm \frac{u \sqrt{(N+1)F'}}{\sqrt{N}} = 59.95 \pm 39.99$$

故に 上限=99.94≒100 (cm)

下限=19.96≒20 (cm)

表一3において、棄却楕円による限界と上記のzの棄却限界を使つて円(a)と円(b)とが画ける。円(a)円(b)及び縦軸、横軸によつて囲まれる面積内に大部分の隅亀裂が生ずる事になる。

隅角は応力が集中するために舗装版にとつて最も弱点となる事が予想されるが隅角を補強する場合には円(a)と円(b)の間に鉄筋を挿入すればよい事になる。

版の辺において生ずる横亀裂は既述の如く1.3m以上の位置において生ずる事は余りないし、又表一3より1.3mは棄却楕円の限界をも与えるものである故に上記の円(a)と円(b)の間に鉄筋を挿入すれば辺において生ずる横亀裂を防ぐ上にも十分有効であると考えられる。

4. 路盤とコンクリート舗装

筆者は現場における観察と実測の結果コンクリート舗装の亀裂の多少は路盤の支持力の不均一性に關係あるものと考えた。即ち亀裂の非常に多い版の隣りの版又はその近くの版において亀裂のない版が存在する。これは単に施工の良否のみに関するものではない。岩国市市内及び宮島口市内において非常に亀裂の多いために他の亀裂版と同一集団に属すると考えられない版とその隣り又はその近くの無亀裂版とにつき舗装版の長辺に沿ひ版の近傍において等間隔に路盤支持力係数Kを測定した。その値を表一4に示す。

表一4

(A) 岩国市市内(N01) 亀裂の多い版に於けるK						
版の番号	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	Ux
N0 12	16.7	18.7	22.5	23.0	17.8	29.0
• 15	21.0	18.5	19.7	15.9	13.7	31.2
• 35	24.8	24.3	24.4	23.4	23.5	44.6
• 87	11.1	16.5	25.6	12.6	21.2	6.03
• 121	31.5	17.6	16.4	19.7	34.4	8.24
(B) 岩国市市内(N02) 無亀裂版に於けるK						
版の番号	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	Ux
N0 7	17.8	17.8	20.4	16.3	16.4	16.5
• 17	19.1	23.2	24.2	23.1	18.9	21.1
• 36	23.5	25.0	23.9	22.3	23.9	0.97
• 89	10.9	16.7	10.2	9.1	12.3	11.6
• 120	21.4	20.5	22.6	20.2	19.7	11.8
(C) 宮島口地区(N03) 亀裂の多い版に於けるK						
版の番号	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	Ux
N0 5	18.2	14.1	15.3	18.2	17.7	17.9
• 6	17.9	14.2	14.7	16.0	14.6	1.56
• 8	16.6	17.4	23.0	20.1	26.0	3.60
• 87	19.6	23.5	28.2	21.7	21.7	1.63
• 89	18.5	17.7	18.8	17.2	22.6	3.30
(D) 宮島口地区(N03) 無亀裂版に於けるK						
版の番号	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	Ux
N0 4	19.5	20.4	21.4	19.9	18.4	1.35
• 13	26.0	24.4	24.4	24.0	25.6	0.78
• 14	25.6	27.9	27.9	28.8	24.9	1.68
• 91	14.8	15.1	15.1	16.8	14.8	0.97
• 92	17.4	17.8	20.0	18.2	20.3	1.57

Kの変動を表わすのにKの不偏分散uを使用する。亀裂版についての u_x と無亀裂版についての u_y との大小を比較する。岩国の場合については表一4(a), (b)より

$$\bar{u}_x = 4.94 \quad \bar{u}_y = 1.41$$

故に u_x と u_y の不偏分散を U_x, U_y とすれば

$$U_x^2 = \frac{1}{N-1} (\sum u_x^2 - N\bar{u}_x^2) = 5.01$$

$$U_y^2 = \frac{1}{N-1} (\sum u_y^2 - N\bar{u}_y^2) = 0.21$$

故に $F_0 = \frac{U_x^2}{U_y^2} = 23.4 > 6.39 = F_{1,4} \quad (\alpha=0.05)$

故に龜裂版と無龜裂版は K の変動が違ふと云う事が出来る。

宮島口においては表一4(c), (d)より

$$\bar{u}_x = 2.38 \quad \bar{u}_y = 1.27 \quad U_x^2 = 0.96 \quad U_y^2 = 0.14$$

$\therefore F_0 = \frac{U_x^2}{U_y^2} = 6.86 > 6.39 = F_{1,4} \quad (\alpha=0.05)$

故に此の場合も龜裂版と無龜裂版は K の変動が違ふと云う事が出来る。

即ち、龜裂の非常に多い版は龜裂のない版に比較して路盤支持力の不均一性が大であると云う事が出来る。

路盤は交通荷重による締め固めのため時間的経過に伴い路盤支持力は増加するが、これは最上先生の理論によれば路盤を構成する土粒子の間隙が不平等な状態から平等な状態へと移行する為であると解される。土粒子間隙が不平等から平等へと移行すれば当然路盤支持力もその変動の割合が減少しなければならない。即ち時間的経過に伴い路盤支持力は位置的に均一なものとなつて行くであろう。

岩国地区は施工より測定時まで2.5年を経過し宮島地区は施工より7年を経過している。表一4の測定値より K の変動を u にて表わし表示すれば表一5の如くなる。

表一5

	岩国 (NO1) u	宮島口 (NO3) u	岩国 (NO1) u の変動	宮島口 (NO3) u の変動
龜裂大版	$\bar{u}_{x1} = 4.94$	$\bar{u}_{x3} = 2.38$	$\bar{u}_{x1}^2 = 5.01$	$\bar{u}_{x3}^2 = 0.96$
無龜裂版	$\bar{u}_{y1} = 1.41$	$\bar{u}_{y3} = 1.27$	$\bar{u}_{y1}^2 = 0.21$	$\bar{u}_{y3}^2 = 0.14$

表一5より u の値即ち路盤支持力係数の変動は岩国に比し宮島の方が龜裂の多い版も龜裂のない版も共に小である事が分る。参考の為に徳山市地区に於ける龜裂の多い版 No.62 の u は $u=2.86$ であり、宮島に於ける \bar{u}_{x3} よりは大い。徳山市の No.62 に対応する無龜裂版 No.64 の u は $u=1.15$ である。即ち龜裂のない版では箇所による路盤支持力の変動を比較してみると余り変化がないし又岩国市及び徳山市では共に2.5年を経過しているが宮島口地区では7年を経過している。しかし時間の差による u の大小もないよ

うである。即ち無龜裂版の路盤は箇所による差異、時間による差異に拘らずその路盤支持力は変動が少い事が分り、一方龜裂の多い版においては箇所による差異、時間的経過による差異がありそうに思われる。

今表一5の値を使用して

$$F_0 = \frac{U_{y,1}^2}{U_{y,3}^2} = \frac{0.21}{0.14} = 1.50 < 6.39 = F_{1,4}$$

故に龜裂のない版においては岩国も宮島も u の母分散は同一であると考えられる。故に共通の不偏分散 ω^2 は

$$\omega^2 = \frac{n_1 U_{y,1}^2 + n_3 U_{y,3}^2}{n_1 + n_3} = \frac{4 \times 0.21 + 4 \times 0.14}{4 + 4} = 0.175$$

$$F_0 = \frac{(\bar{u}_{y,1} - \bar{u}_{y,3})^2}{\omega^2} \cdot \frac{N_1 N_3}{N_1 + N_3} = \frac{(1.41 - 1.27)^2}{0.175} \times \frac{5 \times 5}{5 + 5} = 0.28 < 5.32 = F_{3,8}'$$

故に岩国と宮島とで龜裂のない版については路盤支持力の変動の間に有意差はみとめられない。故に龜裂のない版については土質による変化、時間的経過による変化によつても路盤支持力の変動の間に差異はない。これはすでに相当土粒子間隙が平等化され従つて路盤支持力が均一化されているところに舗装された版は龜裂が起りにくいと考えられる。

龜裂の非常に多い版について表一5の値を使つて

$$F_0 = \frac{U_{x,1}^2}{U_{x,3}^2} = \frac{5.01}{0.96} = 5.22 < 6.39 = F_{1,4}$$

故に岩国も宮島も u の分散は同一の母分散の群に属すると考えられるので共通の不偏分散 ω^2 は

$$\omega^2 = \frac{n_1 U_{x,1}^2 + n_3 U_{x,3}^2}{n_1 + n_3} = \frac{4 \times 5.01 + 4 \times 0.96}{4 + 4} = 2.98$$

$$F_0 = \frac{(\bar{u}_{x,1} - \bar{u}_{x,3})^2}{\omega^2} \cdot \frac{N_1 N_3}{N_1 + N_3} = \frac{(4.94 - 2.38)^2}{2.98} \times \frac{5 \times 5}{5 + 5} = 5.49 > 5.32 = F_{3,8}'$$

即ち龜裂の多い版については岩国と宮島とでは何等かの差により路盤支持力の変動が有意な差となつてあらわれる。岩国市地内の方が宮島口地区よりも粒度がより均等であると云うだけであるので、主として時間的経過による影響によるものと考えられる。即ち岩国市地内は宮島口地区に比して龜裂の多い版については路盤支持力の均一性が少い。これは施工後の経過年数による差違と考えられ、路盤は一般に時間的経過に伴い交通車輛の影響により段々と均一な支持力をもつ路盤に近づいて行くものと考えられる。

5. 結 び

調査並びに実測に当つては建設省宮島工事事務所勤務建設技官和気功、木谷昭の両君の協力を得た。

(昭. 26.5.2)