

コンクリート舗装厚に関する隅角公式 の誤用を指摘す

久野重一郎

概 要

近ごろ、コンクリート舗装の普及に伴つて、その厚さの決め方が、いろいろの文献に散見されるやうになつた。路の交通量または交通車重量から推して、經驗的に、15 cm とか 20 cm と決めるよりほかあるまいと、筆者は思つてゐる。ところが、學者のうちには、公式から決めることを以て、理論的方法となし、それが正しい結果を與へるかのやうに信じて居られる一類がある。しかも大抵は、オールドジャー (Older) の隅角公式 (Corner-load formula) を持ちだされることが多い。すなはち

$$d = \sqrt{\frac{3P}{S}} \dots\dots\dots (1)$$

d = コンクリート舗装の厚さ

P = 単一集中荷重、自動車の一後輪への重さをとる

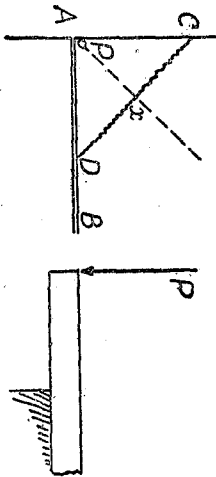
S = コンクリートの許容張應力 (彎曲に對するもの)

さてここで、率直に結論からいへば、この隅角公式には理論的の不備もあるし、また提案者オールダールの意見と違つた方面に使はれてもゐる、といふ2點を明かにするのが本文の目的である。この式の信者諸兄も、一應はこの文をお読み載きたい。その上で、反駁すべき點があるなら、容赦なく示教を惜まれないやう願ひたいのである。また、それほどの信者になり切つてゐない方々は、どうか、本文を機縁として、隅角公式が如何なるものであるか、その真相を十分に御考察賜はるならば、ありがたい。

隅角公式はどうして出るか

まづコンクリート道路床版の側縁部を考へやう (第一圖)。横目地 AB のあるとき、または AB の如きクラックが発生した場合に、床版は、どんなこはれ方をするか。これを論ずるに當り、オールダールは、次のやうな假定を設けることを至當と考へた (Trans. A.S.C.E. 1924, . 126)。

1. 荷重 P は、直角隅の先端 A に作用すると考へる。
2. 隅角部下の路盤は、うつろになつてゐて、床版は突桁のやうに働く。
3. 隅角 A の二等分線 (AC) に直角な任意断面上では、繊維力 (fibre stress) が一様である。



第一圖

かうすると、容易に式(1)が導かれると、オールドナーは、いつてゐる。そして途中のリダクションは記してゐない。Ageによると、導き方はかうである (Construction of Roads and Pavements, 1924, P. 174)。

A から a だけ離れた断面 OD 上に於て荷重から来る曲モーメントは、 P_x に等しい。一方この断面のセクション・モデュラスを W とすれば (床版は無鉄筋と假定す)、

$$W = \frac{1}{6} (2a) d^3 = \frac{1}{3} a d^3$$

従て版の

$$\text{抵抗モーメント} = SW = \frac{1}{3} S a d^3$$

これを荷重の曲モーメントに等しいとおけば

$$P_x = \frac{1}{3} S a d^3$$

従て

$$d = \sqrt{\frac{3P}{S}} \dots\dots\dots (1)$$

公式のもつ理論的不備

彎曲公式 (bending formula) は、周知の通り

$$M = SW, \text{ または } S = M/W$$

で示される。これの成立する桁は、普通、幅や高さに比べて長さの大きいものと考へられてゐる。然るに、隅角公式で考へた桁は、形が三角で、先端から w なる距離に於ける幅が $2w$ である。桁といふよりは、むしろ版である。よつて、假定第三が無理ではあるまいかといふ疑念が浮ぶのである。

式(1)を、理論的に出しつばなしておくならば、假定がどうであらうと、吟味するには及ばない。だが、これを實用に供する段になると、若干趣がちがふ。それは、餘り、とつびようしもない假定だと、現象と全然一致しないかも知れぬからである。幅が長さの2倍もあるやうな特殊三角桁に、普通の彎曲公式を適用してよいかどうかは、一應の實驗を経なければならぬ性質のものだと思はれる。隅角公式には、その點の用意がなされてゐないやうである。

次に、いまひとつの疑問は 應力 S である。床版の設計に當り、 S にどういふ性質の値を使ふべきか。普通は、斷面一樣な桁について實驗した値を使つてゐるやうである。だが、公式(1)は、幅がべらぼうに廣い三角版についてであるから、斷面一樣な矩形桁から出した S が、そのまゝ、適用し得るものかどうか。ここに考察の餘地がある。それで、直角三角形の突版を實驗して得た彎曲應力にもとづいて、許容應力を決めるのが、一番無理のない方法であらうと思はれる。今日までの文献では、さういふ用意が行はれてゐない。いなさういふ點へ、考へ及んだことさへないかに見える。これ、公式實用に關する最も大きい不備である。矩形を以て三角形に置換する、といつたやうな過誤が看過されてゐると思ふ。

隅角公式の實驗的基礎

オールダールは、イリノイ州のベーツ試驗道路 (Bates Test Road) について次にやうに記してゐる (Trans. 前出)。

「コンクリート基礎へトベカを施工した部分へ、試験用トラスクを通した場合、床版の破壊は、殆どみな、隅角部に於て生じ、その廣さは2~3平方呎に限られた。種々の版厚に於ける隅角破壊時(critical corner breaks)の荷重量を調べると、圖に丸點で示したやうであつた(第二圖)。尚、各種床版のコンクリートに對應する供試體を試験し、その破壊時の張應力を平均すると

$$S = 706 \text{ 磅 (約 } 50 \text{ kg/cm}^2\text{)}$$

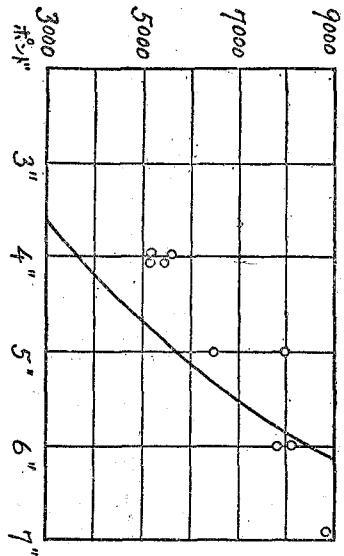
であつた。これと、版の厚さから、公式(1)を用ひて荷重量を計算し、それを圖示したものが、第二圖中に實線で示したものである」(この項逐次語譯ではない)。

ここでオルダーは、 S を求める實驗の供試體が、どんな形状のものかを記してゐない。しかし前後の記述から推して三角形の突版を試験したものではなささうである。氏はつづけていふ。

「この圖から見ると、縁部を補強しない等厚断面床版の設計に對し、隅角公式は、相當の自信を以て使へさうである(may be used)」

そして更に、コンクリート基礎へ煉瓦を敷いたもの、コンクリートだけのもの等5種の床版につき、同様の實驗を行ひ、その結果を別の圖に示してゐる。

これが、オルダーの示した實驗的基礎である。



第二圖

實驗的基礎に於ける不備

第二圖をよく眺めた場合に、實驗結果たる丸點と、公式から出した曲線とが、よく一致してゐる、と見做し得るであらうか、これら 10 個足らずの點を通る曲線としては、もつと他にも、適當なものがあつたらうに思はれないこともない。こんな圖から、「相當の自信を以て使へさうだ」なんて憶面もなく記して、その正當さを強調するのは、誠に大膽であるといはねばならない。白を黒といふ程ではないにせよ、科學的にはどうであらうか。

上圖以外の他圖に於ても、大同小異で、なかには、多少もつともらしいものもあるが、反對にもつとひどいものもある。
(Trans. A.S.O.E. 1924, P. 1209 Fig. 17)

少し極端といふと、若干インチキであつて、それが、米國道路界を風靡し、あまつさへ、海をこえて我が相當の人々まで引込まれてゐるところを見ると、世間は案外組しやすいものだといふ感もする。要するに、刻を急ぎすぎた記述と見るか、或は極めてラフな斷定であるといふべきであらう。

第二圖の實驗値が、なぜ、公式の曲線に一致しないか。それは、恐らく、隅角公式に理論的不備あることによるのであらうと思はれる。また別に、次の 2 理由も考へられる。

1. S のとり方に無理のあるためだらう。
2. 地盤の支持力が公式に無視されてゐるためだらう。

實驗上の破壊荷重が、公式値よりいつも高く出てゐるならば、確かに支持力の存在が影響したことになる。だが、オーダーの記録では、必ずしも、さうばかりではない。だから一概に、第二理由だけとはいへないのであつて、 S のとり方

若しくは公式の理論的不備を、問題にする餘地あることが、示されてゐるやうに思はれる。少くとも、オールダーの記す實驗と理論との關係は、無理があると思はれるのである。

公式の實用に對する提案者のことば

「床版隅角部の下方がうつろになつてゐると考へた場合、版の縁部 (slab edge) の厚さは、公式

$$d = \sqrt{\frac{3P}{S}}$$

から計算したものを使つてよいであらう。但しここで S は、そこに使用するコンクリートの抗曲力 (彎曲張應力) の半分を越えない値をとる。版の縁から少くとも 2 呎の部分へは、この d だけの厚さを與へる。それから内部は、漸次厚さを減らし、縁から 4 呎のところにて中央部の厚さに移る。かやうな設計法を推稱する次第である。」

「版中央部の厚さをいくらにすべきか、といふ點については、確定的な結論を得るに至らなかつた。撓度測定の結果からみると、等厚床版の中央部の撓みは、縁部の撓みの約 1/3 であつた。従つて中央部では、厚さをすつと減らしてもよいわけである。それで、確定的ではないが、公式

$$d = \sqrt{\frac{P}{S}}$$

から計算したものを、中央部の厚さとするれば、大體中央と縁とが耐荷力 (traffic supporting capacity) の釣合つたものにならうかと考へる。もつとも、これは、單にサツゼツシヨンとして記すに止まる。試験區劃の實例から見ると、中央部は 5 吋 (13 cm) あれば、8000 ポンドの車輛に對し、相當の安全率を以て耐へ得ることが判明した。」

以上の言葉は、報文の結論と見做すべき部分に記されてゐる（前記 Trans. P. 1220）。S の取り方に依然として疑問を残すけれども、其他の點では、無理のない主張だと思はれる。特に注意に値するのは、オールドーが、隅角公式を以て、文字通り隅角部の厚さの設計に使ふべきことを指示し、これを、版中央部に適用する必要のないことを明言してゐる點である。この事實を知つて、筆者は眞に愉快に思つたのである。

隅角公式の誤用

隅角公式を Agg がその著書で紹介するに當つて、この式から中央部の厚さが出るかのやうに、或は中央部の厚さとしてもよさうに、書いたものである（Const. Roads and Pavements, 1924, P. 176）恐らくそれがもとだらうと思はれるが、其後、多くの道路書に、同様の記述が出現するに至つた。それが我が國へも入つて來て、「隅角公式」がいつのまにか「中央部公式」の内容を持たされるに至つたものである。明かに誤用といふべきである。

固より、隅角公式から出た厚さを、中央部に採用して、絶対に悪いといふわけのものではない、必要以上に厚いものとなつて、中央と縁とが、強度上バランスがとれないといふわけである。また、特別な事情がない限り、提案者の推稱しない方法をとる必要もないだらうと思ふ。

隅角公式は、もともと、トラツク車輪による隅角部の破壊を基礎にして導いたものであるから、隅角以外へ適用するのは、式の性質からいつても妥當でない。中央に縦目地ある場合は、それを一種の縁と考へるわけであるから、目地に接する部分へは、隅角公式を適用してよいこと勿論である。

尚、隅角公式の變形として

$$d = \sqrt{\frac{1.5P}{S}} \dots\dots\dots (2)$$

$$d = \sqrt{\frac{0.75 P}{S}} \dots\dots\dots (3)$$

などが、Agg によつて記されてゐる。(2) は横目地の側縁部に鐵筋のあつた場合、(4) は縦目地と横目地とに鐵筋の入つた場合であつて、何れもコンクリートだけの床版ではない。以上に用ひた目地といふ需の代りに、クランクといつても同じ式で間に合ふわけである。床版の中央部に、縦横のクランクの生ずることもあり得るから、隅角公式を、版の中央部へ適用してよいではないか。さういふ議論も出得るわけである。然し、多くの経験によると、中央部へクランクの出るときは、大抵、縁にもクランクが出てゐるし、オールダーの實驗によれば、「車輪による破壊」は、殆どみな縁部に生じた。それで、隅角公式はやはり隅角部へ適用するのが、妥當であらうと思はれる。

誤用から生ずる無理の一 (安全率の低減)

隅角公式の禮贊者は、コンクリートの安全率を 2 以下にとるのが普通のやうである。その代表者の一人として Harger をあげやう。氏は、28 日の強度の 65% をとるのがよからうといつてゐる (Highway Engineers' Handbook, 1927, P. 398)。すなはち安全率は 1.5 である。大きくとる人でも、せいぜい 2 くらいであつて、その例は、澤山ある。

土木學會の鐵筋コンクリート標準示方書によると、許容彎曲應力は、28 日の強度の 1/3 にとるを原則とし、28 日の強度がどんなに大きくても、65 kg/cm² を越えてはならぬことになつてゐる。道路は、直圧力、彎曲、摩擦など種々の力をうけるから、安全率も、他の場合と同様、少くとも 3 くらいには、取つて然るべき筈である。いま、コンクリー

トの 28 日に於ける彎曲張應力を $40\sim 60 \text{ kg/cm}^2$ と假定し (三角突版のことはあつかる)、安全率を 3 にとると、許容應力は

$$S = 13\sim 20 \text{ kg/cm}^2$$

になる。いま $S = 15$ をとつて

$$P = 3000 \text{ kg} \quad \text{とすれば} \quad d = 24 \text{ cm}$$

$$P = 5000 \text{ kg} \quad \text{とすれば} \quad d = 32 \text{ cm}$$

この値を、全床版に採用することになると、経験上知られる必要な厚さより厚い。そこで安全率を低下して、許容應力を増せば、計算上出る厚さを、いくらでも薄くすることができると、からくりがある。

道路に於て安全率を 2 以下にとらねばならぬ理由が、實驗上明かにされてゐるといふのならばともかく、さうでない限り低い安全率の使はれるといふ一事を以つてしても、隅角公式が設計理論として無理のありさうなことが、うかがはれるのである。

隅角公式は、隅角部だけに適用するものだとの見解に立ち、縁部だけを、上記例題のやうに、24 cm 以上にするといふのであれば、経験との不一致は、餘程、緩和される。この點から見ると、安全率の低いといふ習慣は、隅角公式を誤用したこと。ら生じた一現象ではあるまいかと思はれる。

誤用から生ずる無理の二 (荷重の論議)

隅角公式の荷重 P に、どんな數値を使つたらよいか。これに種々の意見がある。某氏は、自動車荷重に衝擊として

6) %を加へたものを用ひるがよい、といふやうに書いてある(某パンフレット 21頁)。またある人は、静止荷重でよい。そのわけは、衝撃を加算しないため版が薄くなる心配があるかも知れないが、これは、路盤の耐荷力を無視してゐる點と、相殺するから差支ない、といつたやうな記述をしてゐる(某書 70頁)。

オールドーの原論文に於ける記述は、路盤耐荷力の現存する床版へ、自動車走らせて、版破壊時の荷重を調べ、公式中の P へは、衝撃を加へない荷重を入れてゐる。その結果が、實驗に相當近いと彼はいふのである。して見れば、衝撃を 60% 加へよとか、衝撃無視が耐荷力無視と相殺するなんていふ自分勝手な斷り書きは、附ける必要ないことがわかる。いづれも、原論文を見ないことによる議論で、誤用たるを免れない。

鐵道橋の設計などでは、現在の機關車よりも大きい荷重を使ふのが普通である。道路床版では、現存の荷重に近いものも多く使はれるやうである、すなはち鐵道に比べて、設計荷重が過小である。これは、あまり大きくとると、經驗の要求する厚さよりも厚くなつて困るといふやうな事が暗黙の理由になつてゐるのかも知れない。或は、公式そのものが、理論的不備を有することから、大きな荷重がとれないのかも知れない。將來の研究を要する事項である。

誤用から生ずる無理の三 (厚さの任意的調整)

隅角公式の變形に次のやうなのがある。

$$d = \sqrt{\frac{JP}{S}} \dots\dots\dots (4)$$

ここで、J は、荷重の分布及位置によつて決まる係數と定義されることもあり、又次のやうなとり方もあるやうである。

アスファルトコンクリート	} J = 1.2~1.3
ブロック舗装 (瀝青目地)	
ブロック (セメント目地)	

J の最大値は 3 であつて、その場合 (4) は (1) になる。鐵筋の有無によつて J を變へるのであれば、意味はあるけれども、荷重の分布とか、表層の種類によつて變へるとなると、ただ徒に複雑になるだけであつて、どんな標準で決まるのか、わけがわからなくなつてしまふのである。

こんな事 なるといふのも、隅角公式を本来の意味から遠い方面へ誤用することから起つた結果であらうと思はれるのである。一層根本的に考へれば、公式そのものに缺陷があるため、最初の形では實用にならぬことを示したと解されぬこともない。

誤用から生ずる無理の四 (路盤係數)

路盤の支持力を無視するのはよくない、といつた理由で、

$$d = K \sqrt{\frac{JP}{8}} \dots\dots\dots (5)$$

なる式さへ飛出して來たのである。K は路盤係數で

$$K = 0.9 \sim 1.1$$

かうなると、病すでに膏盲に入つたといはねばならない。ホルダーの原論文などは、どつかへ吹飛ばされてゐる。根

本格的な創見は難く、校葉末節の變改は易い。後者は、往々にして、前者の創意を踏みにぢる、といふことの一例を、隅角公式に於て見たわけである。然かも、後人によつて歪曲されるやうな理論は、初めから眞に完全ではなかつたに違ひない、といふことも亦いひ得るであらう。

要 結

A. 提案者側の不備

1. 矩形突桁に關する彎曲公式を、極めて平べつたい三角突版へ適用したこと。
2. 公式の實驗的基礎に對し、過大の評價を行つた嫌のあること。
3. 許容應力を、三角突版の實驗から求めやうとしなかつたこと。

B. 後人の誤用

1. 隅角部の厚さを求めるための式を、全床版へ適用し得るものと、誤認したこと。
 2. 提案者の精神を無視して、校葉末節の變改を加へすぎた嫌のあること。
- これ 要するに、隅角公式は「假りにこれを用ふるとしても、道路床版の隅角部（縁部） 限定すべき性質のものと思はれる。その場合でも、荷重量及許容應力については、極めて大膽な假定を必要とする。従て得られる結果が正しいかどうかは、現在のところ、保證し得ないであらう。また、荷重や應力について、あまり細かい認識を立てしても、眞の正確さを増す所にはならない。(終)