

踏切道の容量について

国 鉄 宮 本 俊 光

1. まえがき

踏切事故の原因を調べてみると、はっきり通行者側に責のあるのが大部分であるが、他方、事故割合は少ないが設備上に根本的原因(欠陥)があると思われるものがあることは、われわれとして無視することの出来ない重要な問題である。すなわち、それらの対象としては、列車回数が多く踏切しゃ断時分が長く道路通行の機能が著しく阻害されているもの、通行量が多いにもかかわらず踏切幅員が前後の道路幅より狭いもの、列車接近報知装置の不備等が代表的なものといえる。

以上から、ここでは主として列車回数によって定まる踏切門扉のしゃ断時分、開扉時分の長さ、道路通行量および踏切道幅員等の相互関係からみた踏切道の容量について若干考えてみたいと思う。

2. 踏切道の機能

まず踏切道の容量を考えるまえに、踏切道の機能について述べてみる。踏切道の機能を根本的に左右しているのは列車間隔であって、これによって門扉のしゃ断時分、開扉時分が決定される。

1. 列車間隔

2線以上にわたる踏切道における列車の到達間隔は、1日の平均列車到達間隔を T_m とすれば

$$dp = \frac{1}{T_m} e^{-\frac{t}{T_m}} dt$$

なる分布に従うものと考える。1日全列車回数 $N = 800,700,600$ 回についてそれぞれ T_m を求め、上式により列車到達間隔の分布を求める第1図のとおりである。

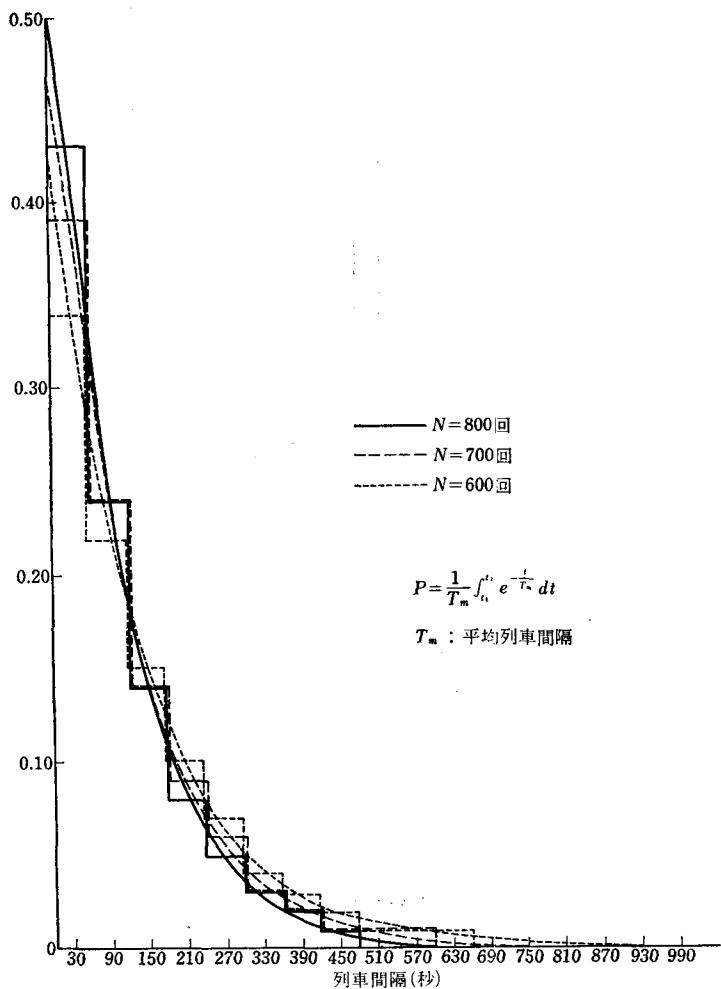
2. 開扉時分、しゃ断時分と列車間隔との関係(第2図参照)

踏切道の機能を理想化して考えるため、踏切の各線について列車の接近報知ベルの鳴動始点から踏切に到達するまでの時分(t_0)は等しいとする。(実際には、列車毎に速度が異なるため到達時分にはばらつきがある。)ここで、1列車のみ通過する場合のしゃ断時分とは、接近報知ベルが鳴り門扉が閉め始められてから列車が踏切に到達するまでの時分(t_0)に、さらに安全を確認して開扉し始めるまでの時分(t')を加えたものとし、開扉時分とは、逆に門扉を開け始めてから閉め始めるまでの時分である。

以上から、開扉時分としゃ断時分の列車間隔との関係は、一般につぎにより決められる。

列車間隔を T とすると

(イ) $t_0 + t' < T$ の場合



第1図 列車間隔の分布

1列車通って門扉は開扉出来る。

(ロ) $t_0 + t' \geq T$ の場合

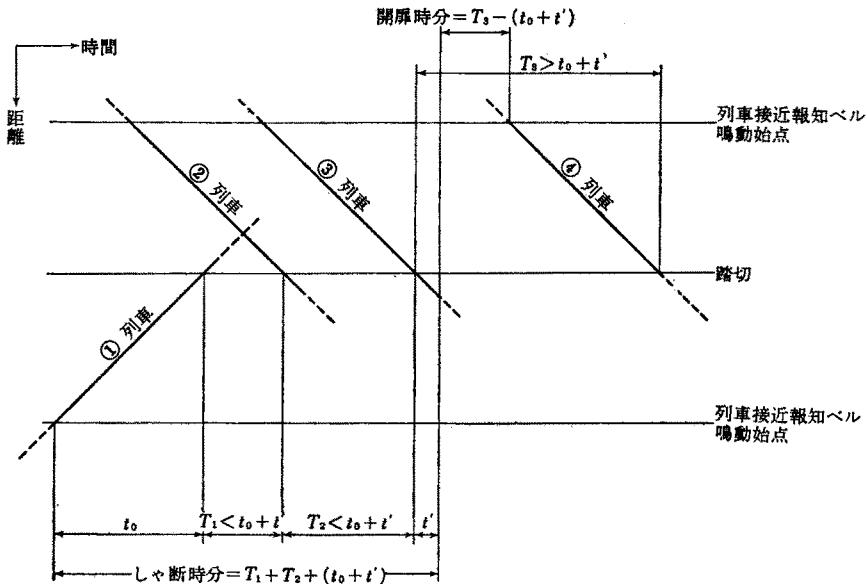
最初の列車が踏切を通過しないうちにつきの列車の接近報知ベルが鳴り、しゃ断時分はさらに長くなる。

以上の関係から

開扉時分を O とすると $O = T - (t_0 + t')$

しゃ断時分を S とすると

$$S = \sum_{i=1}^n T_i + (t_0 + t')$$



第2図 路切門扉の開扉時分としゃ断時分

$T > t_0 + t'$ 門扉があく

開扉時分 $O = T - (t_0 + t')$

$T \leq t_0 + t'$ 門扉はしまつたまま

しゃ断時分 $S = \sum_{i=1}^n T_i + (t_0 + t')$

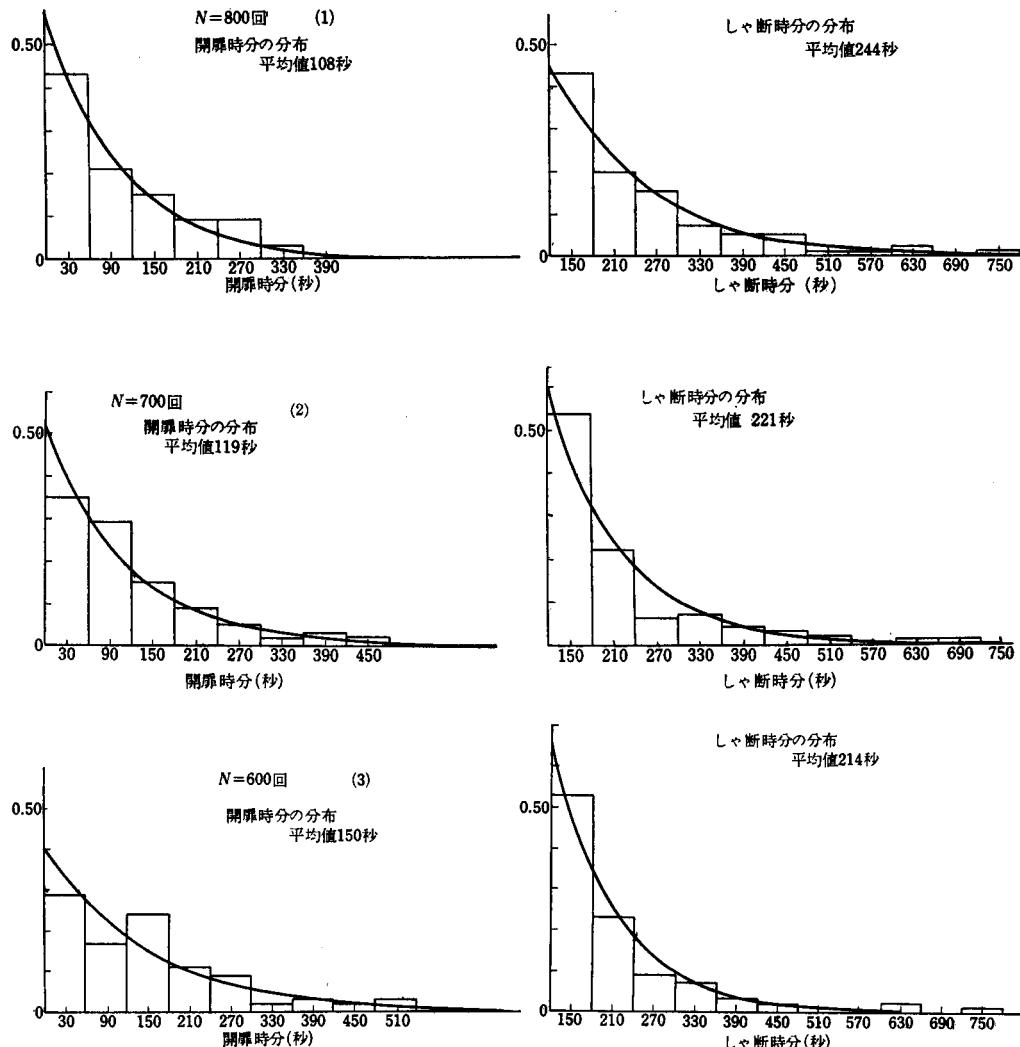
ただし $T_i \leq t_0 + t'$

ただし $\sum_{i=1}^n T_i$ は $T_i \leq t_0 + t'$ の条件のつづく限り加算する。

1. によって列車間隔の分布が与えられておれば、これから任意に選んだ列車間隔の値 T が
2. の(イ), (ロ)の条件のうち何れを満たすかを調べ、これを繰返せば1種のモンテカルロ法として開扉時分の分布、しゃ断時分の分布が求められる。いま1日全列車回数 $N = 800, 700, 600$ 回について開扉時分、しゃ断時分の分布を求めたのが第3図である。

3. 踏切道の容量

筆者が以前勤務したことのある東鉄横浜保線区管内東海道本線筋の踏切についてみると、6線以上を横断し、1日全列車回数700回以上、1日門扉しゃ断時分、計500分以上という状況で、これが約560m毎にあり、高速運転区間でもあるので列車としては20~30秒毎に踏切を通過することになる。他方都会の中にあるため何れも踏切通行量が相当多くなっており、このような厳しい条件のもとで踏切には高度の保安度とともに通行をスムーズにするという通行者に対するサービスが要求されており、具体的にはしゃ断時分をなるべく短かくするとともに門扉開扉と同時に待っている通行者を出来るだけはやく通り抜けさせ、つきの列車接近に対し一定の保安度を保つことが必要とされるのである。従ってある列車回数におけるしゃ断時分と開扉時分が、以上の条件を満たすことが出来なくなる通行量と踏切道幅員が踏切道としての容量の限界であり、そ



第3図

の条件を満たすような踏切道幅員が容量としての必要量である。

これらの関係を明確に数量化することは今まで余り行なわれておらないので、若干考察した結果を以下に述べる。

まず考え方の順序を要約するとつきのとおりである。

(イ) 踏切道の長さを考慮して、通行者の横断時分、列車進来までの余裕時分から門扉の開扉時分の安全な最小限度をきめ t_a 秒とする。実際の開扉時分の分布から開扉時分がその限度 t_a 秒以下となる確率を求め α とする。ここで t_a は踏切道の容量からみた開扉時分の限度である。

(ロ) 現在の踏切道幅員 B から t_a 秒間に横断し得る通行者の数 N 人を算出する。ここで N 人は踏切道の容量からみた 1 回の開扉時分中の通行者の限度である。

(ハ) 通行者の平均間隔 s から、しゃ断時分 t 秒のとき通行者が x_p 人以上待たされる確率 p を求める。

(ニ) (ハ)の関係から、 t_a 秒間に横断し得る通行者 N 人以上が待たされる確率が ρ であるようないしや断時分を求め t_N 秒とする。ここで t_N 秒は踏切道の容量からみたしゃ断時分の限度である。

(ホ) 実際の門扉のしゃ断時分の分布から、しゃ断時分が t_N 秒以上となる確率を求め β とする。

(ヘ) $F = \alpha \times \beta \times 100$ を仮に踏切道指数とよぶ。

(ト) 踏切道の前後の道路の条件から、横断しようとして待たされる通行者の限度をきめ N_w 人とする。

(チ) 通行者 N_w 人が t_a 秒で通過出来る踏切道幅員を算出し B' とし、現状の幅員 B と比較する。 B' は踏切道の容量としての必要量である。

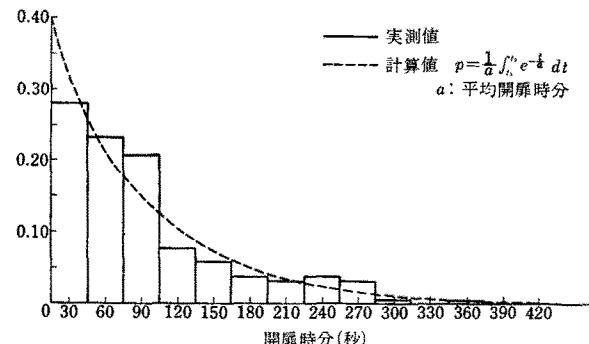
つぎに順を追って各項目について述べる。

いま例としては、非常に危険度の高いと思われる東海道本線鶴見横浜間西子安踏切[注]をとったが、ここは幅員狭小で通行量が多いため車馬の通行は禁止しているので、対象は大部分通行人である。

[注] 幅員 = 3.9 m, 踏切長 28.4 m, 跨線数 6, 1日列車回数 710 回 (S. 32.3 調べ)

1. 開扉時分

門扉の開扉時分とは、開け始めてから閉め始めるまでの時間とする。開扉時分の長さを実測し、その度数分布を示したのが第4図である。これはよく例にひかれる電話の通話の長さ等の分布と同じく指数分布型となる。実際の度数分布から求めた平均値を用いて理論式により分布を求めてみると、実際分布と可成りよく一致していることがわかる。



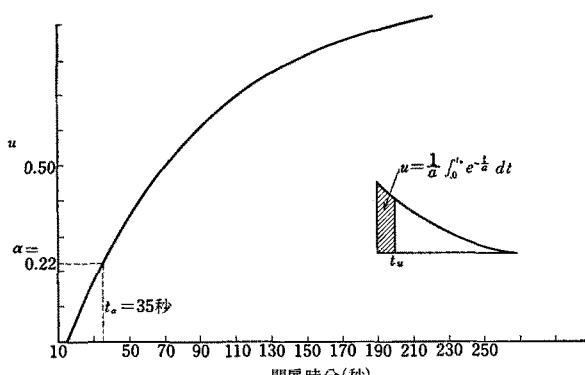
第4図 開扉時分の分布

$$\text{開扉時分の確率} = \frac{1}{a} \int_{t_1}^{t_2} e^{-\frac{t}{a}} dt$$

a : 開扉時分の平均値

踏切の開扉時分は短かい程踏切の管理上好ましくないことであり、時に長いしゃ断時分で通行者がたまってしまった場合そのつぎに来る開扉時分は長いことが必要である。従って短かい開扉時分が多いということは、危険かつサービス上不利な要素であり、その程度をみる目安として第5図はある値以下の開扉時分がどの位の割合でおこるかを計算したものである。

開扉時分が t_u 秒より短くなる確率 u は



第5図 開扉時分曲線

開扉時分の安全な最小限度については、踏切道の長さ、従って横断時分、横断しようとする通行者数、列車進来までの余裕を考慮して定めるべきで、接近報知ベルの鳴動始点(門扉を閉める時間を示す)もそれらの条件を満たすように設定されなければならないが、現状は必ずしもそうではないようである。そこでしゃ断中待っていた先頭の通行者すら普通に歩いて横断出来ない状態では既に安全な状態ではないと一応考えて、通行者の横断可能時分をもって一応開扉時分の安全な最小限度(t_a)とする。

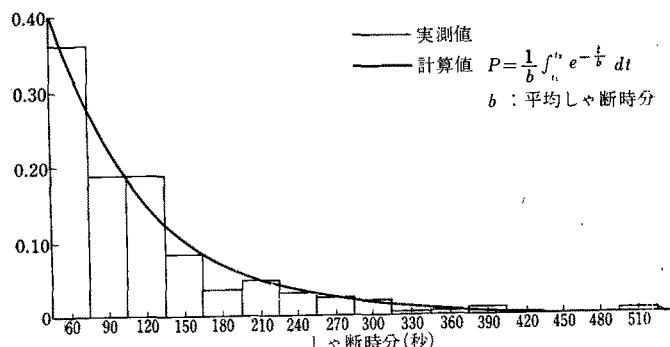
西子安踏切の場合、長さ 28.4 m であるから通行者の歩行速度を平均 0.8 m/sec として開扉時分の最小限度は約 35 秒となる。

2. しゃ断時分

門扉のしゃ断時分とは、閉め始めてから開け始めるまでの時間とする。しゃ断時分の長さを実測しその度数分布を示したのが第6図である。これも開扉時分の分布と同じく指数分布型となる。実際の度数分布から求めた平均値を用いて理論式より分布を求めてみると、実際分布と可成りよく一致していることがわかる。

$$\text{しゃ断時分の確率} = \frac{1}{b} \int_{t_1}^{t_2} e^{-\frac{t}{b}} dt$$

b : しゃ断時分の平均値



第6図 しゃ断時分の分布

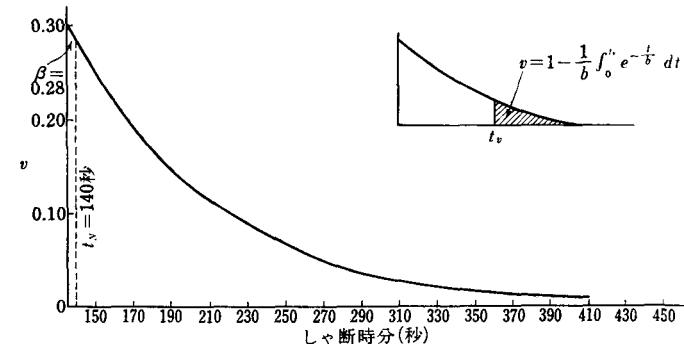
さらにしゃ断時分の長さを支配する大きな要素を考えてみると(開扉時分についても同様である)、(イ)列車回数(ロ)列車接近報知ベルの鳴動時分である。列車回数との関係はさきに述べたが、列車接近報知ベルの鳴動時分、すなわち接近報知ベルが鳴り始め門扉が閉め始められて

から列車が踏切に到来するまでの時間は、接近報知ベルが鳴り始めると同時に踏切にかかった通行者が踏切を横断し終るまでの時間に若干の余裕をとって決定されるべきで、元来踏切毎に一定であるべきである。そこで各踏切における各線の接近報知ベルの鳴動時分を調べてみると、まち

まちで必要以上に長かったり短かかったりして一定していないのが実状である。しかしこれからは少なくとも各線の最高速度列車に対し適切な鳴動距離を保ち一定した鳴動時分とすることが、保安上からぜひ必要なことと考える。

ここで第3図において理論的に求めた列車回数 $N = 700$ 回の場合の開扉時分およびしゃ断時分の分布と、西子安踏切で列車回数 $N = 710$ 回の場合に実測した開扉時分およびしゃ断時分の分布とを比較してみると、開扉時分の分布についてはその平均値に余り差がない ($N = 700$ 回の場合の理論平均値 119") に対し $N = 710$ 回の実測平均値 95") のに対し、しゃ断時分の分布については大分大きい差を生じている。 $(N = 700$ 回の場合の理論平均値 221") に対し $N = 710$ 回の場合の実測平均値 120") この原因については、まず列車接近報知ベルの鳴動時分が線毎にまちまちであることによる誤差、および接近報知ベルが鳴り出しても通行者が多いため人がはけず故意に門扉の降下時期を遅らせざるを得ないので、実際のしゃ断時分は全般に短くなる等のためであると思われる。

しゃ断時分が長くなることはそれだけ通行者が待たされ、且つたまってくるので踏切の円滑な運営上好ましくないことであり、その程度をみる目安としてしゃ断時分がある値より長くなる割合はどの位かを求めたのが第7図である。しゃ断時分が t_v より長くなる確率 v は



第7図 しゃ断時分曲線

$$v = 1 - \frac{1}{b} \int_0^{t_v} e^{-\frac{t}{b}} dt$$

3. 開扉時分としゃ断時分との関係

長いしゃ断時分のつぎに短かい開扉時分のつづくようなことは条件として悪いので、あるしゃ断時分の長さとそのつぎにくる開扉時分の長さとの間に関係があるか否かを調べてみるとその相関関係はなく、従ってあるしゃ断時分の長さとそれにつづく開扉時分の長さとは互に独立と考えてよく、たとえばいま t_v 秒以上のしゃ断時分のおこる確率が v で t_u 秒以下の開扉時分のおこる確率が u なら、 t_v 秒以上のしゃ断時分の後に t_u 秒以下の開扉時分のつづく確率は $v \times u$ となる。

4. 通行者

(イ) しゃ断時分との関係

通行者については、1日のうちから任意抽出によって一定時間毎に踏切を横断しようとしてくる通行者の数を実測し、これによって通行者の平均(到来)間隔 s を求めた。

西子安踏切の場合

総実測時間 $370' = 60'' \times 370' = 22200''$

総通行者数 14907 人

$14907 \text{ 人} / 6 \text{ 人} \div 2485 \text{ 列} \text{ [注]}$

$$\text{平均通行者間隔 } s = \frac{22200''}{2485 \text{ 列}} \div 10''$$

[注] 以後の計算を簡単にするため、西子安踏切では大体 6 人が並んで横断しているので、6 人で割り単位を列にして換算した。

平均通行者間隔が求まると、しゃ断された時間に対して待たされる通行者数の平均値がわかる。しかし通行者の間隔があくまで平均値であるから、ある時間中の通行者数は当然ばらつきが考えられる。いま t_v のしゃ断時間中に待たされる通行者の平均人員 m は t_v/s (列)であり、ばらつきを考えると一般に n (列)待たされる確率は

$$P_n = \frac{\left(\frac{t_v}{s}\right)^n}{n!} e^{-\frac{t_v}{s}}$$

なるポアソン分布に従う。しかしこのポアソン分布も、上記のように数が大きい場合

$$m = \frac{t_v}{s}, \quad \frac{x - m}{\sqrt{m}} = y$$

とおいて平均値 m 、標準偏差 \sqrt{m} なる正規分布に近似させることが出来る。

西子安踏切の例で、 $v = 0.01, 0.025, 0.05, 0.10, 0.20, 0.30$ となるしゃ断時分 t_v と、待たされる通行者の平均人員 m を求めると次表のとおりである。

しゃ断時分が t_v 秒以上となる確率 v	0.01	0.025	0.05	0.10	0.20	0.30
しゃ断時分 t_v (秒)	390	310	270	220	165	135
待たされる通行者の平均人員 $m = \frac{t_v}{s}$ (列)	39	31	27	22	16.5	13.5

以上の待たされる通行者の平均人員の値を正規分布の式にあてはめ、実際に待たされる通行者数のはらつきを求めると第8図のとおりである。

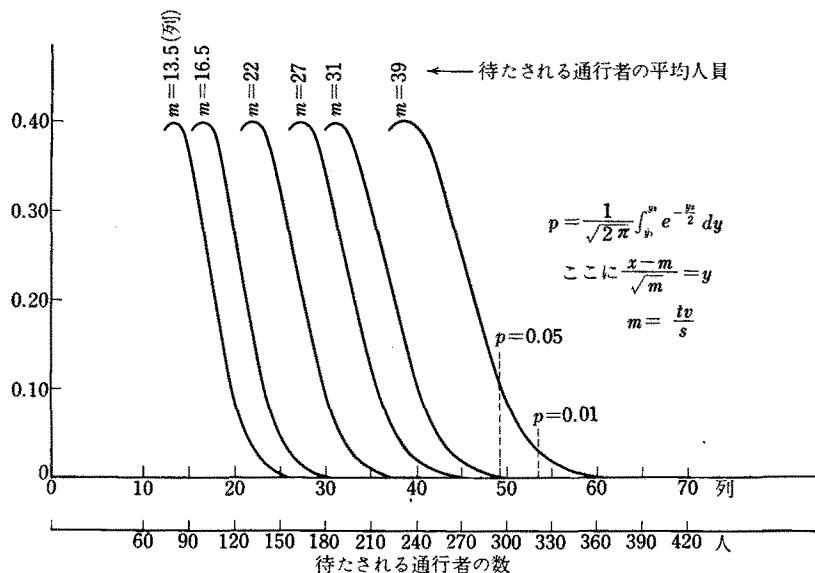
これらの関係から、しゃ断時分とそのしゃ断時分によって待たされる通行者数が x_p 以上となる確率 p が $p = 0.01, 0.05, 0.10$ のときの x_p との関係を求めたのが第9図の上の部分である。この図は、たとえば $200''$ のしゃ断時分では待たされる通行者数が 182 人以上となることが 1% の確率であることを示している。

(ロ) 踏切道幅員、開扉時分との関係

ある開扉時分とその時間中の通行可能人員との関係は次式で与えられる。

$$N = \frac{B}{j} \cdot \frac{VT}{k} = \frac{B}{0.8} \cdot \frac{0.8}{1.0} T = BT$$

ここに N : 通行者数(両側からの) (人)



第8図 踏切で待たされる通行者の数

B : 踏切道幅員	(m)
V : 通行速度	(m/sec) 0.8 m/sec [注1]
T : 開扉時分	(sec)
j : 1人当たり左右幅	(m) 0.8 m
k : 1人当たり前後幅	(m) 1.0 m [注2]

[注1] 東京工事局の調査によると乗降場等で人が群集して通行する場合の速度として 0.8~1.0 m/sec を実測の結果として報告している。

[注2] 比較的楽に歩ける程度として 0.8 m²/人 を考えた。

以上により踏切道幅員、開扉時分、通行可能人員との関係を示したのが第9図の下の部分である。さらに第9図は門扉をしゃ断されて待たされる通行者数=門扉開扉時の通行可能人員という条件で図の上、下の部分を関連させて考えることが出来る。

5. 踏切道指数

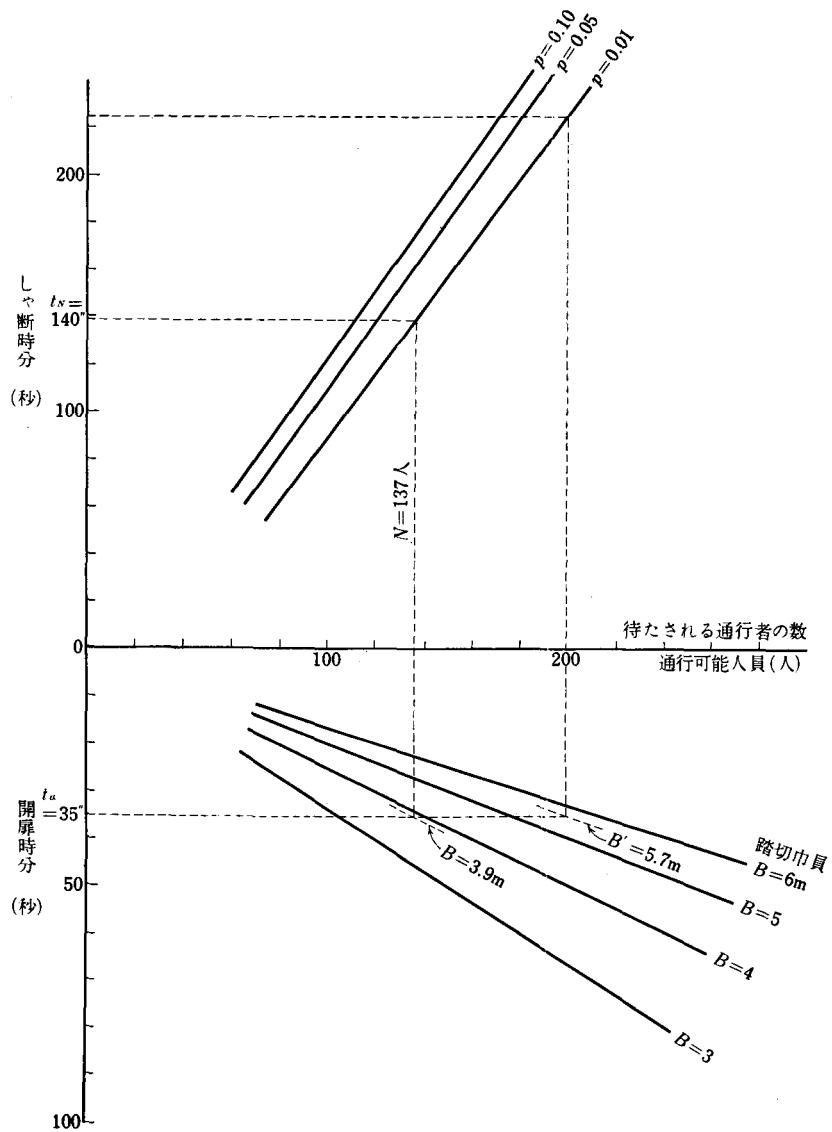
(イ) III.1. により一応踏切道の容量からみた開扉時分の安全な最小限度 t_α 秒がきめられるので、図5より開扉時分が t_α 秒以下となる確率を求め α とする。

西子安踏切の場合、開扉時分の最小限度 $t_\alpha = 35''$ と考えると $\alpha = 0.22$ となる。

(ロ) III.4. (ロ)より現在の踏切道幅員 B から t_α 秒の間に横断し得る通行者数(両側からの) N を算出する。 N を踏切道の容量からみた1回の開扉時分中の通行者の限度とする。

西子安踏切の場合 $B = 3.9\text{ m}$ $T = t_\alpha = 35''$

$$\therefore N = BT = 137 \text{ 人}$$



第9図 踏切道の容量

(ハ) 第9図より通行者が N 人以上待たされる確率 p が 0.01 であるようなしゃ断時分 t_N 秒を求める。 t_N 秒を踏切道の容量からみたしゃ断時分の限度とする。さらに第7図よりしゃ断時分が t_N 秒以上となる確率を求め β とする。

西子安踏切の場合、 $N = 137$ 人以上待たされる確率 $p = 0.01$ であるようなしゃ断時分 $t_N = 140''$ である。 $t_N = 140''$ 以上となる確率 $\beta = 0.28$ である。

(ニ) $F = \alpha \times \beta \times 100$ を仮に踏切道指数とよぶ。開扉時分の安全な最小限度 t_a 秒以下となる確率 α が大きいほど危険度が高いので α は踏切における保安度を示す値、また N 人以上を待たせる確率 p が 0.01 であるようなしゃ断時分 t_N 秒以上となる確率 β が大きいほど通行者に対

するサービス度が悪いことになるので、 β は通行者に対するサービス度を示す値と考えることが出来る。従って F を踏切道における最も重要な 2 つの要素を総合した 1 つの指標として踏切道指數とよぶこととした。この意味は、III.3. にも述べたように t_N 秒以上のしゃ断時分の後に t_α 秒以下の開扉時分のつづく確率をあらわすので、この値の大きいほど踏切道としての条件は悪いことを示すのである。

西子安踏切の場合、 $F = \alpha \times \beta \times 100 = 0.22 \times 0.28 \times 100 = 6.16$ となる。

6. 踏切道の容量

(イ) しゃ断時分の長さの分布、踏切道の前後の道路の条件等を考慮して、横断しようとして待たされる通行者数の限度を想定し N_w 人(踏切両側について)とする。

(ロ) その N_w 人が、開扉時分の最小限度 t_α 秒でも横断出来ることを条件として必要な踏切道幅員を算出し B' とし、現状 B と比較する。

(ハ) これから現状幅員 B が必要幅員 B' より小さければ、つぎのようなことが起つてくる可能性がある。

(a) 踏切道上の通行者が混雑し合い、且つかなかはけず、列車が踏切に到来するまでの余裕(安全度)が少なくなる。

(b) 横断しようとして待たされる通行者は、一度の開扉時分ですっかりはけきらず、もう一度待たなければならぬ。

西子安踏切の場合、道路幅員 4 m であつて $4 \text{ m} \times 5 \text{ m} \times 2 = 40 \text{ m}^2$ を対象に 1 m^2 当り 5 人 [注] として $N_w = 5 \text{ 人} \times 40 \text{ m}^2 = 200$ 人程度を考えると、これ以上通行者が待たされる確率が $p = 0.01$ であるしゃ断時分は第 9 図より約 220" であり、しゃ断時分が $t_v = 220"$ 以上となる確率は図 7 より $v = 0.10$ となるので、この程度の通行者数を限度として想定する。

$$t_\alpha = 35", N_w = 200 \text{ 人} \text{ として } N = BT \text{ より}$$

$$\text{必要踏切道幅員 } B' = N/T = N_w/t_\alpha = 200/35 = 5.7 \text{ m}$$

$$B' = 5.7 \text{ m} > B = 3.9 \text{ m}$$

[注] 建設省建築研究所の調査によると、群集密度としての状態をつぎのように述べている。

5 人/ m^2 ……比較的楽な状態でエレベーターの設計はこの基準による。

6~7 人/ m^2 ……肩がふれ合う程度で新聞をよまれたりすると迷惑する。

この結果からみても、西子安踏切は踏切道幅員を拡張する等の処置を講じなければ非常に危険な状態にあることがわかる。

4. む す び

以上の調べにより、いま直ちに踏切道幅員を拡張するとか、立体交叉にするとかいうことは出来ないかもしれないが、踏切道指數 F は一応踏切道の機能が、踏切道としての容量からみた限界を超えて無理な状態にある程度(保安度およびサービス度)を比較する指標とすることが出来ると思う。

元来踏切道の実態とは、列車、通行者、踏切道の構造、地形的要素、保安設備等の諸条件が複雑に織り混ったもので、その踏切道の根本である保安度、サービス度はそれら諸条件が競合して極限集約された形で決定されるものと思うが、われわれはこれを何とか実状にかなった簡単な数値であらわしたいのが念願である。

今回の調べは未だほんのいとぐちに過ぎないものであり、保線区在勤中最も問題となっていた西子安踏切についてのみあたってみたのであるが、さらに今後も機会をとらえて調べを進めてみたいと考えている。