ガードレールの最適規格

枝 村 俊 郎*
山 本 俊 夫**

1. まえがき

ガードレールには周知の通り，自動車の路外逸脱防止と衝突時の乗員の被害の極小化という相反する２つの機能が要請される。すなわち，ガードレールの剛度を大きくするにつれて衝突車のうちガードレールを突破する車両の割合が減少し，路外逸脱防止効果が増進されるが，一方では衝突時に自動車の受ける減速度が大きくなり，乗員の被害が増加し，しかもそれとともに初期投資費用も増加する。このように，要請されている条件が相反し互いに他の条件を規制することから，最適なガードレールの剛度は，これらの相反する条件を最もよく満たすような均衡値として決定されるべきである。当然のことながら，路側が断崖絶壁や海のように転落した場合に，重大な事故となることが予想される所や，事故発生率が大きい所では，大きな剛度のガードレールの設置が要求されるであろう。逆に，路側の危険度の小さい所では，剛度の小さいガードレールを設置するか，さらには設置する必要のない場合も考えられる。

従来ガードレールの設置基準や構造設計に関しては，多分に定性的な議論が行なわれてきたが，以上のような観点にたって，便益，あるいは費用便益比を判断基準にとり定式化すれば，ある地点におけるガードレールの設置の可否，あるいは，最適な剛度を決定することができる[1)2)]。

ところでガードレールのような付属施設は，個々の地点ごとに設計が行なわれるのではなく，大量生産による規格品として，全国的に数種のものが供給されるのが普通である。道路の設計者は設置基準あるいは，みずからの engineering judgement に従って，この規格の中からその地点に最も適したものを選択して，現場に設置することになる。このような場合には，あらかじめ国民経済的にみて，最適なガードレールの規格（各段階の剛度と規格のランク数）を用意することが，中央における規格制定者のとるべき政策となる。著者の一人は前にその定式化について示したことがあるが[1)]，ここでは，路側用ガードレールについて，荷重条件を単純化した場合，D.P. の手法により，実用的にその計算を進めることができることを示すことにする。

* 正会員　工博　神戸大学教授　工学部土木工学科
** 正会員　阪神高速道路公団工務部設計課

2. 評価の基準

一般に投資効果の評価基準としては，便益最大，あるいは費用便益比最大が考えられる。以下最適規格を論ずるにあたって，この両者を基準として考察を進めることにする。

まず，最適性の尺度として便益をとり，貨幣タームを用いるならば，ガードレールの設置便益は一般に次のように表わせる。

$$B=N_b\cdot D_b-N_a\cdot D_a-I-M \quad\cdots\cdots(1)$$

ここに

B：設置便益
N_b：設置前の路側事故発生率
D_b：設置前の事故一件あたりの損害額
N_a：設置後のガードレール衝突事故発生率
D_a：設置後のガードレール衝突事故一件あたりの損害額
I：初期投資の償還額
M：維持費

以上の各変数は道路単位延長，単位期間あたりの値を示す。

N_b, N_a は道路幾何構造，交通条件等に関係しておりガードレールの視線誘導効果により，一般に N_a は N_b より小さいと考えられる。D_b は路側環境や車種に関係しており，D_a はガードレールの剛度や，車種，衝突速度，衝突角度等に関係する。I および M はガードレールの剛度や耐用年数の関数である。

式(1) の右辺の第1項はガードレール設置前の道路単位延長，単位期間あたりの路側事故損害額を表わし，第2項は設置後の事故損害額を表わしている。

また費用便益比を基準にする場合は

$R=B/C$

ここに

R：費用便益比

C：費　用

をとればよい。

3. 設置便益最大の立場による最適規格

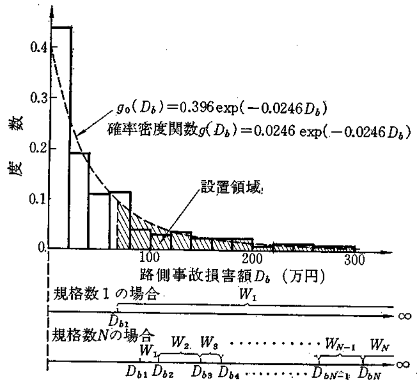
(1) 路側事故発生率が道路延長に沿って，一定と考えた場合

路側事故の発生率を一定とすると，N 種の規格のガードレールを設置する場合の最適規格，すなわち，ガードレール剛度と設置箇所の選定は，路側の危険度を表わす路側事故損害額 D_b のみによって支配される。路側環境は道路延長に沿って変化しているから，D_b もまた道路延長に沿って変化していると考えられる。ガードレール設置対象道路の総延長を基準化して1とし，路側危険度をその大きさの順に統計整理を行なうと，一般に 図—1 のような路側事故損害額の分布が得られる。ガードレールは当然路側危険度の大きい所から設置されるべきである。

まず，簡単のため，規格数が1の場合の設置規格について考えてみよう。この場合，ガードレールは 図—1 に示したように，路側危険度が D_{b1} 以上の箇所に設置するものと考える。斜線を施した領域の面積は設置延長を表わす。後で述べるように，ガードレールの剛度は一般に単位長あたりの鋼材重量によってよく表わされる（図—2）から，これを単位長あたりの重量 W_1 で表わすこととする。従って，規格数が1の場合の最適規格決定とは，式 (1) を最大にするように D_{b1}, W_1 を決定することを意味する。

図—1 路側事故1件あたり損害額の度数分布

① 運輸省自動車局昭和 37 年度事故原票による
② 人損：死亡 300 万円，重傷 50 万円，軽傷 10 万円とした場合



この場合，式 (1) の各項は次のように表現される。

a) 設置前の路側事故損害額期待値 ($N_b \cdot D_b$)

道路延長に対する D_b の分布の確率密度関数を $g(D_b)$ とすれば，ガードレール設置前の道路の全延長に対する路側事故損害額期待値は

$$N_b \cdot D_b = N_b \cdot \int_0^\infty D_b \cdot g(D_b) dD_b \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (2)$$

と表わせる。

b) 設置後の路側事故損害額期待値

設置後の事故損害額期待値は設置した道路延長の事故損害額期待値と，設置しなかった道路延長の事故損害額期待値の和で求められる。

また，設置道路延長における事故損害額期待値は，衝突車がガードレールを突破した場合の損害額期待値と，阻止された場合の事故損害額期待値の和で表わされる。

衝突車がガードレールを突破するか，阻止されるかは衝突時の自動車の重量，速度，および衝突角度とガードレールの形状，剛度，その他の複雑な要因によって決まるであろう。しかし，ここでは問題を次のように単純化して考えることにする。

まず，衝突自動車のもつ重量，速度および衝突角度は一般に統計的に分布しているが，いまこれらをまとめてガードレールの直角方向の運動エネルギーという1変数の分布で表現する。

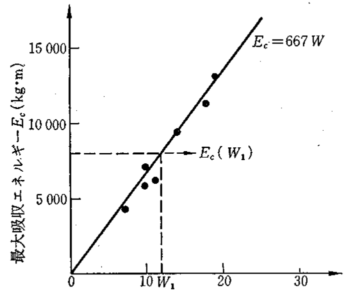
すなわち，衝突自動車のガードレール直角方向の運動エネルギーを E, 車両重量を W_v, 衝突速度を V, 衝突角度を α とすると

$$E=\frac{1}{2g} \cdot W_v \cdot V^2 \cdot \sin^2\alpha \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (3)$$

このような取り扱いには問題がないわけではないが，

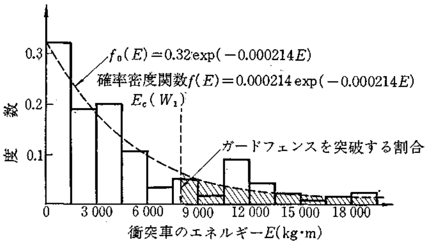
図—2 ガードレール最大吸収エネルギーと単位重量の関係

① ガードケーブルの場合
② ガードケーブルは 150 cm の変形で防護機能を失うと考えた



図―3　衝突車のガードレール直角方向エネルギーの度数分布

（3，4，5ナンバー車，建設省，警察庁路外逸脱事故合同調査，昭和 38 年度）



巨視的にはこれで十分であろう。W_v, V, α をそれぞれ独立とみなして，それらの積として求めた E の分布の一例を 図―3 に示す。

また，これまでガードレールの剛度と称していたガードレールの力学的特性も

① ガードレールの形式と単位延長あたりの重量を与えれば，ガードレールの変位と反力の関係が決る。

② ガードレールは所定の変位に達したときすべて破壊（機能喪失）する。

③ 従って，破壊時までにガードレールの吸収するエネルギー E_c が決まる。

と考える。

これより，ガードレールの最大吸収エネルギー E_c は W の関数として与えられる。

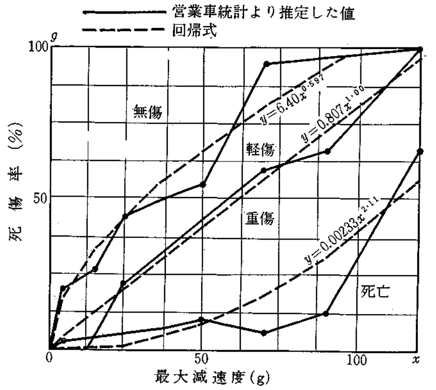
E_c と W の関係の一例として，ガードケーブルの場合について計算したものを 図―2 に示す。ただし，破壊変位は 150 cm と仮定した。

以上のことから，結局，衝突車両のガードレール直角方向エネルギー E が与えられ，一方設置されているガードレールの単位延長あたり重量 W, 従って，ガードレールの最大吸収エネルギー $E_c(W)$ が与えられるとき，もし $E>E_c$ ならば衝突車両はガードレールを破壊して転落し，$E<E_c$ ならば阻止されて路上に止まると仮定することにする。

たとえば，規格数が1の場合には，1規格の場合のガードレール重量 W_1 が与えられると，図―2 に破線で示したように，ガードレールの最大吸収エネルギーが決定され，図―3 によって，ガードレールを突破する車両の割合が斜線を施した領域の面積として得られる。衝突事故損害額については，簡単のため次のように考えた。まず，ガードレールを突破した場合は設置していない箇所の事故と同様に取り扱うことにする。また，阻止された場合の事故損害は，主として，衝突時に受ける減速度に寄因すると考える。この減速度についても車両重量，ガードレール形式，剛度，衝突条件が複雑に関連して決まると考えられる。ここでは，まず衝突エネルギーを吸収するに要するガードレール変位量から車体の受けるガードレール最大反力を求め，最大減速度を算出することとする。減速度が求まると，図―4 のごとき減速度と人損および物損の関係[3] より損害額を算定すればよい。従って車種，乗車人員，ガードレールの形式が決められると，衝突損害額はガードレール単位延長あたりの重量の関数となり，$S(W)$ と表わせる。

図―4　最大減速度と乗員中の死傷の割合

（昭和 40 年度営業車事故統計による）



以上のように考えると設置後の損害額期待値は次のように表わせる。

$$N_a\cdot D_a=N_b\cdot\int_0^{D_{b1}}D_b\cdot g(D_b)dD_b+N_a\left\{\int_{D_{b1}}^{\infty}D_b\cdot g(D_b)dD_b\cdot\int_{E_c(W_1)}^{\infty}f(E)\,dE+\int_{D_{b1}}^{\infty}g(D_b)dD_b\cdot S(W_1)\int_0^{E_c(W_1)}f(E)dE\right\}\quad\cdots\cdots(4)$$

ここに，

D_{b1}：ガードレールを設置し始める路側事故損害額の下限値

$f(E)$：衝突車の保有するガードレール直角方向エネルギーの確率密度関数

$E_c(W_1)$：ガードレールの最大吸収エネルギー

上式の第1項は設置しない箇所の事故損害額期待値を表わし，第2項は設置箇所における事故損害額期待値を表わしている。

c） 建設費および維持費（I, M）

建設費および維持費は，一般にガードレール単位重量の関数と考えられる。また耐用年数も考慮に入れねばならない。

$$\left.\begin{aligned}I&=I(W_1)\int_{D_{b1}}^{\infty}g(D_b)dD_b,\\ M&=M(W_1)\int_{D_{b1}}^{\infty}g(D_b)dD_b\end{aligned}\right\}\quad\cdots\cdots(5)$$

以上により，規格数が1の場合の設置便益 B_1 は次のようになる。

$$B_1=N_b\int_{D_{b1}}^{\infty}D_b\cdot g(D_b)\,dD_b-N_a\left\{\int_{D_{b1}}^{\infty}D_b\cdot g(D_b)\,dD_b\cdot\int_{E_c(W_1)}^{\infty}f(E)dE+\int_{D_{b1}}^{\infty}g(D_b)dD_b\cdot S(W_1)\cdot\int_0^{E_c(W_1)}f(E)dE\right\}$$
$$-\{I(W_1)+M(W_1)\}\int_{D_{b1}}^{\infty}g(D_b)dD_b \quad\cdots\cdots(6)$$

このように設置便益は最終的に W_1 と D_{b1} の関数として表現される。従って，式(6) の B_1 を最大にするような最適値 $W_1{}^*$, $D_{b1}{}^*$ が最適規格となる。

N 規格のガードレールを設置する場合も同様に考えればよい。図—1 に示した通り，各ガードレールの剛度を $W_1, W_2, \cdots\cdots W_{N-1}, W_N$ で表わす。設置箇所選定にあたっては，単位重量 W_i の第 i 番目規格ガードレールを路側危険度が D_{bi} から D_{bi+1} の範囲の箇所に設置するものと考える。

ここに，

$$\left.\begin{array}{l}W_1<W_2<\cdots\cdots<W_N,\\ D_{b1}<D_{b2}<\cdots\cdots<D_{bN}\end{array}\right\}\quad\cdots\cdots(7)$$

規格数 1 の場合と同様に，N 規格の設置便益 B_N は次式で表わされる。

$$B_N=N_b\int_{D_{b1}}^{\infty}D_b\cdot g(D_b)dD_b-\sum_{i=1}^{N}\left[N_a\left\{\int_{D_{bi}}^{D_{bi+1}}D_b\cdot g(D_b)dD_b\cdot\int_{E_c(W_i)}^{\infty}f(E)dE+\int_{D_{bi}}^{D_{bi+1}}g(D_b)\cdot dD_b\cdot S(W_i)\int_0^{E_c(W_i)}f(E)dE\right\}\right]$$
$$-\sum_{i=1}^{N}\{I(W_i)+M(W_i)\}\int_{D_{bi}}^{D_{bi+1}}g(D_b)dD_b-C(N)\quad\cdots\cdots(8)$$

ここに，

D_{bi}：第 i 番目規格を設置する道路延長の路側事故損害額の下限値

D_{bi+1}：第 i 番目規格を設置する道路延長の路側事故損害額の上限値

W_i：第 i 番目規格の単位重量

$E_c(W_i)$：第 i 番目規格の最大吸収エネルギー

$I(W_i)$：第 i 番目規格の単位期間あたりの建設費

$M(W_i)$：第 i 番目規格の単位期間あたりの維持費

$C(N)$：規格数の増加に伴う諸経費

N：規格数

N 規格を設置した場合の最適規格決定は式 (8) を最大にする $2n$ 個の未知変数 $W_1, \cdots\cdots, W_N, D_{b1}\cdots\cdots, D_{bN}$ を求めることに帰着する。

これは次の $2n$ 個の条件式

$$\left.\begin{array}{l}\dfrac{\partial B_N}{\partial W_1}=\dfrac{\partial B_N}{\partial W_2}=\cdots\cdots\cdots=\dfrac{\partial B_N}{\partial W_N}=0\\[2mm] \dfrac{\partial B_N}{\partial D_{b1}}=\dfrac{\partial B_N}{\partial D_{b2}}=\cdots\cdots\cdots=\dfrac{\partial B_N}{\partial D_{bN}}=0\end{array}\right\}\quad\cdots\cdots(9)$$

を解くことによっても，求めることができるが，一般に B_N は $W_i, D_{bi}(i=1, \cdots\cdots, N)$ について非線形であり，規格数 N の増加に伴って，解法は著しく困難となる。しかし，この場合問題を D.P. の最適値問題として取り扱えば，容易に解を求めることができる。

いま，N 規格のガードレールを設置した場合の最大設置便益を $B_{N\max}$ とすると，最適規格の目的関数は次のように表わせる。

$$B_{N\max}=\max_{W_1,\cdots,W_N,D_{b1},\cdots,D_{bN}}B(W_1, W_2, \cdots\cdots, W_N, D_{b1}, D_{b2}, \cdots\cdots, D_{bN})\quad\cdots\cdots(10)$$

式 (10) は D.P. の最適性の原理により，次の再帰方程式に書き換えられる。

$$\left.\begin{array}{l}B_{1\max}=\max\limits_{W_1, D_{b1}}[B(W_1, D_{b1}, D_{b2})]\\ B_{2\max}=\max\limits_{W_2, D_{b2}}[B(W_2, D_{b2}, D_{b3})+B_{1\max}(W_1, D_{b1}, D_{b2})]\\ \quad\vdots\qquad\qquad\vdots\qquad\qquad\vdots\\ B_{N-1\max}=\max\limits_{W_{N-1}, D_{bN-1}}[B(W_{N-1}, D_{bN-1}, D_{bN})+B_{N-2\max}(W_1, \cdots, W_{N-1}, D_{b1}, \cdots, D_{bN-1})]\\ B_{N\max}=\max\limits_{W_N, D_{bN}}[B(W_N, D_{bN}, \infty)+B_{N-1\max}(W_1, \cdots\cdots, W_N, D_{b1}, \cdots\cdots, D_{bN})]\end{array}\right\}\quad\cdots\cdots(11)$$

ここに $B(W_i, D_{bi}, D_{bi+1})$ は第 i 番目規格ガードレールの設置区間における設置便益を表わす。

$$B(W_i, D_{bi}, D_{bi+1})=N_b\cdot\int_{D_{bi}}^{D_{bi+1}}D_b\cdot g(D_b)dD_b-N_a\left\{\int_{D_{bi}}^{D_{bi+1}}D_b\cdot g(D_b)dD_b\int_{E_c(W_i)}^{\infty}f(E)dE+\int_{D_{bi}}^{D_{bi+1}}g(D_b)dD_b\cdot\right.$$
$$\left.S(W_i)\int_0^{E_c(W_i)}f(E)dE\right\}-\left\{I(W_i)+M(W_i)\right\}\int_{D_{bi}}^{D_{bi+1}}g(D_b)dD_b\quad\cdots\cdots(12)$$

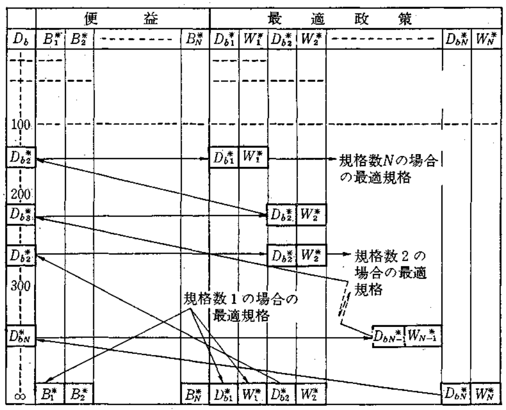
$W_1, \cdots\cdots, W_N, D_{b1}, \cdots\cdots, D_{bN}$ は状態変数であり，式 (11) を満足する最適政策値 $W_1{}^*, \cdots\cdots, W_N{}^*, D_{b1}{}^*, \cdots\cdots, D_{bN}{}^*$ が最適規格を表わす。目的関数が複雑なため，ここでは式 (11) を数値解法で解くこととした。

次にその解法手順について述べる。

まず，表—1 のような計算表を作成する。

D_b 欄は路側事故損害額を示し，その値の小さいものから順に任意の値をあらかじめ記入しておく（表—3 参照)。便益表の $B_i{}^*$ 欄および最適政策表の $D_{bi}{}^*$, $W_i{}^*$ 欄は i 種の規格を設置した場合の最大便益，第 i 番目規格を設置し始める路側事故損害額，およびガードレール単位重量を記入する欄である。

表―1　設置便益最大による最適規格計算表



① まず，規格数が1の場合には式 (11) より目的関数は

$$B_{1\max}=\max_{W_1,\ D_{b1}} B(W_1,\ D_{b1},\ D_{b2})\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(13)$$

と表わされる。

D_{b2} を仮定すると，式 (12) により上式を満足する最適政策値 $W_1{}^*$, $D_{b1}{}^*$ を容易に求めることができる。この場合，計算表の任意の行に着目し，その行の D_b 欄の値を D_{b2} の仮定値として $B_1{}^*$, $W_{b1}{}^*$, $W_1{}^*$ を算定し，所定の欄に記入する。これをすべての行について行ない $B_1{}^*$, $D_{b1}{}^*$, $W_1{}^*$ 欄を完成する。最下行の $B_1{}^*$, $D_{b1}{}^*$, $W_1{}^*$ 欄の各値は D_{b2} を∞と仮定しているから，規格数が1の場合の最大便益および最適規格を示すことになる。

② 次に，規格数が2の場合について考えてみよう。目的関数は

$$B_{2\max}=\max_{W_2,\ D_{b2}}\{B(W_2,\ D_{b2},\ D_{b3})+B_{1\max}(W_1,\ D_{b1},\ D_{b2})\}\cdots\cdots\cdots\cdots(14)$$

① の場合と同様に，まず，計算表の任意の行に着目し，その行の D_b 欄の値を D_{b3} の仮定値とする。次に，D_b 欄の値のうち $D_b<D_{b3}$ なる任意の値を D_{b2} の仮定値とする。このようにして D_{b3}, D_{b2} が決定されると，式 (14) の第1項を最大にする W_2 は容易に求められる。また，第2項の最大値はすでに ① の計算過程で求められている。従って，式(14)を最大にするような D_{b2} を D_b 欄から探索し，求めた最適値 $B_2{}^*$, $W_2{}^*$, $D_{b2}{}^*$ を当初に選んだ行の所定の欄に記入する。この手順をすべての行について行ない，$B_2{}^*$, $W_2{}^*$, $D_{b2}{}^*$ 欄を完成する。最下行の $B_2{}^*$, $W_2{}^*$, $D_{b2}{}^*$ 欄の各値および 表―1 に示すように，$D_{b2}{}^*$ と同じ値を有する D_b 欄の行における $D_{b1}{}^*$, $W_1{}^*$ 欄の値が最適規格を表わすことになる。この場合は，単位重量 $W_1{}^*$ のガードレールを路側事故損害額が $D_{b1}{}^*$ から $D_{b2}{}^*$ の間にある箇所に，また，$W_2{}^*$のガードレールを $D_{b2}{}^*$ から∞の間にある箇所に設置するのが最適であり，最大便益が $B_2{}^*$ となることを意味している。

③ このようにして，② に示した計算手順を反復することによって，各規格数における最適規格を比較的容易に求めることができる。

N 規格まですべての計算表が完成すると，N 規格の場合の最大便益 $B_N{}^*$ および最適規格 $W_1{}^*,\cdots\cdots,W_N{}^*$, $D_{b1}{}^*,\cdots\cdots,D_{bN}{}^*$ が 表―1 に示すように ② と同じ方法で得られる。

最適規格数も未知数であり，便益表の最下行の便益のうち最大値を有する規格数が最適規格数であり，この規格数における設置規格が最終的な最適規格を表わす。

以上，計算方法について簡単に述べた。目的関数形が簡単で計算表が小規模であれば，この数値解法は筆算で十分処理できるが，そうでない場合には簡単なプログラムで電子計算機によって能率よく処理できよう。

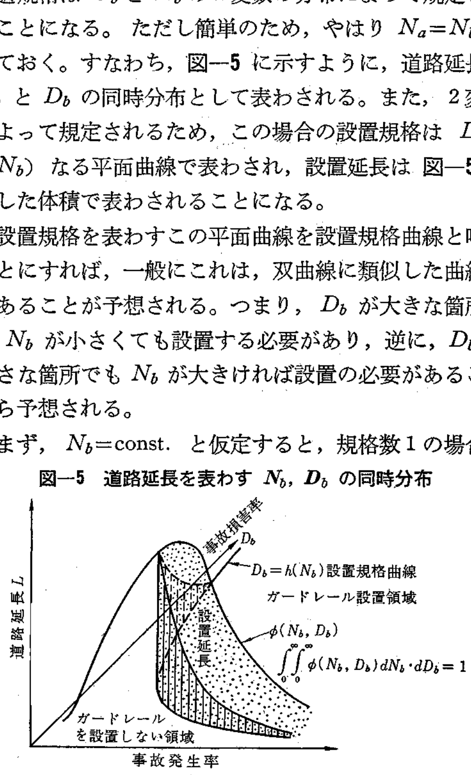
（2） 路側事故発生率の道路延長に沿った分布を考慮に入れた場合

路側事故発生率 N_b は道路幾何構造や交通条件によって異なるため，一般に，道路延長に沿って変化しているのが普通である。（1）では $N_b=N_a=\mathrm{const.}$ と考えたため，最適規格は D_b の分布のみによって規定されたが $N_b\fallingdotseq\mathrm{const.}$ として事故率の分布を考慮する場合には，最適規格は D_b と N_b の2変数の分布によって規定されることになる。ただし簡単のため，やはり $N_a=N_b$ としておく。すなわち，図―5 に示すように，道路延長は N_b と D_b の同時分布として表わされる。また，2変数によって規定されるため，この場合の設置規格は $D_b=h(N_b)$ なる平面曲線で表わされ，設置延長は 図―5 に示した体積で表わされることになる。

設置規格を表わすこの平面曲線を設置規格曲線と呼ぶことにすれば，一般にこれは，双曲線に類似した曲線形であることが予想される。つまり，D_b が大きな箇所では N_b が小さくても設置する必要があり，逆に，D_b の小さな箇所でも N_b が大きければ設置の必要があることから予想される。

まず，$N_b=\mathrm{const.}$ と仮定すると，規格数1の場合は

図―5　道路延長を表わす N_b, D_b の同時分布



式 (6) より

$$B_1 = B(N_b, W_1, D_{b1}) \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (15)$$

いま，W_1 が既知であると考えると，最適な D_{b1} は

$$\frac{\partial}{\partial D_{b1}}\{B(N_b, W_1, D_{b1})\}=0 \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (16)$$

で得られ，一般に $D_{b1}=h_1(N_b, W_1)$ となる。

規格数が 2 の場合も同様に W_1, W_2 が既知であると考えると $D_{b2}=h_2(N_b, W_1, W_2)$ と表わせる。

以下同様に考えると，N 規格の設置にあたっては，次のような関係式が成立する。

$$\left.\begin{array}{l} D_{b1}=h_1(N_b, W_1) \\ D_{b2}=h_2(N_b, W_1, W_2) \\ \vdots \\ D_{bN}=h_N(N_b, W_1, W_N) \end{array}\right\} \cdots\cdots\cdots\cdots (17)$$

ここで，$N_b \fallingdotseq$ const. とすれば式 (16) は設置規格曲線群を表わすことになる。この場合，第 i 番目規格の設置領域は曲線 $D_{bi}=h_i(N_b, W_1, \cdots\cdots, W_i)$ と $D_{bi+1}=h_{i+1}(N_b, W_1, \cdots\cdots, W_{i+1})$ の間にはさまれる領域となる。道路延長を表わす D_b と N_b の同時分布関数 $\phi(N_b, D_b)$ が与えられると，第 i 番目規格の設置便益は次式で得られる。

$$\begin{aligned} B = & \int_0^\infty \int_{D_{bi}}^{D_{bi+1}} N_b \cdot D_b \cdot \phi(N_b, D_b) dD_b dN_b \\ & - \int_0^\infty \int_{D_{bi}}^{D_{bi+1}} N_b \cdot D_b \cdot \phi(N_b, D_b) d\, D_b \cdot dN_b \int_{E_c(W_i)}^\infty f(E) dE \\ & - \int_0^\infty \int_{D_{bi}}^{D_{bi+1}} N_b \cdot \phi(N_b, D_b) dD_b dN_b \cdot S(W_i) \int_0^{E_c(W_i)} f(E) dE \\ & - \left\{ I(W_i) + M(W_i) \right\} \int_0^\infty \int_{D_{bi}}^{D_{bi+1}} g(N_b, D_b) dD_b dN_b \\ & = B(W_1, \cdots\cdots, W_i, W_{i+1}) \cdots\cdots\cdots\cdots (18) \end{aligned}$$

N 規格を設置した場合の目的関数は

$$B_{N\ \max} = \max_{W_1, \cdots, W_N} B(W_1, \cdots\cdots, W_N) \cdots\cdots\cdots (19)$$

従って，上式を満足する $W_1^*, \cdots\cdots, W_N^*$ を求めれば 図—6 に示した最適規格曲線群が得られる。式 (19) は(1) で述べた数値解法によって同様にして解くことができる。しかしながら，これは計算がかなり煩雑になるとともに，一般には $\phi(N_b, D_b)$ 関数を知ることがむずかしいため，ここでは N_b と D_b が独立であると考えてみる。N_b の分布関数を $k(N_b)$ とすると

$$\phi(N_b, D_b)=k(N_b)\cdot g(D_b)$$

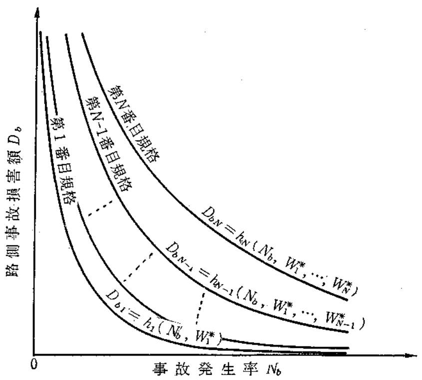
となる。

この場合には，式 (19) を解くことは N_b の分布の平均値を N_b として (1) で述べた方法で解くことと等価となる。従って，平均事故率を用いて，(1) の方法で，$W_1^*, \cdots\cdots, W_N^*$ を求め，この値を式 (17) に代入すれば，最適規格曲線群が得られる。

このようにして，最適規格曲線が求まると，設置対象道路の任意の箇所のガードレール規格選定は，その箇所の D_b と N_b を知ることによって 図—6 のグラフ上から一義的に決定される。

設置対象道路の D_b と N_b のデータについては，事故資料の統計によっても知ることができ，また路側環境，交通条件を要因として，よく推計できることが報告[2] されている。

図—6 最適規格曲線



4. 費用便益比最大の立場による最適規格

ここでは，設置便益と設置費用の比を最大にする立場から最適規格について考えてみる。

設置費用はガードレールの単位重量と設置延長の関数であるから，N 規格のガードレールを設置した場合の便益 B_N および費用 C_N は

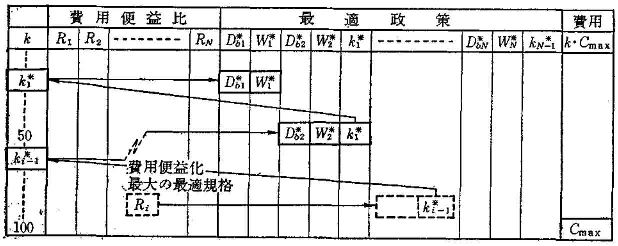
$$\left.\begin{array}{l} B_N=B(W_1, \cdots\cdots, W_N, D_{b1}, \cdots\cdots, D_{bN}) \\ C_N=C(W_1, \cdots\cdots, W_N, D_{b1}, \cdots\cdots, D_{bN}) \end{array}\right\} \cdots (20)$$

と表わせる。従って，この場合の最大の費用便益比を R_N とすると，目的関数は

$$R_N = \max_{W_1, \cdots, W_N, D_{b1} \cdots, D_{bN}} R(B_N/C_N) \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (21)$$

設置便益を最大にするような投資額を $C_{\max}$ とすると $C_{\max}$ 以上に投資を行なっても便益は増加しないことから，費用便益比を最大にする投資額は明らかに $C_{\max}$ 以下である。そこで，目的式 (21) を次のような数値解法によって解くこととした。まず，投資総額 C_N ($C_N \leqq C_{\max}$) を規定する。すると，目的式は C_N の投資によって B_N を最大にするように $W_1, \cdots\cdots, W_N, D_{b1}, \cdots \cdots D_{bN}$ を求める比較的簡単な問題となる。従って，種々の C_N について R_N を求め，その R_N の最大値に対する C_N が最適投資額であり，$W_1, \cdots\cdots, W_N, D_{b1}, D_{bN}$ が最適規格となる。表—2 のような計算表によれば，この計算を能率よく行なうことができる。N 規格の設置を考える。3. の場合とは逆に，便宜上規格剛度および路側損害額の大きい方から順に $W_1, W_2, \cdots\cdots, W_N, D_{b1}, \cdots\cdots, D_{bN}$ ($W_1 > W_2 > \cdots\cdots > W_N$, $D_{b1} > \cdots$

表―2 費用便益比最大による最適規格計算表



$\cdots > D_{bN}$) とし，路側危険度の大きな箇所から順に設置し，第 i 番目規格は D_b が $D_{bi} \sim D_{bi-1}(D_{60}=\infty)$ の範囲の箇所に設置すると考えた。

投資総額を $C_{\max}$ としこのうち第 i 番目規格までのガードレールに $k_i(\%)$ 投資するものとする。すなわち第 i 番目規格に対する投資額は $C_{\max}$ のうちの (k_i-k_{i-1}) %となる。投資総額が，あらかじめ決められているのでそれを各規格に設置便益が最大になるように分配してやればよい。

まず規格数が1の場合には，その規格に $C_{\max}$ の $k_1\%$（計算表の k 欄の任意の値）を投資すると考えると，次式の関係が成り立つ。

$$\{I(W_1)+M(W_1)\}\int_{D_{b1}}^{\infty} f(D_b)\,dD_b=\frac{k_1 \cdot C_{\max}}{100} \quad \cdots(22)$$

(22) 式より一般に

$$W_1=f_1(D_{b1},\ k_1) \quad \cdots\cdots(23)$$

設置便益は W_1 と D_{b1} の関数であるから，式 (23) より

$$B_{1\max}=\max_{W_1,\ D_{b1}} B(W_1,\ D_{b1}) =\max_{D_{b1}} B(D_{b1},\ k_1) \quad \cdots\cdots(24)$$

計算表の k 欄のすべての値について式(24)を満足する最適値 W_1^*, D_{b1}^* と $R_1=B_{1\max}/k_1C_{\max}$ を求め，W_1^*, D_{b1}^*, R_1 欄を完成する。

このとき R_1 欄のうち最大値を示す行の W_1^*, D_b^* 欄の値が規格数1の場合の最適規格を表わし，$k_1C_{\max}$ が最適投資額を表わす。

規格数が2の場合には，第1番目規格に $C_{\max}$ の k_1 %，第2番目規格に $(k_2-k_1)\%$ を投資すると考えると目的式は

$$B_{2\max}=\max_{D_{b2},\ k_1}\{B(D_{b2},\ k_2-k_1) + B_{1\max}(D_{b1},\ k_1)\} \quad \cdots\cdots(25)$$

k_2 の値として k 欄の任意の値を選び，$k_1<k_2$, $D_{b1}>D_{b2}$ の条件を満足するよう，3. の場合と同様に最適値 W_2^*, D_{b2}^*, k_1^* および

$$R_2=\frac{B_{2\max}}{k_2 \cdot C_{\max}}$$

を求める。

以下同様に計算を進めればよい。

規格数が i の場合の目的式は次のようになる。

$$B_{i\max}=\max_{D_{bi},\ k_{i-1}}\{B(D_{bi},\ k_i-k_{i-1}) + B_{i-1\max}(D_{bi-1},\ k_{i-1})\} \cdots(26)$$

このようにして，計算表が完成すると，費用便益比欄の値のうち最大値を求め，それに対応している規格数，投資額，および最適政策値が費用便益比最大による最適規格を表わす。また，投資額が決定されている場合には，投資額欄の値のうち，それに相当する行で最大の費用便益比を探し，それに対応する規格数および最適政策値が最適規格になる。

表―3 最適規格計算例 (N=3)

便益表				最適政策表					
D (万円)	B_1^* (万円/km)	B_2^* (万円/km)	B_3^* (万円/km)	D_1^* (万円)	W_1^* (kg/m)	D_2^* (万円)	W_2^* (kg/m)	D_3^* (万円)	W_3^* (kg/m)
60	0.046			56	12.6				
70	0.429	0.430		56	13.2	60	13.5		
$\boxed{80}$	1.063	1.066	1.067	$\boxed{56}$	$\boxed{13.7}$	70	14.5	70	14.5
90	1.828	1.832	1.833	56	14.1	70	15.0	70	15.0
100	2.627	2.643	2.646	56	14.5	70	15.3	80	15.9
$\boxed{110}$	3.421	3.447	3.450	$\boxed{56}$	$\boxed{14.8}$	80	16.2	80	16.2
120	4.173	4.207	3.212	56	15.1	80	16.5	90	16.9
$\boxed{130}$	4.863	4.906	4.913	56	15.3	$\boxed{80}$	$\boxed{16.7}$	90	17.2
140	5.483	5.534	5.543	57	15.5	80	16.9	100	17.8
150	6.031	6.090	6.101	57	15.7	90	17.6	100	18.0
160	6.509	6.576	6.587	57	15.8	90	17.8	100	18.2
170	6.922	6.995	7.013	57	15.9	90	17.9	110	18.8
180	7.274	7.354	7.373	57	16.0	90	18.0	110	18.9
190	7.574	7.657	7.676	57	16.1	100	18.6	110	19.0
200	7.827	7.915	7.935	57	16.2	100	18.7	120	19.6
250	8.670	8.776	8.800	57	16.4	100	19.0	130	20.4
300	8.877	8.986	9.014	57	16.5	110	19.6	130	20.5
350	8.982	9.094	9.123	57	16.5	110	19.7	130	20.6
400	9.019	9.131	9.161	57	16.5	110	19.7	130	20.6
450	9.031	9.144	9.173	57	16.5	110	19.7	130	20.6
500	9.035	9.148	9.178	57	16.5	110	19.7	130	20.6
600	9.037	9.150	9.180	57	16.5	110	19.7	130	20.6
700	9.037	9.15	9.180	57	16.5	110	19.7	130	20.6
800	9.037	9.15	9.180	57	16.5	110	19.7	130	20.6
900	9.037	9.151	9.180	57	16.5	110	19.7	130	20.6
∞	9.037	9.151	9.180	57	16.5	$\boxed{110}$	19.7	$\boxed{130}$	20.6

5. 計　算　例

設置便益最大の立場から最適規格を求める計算例を示す。簡略化のため，車種構成は1車種（乗用車および小型貨物車）とし，衝突した場合の事故損害 $S(W)$ および維持費 $M(W)$ を一定値とした。設置便益は道路 1 km,

1年あたりについて考えることとした。

計算データは次の通りである。

$N=3$, $N_b=N_a=1.0$ (件/km)

$g(D_b)=0.246\,e^{-0.246\,D_b}$ (D_b：万円/件)

$f(E)=0.000\,214\,e^{-0.000214E}$ (E：kg・m)

$E_c(W_i)=667.0\,W_i$ (W_i：kg/m, E_c：kg・m)

$S(W_i)=5.0$ (万円/件)

$I(W_i)=1.25\,W_i+6.5$ (万円/km/年)

$M(W_i)=20$ (万円/km/年)

$C(N)=0$

計算結果を 表―3 に示す。各規格数の最適規格と最大便益は計算表に太線で囲んだ値である。

規格数の増加に伴う諸経費をこの計算では0としているにかかわらず，規格数が増加しても設置便益はさほど増加していない。

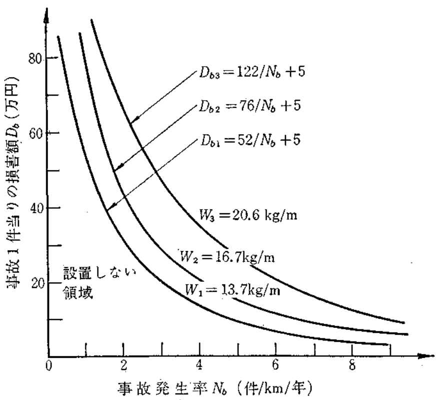
次に，路側事故発生率が道路延長に沿って分布している場合の最適規格を 図―7 に示す。最適規格曲線はこの場合双曲線となる。$N_b=1$ の場合の D_b の値は当然路側事故の発生率を一定とおいた場合の D_b の値と合致している（数値計算のため少し差異があるが)。

所定の道路箇所の事故発生率 N_b と，路側事故損害額 D_b が与えられると，この最適規格曲線によって，ガードレールを設置すべきか否かを，また，設置する場合にはその剛度を知ることができる。

6. むすび

以上ガードレールの最適規格の決定方法について述べた。すなわち，ガードレールの設置便益を評価基準とした場合について，まず事故発生率が道路延長に関して一定である場合について，次に事故発生率と事故の危険度がともに分布する場合について，最後に費用便益比を基準とした場合について，いずれも最適規格を D.P. の手法を用いて求める方法を示した。

図―7 最適規格曲線 (N=3 の場合)



ガードレールに関する種々の問題，すなわち，衝突現象の解析，各種形式の特性，最適設計，設計基準の考え方，等々は実物実験技術も含めて，近年著しく進歩したが，最適規格概念によって，巨視的にみた場合にとられるべき政策が明らかになった。ガードレールの場合，その力学的性質，設置箇所等は規格の制定と不可分の関係にあるのである。

参考文献

1) 枝村俊郎：ガードフェンスの最適設計，土木技術資料，Vol. 8, No. 10, pp. 22～40

2) Edamura, T.: Statistical Analysis of Runout Accidents in Rationalyzing the Warrant for a Guardfence, Journal of Research, Public Works Research Institute, Vol. 10, pp. 47～90

3) 枝村俊郎，柴田正雄：衝突時に生ずる減速度と損害の関係，第3回日本人間工学会関西支部大会抄録，人間工学，Vol. 4, No. 1

(1969. 4. 26・受付)

日本の土木技術

100年の発展のあゆみ

第二版発売中　上製箱入

A 5・490ページ　1200円　〒110円

●お申込みは土木学会へ…… 一括注文は御相談ください●

土木学会が創立 50 周年（1964 年）を記念して出版した土木技術史で，若い技術者とくにこれから土木工学の真随をきわめようとする学生諸君のためには絶好の読物といえる．Ⅰ　土木技術と国土の開発　Ⅱ　水の利用と水との戦い　Ⅲ　交通路の整備　Ⅳ　都市の建設　Ⅴ　材料の進歩と構造技術の進展　Ⅵ　基礎技術の進歩　<年表および索引つき>