

鳥取大学工学部 正会員 ○白木 渡 舞鶴工専 正会員 松保重之  
 鳥取大学工学部 正会員 高岡宣善 総合技術コンサルタント 正会員 山本克之

1. まえがき 都市高速道路高架橋の主桁の安全性に支配的な影響を及ぼすのは、高架橋へ自動車荷重が満載された渋滞状態の活荷重であるという観点から、先に1)で報告したように阪神高速道路公団の活荷重実態調査結果<sup>2)</sup>に基づいて渋滞時における都市高速道路独自の荷重状況を踏まえ、活荷重を車両進行方向に沿った空間座標  $x$  を助変数とする不規則関数  $\tilde{z}(x)$  でモデル化し、さらに3)で報告したようにその荷重が各種構造形式の主桁に作用した場合の断面力の確率特性値と空間領域において、不規則関数の相関理論を用いて評価した。本研究では、3)の報告で得られた結果を用いて主桁の空間領域での信頼度の評価を行い、その後その結果から得られる空間領域での主桁の最大曲げモーメントに注目して、主桁の時間領域での信頼度の評価を行うことにする。

2. 空間領域における主桁の信頼度の評価 先に示した3)の報告では、主桁断面に作用する曲げモーメントを橋軸方向の空間座標  $x$  を助変数とする非定常な不規則関数  $\tilde{M}(x)$  としてとらえ、その確率特性を明らかにした。空間領域における信頼度の評価とは、このような空間的に不規則な曲げモーメント  $\tilde{M}(x)$  が桁の全長にわたって断面の許容曲げモーメント  $M_a$  を1度も超過しない確率を評価することである。主桁の空間領域での信頼度を評価するために、新たな不規則関数  $\tilde{Z}_1(x) = \tilde{M}(x) - R_1(x)$ 、 $\tilde{Z}_2(x) = \tilde{M}(x) - R_2(x)$  を導入する。ここに、 $R_1(x)$ 、 $R_2(x)$  はそれぞれ桁の正および負の曲げモーメントの設計値で、本研究では  $M_a$ 、 $-M_a$  で表わされる確定量とする。そうすると、不規則な活荷重  $\tilde{z}(x)$  による桁の破壊は  $\tilde{Z}_1(x)$  がゼロを正超過し、 $\tilde{Z}_2(x)$  がゼロを負超過する事象で表わされる。ここでは、 $\tilde{Z}_1(x)$ 、 $\tilde{Z}_2(x)$  を最も一般的で取り扱いも容易な正規非定常不規則関数であると仮定すると、 $\tilde{Z}_1(x)$  がゼロを正超過し、 $\tilde{Z}_2(x)$  がゼロを負超過する単位長さ当たりの超過確率密度  $p_1(x)$ 、 $p_2(x)$  は、それぞれ次式(1)および(2)で与えられる<sup>4)</sup>。

$$p_1(x) = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{D_2(x)}{D_1(x)}} \exp\left(-\frac{\tilde{Z}_1^2(x)}{2D_1(x)}\right) \left\{ \sqrt{1-\rho^2(x)} \exp\left\{ \frac{-1}{2(1-\rho^2(x))} \left( \frac{\tilde{Z}_1(x)}{\sqrt{D_1(x)}} - \frac{\rho(x)\tilde{Z}_2(x)}{\sqrt{D_2(x)}} \right)^2 \right\} + \sqrt{2} \left( \frac{\tilde{Z}_1(x)}{\sqrt{D_1(x)}} - \frac{\rho(x)\tilde{Z}_2(x)}{\sqrt{D_2(x)}} \right) \left[ 1 - \Phi \left( \frac{1}{\sqrt{1-\rho^2(x)}} \left( \frac{\tilde{Z}_1(x)}{\sqrt{D_1(x)}} - \frac{\rho(x)\tilde{Z}_2(x)}{\sqrt{D_2(x)}} \right) \right) \right] \right\} \quad (1)$$

$$p_2(x) = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{D_2(x)}{D_2(x)}} \exp\left(-\frac{\tilde{Z}_2^2(x)}{2D_2(x)}\right) \left\{ \sqrt{1-\rho^2(x)} \exp\left\{ \frac{-1}{2(1-\rho^2(x))} \left( \frac{\tilde{Z}_2(x)}{\sqrt{D_2(x)}} - \frac{\rho(x)\tilde{Z}_1(x)}{\sqrt{D_1(x)}} \right)^2 \right\} - \sqrt{2} \left( \frac{\tilde{Z}_2(x)}{\sqrt{D_2(x)}} - \frac{\rho(x)\tilde{Z}_1(x)}{\sqrt{D_1(x)}} \right) \Phi \left( \frac{1}{\sqrt{1-\rho^2(x)}} \left( \frac{\tilde{Z}_2(x)}{\sqrt{D_2(x)}} - \frac{\rho(x)\tilde{Z}_1(x)}{\sqrt{D_1(x)}} \right) \right) \right\} \quad (2)$$

ここに、 $\tilde{z}(x) = (1/\sqrt{L}) \int_{x_0}^x \exp(-\alpha|x-y|) dz$ 、 $\tilde{Z}_1(x)$ 、 $\tilde{Z}_2(x)$ 、 $D_1(x)$ 、 $D_2(x)$  は、それぞれ  $\tilde{Z}_1(x)$ 、 $\tilde{Z}_2(x)$  の期待値と分散、 $\tilde{z}_1(x)$ 、 $\tilde{z}_2(x)$ 、 $D_1(x)$ 、 $D_2(x)$  は、それぞれ  $\tilde{Z}_1(x) = \int \tilde{z}_1(x) dx$ 、 $\tilde{Z}_2(x) = \int \tilde{z}_2(x) dx$  の期待値と分散、 $\rho(x)$  は  $\tilde{Z}_1(x)$  と  $\tilde{Z}_2(x)$  との断面における相関係数、 $\rho_1(x)$  は  $\tilde{Z}_1(x)$  と  $\tilde{Z}_1(x)$  との断面における相関係数で、3)の報告で示したようにそれぞれ不規則関数の相関理論により評価できる。

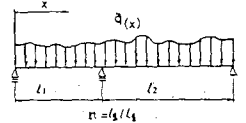


図-1

主桁が十分な安全性を有するためには、曲げモーメントの許容(設計)値  $M_a$  は  $\tilde{M}(x)$  に比べて十分大きな値でなければならぬ。この場合には  $\tilde{M}(x)$  が  $M_a$  を超過する事象は非常にまれな事象となり、ポアソン分布で近似することが可能となる。したがって、この場合の主桁の破壊確率  $Q$  は次式(3)で表わすことができる。ここに、 $L$  は主桁の全スパン長である。この確率  $Q$  を1から引いた値が主桁の空間領域における信頼度である。この式(3)を用いれば種々の構造形式を有する主桁の空間領域での破壊確率を求めることができる。その一例を図1に示す2径間連続主桁について計算して図2に示す。この図は、図1に示す2径間連続主桁に1)の報告でモデル化した不規則分布荷重  $\tilde{z}(x)$  [ $\bar{z} = 0.4506 \text{ t/m}$ 、 $D_z = 0.4064 \text{ t}^2/\text{m}$ 、 $K_z(x) = 0.4064 \exp(-0.3164|x-y|)$ ] が作用する場合の空間領域での破壊確率  $Q$  を求め、 $Q = 10^{-1} \sim 10^{-6}$  の規定値に対して許容(設計)曲げモー

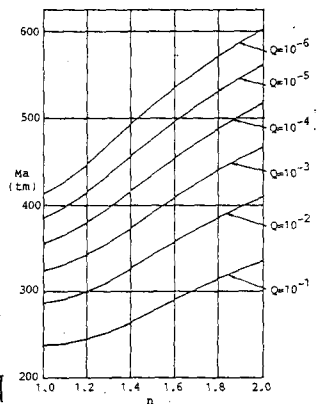


図-2

ント $M_a$ とスパン比 $n (=l_2/l_1)$ との関係を示したものである。このような図を1)の報告で示した各渋滞パターンでの活荷重の作用を受ける種々の構造形式の主桁に対して作成しておけば、1回の渋滞に対する設計曲げモーメントを規定された任意の信頼度のもとに決定することが可能となる。

3. 時間領域における主桁の信頼度の評価 先に指摘したように高架橋に作用する荷重は、一般に空間領域のみならず時間領域においても変動する。したがって、高架橋の信頼度はその耐用期間中に作用する最大曲げモーメントに対して明らかにされなければならぬ。ここでは、先に評価した式(3)を利用して、活荷重の時間軸上での変動性を考慮した主桁の最大曲げモーメントのモデル化を図3に示す再生パルス過程 $\tilde{M}(t)$ を用いて行い、耐用期間 $T$ における主桁の信頼度の評価を行う。パルス過程のレベル超過の理論<sup>5)</sup>を用いれば、この場合の耐用期間 $T$ における主桁の破壊確率 $Q^*$ は、空間領域における破壊確率 $Q$ を評価する際に用いたポアソン近似の仮定により式(4)となる。ここに $F_M(m)$ は、

$$Q^* = 1 - P_3 F_M(M_a) \exp[-\lambda_f \lambda_f F_M(M_a) \{1 - P_3 F_M(M_a)\} T] \quad (4)$$

任意の時点における $\tilde{M}(t)$ の分布関数、 $P_3$ は任意の時点に渋滞が発生する確率、 $\lambda_f$ は再生パルス過程を規定する再生点過程の平均発生率でパルスの継続時間の期待値 $m_0$ の逆数として与えられるものである。いま、実現したパルスは、渋滞発生時の橋軸方向の最大曲げモーメントを表わすものであるから、その分布関数 $F_M(m)$ として式(3)の $Q$ を1から引いたものを用いることができる。これは、橋軸方向の全断面において曲げモーメントが一定のレベル $M_a$ を超過しない確率が $M_a$ の関数として示しているのであるから、 $M_a = m$ とすればこれを橋軸方向の最大曲げモーメントの分布関数 $F_M(m) = \exp[-\int_0^m \{h_1(x) + p(x)\} dx]$ と考えることができる。また、再生点過程の平均発生率 $\lambda_f$ は、パルスの平均継続時間 $m_0$ の逆数で与えられるから、 $m_0$ に渋滞の平均継続時間を与えれば決定できる。さらに、任意の時点に渋滞が起る確率 $P_3$ および構造物の耐用期間 $T$ を与えれば、時間領域における主桁の破壊確率 $Q^*$ を一定レベル $M_a$ の関数として式(4)を用いて評価することができる。さて、式(4)を用いて計算を行えば、種々の構造形式を有する主桁の時間領域での破壊確率を求めることができるが、ここでは一例として、空間領域での信頼度の評価のときに取り上げた2径間連続主桁に対して計算した結果を図4に示す。この図は、 $T=50$ 年、 $P_3=0.0171$ 、 $\lambda_f=0.667/\text{hour}$ とした場合、すなわち耐用期間中に渋滞が $N=\lambda_f P_3 T=5000$ 回生ずると期待される場合の規定の破壊確率 $Q^*=10^{-6}$ ～ $10^{-1}$ のもとでの許容(設計)曲げモーメント $M_a$ とスパン比 $n$ との関係を示したものである。

また、橋軸方向最大曲げモーメントの分布関数 $F_M(m)$ は、極値I型分布であると仮定して計算した。この図と先に図2で示した空間領域における結果とを比較すれば、同じスパン比、同じ破壊確率に対する許容(設計)曲げモーメント・レベルが、活荷重の時間領域における変動性を考慮することにより大きく異なることがわかる。また、図4においては現行設計曲げモーメント・レベルを $L=20i$ (衝撃考慮)と $L=20$ (衝撃無視)とに分けて破線で示している。一般的に高架橋の設計条件として $P_3=0.0171$ 、 $\lambda_f=0.667/\text{hour}$ つまり、 $T=50$ 年中の渋滞回数 $N$ が $N=5000$ 回という仮定が妥当であるとするれば、現行の設計荷重により設計される2径間連続主桁の破壊確率は、 $T=50$ 年において $Q^*=10^{-5}$ ～ $10^{-4}$ を保証されているということがわかる。また、このような信頼性解析に基づく図により、所定の破壊確率あるいは信頼度のもとでの主桁の設計が可能となる。最後に資料の提供を賜ったHDL委員会関係各位に感謝します。

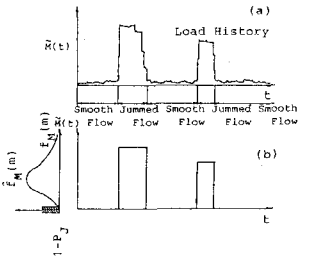


図-3

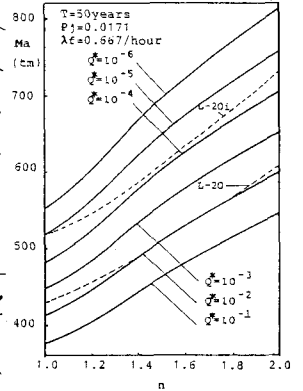


図-4

- 1) 山本、白木、松保、高岡：都市高速道路高架橋における渋滞時活荷重のモデル化，第39回土木学会年次学術講演会概要集，1984-10。
- 2) 阪神高速道路公団設計荷重(HDL)委員会：活荷重分科会資料，第1回～第13回資料，No.21号～No.69号，1982-1984。
- 3) 松保、白木、山本、高岡：都市高速道路高架橋における主桁の静的規則応答解析，第39回土木学会年次学術講演会概要集，1984-10。
- 4) ボロケン著，小林他訳：構造設計の確率論的方法と信頼性問題，培風館，pp.170-175，1981-2。
- 5) R.D. Larrabee and C.A. Cornell：Combination of Various Load Processes，Jour. Stru. Div.，ASCE，Vol.107，No. ST1，pp.223-239，1981-1。