

I-46

構造物の荷重設定における基準値について

北海学園大学大学院 学 生 員 黒田保博
北海学園大学工学部 フェロー 当麻庄司

1. はじめに

我が国の土木構造物では、橋梁を中心に許容応力度を用いた設計法が行われてきた。この許容応力度法は簡便に取り扱えことや構造物の設計で伝統的に使用されてきたことなどから、我国では現在でも構造設計の主流として使用されている。しかし、許容応力度法における設計荷重は、概念的には確率というものが考慮されているものの荷重の統計的な意味が不明確である。限界状態設計法は構造物の安全性を限界状態で評価し、確率論的設計を行うことが特徴となっている。しかし、この限界状態設計法では今までの許容応力度法の持つ簡便さが失われていることも事実である。そのため許容応力度法のもつ簡便さを維持しながら確率論的な手法を検討することも必要であるといえる。

ここで限界状態設計法あるいは確率論を含んだ許容応力度法において重要となるのが、基準となる荷重値の確率的な意味を明確にすることである。構造物に作用する荷重はほとんどが確率過程である。そのためその確率値から設計荷重を設定するためにはある一定の基準がなくてはならない。著者らはこれまでその一環として有義荷重を用いること提案している^{1) 2)}。本論文ではまず荷重基準値のとり方について一般的に論じ、次に有義荷重を用いて交通荷重を評価する例を具体的に示すことにする。

2. 荷重基準値の設定方法

構造物の安全性の指標として破壊確率がある。荷重と抵抗のいずれもが図1に示すように互いに独立な確率過程であると考え、この破壊確率は次式で算定される。

$$P_f = \int_0^{\infty} f_s(s) F_R(s) ds = \int_0^{\infty} f_R(r) (1 - F_s(r)) dr \quad \text{式 (1)}$$

しかし、上式で用いる荷重および抵抗の確率密度関数は厳密には求めることができないし、また構造物を設計する度に上式で破壊確率を算定するわけにはいか

ない。よって荷重と抵抗にある確定的な値、すなわち基準値を設定して簡潔化を図らなければならない。ここで抵抗の基準値としては、降伏軸力 P_y 、崩壊荷重 P_u 、降伏モーメント M_y 、塑性モーメント M_p などの降伏応力 σ_y を基準とした値をとることができるが、一方作用荷重については構造物の寿命に大きく影響を与えるにも関わらず明確な基準値といえるものがない。

荷重の実態を統計的に表す手法として、調査等により得られたデータにある確率分布式を近似的に当てはめることができる。こうして一旦確率分布式を当てはめれば荷重設定に関する問題は扱いやすくなるが、分布形をあてはめる作業は容易ではない。またそれはあくまでも生データを基にした近似であり、特に分布の裾の部分では誤差が大きくなる。このことから確率論を含んだ荷重基準値のより簡便な設定方法の開発が重要となる。

現在とられている荷重の設定法には次のようなものが挙げられる。

(1) 平均値 μ と分散 σ を用いる方法

分布形全体を2つのパラメータ、平均値と分散とで表す。この手法を用いたものに LRFD/AISC³⁾ や LRFD/AASHTO⁴⁾ のような荷重抵抗係数設計法がある。これは荷重と抵抗の各分布の平均値および分散から求められる安全性指標を用いて安全率をコントロールする手法である。

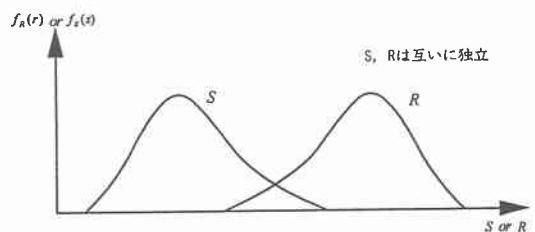


図1 荷重と抵抗の確率分布

(2) 超過確率による方法

道路橋の荷重をシミュレーション等により求め、例えば日最大値あるいは渋滞時の10%超過確率値をもって設計値とする方法である^{6) 6)}。

(3) 最大値をとる方法

構造物の寿命期間における再現期間最大値をとる。

(4) 有義荷重をとる方法

有義荷重とは港湾構造物に使用されている有義波の概念を用いたもので、それは「大きい方から数えて全体の波数の1/3の数の波を選び出し、それらの波高の平均値に等しい波高」と定義される⁷⁾。この概念を用いた有義荷重 $S_{1/3}$ は次式のように示すことができる。

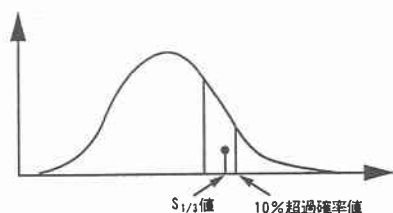
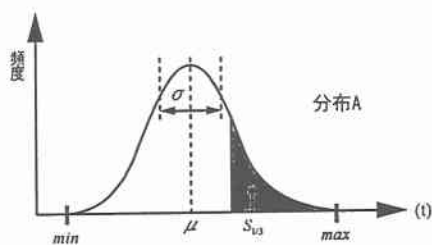
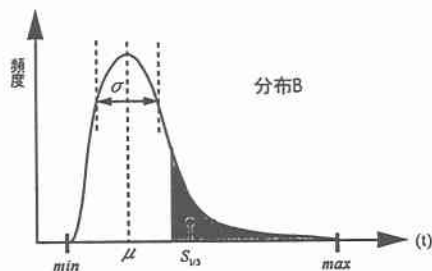


図2 有義荷重と10%超過確率値



(a) 分布A



(a) 分布B

図3 分布形の比較

$$S_{1/3} = 3 \int_0^{\infty} s f_s(s) ds \quad \text{式 (2)}$$

上式は図2の分布図では上部1/3の重心値として表される。

3. 有義荷重の利点

図2に示すように、よく用いられる超過確率10%をとる方法は分布形全体の上部10%を対象にしているのに対し、有義荷重は全体の1/3を対象にしている。また超過確率をとる方法は超過確率値が安定するためにはより多くのデータが必要になる。

次に図3に示すような2つの分布を比較する。分布A、B共に最小値および最大値が同じであるが、分布Aは正規分布的な形状であるのに対して分布Bは対数正規的な右裾広がりな形状をした分布である。分布Aは左右対称形であるので平均値と分散で全体の分布形をよく表すことができるが、分布Bはこの2つのパラメータだけでは不正確であり非対称形を表す3つ目のパラメータであるスキュー係数が必要となる。しかし、有義荷重は1つのパラメータでいずれの分布形も全体をよく表すことができる。

提案した有義荷重値は基本的に超過確率値と同じようにデータ数が多いほど値が安定してくる。しかしこの有義荷重値が、超過確率がなぜ10%なのかという疑問と同じようになぜ1/3かということが問題となるがこの点は今後の課題とする。この有義荷重値の超過確率を各種分布形について求めると表1のようになる¹⁾。これを見ると、同一分布形の場合、変動係数によって若干のばらつきはあるもののそのばらつきは約1%以内におさまっていることが分かる。また分布形が異なってもその差は約3%以内である。有義荷重の超過確率が分布形に依存せずきわめて安定した値をとることは、この有義荷重値を許容応力度法あるいは

表1 有義荷重の超過確率

分布形	変動係数				
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
正規分布	13.77				
対数正規分布	13.46	13.14	12.83	12.52	12.22
Gumbel分布	12.59				
Frechet分布	12.10	11.64	11.23	10.87	10.58
Weibull分布	14.44	14.25	14.03	13.78	13.54

単位：%

は限界状態設計法に取り込むことにしても分布形に依存せず安定した破壊確率となることを示している。

4. 有義荷重を用いた道路交通荷重の一評価法
4. 1 有義荷重と10%超過確率値の比較

表2に東京都の国道357号線に位置する有明路線における車種別の荷重実測値⁶⁾から求めた10%超過確率値と有義荷重との比較を示す。荷重観測は1984年11月に24時間計測された日交通量である。有義荷重は表1で示したように約13%の超過確率値であるので10%超過確率値よりは一般的にやや小さい値となるが、両者の間には極めて安定した関係があることが分かる。表2の分布形の一部をヒストグラムで表したのが図4である。この図の横軸は車両重量、縦軸は合計台数に対する比率をとっている。この図をみると分かるとおり、この例の中には極めて不規則な分布形をしているものもあるが、表2の有義荷重と10%超過確率値の比較でみたとおりやはり安定した値をとる。有義荷重はその定義から統計的に合理的な意義をもっており、これらの分布形の代表値として非常に適切であると言える。

荷重抵抗係数設計法で用いられている平均値と分散によって統計量を表す方法は、パラメーターが2つ必要になってくる。それに対して有義荷重はパラメーターが1つですむのでより簡便に取り扱える。また平均

値と分散では分布形全体をよく表しているものの、設計上問題となる分布形の裾部は正確に捉えられない。

構造物に対する風荷重や雪荷重は、100年あるいは50年を再現期間とし、再現期間中の最大荷重とされる。またこれらは自然現象であるため、年最大荷重の統計値をとることが多い。再現期間最大荷重は統計的データから最大値を求めるため得られた値の意味は非常に明快で解りやすい。しかし、最大値は分布形をあてはめた場合右裾部分であるため誤差が大きく、統計データの曖昧さに大きく影響される。

4. 2 $S_{1/3}-N$ 図

次に、有義荷重を用いて具体的な交通荷重の評価を試みることにする。図5は2つの路線に対する交通荷重の実測値⁶⁾を、有義荷重を縦軸に、自動車台数を横軸に取って $S_{1/3}-N$ 図としてプロットしたものである。また表3に図5以降で用いる車種別のマークを示す。ここで有明路線は先の図4あるいは表2と同じものを用い、また熊谷路線は埼玉県的一般国道17号線に位置し、荷重観測は1984年12月に24時間計測された日交通量である。この図5では右上にマークが多い程荷重は厳しいと言える。図5(a)、(b)に示すこれらの2つの路線を比較すると、有明路線の方が熊谷路線よりもマークが全体的に右寄りになっており明らかに厳しい荷重を受けていることが分かる。また同図上に限界荷重曲線を引くことができれば、疲労設計の考え方を取り入れて橋梁の余寿命の算定を行うこともできる。

交通荷重をより比較し易くするため、図5を区域分けして21種類の車両有義荷重が各区域に属する数を求めると図6に示すようになる。そして各区域毎にその数を比較すると表4のようになる。これらの比較から、これらの交通荷重をもつ路線に架かる橋の設計荷重に対して特別な配慮をすることができる。例えば、有明路線のようにZone A₀に属する荷重が存在するような場合、現在の道路橋示方書の設計荷重(TL-25)の取り方では不十分であることが判断できる。また同じ路線の交通荷重計測を継続することにより路線の時代による交通荷重の変化を的確に把握することができ、維持管理に生かすことができる。このように荷重の確率値を一つのパラメータで表すことにより、荷重の全体像をいろいろな角度から比較や分析するこ

表2 交通荷重の実測例〔有明路線〕⁶⁾

車種	10%超過確率値	$S_{1/3}$ 値
1. 軽自動車	1.3	1.2
2. 乗用車	1.9	1.7
3. 貨客車	2.7	2.7
4. 小型トラック	5.5	5.1
5. ロングボディトラック	7.5	6.7
6. 中型トラック	10.5	9.2
7. 大型トラック	13.0	13.6
8. 大型トラック (後タンデム)	27.0	24.6
9. 大型トラック (前タンデム)	21.0	19.8
10. 大型トラック (前後タンデム)	23.0	21.2
11. 大型ダンプ	13.0	12.7
12. 大型ダンプ (後タンデム)	31.0	31.3
13. 大型ミキサ	13.0	11.0
14. 大型ミキサ (後タンデム)	25.0	21.9
15. 大型タンクローリー (後タンデム)	23.0	21.8
16. 大型タンクローリー (前タンデム)	23.0	21.1
17. セミトレーラー	43.0	39.9
18. フルトレーラー	43.0	42.7
19. マイクロバス	5.5	4.4
20. 中型バス	15.5	15.2
21. 大型バス	16.5	16.3

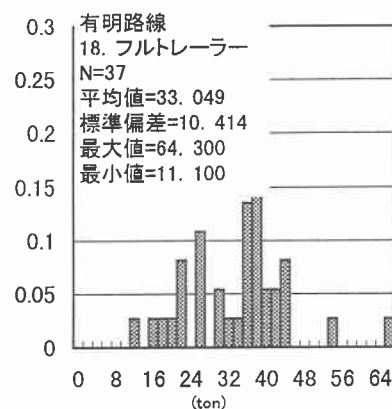
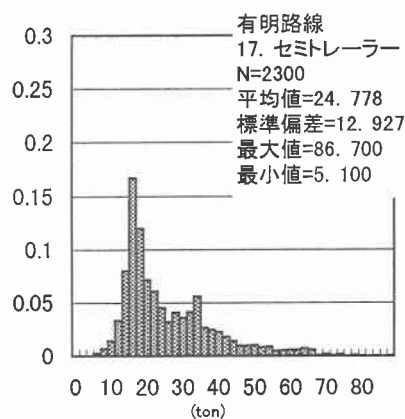
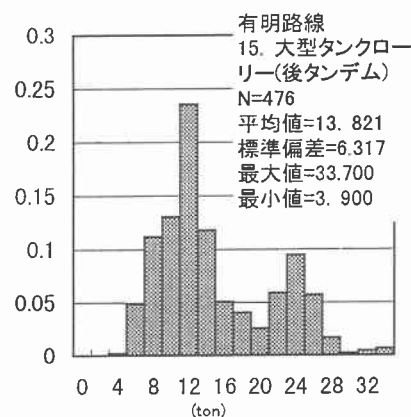
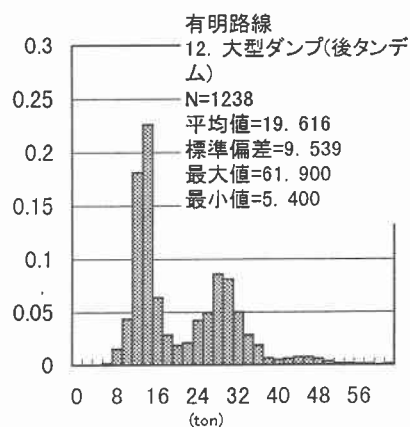
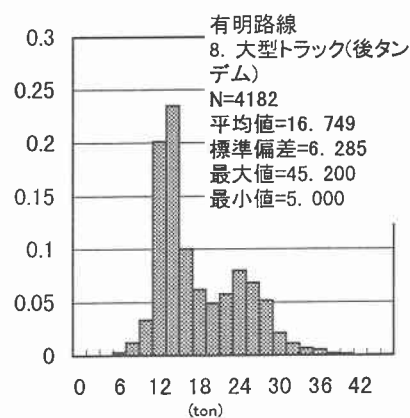
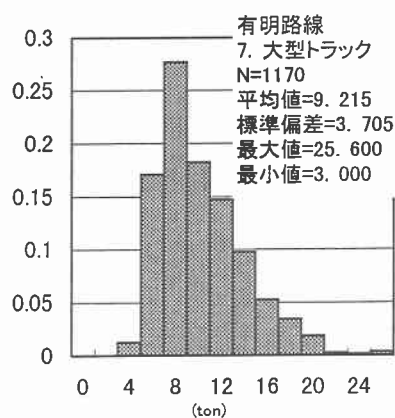


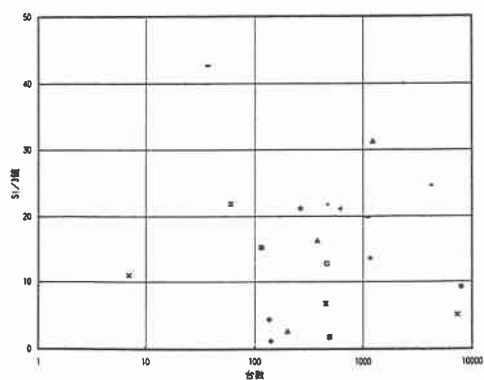
図4 交通荷重の実測ヒストグラム [有明路線] ⁶⁾

表3 車種別のマーク

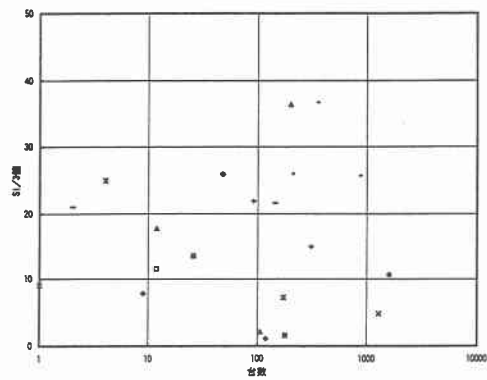
◆ 1.小型車
■ 2.乗用車
▲ 3.貨客車
× 4.小型トラック
※ 5.ロングボディトラック
● 6.中型トラック
+ 7.大型トラック
- 8.大型トラック(後タンDEM)
- 9.大型トラック(前タンDEM)
□ 10.大型トラック(前後タンDEM)
◇ 11.大型ダンプ
△ 12.大型ダンプ(後タンDEM)
× 13.大型ミキサ
※ 14.大型ミキサ(後タンDEM)
◦ 15.大型タンクローリー(後タンDEM)
+ 16.大型タンクローリー(前タンDEM)
- 17.セミトレーラ
- 18.フルトレーラ
◆ 19.マイクロバス
■ 20.中型バス
▲ 21.大型バス

表4 区分別の荷重種類数

有明路線		熊谷路線	
Zone A ₀	1	Zone A ₀	0
Zone A	1	Zone A	0
Zone B	2	Zone B	2
Zone C	5	Zone C	4
Zone D	6	Zone D	4
Zone E	6	Zone E	11
TOTAL	21	TOTAL	21

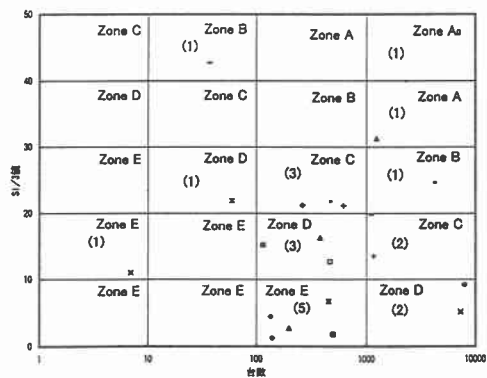


(a) 有明路線

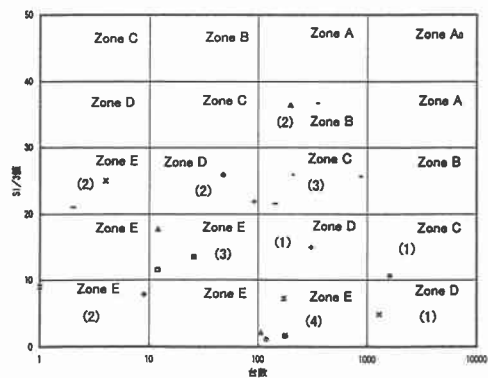


(b) 熊谷路線

図5 $S_{1/3}-N$ 図



(a) 有明路線



(b) 熊谷路線

図6 区分別荷重分布図

とが可能になる。

5. 結語

本論文では、荷重を統計的に簡便に表す手法として有義荷重法が有効であることを具体的な例を用いて示した。ここでは車両重量を用いたが同様な表現は車両の軸重を用いることもでき、橋梁の設計荷重を捉えようとする場合にはその方が適当かも知れない。また設計荷重としては例えば10 ton以上の大型車のみを対象として考えてもよいのではないと思われるが、その扱いは今後の課題である。そして有義荷重を用いた設計において、荷重抵抗係数設計で行われたような破壊確率との関係を明確にする必要がある。いずれにしろ、本論文で示したような手法により作用荷重をより的確に捉えることができるので、道路管理者はその情報を道路構造物のより無駄のない設計あるいは維持管理に活用されることを期待する。

【参考文献】

- 1) 当麻、森戸：有義荷重法による構造設計の提案、土木学会北海道支部論文報告集、1995年2月。
- 2) 当麻、黒田、森戸：等価有義荷重を用いた自動車荷重の評価、土木学会第51回年次学術講演会概要集、平成8年9月。
- 3) American Institute of Steel Construction (AISC): Load and Resistance Factor Design (LRFD) Specification for Structural Steel Buildings, 1993.
- 4) American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO): LRFD Specifications for Highway Bridges, 1994.
- 5) 阪神高速道路公団（HDL）委員会：阪神高速道路公団の設計荷重体系に関する調査研究、阪神高速道路公団・（財）阪神高速道路管理技術センター、1986年12月。
- 6) 藤原、岩崎、田中：限界状態設計法における設計活荷重に関する検討、土木研究所資料、第2539号、1988年1月。
- 7) 運輸省港湾局：港湾施設の技術上の基準・同解説、（社）日本港湾協会、昭和54年3月。