

プレートガーダーの限界状態を考慮した 道路橋活荷重シミュレーションによる 応答評価と設計法

Response Evaluation and Design Method of Plate Girders Based on
Simulation of Live Load of Roadway Bridges Reflecting Limit States

佐藤尚次*

By Naotsugu SATO

In recent world-wide trend to Limit State Design, JRA(Japan Road Association) also proceed preparation works to revise "Specification for Highway Bridges". The fundamental works of this project are to examine the conventional rules for both load and strength. In spite of importance of these essential concepts in design code, examinations for load and strength are independently carried out in usual cases. The major purpose of this study is to search the possibility of contact between them. Typical limit states for plate girder bridges are apparently listed up, and load effects corresponding to them are computer-simulated from actual live load data. Difference in occurrence of such effects are manifested.

1. はじめに

道路交通量の増大や大型・重量車両の増加といった近年の状況に対して、現行の規定で設計された橋梁の安全性を確認する作業が建設省土木研究所、阪神高速道路公団等を中心に進められており、その成果は各種の学協会の発表や、文献^{1,2)}などに表わされている。また日本道路協会では、道路橋示方書が将来的に限界状態設計法の形に移行することを考慮して、そのための準備作業を進めているが、前記の活荷重検討も（別個な作業とすることも当然可能ではあるが）その一環として位置づけられている²⁾。

橋梁で限界状態設計法を採用するに際しては、代表的な構造要素についての限界状態を明確にすることも重要である。既に土木学会においても鋼構造物については^{3,4)}、コンクリート構造物については⁵⁾など、限界状態設計法を意識した研究成果がまとめられているものの、一般の土木構造物と対比させたときに、橋梁として独自に考慮すべきことも多々あると考えられる。鋼橋については、従来の強度規定の見直し（限界状態の性格づけ）と、特にプレートガーダーについて載荷実験を行い、設計法の合理化をはかっている⁶⁾。ただし、荷重と鋼部材とは、それぞれに検討を要する事項が多いこともあり、相互に調査項目の要望を出し合うような状況には至っていない。

一般的にいて、構造物の設計基準の策定に当っては、設計荷重の評価と、設計構造強度の評価とは、独立したプロセスで検討が行われるのが普通であり、各組織での検討結果を踏まえて、更に上位の意思決定機関で総合的判断により条項が策定されることになる。しかし、下部組織から上部組織へと伝達される情報は、検討の内容を凝縮させたものであり、上部の段階で各組織の情報を有機的に利用するためには、

* 工博 関東学院大学講師 工学部土木工学科 (〒236 横浜市金沢区六浦町4834)

あらかじめ下部の段階で、相互に情報交換を密にし、それぞれの検討に有効に活用しておくことが望ましい。著者は、設計基準の構成を多段階分析的に理解し、併せて設計基準に示される荷重や強度の設計値をメニュー的に提示して、設計者に選択の余地を与える手法を提案しているが⁷⁾その議論の一環として、設計基準策定作業の組織構成をも多段階の階層構造という概念でとらえ、組織間の情報交換にもメニューの考え方が適用できることを述べている。

このメニューの考え方は、安全性を定量的にとらえる立場からのものである。本研究では、メニューの考え方は用いないが、異種組織間の情報交換が行われることを前提として、そこで問題となることを主として定性的に整理することに重点をおいた。安全性の問題は定量的な議論ばかりでなく、定性的な整理も重要である。ここではその例題として、上記の2つの限界状態設計法検討班の代表的作業である、活荷重検討と、プレートガーダーの耐力力検討の作業を対比させ、接点をもちうる可能性について考えてみた。

活荷重（この場合L荷重）に関する検討は、通常、渋滞した車両列が橋梁上を通過する状況を考え、こうした通過が多数回繰返されたときの、橋に生じる代表的な応答値（ふつうは単純げた中央の曲げモーメント）の最大値、または upper-fractile値に着目して行われる。しかし例えば曲げモーメントのような応答値は、ランダム量である個々の車両重量に影響線の重みをつけて重ね合せた量であり、いわば構造解析のフィルターを通った量である。それゆえ、こうした量をもとに設計荷重を規定した場合に、影響線の形の異なる応答、例えばせん断力、連続げたの曲げモーメントが、真に十分な精度で upper-fractile 値を与える保証があるとはいえない。

杉山ら⁸⁾は確率的手法により、単純・連続・ゲルバー桁等の構造形式の曲げモーメントやせん断力を考察し、最適荷重載荷方式等の提案を行っている。現実の基準の中でも、米国AASHTO⁹⁾の活荷重規定(H-Loading)では、曲げとせん断に対して、等分布荷重は共通とするものの、集中荷重は異なる荷重値を用いているが、これも応答の相違を考慮したものといえる。せん断力の場合には、曲げモーメントに比べて、重量の大きい車両が単独で来た場合に影響が著しいとされ、集中荷重の値によって調整しているわけである。このような影響線形状の相違に対し、場合によっては、例えば構造解析係数のような処理が適切となる場合があるかもしれない。構造応答の相違が、設計基準の条文の上で、構造解析の前提となる荷重値の違いとして処理されてきた前例としては、地震に対する修正震度法なども該当する。

このように、設計荷重に対する検討は、外的作用としての荷重の力学的・統計的な性質の調査だけでは不十分で、ある程度構造物の性質をも考慮に入れる必要があるのが現状である。〔耐震設計で動的解析を設計者に委ねれば、荷重は外的作用としての地震そのものでよく、同様に、upper-fractile値を求めるためのシミュレーションを設計者に委ねることができれば、荷重は車両のデータだけでよいことになるが、これは現実的とはいえない〕こうした点を考えれば、必ずしも曲げモーメント、せん断力といった一般的な形の応答で荷重検討の線を引きだけでなく、個別の構造物ごとに特性を考慮して、例えば曲げとせん断の相関、曲げと圧縮の相関といった形による整理にも一考の余地はあろう。例えばプレートガーダーの設計で問題となるのは、曲げによる横座屈と曲げ+せん断による腹板の座屈である。前記の鋼部材強度の検討作業⁶⁾でも、耐力力実験においては、「曲げが卓越する状態」、「曲げとせん断の相互作用がある状態」、「せん断が卓越する状態」をそれぞれ作りだして、限界状態の様子を観察している。

はりの設計において、曲げが最も重要な要因であることは論を待たない。建築構造物に代表される骨組構造物のはり要素の設計を考えてみれば、文献4)では、曲げモーメントを受ける部材の照査は、部材の両端から等しい曲げを受ける場合の、横座屈に対する限界状態をもとに定められている。両端の曲げが異なる場合の等価モーメントへの置き換えも示されている。これははりに対する設計の典型的なものであるが、この場合の曲げモーメントは断面力というよりは、むしろ部材力というべきものであろう。ところが、橋梁の設計は、骨組のはり要素の設計とは明かに異なる。例えば「スパンが大きく、断面形状そのものが違う」、「はり要素が等断面であることが多いのに比べ、橋梁は変断面を採用するのが普通」等の諸点は

既に多くの文献（例えば10）で指摘されている。橋梁の場合は、断面力に応じて、断面寸法を決めるわけであるから、必ずしも単純はりでも中央の断面の曲げが最も確率的に危険度の高い限界状態とは限らない。また薄肉集成構造であることから、考慮すべき限界状態にも特徴がある。

以上の諸点が本研究を行った動機である。本研究での対象は「自動車荷重（および死荷重）を主荷重とする」、「橋梁構造物の主構造部材（あるいは構造要素）」に限定されているが、主要な荷重の種類や構造形式の異なる構造物の設計基準に関しても、著者自身が日頃感じている共通の問題点があるので、文末のまとめに加えて、補足の記述を行った。

2. 対象とする限界状態

プレートガーダーは、はり断面の機能を極限まで追究した結果薄板集成構造となったものである。機能的にははりであるが、力学的には骨組としてとらえられることはなく、断面を構成する板要素の限界状態が設計の基本となる。鋼構造物設計指針⁴⁾でも「薄板構造物」に分類して扱われている。

道路橋示方書¹¹⁾では、設計の単位を、上下フランジと腹板の中の垂直・水平補剛材やフランジによって囲まれる領域（単一パネル）といった最小の要素の（座屈）耐荷力において条項を定めている（これは骨組構造を個々の部材単位の限界状態照査により設計するのと同様である）。座屈設計ガイドライン³⁾などにより詳細な限界状態の解説が述べられているが、本研究で扱う限界状態は、道路橋示方書に準拠したものに限定する。プレートガーダーの設計手順は定型化しているが、それに合わせて、限界状態の形を、鋼構造物設計指針と同様に書き下してみる。ただし、ここでは全スパンで腹板高さが一定な、2軸対称断面の、単純支持プレートガーダーの設計を仮定する。断面の諸元は図-1に示す通りで、 h ：腹板高さ、 t_w ：腹板厚、 A_w ：腹板断面積、 b_f ：フランジ幅、 t_f ：フランジ厚、 A_f ：フランジ面積、さらに全断面積は $A = A_w + 2A_f$ で表わされる。また以下、 a は垂直補剛材間隔、 β は腹板の許容最大幅厚比、 σ_a 、 τ_a は許容応力度で、応力表示の限界強度 σ_u 、 τ_u との間に $\sigma_a = \sigma_u / \nu$ などの関係がある。 ν は安全率である。また[2]の②における ψ は、腹板の上下縁における直応力比、 R は座屈パラメータ、[2]の②および[4]における σ_{cr} 、 τ_{cr} は、それぞれ直応力、せん断応力が単独に作用した場合の弾性座屈応力、[4]における C 、 D_1 、 D_2 は、水平補剛材の本数により異なる定数である。

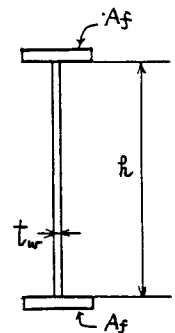


図-1 断面の諸元

[1] 腹板高さの決定……経験式（後出）

[2] 腹板厚の決定……… $\tau = S / A_w \leq \tau_a$ ……①および

$$h / t_w \leq \beta \dots\dots\dots ②$$

①： $\nu S / S_u \leq 1$ 、 $S_u = A_w \cdot \tau_u$ （せん断による限界状態）、

$$②：\frac{1+\psi}{4} \frac{\sigma}{\sigma_{cr}} + \sqrt{\left(\frac{3-\psi}{4} \frac{\sigma}{\sigma_{cr}}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_{cr}}\right)^2} \leq \frac{R^2}{\nu B} \quad \text{（曲げとせん断による座屈限界状態）}^{11)}$$

で、通常は②の条件が支配的。

[3] フランジ面積の決定……… $\sigma = M / W \leq \sigma_a$ 、 $W \approx (t_w h^2) / 6 + A_f h$

場合により合成応力度照査 $(\sigma / \sigma_a)^2 + (\tau / \tau_a)^2 \leq 1.2$ が必要。

基本的には $\nu M / M_u \leq 1$ 、 $M_u = W \cdot \sigma_u$

[4] 垂直補剛材間隔の決定……… $U^2 = (h / 100 t_w)^4 [(\sigma / C)^2 + \{\tau / D_1 + D_2 (h / a)^2\}^2] \leq 1$

$$\nu B^2 \left[\left(\frac{\sigma}{\sigma_{cr}} \right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_{cr}} \right)^2 \right] \leq 1$$

であり、せん断の影響を主として考えている。せん断座屈後には、腹板の張力場による後座屈強度が期待できるため、座屈安全率は $\nu_B=1.25$ を設定している。この安全率には、限界状態の性質を反映した、強度係数的意味合いが含まれているといえる。

[5] 水平・垂直補剛材剛度の決定

単一パネル照査が成立するための必要な境界条件。

以上まとめたことから、プレートガーダーの限界状態としては、曲げモーメントによるもの([3])、せん断力によるもの([2]の①)、曲げとせん断による座屈に関するもの([2]の②および[4])が考えられ、また例えば断面ごとのMに応じて A_f が決まることから、スパン中央だけでなく、種々の位置での断面における断面力が問題となると考えられる。また、[2]において①の限界状態が支配的になることが殆どないため、この条件に対しては断面が余裕があること、せん断が重要な要因となるのは、むしろ[4]の限界状態であることが予想される。

また、M、Sについては、断面形状に無関係に、スパンと断面位置のみから断面力を算出すれば、[3]ならびに[2]－①の限界状態に関連した整理が可能であるが、今一つのMとSとが連成する限界状態の表現には断面形状に関係した量が入ってくる。このため、何らかの断面形の仮定が必要となる(もっとも本質的には $(M/M_u)^2$ と $(S/S_u)^2$ とをどのような重みづけで考えるかという問題に帰着するわけである)。

3. 解析手順

上記の理由(MとSとが連成する限界状態の表現には何らかの断面形の仮定が必要)から、はじめにプレートガーダーの断面を試算しておく。単純支持、2軸対称断面、腹板高さ一定は前記の通りである。仮定したスパンは、 $L=20\text{m}$ 、 40m 、 60m (単純支持プレートガーダーの適用妥当範囲を超えるが、例として含めた)、使用鋼材はSM41およびSM58で、道路橋示方書の許容応力度はそれぞれ 1400 kgf/cm^2 (137MPa)、 2600 kgf/cm^2 (255MPa)。これは $\nu=1.7$ に相当する。また垂直補剛材は設けるものとし、水平補剛材は設けない場合と2本設ける場合について結果を示す。

設計断面力算定用の荷重であるが、今回の検討の目的が1車線分の車両列についての荷重効果の特性を調べることにあつため、整合させる意味で、現行道路橋示方書に規定されている1車線分(2.75m幅)の活荷重が1本の主桁にかかるものとして計算した。これは現実の設計とは異なるが、あくまでも便宜的に仮定したものである。また死荷重についても、1車線幅(2.75m)の範囲の床版死荷重(厚さ25cmのRC床版; 625kgf/m^2 ; 6130Pa)のみが1本の主桁にかかるものとし、けた自重、床組、付属物等の重量は無視して計算した。仮にこの計算で得られる死荷重効果を S_D 、活荷重効果を S_L として、全荷重効果を $\alpha_1 \cdot (\alpha_2 S_D + S_L)$ のようにおき、1本の主桁が支えるべき幅員の大きさの効果などを α_1 で、床版厚の違いや、無視をした部分の重量、死荷重と活荷重の載荷方法の違いなどを α_2 で考慮して、パラメトリックに検討を行えば、より一般的ではあるが、今回はそこまで検討範囲は広げなかった。したがって、今回の荷重条件は、

[1] 死荷重: 等分布荷重 1720 kgf/m

[2] 活荷重: 等分布荷重	1240 kgf/m	集中荷重	17700kgf	($L=20\text{m}$)
(衝撃を含む)	1180 kgf/m		16800kgf	(40m)
	1140 kgf/m		16250kgf	(60m)

とした。

このときプレートガーダー形状の決定は、慣用的な手法を更に簡略化して、以下のように行った。

①支間長を決め、10等分断面で設計曲げモーメント $M_d(x)$ 、せん断力 $S_d(x)$ を計算。

②2軸対称I形断面とし、鋼種、補剛方法の仮定から、許容応力度 σ_a 、 τ_a や腹板の最大幅厚比 β を決め

る。

③けた高 h の計算：けた中央断面に発生する最大曲げモーメント M_{max} に対する最適けた高

$$h_{op} = [3\beta M_{max} / 2\sigma_a]^{1/3} \text{ の } 90\%$$

④腹板厚 t_w の計算：前記[2]にもとづき、 $t_w = \max [h/\beta, S_{max}/(h \cdot \tau_a)]$ で算出。通常は h/β 。

⑤各断面のフランジ面積 $A_f(x)$ の計算：前記[3]にもとづき、 $\nu M_d/M_u = M_d(x)/M_u(x) = 1$ となるようにする。

⑥垂直補剛材間隔：前記[4]にもとづいて行った。ただし道路橋示方書には $a \leq 1.5h$ とする制約があるが、⑤と同様、限界状態にクリティカルな断面とするため、この制約は除いて考えた。

現実の設計ではこれらの他に、合成応力度の照査や、フランジの断面変化のさせ方なども考慮するが、ここでは省略した。すなわち、10等分断面で⑤および⑥の限界状態の条件に対し、完全にクリティカルになっているという、理念系を考える。結果の断面諸元を表-1に示す。

次いで、活荷重列

のシミュレーションを

を行い、試算した構造物

に載荷する。この際、

死荷重は設計で考慮し

たものがそのまま載る

ものとし、活荷重は、

建設省土木研究所が昭

和59年に東京都江東区

有明の国道357号線で

測定したデータ²⁾(表

-2)を用い、ランダム

に与えた車両が、

1mの車間距離を開け

て、完全渋滞の状態で

橋上に満載した場合を

考えた。設計時にせん

断力の計算で仮定する

ような、影響線の符号

による載荷・不載荷は

考慮していない。した

がって、特にけた中央

断面付近での[4]の

限界状態に対しては、

相対的に発生せん断力

が小さくなり、余裕が

生じることは予想され

る。

シミュレーション

の手法は極めて単純な

ものであり、一様乱数

表-1 断面試算結果

L(m)	鋼種 SM	水平 補剛	h t _w	A _{f1} a ₁	A _{f2} a ₂	A _{f3} a ₃	A _{f4} a ₄	A _{f5} a ₅	A _{f6} a ₆
20	41	0	141 0.93	111	21.3 131	54.8 169	78.8 280	93.1	97.9
		2	179 0.58	82	16.8 96	43.2 120	62.1 178	73.4	77.2
	58	0	103 0.94	134	15.7 194	40.4	58.1	68.7	72.2
		2	138 0.53	58	11.7 66	30.3 81	43.5 110	51.4 265	54.1
40	41	0	207 1.36	226	45.9 305	118 664	170	201	211
		2	263 0.85	162	36.2 207	93.1 333	134	158	166
	58	0	151 1.38	538	33.8	87.1	125	148	156
		2	202 0.77	111	25.3 137	65.2 194	93.7 1351	111	116
60	41	0	263 1.73	369	73.9 628	190	274	323	340
		2	333 1.08	254	58.3 365	150	216	255	268
	58	0	192 1.75		54.5	140	202	238	251
		2	256 0.98	168	40.8 223	105 432	151	179	188

単位：h, t_w, a はcm、A_fはcm²。A_fの空欄はM=0、aの空欄は無制限
添字の1~6は10等分断面の左端から中央。

から表-2の車種混入率に応じて車種を決め、所定の平均値、標準偏差を与えて対数正規分布に従う乱数により車重を与えた。前後の軸重配分、車長および車輪位置は表-2のものをそのまま用いることとし、けた端部から順次集中荷重を載荷していく。

ここでの検討は、通常行われているシミュレーションで目的とされることが多い、「現実の車両データをもとに、荷重効果のごく裾部にある upper-fractile を推定する。」ことを試みるわけではなく、「各種の限界状態に対応した荷重効果の、生起頻度に着目して、特質の違いを対比する。」ことを行っている。このため、膨大な回数の繰返しにより超過確率の推定精度を向上させることには重点をおかず、特に「効率化」の手法¹²⁾は

用いずに、 10^5 回全載荷を繰返して、結果を密度関数の形にまとめた。渋滞回数と供用期間の関係、渋滞列の走行速度等についても特別な考慮はしていない。そのため、一定時間間隔で載荷荷重を移動させて応答を算出する操作もしていない。確率過程の処理としては、時系列のサンプル間隔が長い、あるいはアンサンブル的なとらえ方をしていることに対応する。

試算結果の1例を図-2(a)~(d)に示す。これは、前述の[3]、[4]における限界状態照査の左辺の形に準じ、無次元化して整理したものである。またこの結果は、死荷重によるM、Sの影響をも含むものである。[4]に記したように、曲げとせん断から決まる腹板の座屈限界状態をUで表わしている。また図-2の縦軸は、ヒストグラムの区間分けとして、横軸の0.0と1.0の間を100等分したため、この区間での荷重効果の生起頻度を表わす。

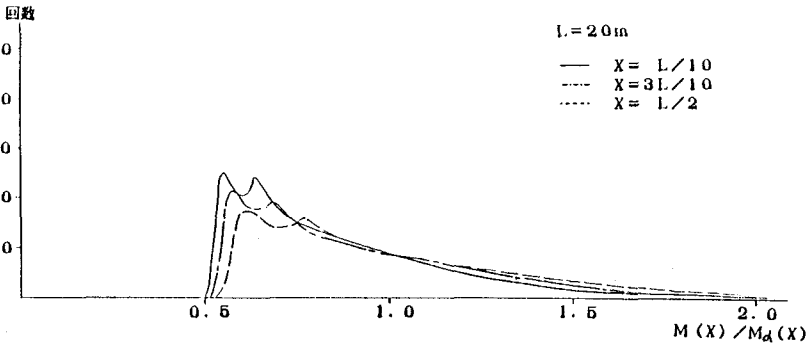
図-2から読み取れる点は以下のようなことである。まず曲げモーメントの生起頻度であるが、 $L=20\text{m}$ の比較的短い支間では、個々の重量車の影響が直接的に出てきて、 $L=60\text{m}$ の方では、それが平均化されるものと思われたが、かえって長い支間の方が分布が大きめに偏っている。これは車間距離を1m固定と小さめに設定し

た影響が出ている。これを大きくすると、 $L=20\text{m}$ よりも60mの方が頻度分布が左に寄る傾向が著しい。相当の頻度で発生モーメントが設計モーメントを上回っており、対策の必要性をうかがわせる。考慮する断面位置の違

表-2 荷重モデル及び混入率

車 種	車 重 (最大) t	活 荷 重 モデル (m)	軸 重 (比) (t)			種 別	混入率
			1	2	3		
乗用車	1.30 (3.1)		0.501V +0.03	0.498V -0.03		小型	0.551
小 型 トラック	3.80 (12.8)		0.231V +0.78	0.787V -0.78		小型	0.124
中 型 トラック	8.20 (18.3)		0.182V +1.38	0.818V -1.38		大型	0.131
大 型 トラック	17.00 (45.2)		0.109V +3.22	0.891V -3.22		大型	0.103
大 型 ダンプ	20.00 (61.9)		0.081V +3.80	0.919V -3.80		大型	0.030
タンク ローザ	18.00 (33.7)		0.107V +3.01	0.893V -3.01		大型	0.017
セミ トレーラ	30.00 (88.7)		0.024V +4.19	0.360V +0.70	0.816V -4.89	大型	0.034
大 型 バ ス	13.80 (18.7)		0.376V -0.464	0.624V +0.464		大型	0.010

Wは車重を示す

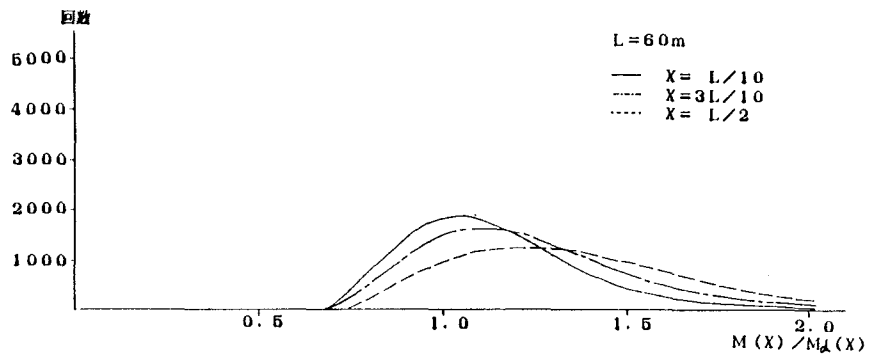


(a) $L=20\text{m}$, $M(x)/M_d(x)$ $X=L/10, 3L/10, 5L/10$

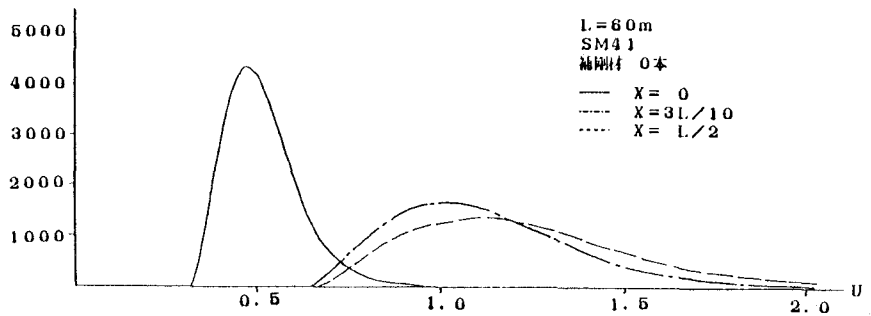
図-2 各種限界状態の発生頻度分布

いによる差は、さほど大きいものではないが、中央に寄るにつれて、大きめに偏り、ばらつきも大きくなっている。

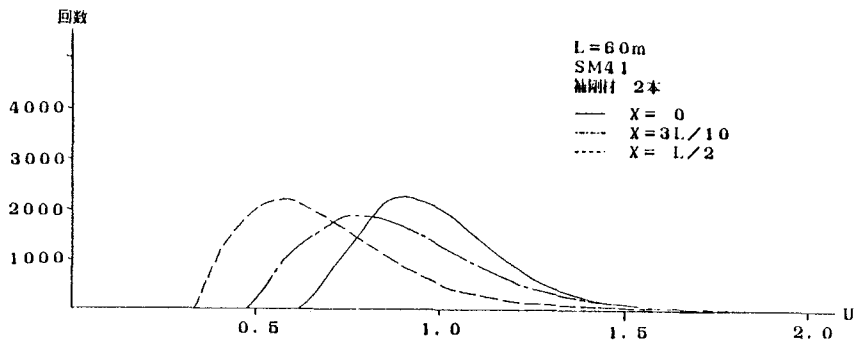
曲げとせん断から決まる限界状態Uについては、中央断面で余裕があるという予測は必ずしも当たっていない。水平補剛材の有無によって端部と中央付近の断面の間の分布の大小関係が逆転していることが目につく。水平補剛材を用いない場合には、中央付近の断面のUの分布は前出のMの分布の影響を、極めて強く受けている。せん断の寄与分で少し小さめに寄ってはいるものの、その影響はごく僅かである。一方端部では $M=0$ であるので、この分布の状況はすべてせん断の寄与によるものである。このことから曲げモーメントに比べて、せん断は設計値超過の可能性が小さいこともわかる。一方、水平補剛材2段の場合には、考



(b) $L=60\text{m}$ 、 $M(x)/M_d(x)$ $X=L/10, 3L/10, 5L/10$



(c) $L=60\text{m}$ 、 $U(x)$, $X=0, 3L/10, 5L/10$ [SM41, 水平補剛材なし]



(d) $L=60\text{m}$ 、 $U(x)$, $X=0, 3L/10, 5L/10$ [SM41, 水平補剛材2段]

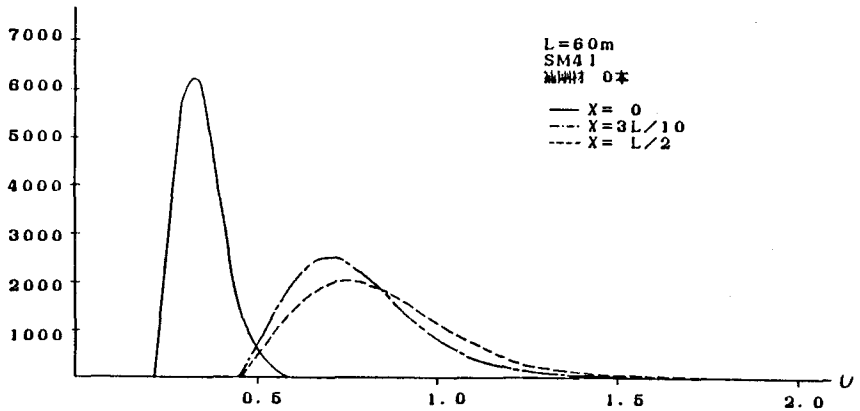
図-2 各種限界状態の発生頻度分布

ている限界状態の中に、曲げモーメントは相対的に「縮小」された形で入っている。すなわち前記の[4]に示したUの式において、 σ を割る係数Dの値は、水平補剛材を用いない場合で3650なのに対し、水平補剛材2段の場合には3150と、8.6倍にもなっているのに対し、 τ を割る係数の方は、 C_1 が2.4~2.7倍、 C_2 は同じ値である。これが、水平補剛材2段の場合の照査が一番下側の単一パネルの限界状態に対するものであることによるのは明らかである。それゆえ、水平補剛材2段の場合、生起頻度分布の形状は、断

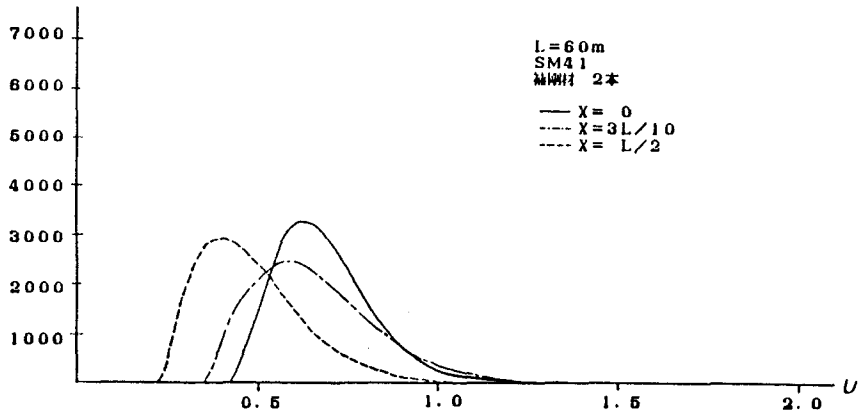
面の位置のいかんによらず、せん断の影響を強く受けることになる。したがって、シミュレーションで考慮している、影響線の符号を無視した渋滞モードと設計条件の違いが反映され、端部の方が厳しくなっているものと思われる。なお、今回の検討では、 h/a の上限を除いて条件設定を行ってきたが、現実の構造物では、この制約によって中央付近の a がきまっており、これを考えれば中央付近の断面の安全度余裕はかなりあると考えてよいであろう。

総合的にみれば、曲げに対する条件に比して、せん断に対する条件にはなお余裕があるように思われる。図-2にみられる曲げの設計値超過には、(法的な対抗措置を講じないとすれば)設計荷重値の増加によって対処せざるを得ないものと考えられる。その際、せん断に対する条件を比例的に増加させる必要があるかどうかには、なお検討の余地があると思われる。ここでは「設計荷重規格値を実情に合わせる」ための意味での荷重係数を考えてみた。死荷重はそのままにして、活荷重のみ荷重係数として2.0をとり(従来の設計荷重を2.0倍したものに對し、構造解析する)、再度同様の計算をした結果を図-3(a),(b)に示す。 M/M_d に関しては、横軸の目盛が0.5倍になるだけであるので、図は省略するが、限界状態Uについては、設計断面自体が変わる(例えばけた高 h は M_d には比例しない)ので、曲げモーメントのように単純には扱えない。図-3(a),(b)から、設計値超過は大幅改善されたことが理解できるが、曲げとせん断の間の余裕の差から、水平補剛材2段の場合の方が多少水平補剛材を用いない場合に比べて、安全性が高いことがわかる。これらの図に現われた程度の差を有意と判断するかどうかは議論もあると思われるが、設計法によって安全性に差が出ることは基本的には好ましくないことである。

ここでは「荷重係数によって2.0倍した活荷重」によって計算された断面力に、さらに「構造解析係数を曲げモーメントは1.0、せん断力は0.5かけた」もので設計することをも考えてみた。これはもともとの設計荷重に対し、曲げモーメントを計算するときは2.0倍、せん断力を計算するときは1.0倍して扱ったのと結果は同じであるが、荷重自体の統計的性質に起因する現象と、影響線



(a)荷重係数2.0, $L=60\text{m}$, $U(x)$, $X=0, 3L/10, 5L/10$ [SM41, 水平補剛材なし]



(b)荷重係数2.0, $L=60\text{m}$, $U(x)$, $X=0, 3L/10, 5L/10$ [SM41, 水平補剛材2段]

図-3 荷重係数・構造解析係数を用いた場合

形状が関係する現象とを区別するために、あえて一括して荷重係数の扱いをすることを避けた表現にしたものである。その結果を図-3(c), (d)に示す。これらの図を見るとせん断の構造解析係数0.5というのは

落とし過ぎであり、(c)荷重係数2.0, 構造解析係数(せん断)0.5, $L=60\text{m}$, $U(x)$, [SM41, 水平補剛材なし]

かえって水平補剛材2段の場合の、けた端部で設計値超過の頻度が増えている。このデータの範囲で、構造解析係数の適切な値まで検討することは困難ではあるが、設計法の枠組みを見直す役には立つであろう。

(d)荷重係数2.0, 構造解析係数(せん断)0.5, $L=60\text{m}$, $U(x)$, [SM41, 水平補剛材2段]

図-3 荷重係数・構造解析係数を用いた場合

4. まとめ

本研究の内容を要約すると以下になる。

- ①プレートガーダーの慣用的な設計手順を整理し、限界状態設計法の表現により考察した。
- ②①の限界状態に対応した形で道路橋の活荷重をシミュレートし、荷重効果の生起頻度分布を求めた。
- ③限界状態の違い、あるいは設計法の違いによってみられる結果の相違を整理し、理由を考察した。

こうした整理は、直接限界状態確率の算定を行うという意図よりも、通常議論の接点のもち難い強度と荷重の間を埋めることを目標にしている。構造への配慮なしに荷重を論ずることは余り意味がなく、また強度の側から見ても、最適な構造形態を考えていくうえで、例えば曲げとせん断に、どのような重みをおいて考えたらよいかなど、荷重の性質とも関連する問題が多々ある(水平補剛材の最適取付位置の問題など)。相互に有益な情報が交換できるような議論の整理方法を開発していく必要がある。

本研究では道路橋示方書に記述されている限界状態のみ取扱ったが、例えば座屈設計ガイドライン³⁾では、限界状態設計法への移行を考慮し、より汎用的な規定作成の立場から、単一パネルだけでなく、垂直補剛材によってはさまれた領域(水平補剛材を中に含む; 部分パネル)や、垂直・水平補剛材を中に含む全体パネルについても、曲げ、せん断に対する極限強度を提示し、それらを総合した設計方法が提案さ

れている。また、道路橋示方書では弾性座屈理論に基づいた腹板の座屈強度により腹板の諸元を定め、後座屈強度は安全率を調整することで取入れている。こうした間接的方法は実的には利点が認められる一方、背景が理解しにくく、真の耐荷力を取入れる妨げになっているとの批判もある。しかしこの点についても、本研究では深入りを避け、弾性座屈強度を剛性低下に着目したひとつの限界状態としての評価でとらえた。

本研究では荷重係数や構造解析係数に種々の値を仮定しているが、これらは特に根拠のあるものではない。あくまでもきりの良い数字として採用しただけである。こうした値を本格的に検討しようとする、本文中にも記したように膨大な計算量を必要とするが、それは必ずしも本研究の目的とするところではない。

[補足]

論文の本筋から離れるが、関連して日々疑問に感じていることがあるので、ここに書き留めておくことにする。本研究は、設計論における強度と荷重という2つの概念の間を埋めることを目的として行われたものである。しかしそもそも「強度」とは何か、「荷重」とは何かという定義を、設計論の枠組みの中で厳密に与えること自体、存外に困難なことである。現在の設計の多くは、構造物を構成する「部材」に着目して行われる（「部材」の定義もまた難しいのだが）。ここで部材の強度は、部材を構成する材料の強度に基づいて決められてはいるが、材料の強度と等価な概念ではない。また部材に発生する部材力は、荷重に基づいてはいるが、やはり荷重と等価な概念ではない。

設計で本質的に確保すべきなのは、「構造物の安全性」であって、「部材の安全性」ではない。したがって現在の設計のあり方は、構造物の安全性を部材照査によって確保する、いわば間接照査の体系といえる。これに対し、構造物のレベルで安全性を直接的に照査する方法も存在する（例えば多層多スパンラーメンに対する単純塑性解析、あるいは道路橋示方書に規定されているアーチの全体座屈解析）。この場合荷重は本来の形に近いが、強度はどのように定義されるのか、あいまいさが残る。疲労設計のような、「点」に着目した照査も行われるが、この場合は逆に、強度の定義（S-N曲線など）は理解しやすいが、荷重にあいまいさが残る。

どのように安全性照査を行うにせよ、異なった概念である強度と荷重を同一の土俵に乗せる必要性が生じてくる、また、一方で設計には正確さばかりでなく、簡略さも要求されるわけである。こうした理由から、設計基準には様々な便法、妥協が含まれているわけである。ともすると、設計荷重規定は、構造物と無関係に存在する、外的要因としての荷重（の upper-fractile 値）が記述されているという錯覚に陥りがちであるが、現実には安全性照査が行われるレベルでの荷重効果を考慮して定められているわけである。道路橋活荷重にL-荷重とT-荷重の区別があることを考えてもそれは明らかであるし、本来ランダムな集中荷重の列である活荷重を等分布荷重として扱えるのも、前記の簡略さへの要求に応じた、（部材）荷重効果からの逆算という手順が設計基準策定段階にあるからである。

限界状態設計法への流れの中で、部材照査から構造物照査へ（間接照査から直接照査へ）という方向づけも議論されることがある。例えば西独のDIN 18800（鋼構造の安定基準）¹³⁾では塑性設計的な考え方を相当に取入れる一方、各設計荷重値に一樣な係数（AASHTO やBS5400 のように荷重によって変えるのではない）をかけて設計をするようになっている。これなどは構造物照査志向の相当強い基準と考えられるであろう。しかし、前記のように（部材）荷重効果からの逆算で、便宜的に等分布荷重として与えられている設計荷重に対し、「等分布」の荷重モードで比例的に荷重を増加させ、全体構造物の耐荷力を評価する（あるいは設計荷重に一樣な係数をかけたものに対して、全体構造物の安全性を確認する）といった操作をするものとする、この係数のなかった荷重はどのような意味をもつのであろうか。

本研究は、同一の構造物における複数の限界状態に対応する荷重効果を対比させたものであるが、ここでも設計法との関係で、多様な荷重効果が生じうることが理解できた。まして設計法を根本的に考え

直すなら、対応した荷重検討の見直しも必要であろう。

ところで、荷重を検討する立場からみても、全ての限界状態を考慮してフィードバックを行うのは所詮不可能である。本文中にあるような、単純ばりの支間中央の曲げのみに着目する程度のことで、超過確率の十分小さい荷重値を、一定の精度で求めるには膨大な検討が必要であり、いくつかの限られた支間長のみの検討から、その他の場合を補間して推定することを行っている。また、例えば橋梁と建築骨組構造物では、ともに部材照査に基づく設計を行っているとはいっても、部材の安全性と全体構造物の安全性の関係には相当の相違がある。これは現状の基準での、安全率の相違に反映されているものと考えられるが、この相違の内容を検討するのは荷重ではなく、強度の概念の範囲内のことと思われる。

ここ（及び本文）に述べたことは、多分に研究的な観点からのことであり、専門の細分化にともなつて、研究者間に認識の隔たりが生ずることへの懸念も含まれている。実務に直接関与する設計基準策定作業においては、強度と荷重の概念的関連性に対する配慮は十分行われ、不適切な条項が定められることはないと考えてよい。しかしまた、適切な情報交換が難しいことが、作業の進行に影響する面もないとはいえない。著者は別な報告⁷⁾で「メニュー」による情報交換なども提案しているが、有効かつ効率的な検討が行われることを期待する次第である。

5. 謝辞

本研究を進めるにあたり、一部文部省科学研究費（奨励研究(A);課題番号63750471）の補助を受けた。ここに記して感謝する。また関東学院大学卒研究生の宮下進吾、村橋尉匡、吉村善英君には数値計算、結果の整理等の労を煩わせた。感謝の意を表したい。

参考文献

- 1) HDL委員会報告書：阪神高速道路の設計荷重体系に関する調査研究、1986-12.
- 2) 日本道路協会：限界状態設計法分科会荷重検討班第一次報告書、1986-11（非公開）.
- 3) 土木学会：座屈設計ガイドライン(鋼構造シリーズ2)、1987-10.
- 4) 土木学会：鋼構造物設計指針PART A(鋼構造シリーズ3A)、1987-11.
- 5) 土木学会：コンクリート標準示方書(設計編)、1986-10.
- 6) 日本道路協会：限界状態設計法分科会鋼部材検討班第一次報告書(素案)、1988-3 .
- 7) 佐藤、長谷川、西野：メニュー方式による設計基準の試みと多段階分析型超過確率法信頼性理論、構造工学論文集Vol.35A、1989-3（登載予定）.
- 8) 杉山、藤野、伊藤：道路橋設計活荷重の規定方法に関する確率論的考察、構造工学論文集Vol.32A、1986-3.
- 9) AASHTO: Standard Specifications for Highway Bridges, 13th Ed., PP.18-22, 1983.
- 10) 土木学会：構造システムの最適化－理論と応用－(構造工学シリーズ1)、PP.31-34、1988-9.
- 11) 日本道路協会：道路橋示方書(鋼橋編)、PP.217-228、1980-2.
- 12) 高田、藤野：道路橋最大活荷重評価のためのコンピュータシミュレーションの効率化、構造工学論文集 Vol.32A、1986-3.
- 13) DIN: DIN18800 Teil-1,2 Stalbauten, 1981.

(1988年10月12日受付)