

鋼はり-柱部材の耐荷力に関する統計的評価

STATISTICAL EVALUATIONS OF STEEL BEAM-COLUMNS STRENGTH

塩見 弘幸*・事口 寿男**

By Hiroyuki SHIOMI and Hisao KOTOGUCHI

1. ま え が き

本報告は、はり-柱部材の強度に関する既往の実験値を用い、統計的見地から国内外の 2, 3 の規定の強度相関式について検討を行い、そのパラメーターを考察することにより、信頼性設計のための資料を得ることを目的とするものである。なお、ここに利用した実験データは文献 2) で利用したものに、その後集録し得たデータを加えたものである。

ここで扱うはり-柱は等断面に関するものとし、次の 3 つの場合について考える。① 軸方向力と強軸まわりの曲げが作用する場合の面内耐荷力、② 軸方向力と強軸まわりの曲げが作用する場合の面外耐荷力、③ 軸方向力と 2 軸曲げが作用する場合の耐荷力。なお、① および ② の場合を 1 軸曲げ、③ の場合を 2 軸曲げと略記する。部材間に横荷重が作用する場合は対象外とし、断面形状は H 形および I 形を対象とする。

2. 基準耐荷力式について

はり-柱の基準耐荷力式としては、設計を容易にするために簡略化した近似相関式が用いられている。この近似相関式には種々のものがあるが、日本の道路橋示方書³⁾ (道示と略記) に規定されている次式のタイプが強度相関式として比較的広く用いられている。

$$\frac{P}{P_u} + \frac{M_{x0} \cdot C_{Ex}}{M_{ux}} \left(\frac{1}{1 - P/P_{Ex}} \right) + \frac{M_{y0} \cdot C_{Ey}}{M_{uy}} \left(\frac{1}{1 - P/P_{Ey}} \right) = 1 \dots\dots(1)$$

ここに、 P, M_{x0}, M_{y0} : それぞれはり-柱の軸方向荷重と断面の強軸および弱軸まわりの材端作用モーメント

* 正会員 中部工業大学講師 土木工学科
** 正会員 工博 大同工業大学助教授 建設工学科

P_u : 軸方向力のみが作用する場合の圧縮耐荷力、 M_{ux}, M_{uy} : 曲げモーメントのみが作用する場合の曲げ耐荷力、 P_{Ex}, P_{Ey} : それぞれ曲げモーメント M_{x0}, M_{y0} が作用する面内の Euler 荷重、 C_{Ex}, C_{Ey} : それぞれ曲げモーメント M_{x0}, M_{y0} が作用する面内での曲げモーメントの逓減係数である。これは、部材の両端にそれぞれ大きさの異なる曲げモーメントが作用する場合、部材中央の曲げモーメントの大きさを評価するために用いられ、 $M_{xeq} = M_{x0} \cdot C_{Ex}$ として換算される。 M_{xeq} はさらに増幅係数 $1/(1 - P/P_{Ex})$ によって増幅される。

(1) 1 軸 曲 げ

基準耐荷力式として道示、AASHTO⁴⁾、AISC⁵⁾ を用いる。これらの基準耐荷力式はそれぞれ式 (1) の左辺第 3 項を除いた形で表わされる。各基準においては、式 (1) の P_u および M_{ux} として表-1 の基準式を用いている。また、AASHTO、AISC では部材端で塑性ヒンジが形成される場合を考え、式 (1) の左辺第 3 項を除いた左辺の値と次式の左辺の値とを比べ、小さい方の強度値を設計に用いている。

$$P/P_u + M_{x0}/M_{px} = 1 \dots\dots\dots(1)'$$

ただし、 $P_u = 0.85 P_y$ (AASHTO)、 $P_u = P_y$ (AISC)、 M_{px} : 全塑性モーメント、 P_y : 軸方向力のみが作用する場合の降伏荷重。

(2) 2 軸 曲 げ

ここでは、道示と次式の Chen の提案式⁶⁾を用いる。

$$(M_{x0}/M_{ux})^\mu + (M_{y0}/M_{uy})^\mu = 1 \dots\dots\dots(2)$$

ここに、

$$\left. \begin{aligned} M_{ux} &= M_m (1 - P/P_u) (1 - P/P_{Ex}) \\ M_{uy} &= M_{py} (1 - P/P_u) (1 - P/P_{Ey}) \\ M_m &= [1.07 - (l/r_y) \sqrt{\sigma_y/3161}] M_{px} \\ &\leq M_{px} \quad (\sigma_y \text{ の単位は ksi}) \\ \mu &= 1.4 + P/P_y \end{aligned} \right\} \dots\dots(2)'$$

表一 各基準耐力式（1軸曲げ）における P_u および M_{ux} の基準式

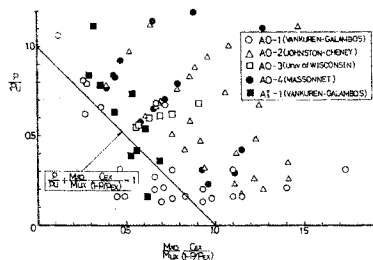
基準耐力式	柱の項に関する基準式	はりの項に関する基準式		
道示	$\frac{P_u}{P_y} = 1$ $= 1.109 - 0.545 \bar{\lambda}$ $= 1 / (0.773 + \bar{\lambda}^2)$	$\bar{\lambda} \leq 0.2$ $0.2 < \bar{\lambda} \leq 1.0$ $1.0 < \bar{\lambda}$	$\frac{M_{ux}}{M_y} = 1$ $= 1 - 0.412(\bar{\alpha} - 0.2)$ $= 1/\bar{\alpha}^2$	$\bar{\alpha} \leq 0.2$ $0.2 < \bar{\alpha} \leq \sqrt{2}$ $\sqrt{2} < \bar{\alpha}$
AASHTO	$\frac{P_u}{P_y} = 0.85(1 - 0.25 \bar{\lambda}^2)$ $= 0.85/\bar{\lambda}^2$	$\bar{\lambda} \leq \sqrt{2}$ $\bar{\lambda} > \sqrt{2}$	$\frac{M_{ux}}{M_y} = 1 - 0.25 \bar{r}^2$ $= 1/\bar{r}^2$	$\bar{r} \leq \sqrt{2}$ $\bar{r} > \sqrt{2}$
AISC	$\frac{P_u}{P_y} = 1 - 0.25 \bar{\lambda}^2$ $= 1/\bar{\lambda}^2$	$\bar{\lambda} \leq \sqrt{2}$ $\bar{\lambda} > \sqrt{2}$	$\frac{M_{ux}}{M_{px}} = 1.07 - \frac{l r_y \sqrt{\sigma_y}}{316i} \leq 1$ (σ_y の単位: ksi)	

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \frac{l}{r_y} \quad \bar{r} = \frac{2}{\pi} \sqrt{3} \left(\frac{Lb}{b} \right) \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \quad \bar{\alpha} = \frac{2}{\pi} \sqrt{3 + \frac{AW}{2AC}} \left(\frac{Lb}{b} \right) \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}}$$

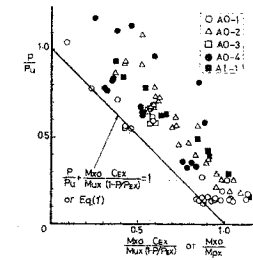
3. 既往の実験値について

1軸曲げに関する実験資料⁷⁾について、面外耐力に関する実験資料のうち、Vankuren-Galambos がまとめた資料を AO-1 とする。この場合の荷重方法は、中心軸圧縮力を一定値に保ち曲げモーメントを増加させている。部材端は一方のみのナイフエッジによって支持されているため、強軸まわりの回転は完全に自由であるが、弱軸まわりについては拘束された状態にある。弱軸に関する部材の有効長は $0.6l$ とする。Johnston-Cheney, Wisconsin 大学, Massonnet の実験をそれぞれ AO-2, AO-3, AO-4 とする。これらの場合の荷重方法はいずれも偏心荷重で、AO-4 を除き、AO-1 と同様に部材端では一方のナイフエッジが用いられている。AO-4 の実験では、部材の両端は半球形状の台上に設置されているため、両軸まわりとも回転支持と考えられる。面内耐力実験に関する資料は、AO-1 と同シリーズ中の 10 体のみで、これを AI-1 とする。2軸曲げに関する実験資料に関しては、Klöppel-Winkelman⁸⁾, Birnstiel⁹⁾, および Massonnet¹⁰⁾ の実験データをそれぞれ B-1, B-2 および B-3 とする。

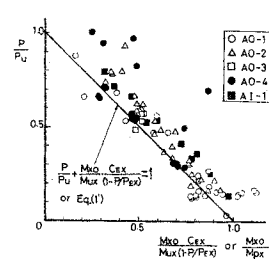
4. 基準耐力値に対する実験値の統計処理



図一 道路橋示方書の基準耐力式によるパラメーターで整理した実験値（1軸曲げ）



図二 AASHTO の基準耐力式によるパラメーターで整理した実験値（1軸曲げ）



図三 AISC の基準耐力式によるパラメーターで整理した実験値（1軸曲げ）

実験値から得られるはり-柱の軸力に関する強度を R_m とし、各基準耐力式を公称降伏応力 F_y と実験降伏応力 σ_y で整理した強度をそれぞれ $(R_y)_n$, $(R_y)_m$ とする。 $R_m/(R_y)_n$ と $R_m/(R_y)_m$ の平均値、標準偏差および変動係数をそれぞれ P_m , P_m' , S_d , S_d' および V_p , V_p' とする。表一2(a) は1軸曲げに関するこれらの計算結果である。AASHTO と AISC の基準耐力式はほとんど同じ評価を下しており、ほぼ実験値の下限値を示している。道示では P_m' は大きくばらつきも大きい。面内耐力については、道示の計算結果はほぼ平均値を示しているもののばらつきが大きい。図一~三は、1軸曲げに関する実験値を各基準耐力式のパラメーターで整理し表わしたものである（図一では、縦軸の 1.2 以上、および横軸の 1.8 以上にプロットされる実験点は省略した）。これらの図から、AASHTO, AISC の基準耐力式は実験値のほぼ下限値を示し、道示では下限値に近いが、基準耐力式に対して危険側に表示される実験値もあることがわかる。

表一2(b) は2軸曲げに関するものである。道示によるものは P_m が大きく、かなり安全側を示しているようである。CHEN-1 は、式(2)内の柱の強度 P_u に表一1, 式(e)を用いたものであるが、 P_m が1よりも小さくなり、基準耐力式としては不相当である。CHEN-2 は、 P_u として ECCS の multiple column curves

表-2 各基準耐力式による計算結果

(a) 1軸曲げ

対象	基準耐力式	資料数	P_m	S_d	V_p
			P_m'	S_d'	V_p'
面外	AASHTO	77	1.162	0.093	0.080
			1.206	0.127	0.105
	AISC	77	1.109	0.106	0.096
			1.149	0.120	0.104
道示	道示	77	1.279	0.299	0.234
			1.376	0.397	0.289
面内	道示	10	1.107	0.111	0.164
			1.137	0.122	0.169

(b) 2軸曲げ

基準耐力式	資料数	P_m	S_d	V_p
		P_m'	S_d'	V_p'
道示	162	1.429	0.189	0.132
		1.390	0.196	0.141
CHEN-1	162	0.856	0.127	0.149
		0.867	0.128	0.148
CHEN-2	162	1.013	0.134	0.132
		1.035	0.139	0.134

の C 曲線に近似させた式を用い、さらに、式 (2)' の M_m を $M_m = M_{px}$ とした場合である。ほぼ実験値の平均を評価している。

5. 強度相関式に関する考察

前節では入手し得た国内外の実験データを用いて、二、三の基準耐力式を検討した。その結果、道示の基準耐力式に対しては、表-2、図-1 から明らかなように、ほかに比べ実験値のばらつきが相当大きい。その原因としては次のようなことが考えられる。

① 道示のはりの基準耐力式では、弾性横倒れ座屈応力式のうち、St. Venant のねじりによる応力の項を無視し、横倒れ座屈パラメーター $\bar{\alpha}$ が定められている¹¹⁾。しかし、実験に供されたはり-柱部材のウェブ高さは一般に低く、St. Venant のねじりの影響が大きい。② 道示の柱の基準耐力式では、ECCS の multiple column curves のうち、下限値近くの曲線に類似した式が用いられている。これは溶接 H 形鋼柱の耐力曲線に近いが、実験に供された部材はいずれも圧延 H 形鋼であり、これらの柱の耐力曲線は、溶接 H 形鋼柱の耐力曲線よりも上側に位置している。③ 道示では、部材端で塑性ヒンジが発生する場合を評価する相関式が規定されていない。既往の実験データには、明らかに部材端で塑性ヒンジが発生し崩壊に至ったとみられるものもある。図-1 において、直線式より内側の数点の実験値にその傾向がみられる。

以上の諸点を検討することによって、入手し得た実験

データの範囲におけるはり-柱部材に限定し、実験値のばらつきがなるべく小さくなるような、はり-柱の強度相関式を考えてみる。ある程度小さな変動係数を示す強度相関式を得ることができれば、たとえば文献 2) に述べられているような下限係数を用いることにより、信頼度の高い下限値を示すことが可能となる。まず、はりに関する基準値については、弾性横倒れ座屈応力式から、そりねじりによる応力項を無視し、これを道示の座屈パラメーター $\bar{\alpha}$ を用いて表わす。両端単純支持の場合のはりの弾性横倒れ座屈応力式は¹¹⁾,

$$\sigma_{cr} = \sqrt{\frac{\pi^2 EI_y GJ}{W_x^2 I^2} + \frac{\pi^4 E^2 I_y I_w}{W_x^2 I^4}} = \sqrt{\sigma_v^2 + \sigma_w^2} \dots \dots \dots (3)$$

ここに、 EI_y : y 軸まわりの曲げ剛度、 GJ : 断面のねじり剛度、 EI_w : 断面のそりねじり剛度、 l : はりの長さである。 $G = E/2(1+\nu)$ 、 $\nu = 0.3$ の関係を用いて、式 (3) から

$$\frac{\sigma_v}{\sigma_y} = \frac{l}{\pi} \sqrt{\frac{J}{2.6 I_w}} \frac{\sigma_w}{\sigma_y} = \frac{l}{\pi} \sqrt{\frac{J}{2.6 I_w}} \frac{1}{\bar{\alpha}^2} \dots \dots \dots (4)$$

式 (4) を $1/\beta^2$ とおくと

$$\beta' = \bar{\alpha} \sqrt{\pi/l \sqrt{2.6 I_w/J}} \dots \dots \dots (5)$$

となる。ここで、このパラメーターを用いて、はりの曲げ耐力実験値の表示を試みる。図-4 は、文献 12) における圧延はりと溶接はり (溶接はりは、桁高 500 mm 以下のもの) の実験データについて縦軸に M_u/M_p 、横軸に $\bar{\beta} (\bar{\beta} = \beta' \sqrt{f})$ 、 f は形状係数) を取り表わしたものである。かなりばらつきがみられるが、強度値は $\bar{\beta} \leq 1$ ではほぼ 1.0 を、 $\bar{\beta} > 1$ では $1/\beta^2$ に従う傾向を示している。したがって、はりに関する基準式は $\bar{\beta}$ を用いて次のように考える。

$$\left. \begin{aligned} M_u/M_p = 1.0 \quad \bar{\beta} \leq 1 \\ M_u/M_p = 1/\beta^2 \quad \bar{\beta} > 1 \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (6)$$

次に柱に関する基準式について検討する。はり-柱に関するばらつきを小さくするためには柱の基準値をもう少し大きくとった方がよいように思われるので、柱の実験値の平均値近くを表わしている AISC の柱の基準式 (表-1、式 (e)) を用いることにする。

最後に③について考える。いま $\bar{\beta} < 1$ 、 $C_{Ex}/(1 - P/P_{Ex}) < 1$ の場合を考えてみると、部材端の曲げモーメント M_{x0} が増幅された部材中央の曲げモーメントよりも大きいため、部材端で塑性ヒンジが生じる可能性がある。したがって、この場合の強度相関式としては、AA SHTO、AISC で定めているように、式 (1)' を用いる。

以上の3点を考慮した強度相関式を用いて実験値の統計処理を行ったものが表-3 である。また、図-5 と図-6 は考慮した変数を用いて、実験値を図示したもの

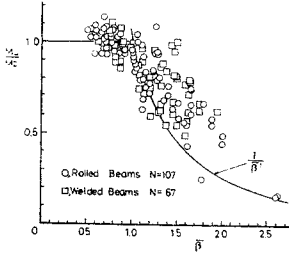


図-4 $\bar{\lambda}$ で整理したはりの曲げ耐力実験値

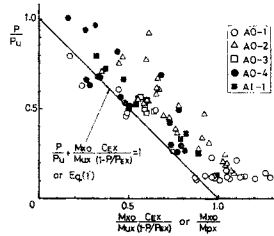


図-5 考察結果のパラメーターで整理した実験値（1軸曲げ）

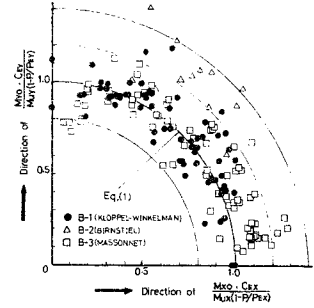


図-6 考察結果のパラメーターで整理した実験値（2軸曲げ）

表-3 考察結果のパラメーターを用いた計算結果

対象	資料数	P_m	S_d	V_p	
		P_m'	S_d'	V_p'	
1軸曲げ	面外	77	1.034 1.080	0.080 0.104	0.077 0.096
	面内	10	1.103 1.116	0.046 0.037	0.042 0.033
2軸曲げ	162	1.042 1.055	0.130 0.125	0.125 0.119	

である。なお、1軸面内耐力力の場合は、 $M_{ux} = M_{px}$ とおき面外耐力力の図中に示した。2軸曲げに関する図-6については、式(1)の左辺の合計値をベクトルとし、 x, y 軸に関する作用曲げモーメントの大きさによる方向性を考慮して、原点から放射状にこれを取り示した。図-5から、1軸曲げの場合は、かなりばらつきが小さくなっていることがわかる。なお、強度相関式よりも安全側に、大きく離れた数個の実験値の存在が目につくが、これらの供試体諸元をみると、細長比が大きく ($\bar{\lambda} = 1.5 \sim 2.0$) 弾性挙動を示す部材であることから、式(1)では説明がつかず、弾性ははり-柱の相関式を用いなければならないと考えられる。図-6の2軸曲げに関するものは、1軸曲げに比べばらつきが大きいが、表-2(b)と表-3とを比べると道示の強度相関式を用いたものよりも変動係数は小さくなっている。したがって、この相関式は、2, 3の強度相関式を用いて計算した値と比較して変動係数も小さく、 P_m の値も1軸曲げ2軸曲げともに同程度の値を示していることから、対象としたはり-柱部材に対しほぼ一定の評価を下していると考えられる。

6. あとがき

はり-柱部材の実験資料の集録に努め、これらを国内外の各基準耐力方式のパラメーターについて整理した。その結果、道示の強度相関式に対しては他の示方書のものに比較して、ばらつきが大きいことが認められた。そこで、道示の強度相関式における柱およびはりの項に関するそれぞれの基準式を検討し、実験値をよりよく評

価する強度相関式を提示した。なお、既往の実験データには含まれていないような、はり高の大きいはり-柱部材に関しては、今後実験データの集積を待ってからの検討課題であると考えられる。

謝辞：この研究においては、名古屋大学工学部、福本啓士教授の指導を賜った。また、東海鋼構造研究グループ（代表 福本教授）の諸氏には、資料の提供と貴重な助言を受けた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) たとえば, Fukumoto, Y., Y. Itoh and M. Kubo : Strength variation of laterally unsupported beams, Proc. ASCE, Vol. 106, No. ST 1, pp. 165~181, 1980.
- 2) 福本啓士ほか: 鋼構造部材の抵抗強度の評価と信頼性設計への適用, 橋梁と基礎, Vol. 14, Nos. 11~12, 1980.
- 3) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, 昭和55年2月.
- 4) AASHTO : Standard Specification for Highway Bridges, 12 ed., 1977.
- 5) AISC Specification for the Design : Fabrication and Erection of Structural Steel for Buildings, Nov. 1, 1978 ed.
- 6) Tebedge, N. and W.F. Chen : Design criteria for H-columns under biaxial loading, Proc. ASCE, Vol. 100, No. ST 3, pp. 579~598, 1974.
- 7) 塩見弘幸・事口寿男: はり-柱の抵抗強度の評価と信頼性, 第35回土木学会年次学術講演会講演概要集第1部, pp. 673~674, 昭和55年9月.
- 8) Klöppel, K. and E. Winkelmann : Experimentelle und [theoretische Untersuchungen über die Traglast von zweiachsig außermittig gedrückten Stahlstäben, Der Stahlbau, Vol. 31, No. 4, pp. 109~119, 1962.
- 9) Birnstiel, C. : Experiments on H-Columns under Biaxial Bending, Proc. ASCE, Vol. 94, No. ST 10, pp. 2429~2449, 1968.
- 10) Anslin, R. and C. Massonnet : New tests on steel I beam-columns in mild steel subjected to thrust and biaxial bending, Technische Hochschule Darmstadt, Darmstadt, pp. 103~122, 1978.
- 11) 福本啓士: プレートガーダーのフランジの曲げ圧縮強度, 橋梁と基礎, Vol. 6, No. 8, pp. 1~6, 1972.
- 12) Fukumoto, Y. and M. Kubo : An Experimental Review of Lateral Buckling of Beams and Girders, International Colloquium on Stability of Structures under Static and Dynamic Loads, ASCE, pp. 541~562, 1977.