【カテゴリーⅣ】

日本建築学会構造系論文集 第90巻 第835号, 1073-1084, 2025年9月
J. Struct. Constr. Eng., AIJ, Vol. 90, No. 835, 1073-1084, Sep., 2025
DOI https://doi.org/10.3130/aijs.90.1073

G ファクタを用いた柱の座屈長さ係数評価の現況

CURRENT SITUATION OF THE EFFECTIVE LENGTH FACTOR EVALUATION IN COLUMNS USING THE G-FACTORS

津 田 惠 吾[*1], 城 戸 將 江[*2], 西 村 拓 真[*3]

Keigo TSUDA, Masae KIDO and Takuma NISHIMURA

This paper summarizes how the effective length factors calculated by the G-factor method can be utilized based on previous papers. First, 1) proposed evaluation formulas for effective length factors are summarized in Tables. Furthermore, it is shown that 2) the effective length factors by the G-factor method give the factors related to story buckling, 3) the G-factor can be used to calculate the moment amplification coefficients due to the P-Δ effect in a uniform frame, and 4) the effective length factors of multi-story, multi-span frames can be calculated by using the concept of story buckling loads and buckling-associated stories.

Keywords: *frame stability*, *symmetrical frame*, *effective length*, *G factor method*, *research paper survey*
骨組の安定性，均等骨組，座屈長さ，*G* ファクタ法，論文サーベイ

1. 序

鋼構造骨組の柱の設計では，骨組の安定性に関して配慮を行うため，柱の座屈長さ係数を評価する必要がある [1), 2)]．均等な骨組の中の柱に対する座屈長さ係数の評価に関しては，文献 1), 2)に *G* ファクタを用いた設計図表が与えられている（付録 1 参照）．この図表は，図 1 に示す均等な骨組から取り出した図 2 に示すキ形の部分骨組に対して，幾つかの仮定の下に導かれた三角関数を含む座屈条件式より作成されたものであり，座屈長さ係数の概略値を求めるには簡便で使いやすい．しかしながら，座屈長さ係数を数式で陽には表現できておらず，座屈条件式より正確な座屈長さ係数を算定するには，繰返し計算が必要であり，煩雑である（本論文では，上記のキ形の部分骨組に対して三角関数を含む座屈条件式より得られる座屈長さ係数を正解の座屈長さ係数とする）．

このような状況の下，筆者らは文献 3)～6)で均等骨組の中の柱の座屈長さ係数評価式を提示している．文献 3)，4)では図 2 のキ形の部分骨組と座屈条件式が同じとなる図 3(a)のロ形骨組に対してエネルギ法を用いて，それぞれ節点移動のある場合，ない場合の座屈長さ係数評価式を提示した．また，文献 5)では，文献 3)と同様な手法で，ブレース付き骨組の座屈長さ係数評価式を提示した．文献 6)では文献 3)と同じ解析モデルに対して，座屈時の骨組に蓄えられるコンプリメンタリエネルギが外力のなす仕事に等しいとして高精度の座屈長さ係数評価式を提示した．

筆者ら以外も，文献 7)～10)で，正解の座屈荷重や座屈長さ係数を陽に評価する近似式を提示している．また，*G* ファクタ法により求めた座屈長さ係数は単に均等な骨組の中の柱の座屈長さ係数を評価するだけでなく，不均等 1 層多スパン骨組の中の柱の座屈荷重・座屈長さ係数評価 [11), 12)]や，多層多スパン骨組の層の座屈荷重 [13),14)]，多層多スパン骨組全体の座屈荷重 [14)]，吹抜け層がある骨組の吹抜け長柱の座屈長さ係数の算定 [15), 16)]にも用いることができることが示されている（付録 1 参照）．さらに，筆者らは均等な骨組内の柱の，PΔモーメントに起因する曲げモーメントや部材角の軸力がない場合からの拡大率を，*G* ファクタを用いて評価できることを報告している [17),18)]．

上記のように，*G* ファクタや *G* ファクタ法による座屈長さ係数を用いて応用できることが多々あるが，全体として整理された文献はない状況にある．本論文は *G* ファクタや *G* ファクタ法により算定された座屈長さ係数がどのように活用できるかを既往の論文に基づいて整理し，レビューするとともに今後の課題について論じたものである．

2. 座屈長さ係数評価式

本章では，*G* ファクタ法を用いた座屈長さ係数評価の現況を示す

*1 北九州市立大学　名誉教授・工博
*2 北九州市立大学国際環境工学部　教授・工博
*3 北九州市立大学大学院　日本学術振興会特別研究員　DC1・工修

Professor Emeritus, The University of Kitakyushu, Dr.Eng.
Professor, Faculty of Environmental Eng., The University of Kitakyushu, Dr.Eng.
JSPS Research Fellow, Graduate Student, The University of Kitakyushu, M.Eng.

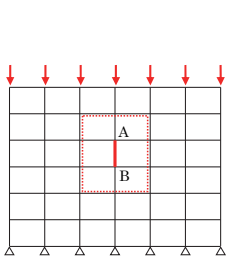
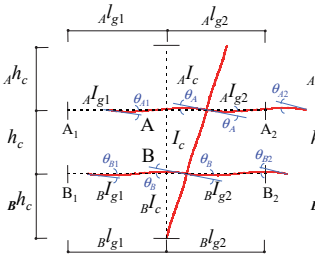
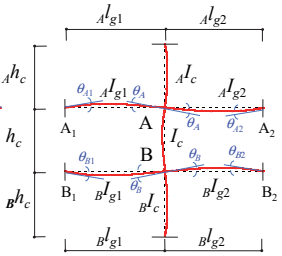


図 1　均等な骨組

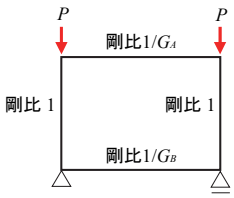


(a) 節点移動あり

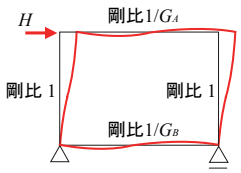


(b) 節点移動なし

図 2　部分骨組



(a) 等価な骨組



(b) 仮定する座屈モードを作る荷重

図 3　ロ形骨組

ために，2.1 節で節点移動のある場合，2.2 節で節点移動のない場合の我が国で提案されている座屈長さ係数評価式を示す．

2.1　節点移動のある場合

2.1.1　節点移動のある場合の正解（文献 2)）

文献 2)では節点移動のある均等な骨組について，図 1 に示す均等な骨組から取り出した図 2(a)の部分骨組の中の柱 AB の座屈長さ係数の算定法を示している．図 2 において，記号 I は部材の断面 2 次モーメント，h，l はそれぞれ柱の長さ（階高），梁の長さであり，前添字 A，B は接合する節点，後添字 c，g はそれぞれ柱，梁を表している．解析仮定として，1) 骨組内のすべての柱は同時に座屈する，2) 図 2(a)に示す点 A_1，A，A_2 のたわみ角 θ_{A1}，θ_A，θ_{A2} および，点 B_1，B，B_2 のたわみ角 θ_{B1}，θ_B，θ_{B2} は式(1)に示すよう仮定している．すなわち，柱を拘束する梁の両端のたわみ角は大きさと向きが等しいと仮定している．

$$\theta_A=\theta_{A1}=\theta_{A2}\,,\quad \theta_B=\theta_{B1}=\theta_{B2} \tag{1}$$

また，3) 梁のモーメントは節点 A および B において上下の柱にその剛度に応じて分配されると仮定している．文献 19)，20)では，上記の仮定に加えて以下のことを仮定しているとの記述がある．すなわち，i) 挙動は弾性である，ii) 部材は等断面である，iii) 接合部は剛である，iv) 柱剛性パラメータは全ての柱で等しい，である（柱剛性パラメータは式(6)で定義される）．

上記の仮定のもと，文献 2), 19), 20)では，座屈条件式として表 1 の式(T1.1)を示している．式(T1.1)の γ は座屈長さ係数であり，G_A，G_B はそれぞれ式（T1.2），式(T1.3)で算定する．

2.1.2　文献 3)「節点移動のある均等な骨組の柱材の実用座屈長さ評価式（津田, 2001)」

文献 3)では，図 2(a)の部分骨組の表 1 に示す式(T1.1)と同じ座屈条件式となる図 3(a)に示す下梁の剛比が $1/G_B$，上梁の剛比が $1/G_A$ のロ形骨組を対象として，エネルギ法を用いて座屈長さ係数を算定している．仮定するたわみ形としては図 3(b)に示すロ形骨組の柱頭に水平力を作用させたときのたわみ形を用いている．得られた座屈長さ係数評価式は表 1 の式(T2.1)となる．なお，点 A が固定，ピンの場合の座屈長さ係数 γ_{FIX}，γ_{PIN} は，それぞれ G_A=0，G_A=∞として，式(T2.2)，式(T2.3)が得られる．

エネルギ法による座屈荷重は真の座屈荷重の上界を与えるため，式(T2.1)～(T2.3)に示す座屈長さ係数評価式は真の値の下界を与える．このため文献 3)では，固定－ピンや，固定－固定の時に正解を与えるように，式(T2.1)～(T2.3)の右辺の $\pi/\sqrt{10}$ (≒0.993)を 1.0 とした式(T3.1)～(T3.3)を設計用の座屈長さ係数評価式として提案している．

2.1.3　文献 7)「吹き抜け柱の座屈長さ（柴田, 2003)」

文献 7)では，吹抜け柱を含む節点移動のある骨組の座屈荷重を評価する事を目的としているが，その過程で表 1 の式(T1.1)が与える座屈荷重の近似座屈荷重評価式を提示している（文献 7)中の式(6b)）．提示された座屈荷重評価式を，座屈長さ係数 γ と G ファクタを用いて表記すると，式(T4.1)となる．なお，点 A が固定，ピンの場合の座屈長さ係数 γ_{FIX}，γ_{PIN} は，それぞれ式(T4.2)，式(T4.3)となる．文献 7)では，$0.1<G_B/G_A<10$ の範囲で正解と良い対応をすると記されているが，具体的な誤差の値は示されていない．

2.1.4　文献 6)「節点移動のある均等な骨組の柱材の高精度座屈長さ係数評価式（津田・城戸・西村, 2025)」

文献 6)では，文献 3)と同様に図 3(a)のロ形骨組に対して，図 3(b)に示す変形状態に対して，座屈時に蓄えられる柱および梁のコンプリメンタリエネルギが圧縮力 P のする仕事と等しいとして，座屈長さ係数評価式を式(T5.1)のように提示している．点 A が固定，ピンの場合の座屈長さ係数 γ_{FIX}，γ_{PIN} は式(T5.2)，(T5.3)となる．

式(T5.1)は，$0.25\le G_B/G_A\le 4.0$ の範囲では，正解値と比較して概ね相対誤差 0.25%以内で座屈長さ係数を評価できるとしている．

2.2　節点移動のない場合

2.2.1　節点移動のない場合の正解（文献 2)）

文献 2)，19)，20)では節点移動の無い均等な骨組について，均等な骨組から取り出した図 2(b)の部分骨組の中の柱 AB の座屈長さ係数の算定法を示している．図 2(b)中の記号は図 2(a)と同じであり，解析仮定は，柱の節点は図 2(b)に示すように水平方向へ変位せず，2.1.1 項で記した仮定 1)～3)のうち，2)が下記のようになることが異なる．すなわち，図 2(b)に示す点 A_1，A，A_2 のたわみ角 θ_{A1}，θ_A，θ_{A2} および，点 B_1，B，B_2 のたわみ角 θ_{B1}，θ_B，θ_{B2} は式(2)に示すように，柱を拘束する梁の両端のたわみ角は大きさが等しく，向きが反対であると仮定している．

$$\theta_A=-\theta_{A1}=-\theta_{A2}\,,\quad \theta_B=-\theta_{B1}=-\theta_{B2} \tag{2}$$

上記の仮定のもと，文献 2), 19), 20)では，座屈条件式として表 2 の式(T6.1)を示している．

2.2.2　文献 4)「節点移動のない均等な骨組の柱材の実用座屈長さ評価式（津田, 2002)」

文献 4)では，文献 3)と同様に図 3(a)に示す下梁の剛比が $1/G_B$，上梁の剛比が $1/G_A$ のロ形骨組を対象として，エネルギ保存則を用いて座屈長さ係数を算定している．仮定するたわみ形としては，1) 柱に等分布荷重を作用させたときのたわみを算定し，2) 次にそのたわみの曲率に比例する分布荷重を柱に作用させたときの 6 次式と

表 1　節点移動のある場合

番号	文献	座屈長さ係数評価式
1	文献2)	$\dfrac{G_A G_B\left(\dfrac{\pi}{\gamma}\right)^2-36}{6(G_A+G_B)}=\dfrac{\left(\dfrac{\pi}{\gamma}\right)}{\tan\left(\dfrac{\pi}{\gamma}\right)}$ (T1.1)　$G_A=\dfrac{I_c/h_c+{}_AI_c/{}_Ah_c}{{}_AI_{g1}/{}_Al_{g1}+{}_AI_{g2}/{}_Al_{g2}}$ (T1.2)　$G_B=\dfrac{I_c/h_c+{}_BI_c/{}_Bh_c}{{}_BI_{g1}/{}_Bl_{g1}+{}_BI_{g2}/{}_Bl_{g2}}$ (T1.3)
2	文献3) 津田 (2001)	$\gamma=\dfrac{\pi}{\sqrt{10}}\cdot\sqrt{\dfrac{5G_A^2G_B^2+20G_AG_B(G_A+G_B)+24(G_A^2+G_B^2)+63(G_AG_B+G_A+G_B)+54}{3G_AG_B(G_A+G_B)+30G_AG_B+6(G_A^2+G_B^2)+45(G_A+G_B)+54}}$ (T2.1) $\gamma_{FIX}=\dfrac{\pi}{\sqrt{10}}\cdot\sqrt{\dfrac{24G_B^2+63G_B+54}{6G_B^2+45G_B+54}}$ (T2.2)　$\gamma_{PIN}=\dfrac{\pi}{\sqrt{10}}\cdot\sqrt{\dfrac{5G_B^2+20G_B+24}{3G_B+6}}$ (T2.3)
3	文献3) 津田 (2001)	$\gamma=\sqrt{\dfrac{5G_A^2G_B^2+20G_AG_B(G_A+G_B)+24(G_A^2+G_B^2)+63(G_AG_B+G_A+G_B)+54}{3G_AG_B(G_A+G_B)+30G_AG_B+6(G_A^2+G_B^2)+45(G_A+G_B)+54}}$ (T3.1) $\gamma_{FIX}=\sqrt{\dfrac{24G_B^2+63G_B+54}{6G_B^2+45G_B+54}}$ (T3.2)　$\gamma_{PIN}=\sqrt{\dfrac{5G_B^2+20G_B+24}{3G_B+6}}$ (T3.3)
4	文献7) 柴田 (2003)	$\gamma=\sqrt{\dfrac{\{6+4(G_A+G_B)+2G_A\cdot G_B\}\cdot\left(1+1.64\sqrt{G_A\cdot G_B}+0.84G_A\cdot G_B\right)}{(6+G_A+G_B)\cdot\left(1+\sqrt{G_A\cdot G_B}\right)^2}}$ (T4.1) $\gamma_{FIX}=\sqrt{\dfrac{6+4G_B}{6+G_B}}$ (T4.2)　$\gamma_{PIN}=\sqrt{0.84\cdot(4+2G_B)}$ (T4.3)
5	文献6) 津田 城戸 西村 (2025)	$\gamma=\pi\sqrt{\dfrac{35{G_A}^3\cdot{G_B}^3+210{G_A}^2\cdot{G_B}^2(G_A+G_B)+1057{G_A}^2\cdot{G_B}^2+476G_A\cdot G_B({G_A}^2+{G_B}^2)+2043G_A\cdot G_B(G_A+G_B)+408\left({G_A}^3+{G_B}^3\right)+}{42\{(G_A+G_B)+6\}\times}$ $\dfrac{1611\left({G_A}^2+{G_B}^2\right)+3285G_A\cdot G_B+2295(G_A+G_B)+1377}{\left\{5{G_A}^2\cdot{G_B}^2+20G_A\cdot G_B(G_A+G_B)+63G_A\cdot G_B+24({G_A}^2+{G_B}^2)+63(G_A+G_B)+54\right\}}}$ (T5.1) $\gamma_{FIX}=\pi\sqrt{\dfrac{136{G_B}^3+537{G_B}^2+765G_B+459}{14(G_B+6)\left(24{G_B}^2+63G_B+54\right)}}$ (T5.2)　$\gamma_{PIN}=\pi\sqrt{\dfrac{35{G_B}^3+210{G_B}^2+476G_B+408}{42\left(5{G_B}^2+20G_B+24\right)}}$ (T5.3)

なるたわみ形を仮定している．得られた座屈長さ係数評価式は表 2 の式(T7.1)となる．なお，点 A が固定，ピンの場合の座屈長さ係数 γ_{FIX}，γ_{PIN} は，それぞれ G_A=0，G_A=∞として，式(T7.2)，式(T7.3)が得られる．

式(T7.1)による座屈長さ係数は正解より小さめであるが相対誤差 e を-0.15% < e < 0.00%の範囲で評価できる [9]．

2.2.3　文献 8)「水平移動が拘束される骨組内柱の単独座屈及び連成座屈荷重の近似評価法（王・五十嵐, 2011）」

文献 8)では，水平移動が拘束された骨組内柱の単独座屈と系の連成座屈の関係やそれらの座屈長さ係数の近似評価法を論じている．その過程で，表 2 の式(T8.1)を提示している．この式は，Ω_1 等に係る係数を，遺伝的アルゴリズムを用いて誤差の絶対値が小さくなるように最適化解析を行い，さらに誤差が正（座屈長さ係数が真のものより大きい）となるように努めたものである．誤差は-0.07～0.95%である [9]．

2.2.4　文献 10)「水平荷重を受ける多層多スパン平面骨組の弾性座屈性状の考察と柱の座屈長さ算定手法の提案（高田・多田・向出, 2015）」

文献 10)では，両端に回転ばねが付いた柱に対して，たわみ曲線を部材中央で分けた 2 つの 3 次曲線で近似し，仮想仕事の原理を適用して座屈荷重を算定している．表 2 の式(T9.1)は文献 10)の座屈荷重式を座屈長さ係数γと G ファクタを用いて表したものである．正解の座屈長さ係数に対する相対誤差は-3.72～-0.44%である [9]．

2.2.5　文献 9)「水平荷重による柱軸力を受ける鋼構造ラーメン骨組中の柱における弾性座屈性状の考察と座屈軸力算定手法の提案（高田, 2014）」

文献 9)では文献 10)の式に対して，誤差ができるだけ小さく，かつ座屈長さ係数を正解よりも大きくなるように係数を調節したもので，正解の座屈長さ係数に対する相対誤差は 0.01～0.49%である [9]．

2.3　補剛材のついた節点移動のある均等骨組

2.3.1　文献 5)「均等なブレース付き骨組の柱材の実用座屈長さ評価式（城戸・津田, 2007）」

文献 5)では，均等なブレース付き骨組の座屈荷重および座屈長さ係数をエネルギ法に基づき提示している．座屈長さ係数評価式は表 3 の式(T11.1)であり，式中の k_H は無次元水平剛性で，下式(3)で定義される．式(3)右辺の $\overline{K}$ はブレースの基準水平剛性で，式(4)で定義される，K_h は層のブレースの水平剛性の総和である．

表 2　節点移動のない場合

番号	文献	座屈長さ係数評価式
1	文献2)	$\frac{G_A G_B}{4}\left(\frac{\pi}{\gamma}\right)^2+\frac{G_A+G_B}{2}\left(1-\frac{\frac{\pi}{\gamma}}{\tan\left(\frac{\pi}{\gamma}\right)}\right)+\frac{2\tan\left(\frac{\pi}{2\gamma}\right)}{\frac{\pi}{\gamma}}=1$ (T6.1)
2	文献4) 津田 (2002)	$\gamma=\frac{\pi}{\sqrt{330}}\cdot\sqrt{\frac{1679130G_A^4G_B^4+1733400G_A^3G_B^3(G_A+G_B)+749736G_A^2G_B^2(G_A^2+G_B^2)+1642383G_A^3G_B^3+158976G_AG_B(G_A^3+G_B^3)+}{50220G_A^4G_B^4+72198G_A^3G_B^3(G_A+G_B)+37260G_A^2G_B^2(G_A^2+G_B^2)+95256G_A^3G_B^3+8904G_AG_B(G_A^3+G_B^3)+}$ $\frac{661869G_A^2G_B^2(G_A+G_B)+158976G_AG_B(G_A^3+G_B^3)+661869G_A^2G_B^2(G_A+G_B)+13824(G_A^4+G_B^4)+132720G_AG_B(G_A^2+G_B^2)+}{45819G_A^2G_B^2(G_A+G_B)+848(G_A^4+G_B^4)+10340G_AG_B(G_A^2+G_B^2)+20658G_A^2G_B^2+940(G_A^3+G_B^3)+4416G_AG_B(G_A+G_B)+}$ (T7.1) $\frac{251382G_A^2G_B^2+251382G_A^2G_B^2+11060(G_A^3+G_B^3)+48000G_AG_B(G_A+G_B)+8775G_AG_B+3840(G_A^2+G_B^2)+675(G_A+G_B)+50}{900G_AG_B+384(G_A^2+G_B^2)+75(G_A+G_B)+6}}$ $\gamma_{FIX}=\frac{\pi}{\sqrt{330}}\cdot\sqrt{\frac{13824G_B^4+11060G_B^3+3840G_B^2+675G_B+50}{848G_B^4+940G_B^3+384G_B^2+75G_B+6}}$ (T7.2) $\gamma_{PIN}=\frac{\pi}{\sqrt{330}}\cdot\sqrt{\frac{1679130G_B^4+1733400G_B^3+749736G_B^2+158976G_B+13824}{50220G_B^4+72198G_B^3+37260G_B^2+8904G_B+848}}$ (T7.3)
3	文献8) 王 五十嵐 (2011)	$\gamma=0.5+0.258\Omega_1-0.165{\Omega_1}^2+0.0534{\Omega_1}^3+\left(0.26\Omega_1-0.12{\Omega_1}^2+0.047{\Omega_1}^3\right)\left(1.72\frac{\Omega_2}{\Omega_1}-1.33\left(\frac{\Omega_2}{\Omega_1}\right)^2+0.61\left(\frac{\Omega_2}{\Omega_1}\right)^3\right)$ (T8.1) $\Omega_1=\tan^{-1}\{\max(G_A,G_B)\}$ (T8.2)　$\Omega_2=\tan^{-1}\{\min(G_A,G_B)\}$ (T8.3)
4	文献10) 高田 多田 向出 (2015)	$\gamma=\frac{\pi}{2\sqrt{10}}\cdot\sqrt{\frac{(2+7G_A)(2+7G_B)-17G_A\cdot G_B+16G_A\cdot G_B\left(\eta^*+\frac{1}{\eta^*}\right)}{(2+5G_A)(2+5G_B)-17G_A\cdot G_B+4G_A\cdot G_B\left(\eta^*+\frac{1}{\eta^*}\right)}}$ (T9.1)　$\eta^*=\frac{\frac{2}{G_B}+4}{\frac{2}{G_A}+4}$ (T9.2)
5	文献9) 高田 (2014)	$\gamma=\frac{\pi}{\sqrt{39.4}}\cdot\sqrt{\frac{(2+7G_A)(2+7G_B)-18.9G_A\cdot G_B+17G_A\cdot G_B\left(\eta^*+\frac{1}{\eta^*}\right)}{(2+5G_A)(2+5G_B)-15.1G_A\cdot G_B+3G_A\cdot G_B\left(\eta^*+\frac{1}{\eta^*}\right)}}$ (T10.1)　$\eta^*=\frac{\frac{2}{G_B}+4}{\frac{2}{G_A}+4}$ (T10.2)

$$k_H=\frac{K_h}{K} \quad (3), \qquad \overline{K}=(n+1)\frac{\pi^2 EI_c}{h^3} \quad (4)$$

ここに，nはスパン数，EI_cは柱の曲げ剛性，hは階高である．

3．*G* ファクタ法により得られる座屈長さ係数の意味と活用法

本章では，*G* ファクタ法を用いて得られる座屈長さ係数に関して，その意味や活用法について整理する．なお，式や図表の表記は，原論文を参照する際に混乱が生じないように，できるだけ原論文のものを用いているが，本論文の趣旨にしたがって，本論文の表記に合わせたものや簡略化したものもある．

3.1　節点移動がある場合の座屈長さ係数の意味について [11)]

G ファクタ法は前提として均等な骨組を対象としたものであるが，座屈長さ係数を評価しようとする座屈検討柱の上下の柱，取りつく梁の剛比が与えられ，骨組として節点が横移動するかしないかが判定できれば，節点が横移動する場合は表 1 に示す各式で，横移動しない場合は表 2 に示す各式を用いれば，機械的に座屈長さ係数を算定できる．鋼構造座屈設計指針(1980)[11)]では，前提条件に近い場合は *G* ファクタ法による座屈長さ係数は良い精度を持ち，そうでない場合にはやや精度が劣るとしているとしていることに問題は無いが，*G* ファクタ法による座屈長さ係数を別の観点から考えると，3.3 節，3.4 節で示す層の座屈に関連したものと考えることができる（層の座屈に関しては文献 14）を参照されたい）．すなわち，多層骨組で柱脚のみ固定，ピンと異なる骨組の 2 層以上の *G* ファクタ法による座屈長さ係数は全く同じになることから，*G* ファクタ法は層の座屈に関連した座屈長さ係数を与えていると考えられる（付録 2，付録 3 参照）．

3.2　均等な骨組の中の柱の PΔ効果によるモーメントや部材角の拡大係数 [17), 18)]

均等な骨組の中の柱に対して，圧縮力 *P* と水平力によって生じる水平変位*Δ*により PΔ効果が生じ，圧縮力のない場合に比べて，柱に生じる部材角や曲げモーメントは大きくなる．均等な骨組において，*G* ファクタを用いて，軸力の作用しない場合に対する柱の部

表 3　補剛材がついて節点移動がある場合

番号	文献	座屈長さ係数評価式
1	文献5) 城戸 津田 (2007)	$\gamma_{SWY}=\sqrt{\dfrac{5G_A^2G_B^2+20G_AG_B(G_A+G_B)+24(G_A^2+G_B^2)+63(G_AG_B+G_A+G_B)+54}{\frac{1}{2}\pi^2k_HG_A^2G_B^2+(3+2\pi^2k_H)G_AG_B(G_A+G_B)+(30+7\pi^2k_H)G_AG_B+(6+2\pi^2k_H)(G_A^2+G_B^2)+(45+6\pi^2k_H)(G_A+G_B)+(54+\frac{9}{2}\pi^2k_H)}}$ (T11.1) $\gamma_{FIX}=\sqrt{\dfrac{24G_B^2+63G_B+54}{(6+2\pi^2k_H)G_B^2+(45+6\pi^2k_H)G_B+(54+\frac{9}{2}\pi^2k_H)}}$ (T11.2)　$\gamma_{PIN}=\sqrt{\dfrac{5G_B^2+20G_B+24}{\frac{1}{2}\pi^2k_HG_B^2+(3+2\pi^2k_H)G_B+(6+2\pi^2k_H)}}$ (T11.3)

$$a_m=\frac{1}{1-\frac{1}{\pi^2}\cdot\frac{5G_A^2G_B^2+20G_AG_B(G_A+G_B)+24(G_A^2+G_B^2)+63(G_AG_B+G_A+G_B)+54}{3G_AG_B(G_A+G_B)+30G_AG_B+6(G_A^2+G_B^2)+45(G_A+G_B)+54}\cdot Z^2} \tag{5}$$

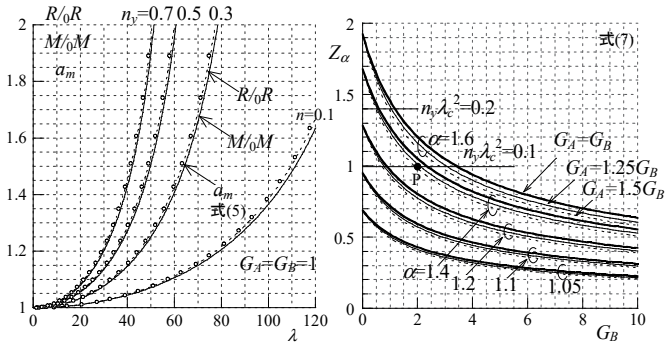
$$Z_\alpha=\sqrt{\frac{Ph_c^{\,2}}{EI_c}}\le\pi\sqrt{\frac{3G_AG_B(G_A+G_B)+30G_AG_B+6(G_A^2+G_B^2)+45(G_A+G_B)+54}{5G_A^2G_B^2+20G_AG_B(G_A+G_B)+24(G_A^2+G_B^2)+63(G_AG_B+G_A+G_B)+54}}\cdot\sqrt{\frac{\alpha-1}{\alpha}} \tag{7}$$

材角，曲げモーメントの拡大係数 a_m を評価できることを文献 17)で示している．すなわち拡大係数 a_m として，式(5)を示している．式(5)中の G_A，G_B は式(T1.2)，式(T1.3)で計算される G ファクタである．また，Z は柱剛性パラメータであり，次式で定義される．

$$Z=\sqrt{\frac{Ph_c^{\,2}}{EI_c}} \tag{6}$$

式(6)右辺の P は当該柱の軸力，h_c は材長，E はヤング係数，I_c は断面 2 次モーメントである．また，拡大係数がα以下となるための柱剛性パラメータの制限値 Z_α を式(7)のように提示している．文献 18)では，ブレース付き均等骨組に対して拡大係数 a_m や制限値 Z_α の評価式を示している．

図 4(a)には，柱の細長比λと軸力がない場合の柱部材角 ${}_0R$ に対する軸力のある場合の部材角 R の比 $R/{}_0R$，軸力がない場合の曲げモーメント ${}_0M$ に対する軸力のある場合の曲げモーメント M の比 $M/{}_0M$，式(5)で示す拡大係数 a_m の関係を示している．図中の n_y は柱の軸力比（=作用軸力/降伏軸力）であり，G ファクタが G_A=G_B=1 の場合を示している．図より式(5)の a_m で精度良く $R/{}_0R$ や $M/{}_0M$ を評価できることが分かる．図 4(b)には，G ファクタ G_B と拡大係数がα以下となるための制限値 Z_α の関係を示している．なお，図中の λ_c は基準化細長比である．



(a) 拡大係 z 数 a_m と $R/{}_0R$, $M/{}_0M$ の比較　(b) 拡大係数をαにするための柱剛性パラメータ Z_α

図 4　部材角や曲げモーメントの拡大係数 [17]

3.3　1 層多スパン骨組の座屈・層の座屈（坂本の方法）[11), 12)]

坂本順博士は，文献 11)で，不均等な一層多スパン骨組に対して G ファクタ法により算定した座屈長さ係数を第 1 近似として精度を向上させる方法を示している（文献 13)では，この方法を坂本の方法と呼んでいる）．文献 11)では，図 5 に示す 1 層多スパン骨組の 0 通りの柱の座屈荷重 P_{cr} を，下式のように示している．ここに，$\widetilde{\gamma}_i$（i=0, 1, ... s）は i 通りの柱の G ファクタ法により求めた座屈長さ係数である．

$$P_{cr}=\frac{\left(1/\widetilde{\gamma}_0\right)^2+\beta_1\left(1/\widetilde{\gamma}_1\right)^2+\cdots+\beta_s\left(1/\widetilde{\gamma}_s\right)^2}{1+\alpha_1+\cdots+\alpha_s}\cdot\frac{\pi^2EI_c}{h^2} \tag{8}$$

上式(8)の両辺に（$1+\alpha_1+\cdots+\alpha_s$）を乗じて式(9)のように表記すると，座屈するときの一層多スパン骨組の柱に作用している圧縮力の総和は G ファクタ法を用いて骨組内の各柱の座屈長さ係数を算定し，各柱の座屈荷重を加えたものに等しいことを意味していること

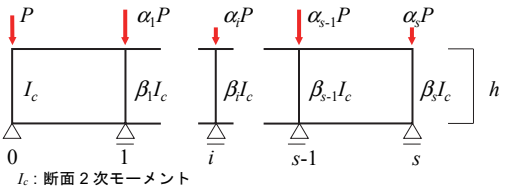
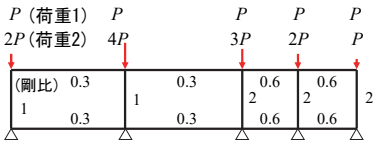
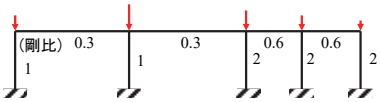


図 5　不均等 1 層多スパン骨組 [11]



(a) 基礎梁付き骨組



(b) 柱脚固定骨組

基礎梁付き骨組

	固有値解析	坂本の方法
荷重1	0.361	0.362
荷重2	0.359	

柱脚固定骨組

	固有値解析	坂本の方法
荷重1	0.577	0.582
荷重2	0.575	

数値は座屈時の柱の圧縮力の総和を各柱のオイラー荷重の総和で除したもの

図 6　不均等骨組 [12]

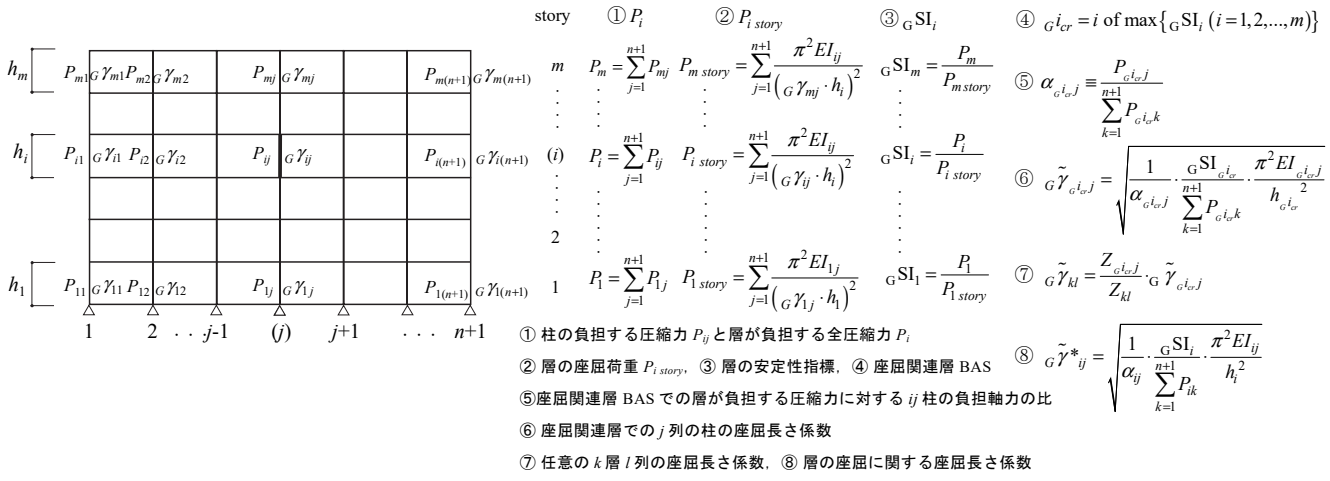


図 7　構造システムの全体座屈の座屈長さ係数(⑦)と層の座屈に関する座屈長さ係数(⑧)[14), 21)]

がわかる．

$$\left(1+\alpha_1+\cdots+\alpha_s\right)P_{cr}=\frac{\pi^2 EI_c}{\left(\tilde{\gamma}_0 h\right)^2}+\frac{\pi^2 E\beta_1\cdot I_c}{\left(\tilde{\gamma}_1 h\right)^2}+\cdots+\frac{\pi^2 E\beta_s\cdot I_c}{\left(\tilde{\gamma}_s h\right)^2} \tag{9}$$

また，上式より各柱の座屈長さ係数は下式として得られる．

$$\gamma_0=\sqrt{\frac{1+\alpha_1+\cdots+\alpha_s}{1+\beta_1\left(\tilde{\gamma}_0/\tilde{\gamma}_1\right)^2+\cdots+\beta_s\left(\tilde{\gamma}_0/\tilde{\gamma}_s\right)^2}}\cdot\tilde{\gamma}_0 \tag{10}$$

$$\gamma_i=\sqrt{\frac{\beta_i}{\alpha_i}}\cdot\gamma_0 \qquad (i=1,\,2,\,\ldots\,s) \tag{11}$$

文献 13)で鈴木・森野らは，不均等長方形骨組の座屈荷重略算法として坂本の方法と Wood の方法を組合せた算定法を提示している．坂本の方法は，層の座屈荷重を坂本の方法を用いて算定し，それと等しい左右対称な多層 1 スパン骨組を作ることに用いられている．

文献 12)で高田は，図 6 に示すような骨組に対して坂本の方法を適用し，精度良く評価できることを示している．すなわち図 6 に示す基礎梁付き骨組，柱脚固定の骨組に対して，柱頭部に作用する圧縮力が各柱一定の場合（荷重 1）と梁部材長に比例した圧縮力を左右の柱に等分配した場合（荷重 2）の固有値解析による座屈時の柱軸力の総和は柱軸力分布によらずほぼ一定であること，また坂本の方法による柱軸力の総和は固有値解析によるものと良い対応をしていることを報告している（図 6 中の表参照）．しかしながら，これらは事例的な研究であるため，柱脚の固定度，骨組を構成する部材の剛比，圧縮力分布などを変化させた検討が必要であろう．

3.4　多層骨組の座屈・SI 法 [14), 21)]

文献 14)，21)で筆者らは SI 法と呼称した方法に関連して多層骨組の座屈長さ係数を，*G* ファクタを用いて算定している（付録 4 参照）．SI 法は建物に水平力を与え，線形 1 次解析結果を用いて，安定性指標（SI）を算定し，SI=1.0 とした座屈条件式より座屈長さ係数を算定するものであるが，*G* ファクタを用いると上記 1 次解析をせずに安定性指標が算定できる．安定性指標 SI は上記 1 次解析による層モーメントに対する PΔモーメントの比として定義されるが，ほかには層の座屈荷重（≡座屈時の層の柱の負担軸力の総和）に対する層の柱の負担軸力の総和としても良い [21)]．層の座屈荷重は 3.3 節で示した坂本の方法で算定できる．すなわち，*G* ファクタ法による各柱の座屈長さ係数を用いて，層の座屈荷重を坂本の方法を用いて算定し，さらに座屈関連層(BAS (Buckling associated story))と言う概念を用いて，構造システムの全体座屈としての座屈荷重の算定法を文献 14)では示している．

図 7 に示す *m* 層 *n* スパンの骨組の層の座屈荷重は坂本の方法を用いて式(12)で算定できる．式(12)右辺の I_{ij} は *i* 層 *j* 列の柱の断面 2 次モーメント，${}_{G}\gamma_{ij}$ は *G* ファクタ法で算定した *i* 層 *j* 列の柱の座屈長さ係数，h_i は *i* 層の階高である．

$$P_{i_{story}}=\sum_{j=1}^{n+1}\frac{\pi^2 EI_{ij}}{\left({}_{G}\gamma_{ij}\cdot h_i\right)^2} \qquad (i=1,\,2,\,\ldots,\,m) \tag{12}$$

層の座屈荷重が求まると，下式で *i* 層の安定性指標 ${}_{\mathrm{G}}\mathrm{SI}_i$ が算定できる（図 7 中の①～③を参照）．

$${}_{\mathrm{G}}\mathrm{SI}_i=\frac{P_i}{P_{i_{story}}}=\frac{\sum_{j=1}^{n+1}P_{ij}}{P_{i_{story}}} \qquad (i=1,\,2,\,\ldots,\,m) \tag{13}$$

各層の安定性指標を比較して，安定性指標が最大となる層（${}_{G}i_{cr}$）を座屈関連層（BAS）と呼んだ（図 7 の④参照）．骨組の座屈に関する座屈長さ係数は，座屈関連層（${}_{G}i_{cr}$ 層）の安定性指標 ${}_{\mathrm{G}}\mathrm{SI}_{{}_{G}i_{cr}}$ が 1.0 となることが座屈条件式となり，${}_{G}i_{cr}$ 層 *j* 通りの柱が負担する軸力 $P_{{}_{G}i_{cr}j}$ の ${}_{G}i_{cr}$ 層の全負担軸力 $P_{{}_{G}i_{cr}}$ に対する比を式(14)のように $\alpha_{{}_{G}i_{cr}j}$ とすると，座屈長さ係数の定義より，式(15)で座屈関連層の *j* 通りの柱の座屈長さ係数 ${}_{\mathrm{G}}\tilde{\gamma}_{{}_{G}i_{cr}j}$ が算定できる．

$$\alpha_{{}_{G}i_{cr}j}=\frac{P_{{}_{G}i_{cr}j}}{\sum_{k=1}^{n+1}P_{{}_{G}i_{cr}k}} \qquad (j=1,\,2,\,\ldots,\,n+1) \tag{14}$$

$${}_{\mathrm{G}}\tilde{\gamma}_{{}_{G}i_{cr}j}=\sqrt{\frac{1}{\alpha_{{}_{G}i_{cr}j}}\cdot\frac{{}_{\mathrm{G}}\mathrm{SI}_{{}_{G}i_{cr}}}{\sum_{k=1}^{n+1}P_{{}_{G}i_{cr}k}}\cdot\frac{\pi^2 EI_{{}_{G}i_{cr}j}}{h_{{}_{G}i_{cr}}^2}} \qquad (j=1,\,2,\,\ldots,\,n+1) \tag{15}$$

また，*k* 層 *l* 通りの柱の座屈長さ係数 ${}_{\mathrm{G}}\tilde{\gamma}_{kl}$ は下式で表せる（図 7 の⑤～⑦参照）．

$${}_{\mathrm{G}}\tilde{\gamma}_{kl}=\frac{\pi}{Z_{kl}}=\frac{\pi}{Z_{{}_{G}i_{cr}j}}\cdot\frac{Z_{{}_{G}i_{cr}j}}{Z_{kl}}=\frac{Z_{{}_{G}i_{cr}j}}{Z_{kl}}\cdot{}_{\mathrm{G}}\tilde{\gamma}_{{}_{G}i_{cr}j} \tag{16}$$

上式の $Z_{{}_{G}i_{cr}j}$，Z_{kl} はそれぞれ，${}_{G}i_{cr}$ 層 *j* 列，*k* 層 *l* 列の柱剛性パラメータである．

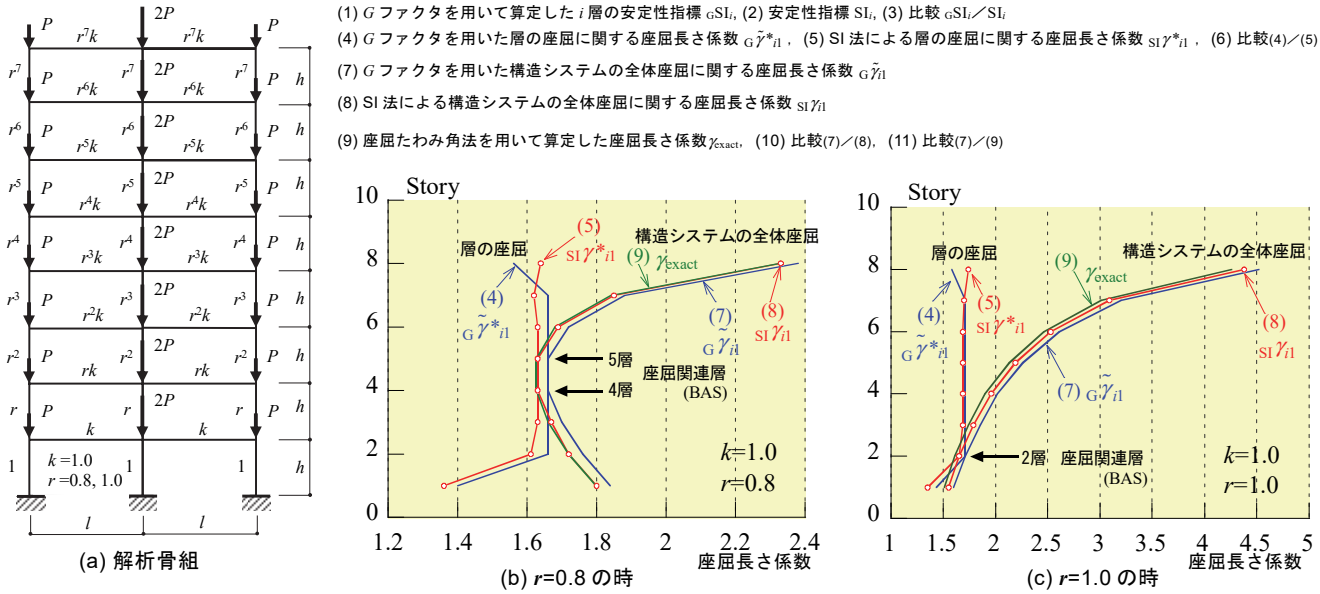


図 8　*G* ファクタ法による座屈長さ係数を用いた多層多スパン骨組の座屈長さ係数 [14]

表 4 *G* ファクタ法による座屈長さ係数を用いた多層多スパン骨組の座屈長さ係数 [14]

(a) r=0.8 の場合

Story i	Stability index			Buckling of the story			Buckling of the overall structural system				
	(1) $_G\mathrm{SI}_i$	(2) SI_i	(3)(=(1)/(2)) $_G\mathrm{SI}_i/\mathrm{SI}_i$	(4) $_G\tilde{\gamma}^*_{i1}$	(5) $_{SI}\gamma^*_{i1}$	(6)(=(4)/(5)) $_G\tilde{\gamma}^*_{i1}/_{SI}\gamma^*_{i1}$	(7) $_G\tilde{\gamma}_{i1}$	(8) $_{SI}\gamma_{i1}$	(9) γ_{exact}	(10)(=(7)/(8)) $_G\tilde{\gamma}_{i1}/_{SI}\gamma_{i1}$	(11)(=(7)/(9)) $_G\tilde{\gamma}_{i1}/\gamma_{exact}$
8	0.578	0.639	0.904	1.56	1.64	0.950	2.38	2.33	2.33		
7	1.05	1.00	1.05	1.66	1.62	1.02	1.88	1.85	1.84		
6	1.26	1.21	1.04	1.66	1.63	1.02	1.72	1.69	1.68		
5	1.35	1.30	1.04	1.66	1.63	1.02	1.66	1.63	1.63	1.02	1.02
4	1.35	1.30	1.04	1.66	1.63	1.02	1.66	1.63	1.63		
3	1.29	1.25	1.04	1.66	1.63	1.02	1.70	1.67	1.66		
2	1.21	1.13	1.07	1.66	1.61	1.03	1.76	1.72	1.72		
1	0.788	0.739	1.07	1.40	1.36	1.03	1.84	1.80	1.80		

(b) r=1.0 の場合

Story i	Stability index			Buckling of the story			Buckling of the overall structural system				
	(1) $_G\mathrm{SI}_i$	(2) SI_i	(3)(=(1)/(2)) $_G\mathrm{SI}_i/\mathrm{SI}_i$	(4) $_G\tilde{\gamma}^*_{i1}$	(5) $_{SI}\gamma^*_{i1}$	(6)(=(4)/(5)) $_G\tilde{\gamma}^*_{i1}/_{SI}\gamma^*_{i1}$	(7) $_G\tilde{\gamma}_{i1}$	(8) $_{SI}\gamma_{i1}$	(9) γ_{exact}	(10)(=(7)/(8)) $_G\tilde{\gamma}_{i1}/_{SI}\gamma_{i1}$	(11)(=(7)/(9)) $_G\tilde{\gamma}_{i1}/\gamma_{exact}$
8	0.125	0.151	0.825	1.58	1.74	0.908	4.52	4.38	4.26		
7	0.292	0.288	1.02	1.71	1.70	1.01	3.20	3.09	3.01		
6	0.439	0.430	1.02	1.71	1.69	1.01	2.61	2.53	2.46		
5	0.585	0.572	1.02	1.71	1.69	1.01	2.26	2.19	2.13	1.03	1.06
4	0.731	0.714	1.02	1.71	1.69	1.01	2.02	1.96	1.90		
3	0.877	0.852	1.03	1.71	1.69	1.01	1.85	1.79	1.74		
2	1.02	0.958	1.07	1.71	1.65	1.03	1.71	1.65	1.61		
1	0.812	0.731	1.11	1.43	1.35	1.05	1.60	1.55	1.51		

層の座屈に関する座屈長さ係数 $_G\tilde{\gamma}^*_{ij}$ は，各層の安定性指標 $_G\mathrm{SI}_i$ を 1.0 とすることにより，下式で計算できる（図 7 の⑧参照）．

$$ {}_G\tilde{\gamma}^*_{ij} = \sqrt{\frac{1}{\alpha_{ij}} \cdot \frac{{}_G\mathrm{SI}_i}{\sum_{k=1}^{n+1} P_{ik}} \cdot \frac{\pi^2 EI_{ij}}{{h_i}^2}} \tag{17} $$

図 8(a)に示す 8 層 2 スパン骨組で，1 層の柱および梁の剛比 k が 1.0，剛比低減係数 r が 0.8 と 1.0 に対して，図 8(b)，(c)に層の座屈に関する座屈長さ係数 $_G\tilde{\gamma}^*_{i1}$，構造システムの全体座屈に関する座屈長さ係数 $_G\tilde{\gamma}_{i1}$ を，SI 法で算定した $_{SI}\gamma^*_{i1}$（層の座屈），$_{SI}\gamma_{i1}$（全体座屈），座屈たわみ角法による正解 γ_{exact} とともに示す（座屈長さ係数は側柱の座屈長さ係数である）．表 4 には，上記座屈長さ係数に加えて，安定性指標 $_G\mathrm{SI}_i$，SI 法による安定性指標 SI_i の値，また各安定性指標間，各座屈長さ係数間の比較を示している（SI 法での水平力は図 8(a)の荷重に対応した各層の支える軸力分布と層せん断力分布が同一となるように与えた場合である [14]）．

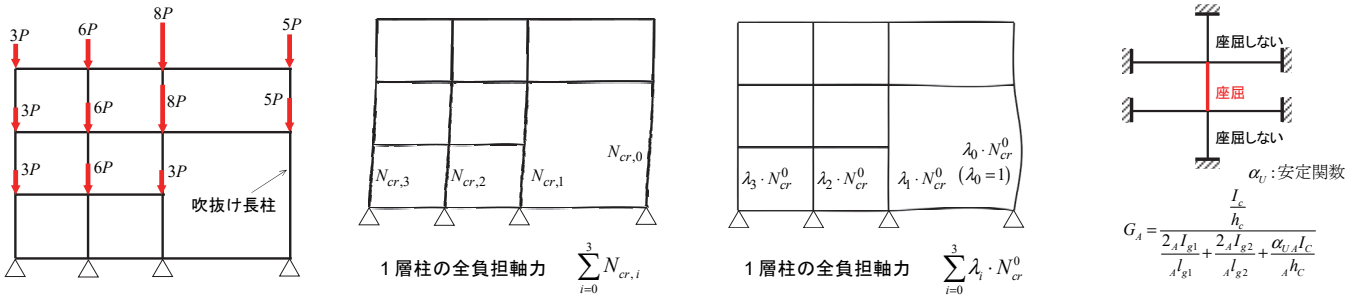
図 8(b)，(c)より層の座屈，全体座屈ともに *G* ファクタを用いた座屈長さ係数は SI 法によるもの，正解と良く対応していることが観察される．表 4 の(11)列より，全体座屈に関する座屈長さ係数 $_G\tilde{\gamma}_{i1}$ は，正解と比較して剛比低減係数 r が 0.8，1.0 に対して 2%，6%程度の差で評価できていることが分かる．また，座屈関連層(BAS)は表 4 の(1)列に示すように r が 0.8，1.0 に対して，それぞれ 4 層・5 層と 2 層となるが，これらは表 4 の(2)列に示す SI 法による座屈関連層と一致している．以上示したように，*G* ファクタと座屈関連層の概念を用いることにより，層の座屈や全体座屈に関する座屈長さ係数を概ね評価できることが分かる．

3.5　吹抜け層のある骨組の吹抜け長柱の座屈長さ係数 [15), 16)]

文献 15)で三谷らは吹抜け層のある骨組の吹抜け長柱の座屈長さ係数に関連して，図 9(a)に示す骨組に対して，図 9(b)に示すように 1 層の各柱の座屈荷重を節点移動があるとして *G* ファクタ法により算定した座屈長さ係数により求め，その時の 1 層柱の全負担軸力と，図 9(c)に示す吹抜け長柱の座屈荷重 N^0_{cr} を図 9(d)に示す（三谷らが提案した）その上下の柱および取りつく梁の座屈時の拘束度を考慮した *G* ファクタを用いることにより算定し，その時の 1 層の負担軸力を比較することにより，長柱の単独座屈と骨組全体の節点移動のある座屈のどちらが生じるか判定できるとしている．すなわち下式(18)を長柱が単独座屈する条件式として提示している．

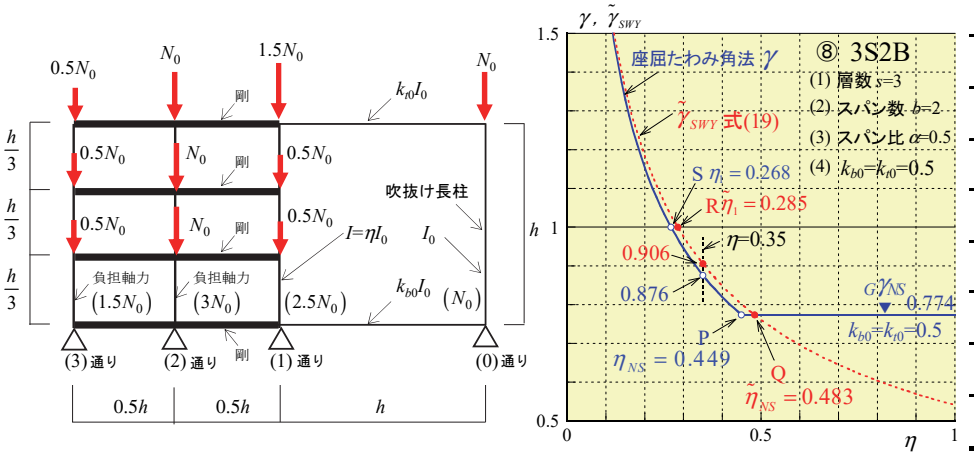
$$ \sum \lambda_i \cdot N^0_{cr} < \phi \sum N_{cr,i} \tag{18} $$

上式の λ_i は長柱の荷重係数を 1 とした時の各柱の荷重係数，$N^0{}_{cr}$ は三谷らが提案した方法による長柱の弾性座屈荷重，$N_{cr,i}$ は節点移動があるとしたときの *G* ファクタ法により算定した座屈長さ係数を用いた座屈荷重，ϕは低減係数である（低減係数ϕとして取るべき数値は論文中には記載されていない）．



(a) 吹抜け層のある骨組　(b) 節点移動ありの座屈モード　(c) 節点移動なしの座屈モード　(d) *G* ファクタ [15]

図 9　三谷らの研究 [15]



(a) 剛梁をもつ補剛骨組と吹抜け長柱　(b) 曲げ剛性比ηと座屈長さ係数の関係

特性点の値

1	*G* ファクタ法による座屈長さ係数 ${}_G\gamma_{SWY}$ 式(T1.1)	1.82
2	*G* ファクタ法による座屈長さ係数 ${}_G\gamma_{NS}$ 式(T6.1)	0.774
3	γ=1.0となる時の限界曲げ剛性比 η_1	0.268
4	$\tilde{\gamma}_{SWY}$=1.0となる時の限界曲げ剛性比 $\tilde{\eta}_1$	0.285
5	${}_G\gamma_{NS}$となる時の限界曲げ剛性比 η_{NS}	0.449
6	${}_G\gamma_{NS}$となる時の限界曲げ剛性比 $\tilde{\eta}_{NS}$	0.483
7	曲げ剛性比η=0.35の時の座屈長さ係数正解 γ	0.876
8	曲げ剛性比η=0.35の時の座屈長さ係数 $\tilde{\gamma}_{SWY}$ 式(19)	0.904

図 10　剛梁補剛骨組を持つ吹抜け長柱の座屈長さ係数 [16]

文献 16)で筆者らは文献 15)の方法を拡張坂本・三谷の方法と呼び，図 10(a)に示す補剛骨組が剛である場合の吹抜け長柱の座屈長さ係数 $\tilde{\gamma}_{SWY}$ を下式(19)のように提示している．ここにμ_{i1}は補剛骨組の中の 1 層 i 通りの柱の負担軸力の吹抜け長柱の負担軸力 N_0 に対する比であり，$\sum\mu_{i1}$ は補剛骨組の 1 層柱の負担軸力比の総和である．ηは吹抜け長柱の曲げ剛性に対する補剛骨組の柱の曲げ剛性の比，s は補剛骨組の層数，b は補剛骨組のスパン数（b+1 は柱の数），${}_G\gamma_{SWY}$は節点移動があるとして *G* ファクタ法により求めた吹抜け長柱の座屈長さ係数である．

$$\tilde{\gamma}_{SWY} = \sqrt{\frac{1+\sum_{i=1}^{b+1}\mu_{i1}}{\eta \cdot s^2 \cdot (b+1) + \frac{1}{{}_G\gamma_{SWY}{}^2}}} \qquad (19)$$

式(19)による座屈長さ係数 $\tilde{\gamma}_{SWY}$ と正解γの比較を図 10(b)に示す．図 10(a)では，$\sum\mu_{i1}$ =7，s=3，b=2，${}_G\gamma_{SWY}$=1.822(式(T1.1)による)，である．図 10(b)の赤点線で式(19)より算定した座屈長さ係数 $\tilde{\gamma}_{SWY}$ と曲げ剛性比η (=EI/EI_0)の関係を，青実線で座屈たわみ角法を用いて算定した座屈長さ係数γとη の関係を示している．図中の点 Q より曲げ剛性比が小さい範囲で，式(19)で精度良く正解の座屈長さ係数を評価できていることが分かる．座屈たわみ角法による座屈長さ係数γは図中の点 P での曲げ剛性比η_{NS} より大きな曲げ剛性比では座屈長さ係数γは一定となる．しかしながら，式(19)は柱剛性比ηが無限大になると 0 になる．これは節点移動が生じる座屈モードのみを考えていることに起因し，実際には節点移動のない座屈となり座屈たわみ角法での算定結果のように座屈長さ係数には下限がある．座屈長さ係数の下限については 3.7 項で示す．

今後の課題として，梁が剛でない場合や，吹抜け長柱の上に柱が存在する場合，吹抜け長柱が複数本存在する場合などの拡張坂本・三谷の方法の適用可能性を検討する必要がある．

3.6　骨組の中の柱が節点移動しない場合 [22]

文献 22)で筆者らは，図 11(a)に示す回転ばねのついた圧縮材の曲げ座屈に関する隣接部材の影響について考察し，隣接圧縮材が座屈検討柱に及ぼす影響を回転拘束に置換した時の回転ばね剛性を考慮すると，座屈検討柱の材端には負の回転ばね剛性を持つ場合があり，その時，*G* ファクタは負の値となること，図 11(b)に示すように *G* ファクタが負となる場合でも式(T7.1)は適用できることを示している．また，一般的には節点移動のない場合には，座屈長さ係数は 1.0 以下と言われているが *G* ファクタが負となる場合には，1.0 を超える場合があることを示している．さらに，図 11(a)に示す AB 部材が BC 材に完全に拘束される「柱 AB 完全被拘束域」，BC 部材が完全に拘束される「柱 BC 完全被拘束域」，どちらでもない「同時座屈域」があること，これら 3 者の境界の限界曲げ剛性比ξの *G* ファクタを用いた算定法を示している．なお，図 11(b)と同様な図は文献 23)でも示されている．

3.7　補剛材・補剛骨組のついた節点移動のある骨組 [5), 24), 12), 25)]

文献 5)で筆者らは，均等なブレース付き多層多スパン骨組の座屈長さ係数を式(T11.1)のように提示した．また，文献 24)では指定

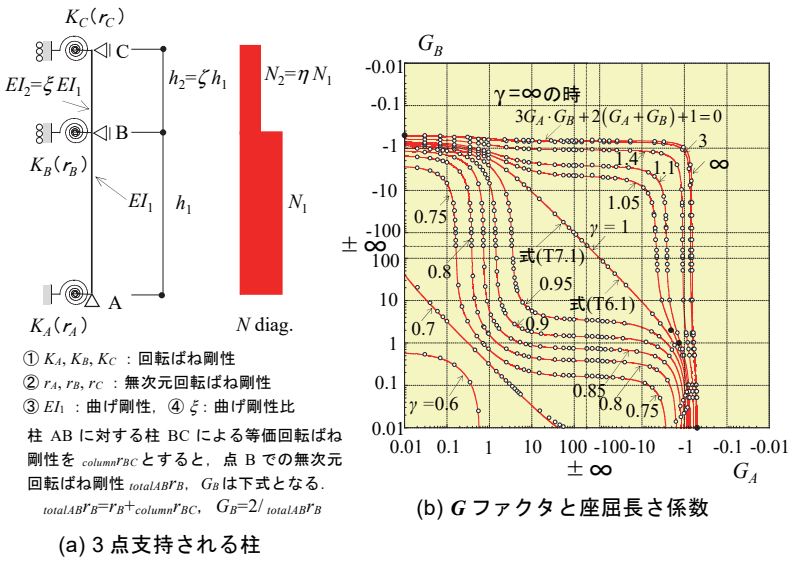


図 11　回転ばねのついた圧縮材の曲げ座屈に関する隣接部材の影響 [22]

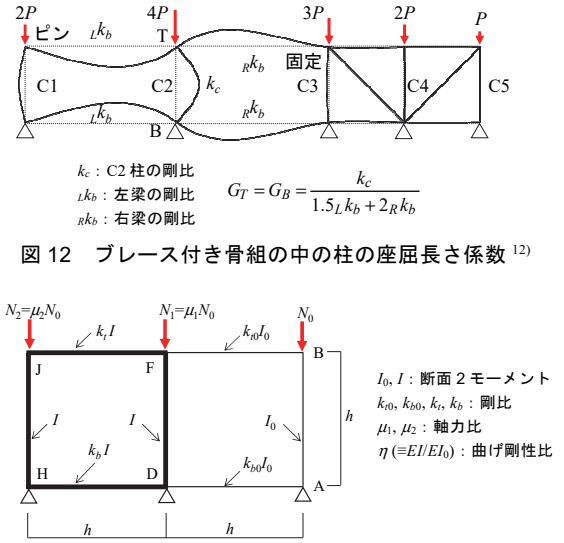


図 12　ブレース付き骨組の中の柱の座屈長さ係数 [12]

図 13　解析モデル [25]

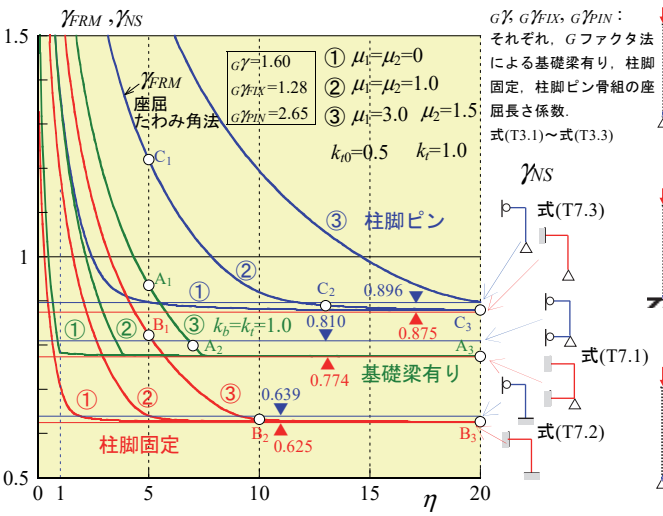


図 14　座屈長さ係数－曲げ剛性比関係 [25]

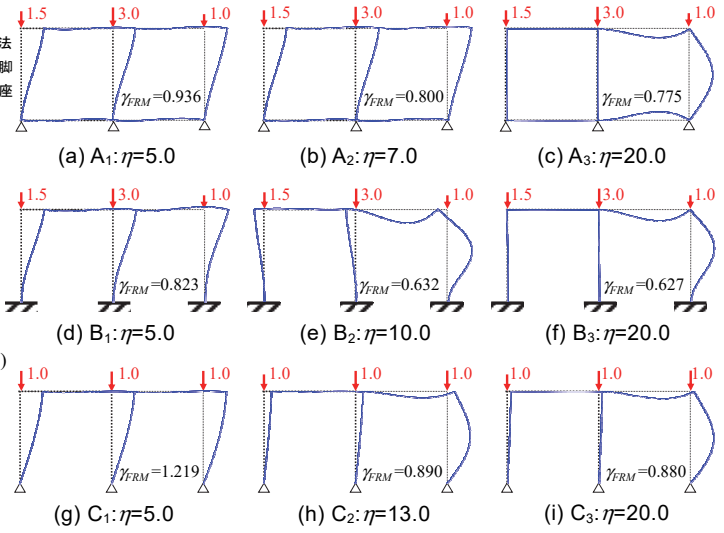


図 15　座屈モード [25]

した座屈長さ係数γを与えるためのブレースの必要剛性評価式を式(20)のように提示した．

$$ {}_{req}k_H=\frac{1}{\gamma^2\left[1+\dfrac{\left(\frac{\pi}{\gamma}\right)\sin\left(\frac{\pi}{\gamma}\right)(G_A+G_B)+12\left(1-\cos\left(\frac{\pi}{\gamma}\right)\right)}{\frac{1}{6}\left\{\left(\frac{\pi}{\gamma}\right)^2G_AG_B-36\right\}\left(\frac{\pi}{\gamma}\right)\sin\left(\frac{\pi}{\gamma}\right)-\left(\frac{\pi}{\gamma}\right)^2\cos\left(\frac{\pi}{\gamma}\right)(G_A+G_B)}\right]} \tag{20}$$

さらに，座屈長さ係数γ=1 とするためのブレースの必要剛性は，式(20)にγ=1.0 を代入することにより，下式となることを示している．

$$ {}_{req}k_H=\frac{1}{1+\dfrac{24}{\pi^2(G_A+G_B)}} \tag{21}$$

文献 12)で高田は，図 12 に示す骨組でブレースの水平剛性が大きくなると節点移動のない座屈モードを呈するが，その時の座屈荷重は，柱剛性パラメータの一番大きい C2 の柱に取りつく梁の座屈モードより，他端ピン，固定と想定できる場合は，G ファクタの算定に梁剛比を 1.5 倍，2.0 倍にして G ファクタ法により計算すれば固有値解析結果と良く対応することを報告している．

文献 25)で筆者らは，図 13 に示すように，吹抜け長柱(AB)に対する多層多スパンとなる座屈補剛骨組を骨組(DFJH)のように 1 層 1 スパンのロ形骨組に置換し，曲げ剛性比ηが大きくなった時の挙動を検討している．図 14 に図 13 に示す骨組の中の吹抜け長柱の座屈長さ係数(γ_{FRM}，γ_{NS})と曲げ剛性比ηの関係を示す．座屈長さ係数γ_{FRM}は座屈たわみ角法を用いた骨組としての座屈解析による吹抜け長柱の座屈長さ係数であり，γ_{NS}は吹抜け長柱は節点移動しないとし，柱頭柱脚にとりつく梁の拘束を G ファクタで考慮して算定した座屈長さ係数である．柱脚ピン，基礎梁有り，柱脚固定の各場合で補剛骨組の柱頭に作用する軸力比（μ_1, μ_2）を図 14 中に示す①～③の三通りで計算をしている．図 14 中の太線は座屈たわみ角法による結果である．太い実線①～③は大きく違うことから，補剛骨組の柱に作用する圧縮力が補剛骨組の水平剛性に大きく影響することが推

察される．図中の水平線は図 13 の点 D，点 F で取りつく梁（AD, BF）がピンあるいは固定の場合の *G* ファクタ法による式(T7.1)～(T7.3)で算定した座屈長さ係数である（ピンの場合は通常の *G* ファクタの 1/1.5 倍，固定の場合 1/2.0 倍となる）．曲げ剛性比ηが大きくなるにつれて梁遠端が固定の座屈長さ係数に近づくのが観察される．図 15 には図 14 中の A_1，A_2, . . . , C_3 点での座屈モードを示している（座屈モードは文献 26）によるソフトウエアにより求めた）．A_1，A_2，B_1，B_2，C_2 点のように骨組の節点が移動する場合でも，長柱の座屈長さ係数が 1.0 以下となる場合のあることが分かる．

4． 結

本論文は，いわゆる *G* ファクタや，*G* ファクタ法により算定された座屈長さ係数がどのように活用できるかを既往の論文に基づいて整理し，レビューしたものである．本論文の内容は以下のように纏められる．なお，活用方法の現況は下記項目の 3)～6), 8)となる．

1) *G* ファクタ法による座屈長さ係数を陽に表現している式を表 1 から表 3 に示した．
2) 節点移動のある場合の *G* ファクタ法による座屈長さ係数は，層の座屈に関連した座屈長さ係数を与えている（3.1 節参照）．
3) *G* ファクタを用いて，均等な骨組の中の柱の PΔ効果による曲げモーメントや部材角の拡大係数を算定できる（3.2 節参照）．
4) *G* ファクタ法による座屈長さ係数を用いて層の座屈荷重を算定できる（坂本の方法．3.3 節参照）．
5) 層の座屈荷重と座屈関連層の概念を用いることにより，*G* ファクタ法で算定した座屈長さ係数を元に，多層多スパン骨組の節点移動のある場合の座屈長さ係数を算定できる（3.4 節参照）．
6) 吹抜け層がある骨組が節点移動して座屈するときの座屈荷重を算定できる（拡張坂本・三谷の方法．3.5 節参照）．
7) 隣接部材の影響を考えると，回転ばね剛性が負となる場合があり，その時には *G* ファクタが負となる．また *G* ファクタが負となる場合も式(T7.1)が適用できる（3.6 節参照）．
8) 補剛材が付いた時の柱の座屈長さ係数や，指定した座屈長さ係数を与えるための必要剛性の評価式が提示されている．補剛骨組の水平剛性が大きくなり，節点移動がない場合の柱の座屈長さ係数は，柱剛性パラメータの大きい柱に取りつく梁の遠端の境界条件が予測できれば *G* ファクタを用いて算定できる．（3.7 節参照）．

参考文献

1) Architectural Institute of Japan: AIJ Standard for Allowable Stress Design of Steel Structures, 2019 (in Japanese) 日本建築学会：鋼構造許容応力度設計規準，2019
2) Architectural Institute of Japan: AIJ Recommendations for Plastic Design of Steel Structures, 2017 (in Japanese) 日本建築学会：鋼構造塑性設計指針・同解説，2017
3) Tsuda, K.: Simplified Design Formula for Effective Length of Column in Unbraced Frame, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No.545, pp.151-155, 2001 (in Japanese)
津田惠吾：節点移動のある均等な骨組の柱材の実用座屈長さ評価式，日本建築学会構造系論文集, No.545, pp.151-155, 2001 (https://doi.org/10.3130/aijs.66.151_2)
4) Tsuda, K.: Simplified Design Formula for Effective Length of Column in Braced Frame, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No.553, pp.129-134, 2002 (in Japanese)
津田惠吾：節点移動のない均等な骨組の柱材の実用座屈長さ評価式，日本建築学会構造系論文集，No.553，pp.129-134，2002 (https://doi.org/10.3130/aijs.67.129_1)
5) Kido, M. and Tsuda, K.: Simplified Design Formula for Effective Length of Column in Symmetrical Frames with Bracing, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No.611, pp.141-147, 2007 (in Japanese) 城戸將江，津田惠吾：均等なブレース付き骨組の柱材の実用座屈長さ評価式，日本建築学会構造系論文集，No.611，pp.141-147，2007 (https://doi.org/10.3130/aijs.72.141_1)
6) Tsuda, K., Kido, M. and Nishimura, T.: High Precision Formula for Effective Length Factor of Column in Unbraced Frame, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.90, No.830, pp.530-537, 2025 (in Japanese) 津田惠吾，城戸將江，西村拓真：節点移動のある均等な骨組の柱材の高精度座屈長さ係数評価式，日本建築学会構造系論文集, Vol.90, No.830，pp.530-537，2025 (https://doi.org/10.3130/aijs.90.530)
7) Shibata M.: Effective Length of a Long Column in the Well, Journal of Structural and Construction Engineering, (Transactions of AIJ), No.567, pp.133-139, 2003 (in Japanese) 柴田道生: 吹き抜け柱の座屈長さ，日本建築学会構造系論文集, No.567，pp.133-139，2003 (https://doi.org/10.3130/aijs.68.133)
8) Wang, T. and Ikarashi, K.: Evaluation of Single Buckling and Coupled Buckling Load of Columns in Braced Frame, Journal of Structural and Construction Engineering, (Transactions of AIJ), Vol.76, No.661, pp.675-684, 2011 (in Japanese)
王 韜，五十嵐規矩夫: 水平移動が拘束される骨組内柱の単独座屈及び連成座屈荷重の近似評価法，日本建築学会構造系論文集, Vol.76，No.661，pp.675-684，2011 (https://doi.org/10.3130/aijs.76.675)
9) Takada, A.: Consideration of Elastic Buckling Behavior of Columns in Steel Moment-resistance Frames Subjected to Column Axial Force due to Horizontal Load and Proposal of a Method to Calculate Buckling Axial Force, Osaka University dissertation, pp. (4)18-19, 2014 高田明伸：水平荷重による柱軸力を受ける鋼構造ラーメン骨組中の柱における弾性座屈性状の考察と座屈軸力算定手法の提案，大阪大学博士論文，pp. (4)18-19, 2014 (https://doi.org/10.18910/34418)
10) Takada, A., Tada, M. and Mukaide, S.: Study of Elastic Buckling of Plane Frames Subjected to Horizontal Loads and Proposal of a Calculation Method for Column Buckling Length, Steel Construction Engineering, Vol.22, No.88, pp.11-22, 2015 (in Japanese) 高田明伸, 多田元英, 向出静司：水平荷重を受ける多層多スパン平面骨組の弾性座屈性状の考察と柱の座屈長さ算定手法の提案，鋼構造論文集，第 22 巻，第 88 号，pp.11-22，2015 (https://doi.org/10.11273/jssc.22.88_11)
11) Architectural Institute of Japan: AIJ Recommendations for Stability Design of Steel Structures, 1980 (in Japanese)
日本建築学会：鋼構造座屈設計指針，1980
12) Takada, A.: Formula for Elastic Buckling Load of Columns in Non-uniform Frames with Relative Story Displacement, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.86, No. 780, pp.299-308, 2021 (in Japanese) 高田明伸：節点移動のある不均等骨組中の柱の弾性座屈時軸力評価式，日本建築学会構造系論文集，Vol. 86, No.780, pp.299-308, 2021 (https://doi.org/10.3130/aijs.86.299)
13) Suzuki, H., Morino, S. and Kawaguchi, J.: Approximate Method of Elastic Buckling Load Analysis for Irregular Rectangular Frames, Journal of Constructional Steel, Vol.1, pp.257-264, 1993 (in Japanese) 鈴木博子, 森野捷輔, 川口淳: 不均等長方形骨組の弾性座屈荷重略算法，鋼構造年次論文報告集, 第 1 巻, pp. 257-264, 1993
14) Kido, M. and Tsuda, K.: Stability Index and Effective Length Factor - Examination in two-span plane frames-, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.86, No.786, pp.1259-1270, 2021 (in Japanese)
城戸將江, 津田惠吾 :安定性指標と座屈長さ係数 －2 スパン平面骨組における検討－，日本建築学会構造系論文集, Vol. 86, No. 786, pp. 1259-1270, 2021 (https://doi.org/10.3130/aijs.86.1259)
15) Mitani, I., Katahira, T., Ohtani, Y. and Hayashihara, K.: Buckling Load of Rigid Frame with Slender Columns, Journal of Structural and Construction Engineering, (Transactions of AIJ), No.557, pp.161-166, 2002 (in Japanese)

三谷 勲，片平 崇，大谷恭弘，林原光司郎: 長柱が混在する純ラーメンの座屈荷重，日本建築学会構造系論文集，No.557，pp.161-166，2002 (https://doi.org/10.3130/aijs.67.161_1)
16) Tsuda, K., Kido, M. and Nishimura, T.: Effective Length Factor of Long Column Whose Bracing Frame has Rigid Beams and its Simplified Evaluation Method, Journal of Structural and Construction Engineering, (Transactions of AIJ), Vol.89, No.826, pp.1459-1470, 2024 (in Japanese) 津田惠吾，城戸將江，西村拓真：剛梁補剛骨組を持つ吹抜け長柱の座屈長さ係数とその実用算定法について，日本建築学会構造系論文集，Vol.89, No.826, pp.1459-1470, 2024 (https://doi.org/10.3130/aijs.89.1459)
17) Kido, M. and Tsuda, K.: Evaluation of PΔ Moment and the Effect on Deformation of Columns in Symmetrical Frames, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.85, No.767, pp.151-157, 2020 (in Japanese) 城戸將江，津田惠吾：均等な骨組における柱材の PΔ モーメントの評価と変形に及ぼす影響，日本建築学会構造系論文集，Vol. 85, No. 767, pp.151-157, 2020 (https://doi.org/10.3130/aijs.85.151)
18) Kido, M. and Tsuda, K.: Evaluation of PΔ Effect for Symmetrical Braced Frames, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.85, No.771, pp.771-778, 2020 (in Japanese) 城戸將江，津田惠吾：ブレース付き均等骨組における柱材の PΔ 効果の評価，日本建築学会構造系論文集， Vol. 85, No. 771, pp.771-778, 2020 (https://doi.org/10.3130/aijs.85.771)
19) Bruce G. Johnston: Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures Third Edition, 1976
20) American Society of Civil Engineers (ASCE): Effective Length and Notional Load Approaches for Assessing Frame Stability: Implications for American Steel Design, 1997
21) Kido, M. and Tsuda, K.: PΔ Effect and Effective Length Factor, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.85, No.776, pp.1325-1333, 2020 (in Japanese)
城戸將江，津田惠吾：PΔ 効果と座屈長さ係数，日本建築学会構造系論文集, Vol. 85, No. 776, pp. 1325-1333, 2020 (https://doi.org/10.3130/aijs.85.1325)
22) Kido, M., Nishimura, T. and Tsuda, K.: Effect of the Adjacent Member on the Flexural Buckling of Compression Member with Rotational Springs – Compressive member with supported at 3 points-, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.88, No.808, pp.1004-1015, 2023 (in Japanese)
城戸將江，西村拓真，津田惠吾：回転ばねのついた圧縮材の曲げ座屈に関する隣接部材の影響 －3 点支持された圧縮材－，日本建築学会構造系論文集, Vol.88, No.808, pp.1004-1015, 2023 (https://doi.org/10.3130/aijs.88.1004)
23) Russell, Q. B. and Donald, J. F.: Improved G-Factor Method for Evaluating Effective Lengths of Columns, J. Struct. Eng., pp.1341-1356, 1987 (https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1987)113:6(1341))
24) Kido, M. and Tsuda, K.: Required Bracing Stiffness to Give the Specified Effective Length -In symmetrical braced frames-, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No.619, pp.165-170, 2007 (in Japanese) 城戸將江，津田惠吾：指定した座屈長さを与えるためのブレースの必要水平剛性 －ブレース付き均等骨組の場合－，日本建築学会構造系論文集，No.619，pp.165-170，2007 (https://doi.org/10.3130/aijs.72.165_3)
25) Tsuda, K., Kido, M., and Nishimura, T.: Horizontal Stiffness of Bracing Frame and Effective Length Factor of Long Column in Atrium (Transactions of AIJ), Vol.89, No.820, pp.615-626, 2024 (in Japanese) 津田惠吾，城戸將江，西村拓真：補剛骨組の水平剛性と吹抜け長柱の座屈長さ係数 －ロ形の補剛骨組を用いた基礎的考察－，日本建築学会構造系論文集，Vol.89，No.820，pp.615-626，2024 (https://doi.org/10.3130/aijs.89.615)
26) Ziemian, R.D., McGuire, W. and Liu, S.W.: MASTAN2 version 5.1.26, 2022
27) Ohishi, K.: Buckling Length Factor for a n-story Single-bay Rectangular Rigid Frame Having Columns and Beams of Varying Moment of Inertia with Each Story, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Structures-I, pp.75-76, 1986 (in Japanese)
大石健次: n 層 1 スパン長方形ラーメンの座屈長さについて （柱，はりの剛度の層変化を考慮した場合），日本建築学会大会学術講演梗概集，構造 I, pp. 75-76, 1986

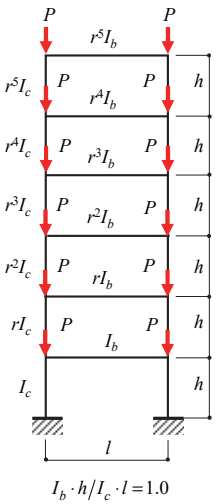
付録 1　*G* ファクタと *G* ファクタ法

表 1 の式(T1.2)，式(T1.3)で示される G_A，G_B を *G* ファクタと呼ぶ．また，節点移動のある場合は本文表 1 の式(T1.1)に基づいて，節点移動のない場合は本文表 2 の式(T6.1)に基づいて，座屈長さ係数を求める方法を *G* ファクタ法と呼ぶ．

付録 2　*G* ファクタ法による座屈長さ係数の意味

鋼構造座屈設計指針 [11](初版 1980)では，付図 1 の骨組に対して，付表 1 の座屈長さ係数を示し，*G* ファクタ法は「骨組の各柱材がそれ自身に載荷される軸荷重と材端拘束の下で座屈し，かつ，骨組の全柱材が同時的に座屈することを前提条件として導かれたものである」として，前提条件に近い r=0.8 の場合は *G* ファクタ法による座屈長さ係数は良い精度を持ち，そうでない場合（r=1.0）にはやや精度が劣るとしている．ところで，骨組の座屈に関して，本文式(6)に示す柱剛性パラメータ Z は各柱間に関係があり，座屈長さ係数はπ/Z であるから，座屈長さ係数もそれぞれの柱の間で関係があるが，*G* ファクタ法により得られた座屈長さ係数はあるべき柱間の関係とは全く無関係に算定される．

付図 1 のように 1 スパン多層骨組の各層の左右の柱が同じで，さらに負担



付図 1　1 スパン 6 層骨組

付表 1　*G* ファクタ法による座屈長さ係数 $_G\gamma$ と正解 γ の比較 [11]

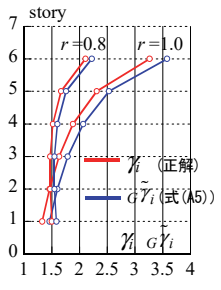
層	r=1.0		r=0.8	
	$_G\gamma$	γ	$_G\gamma$	γ
6	1.45	3.26	1.43	2.11
5	1.60	2.31	1.55	1.67
4	1.60	1.88	1.55	1.52
3	1.60	1.63	1.55	1.47
2	1.60	1.46	1.55	1.47
1	1.28	1.33	1.26	1.50

付表 2　付図 1 で柱脚がピンの場合の座屈長さ係数 $_G\gamma$ と正解 [27] γ の比較

層	r=1.0		r=0.8	
	$_G\gamma$	γ	$_G\gamma$	γ
6	1.45	5.68	1.43	3.27
5	1.60	4.01	1.55	2.58
4	1.60	3.28	1.55	2.36
3	1.60	2.84	1.55	2.28
2	1.60	2.54	1.55	2.28
1	2.63	2.32	2.57	2.33

付表 3　*G* ファクタ法による座屈長さ係数($_G\gamma$)を元に算定した座屈長さ係数($_G\tilde{\gamma}_i$)　$Z_i \left[\times\sqrt{\frac{Ph^2}{EI_c}}\right]$　$_G\mathrm{SI}_i \left[\times\frac{Ph^2}{\pi^2 EI_c}\right]$

層 i	r=1.0						r=0.8					
	$_G\gamma$	γ_i	$_G\mathrm{SI}_i$	Z_i	$_G\tilde{\gamma}_i$	$_G\tilde{\gamma}_i/\gamma_i$	$_G\gamma$	γ_i	$_G\mathrm{SI}_i$	Z_i	$_G\tilde{\gamma}_i$	$_G\tilde{\gamma}_i/\gamma_i$
6	1.45	3.26	2.10	1.00	3.58		1.43	2.11	6.24	1.75	2.22	
5	1.60	2.31	5.12	1.41	2.53		1.55	1.67	11.73	2.21	1.75	
4	1.60	1.88	7.68	1.73	2.07		1.55	1.52	14.08	2.42	1.60	
3	1.60	1.63	10.24	2.00	1.79	1.10	**1.55**	1.47	**15.02**	**2.50**	**1.55**	1.05
2	**1.60**	1.46	**12.80**	**2.24**	**1.60**		**1.55**	1.47	**15.02**	**2.50**	**1.55**	
1	1.28	1.33	9.83	2.45	1.46		1.26	1.50	9.53	2.45	1.58	



付図 2 座屈長さ係数の比較

軸力が同じ場合には，層の座屈としたときの座屈長さ係数と，G ファクタ法による座屈長さ係数は以下のように同じとなる．

G ファクタ法により求めた i 層の柱の座屈長さ係数を ${}_G\gamma_i$ とすると，層の座屈荷重 $P_{i\,story}$ は坂本の方法により，下式で得られる．I_c，I_b はそれぞれ 1 層の柱，梁の断面 2 次モーメントである．

$$P_{i\,story}=2\cdot\frac{\pi^2E\cdot\left(r^{i-1}\cdot I_c\right)}{\left({}_G\gamma_i\cdot h\right)^2} \qquad (i=1,\ldots,6) \qquad \text{(A1)}$$

i 層の安定性指標 ${}_G\mathrm{SI}_i$ を，i 層の座屈荷重 $P_{i\,story}$ に対する i 層に作用する軸力 $2(7-i)P$ との比として算定すると，下式が得られる [14), 21)]．

$${}_G\mathrm{SI}_i=\frac{2(7-i)P}{2\cdot\dfrac{\pi^2E\cdot\left(r^{i-1}\cdot I_c\right)}{\left({}_G\gamma_i\cdot h\right)^2}}=\frac{(7-i)\cdot{}_G\gamma_i^2}{r^{i-1}}\cdot\frac{Ph^2}{\pi^2EI_c} \qquad (i=1,\ldots,6) \qquad \text{(A2)}$$

${}_G\mathrm{SI}_i=1$ が層の座屈に関する座屈条件式となるので，i 層の柱（1 本分）の座屈荷重 $P_{i\,cr}$ として次式が得られる．

$$P_{icr}=(7-i)P=\frac{\pi^2E\cdot\left(r^{i-1}\cdot I_c\right)}{\left({}_G\gamma_i\cdot h\right)^2} \qquad (i=1,\ldots,6) \qquad \text{(A3)}$$

したがって，層の座屈としての座屈長さ係数も ${}_G\gamma_i$ となり，この場合は G ファクタ法による座屈長さ係数と層の座屈長さ係数は同じとなる．

スパン数が 2 より多い場合や 1 スパンでも同じ層の柱の負担軸力が違う場合には，G ファクタ法による座屈長さ係数と層の座屈として算定した座屈長さ係数は同じにはならないが，G ファクタ法による座屈長さ係数は層の座屈に関連の深い座屈長さ係数であると考えるのが適切であると考えられる．

例えば，付図 1 に示す骨組で柱脚がピンの骨組を考えると，G ファクタ法による座屈長さ係数と正解の座屈長さ係数は付表 2 に示すようになる．G ファクタ法による座屈長さ係数は柱脚固定と柱脚ピンで第 1 層の柱の座屈長さ係数が異なるだけで 2 層以上の座屈長さ係数は同じ値となる．柱脚ピンの場合には，柱脚固定の場合には正解値と良く対応していた r=0.8 の場合でも正解値とは大きく異なることが観察されることから，上記のように G ファクタ法による座屈長さ係数は層の座屈に関連の深い座屈長さ係数であると考えるのが適切である．

付録 3　座屈関連層(BAS)と全体座屈での座屈長さ係数

付図 1 に示す骨組に対して，i 層の安定性指標 ${}_G\mathrm{SI}_i$ は式(A2)より，i 層の柱の柱剛性パラメータ Z_i は式(A4)より，付表 3 のように求まる．なお，層の座屈に関する座屈長さ係数は，付録 2 で示したように，付表 1 に示した座屈長さ係数 ${}_G\gamma$ に等しい．

$$Z_i=\sqrt{\frac{(7-i)Ph^2}{E\cdot\left(r^{i-1}\cdot I_c\right)}}=\sqrt{\frac{7-i}{r^{i-1}}}\cdot\sqrt{\frac{Ph^2}{EI_c}} \qquad (i=1,2,\ldots 6) \qquad \text{(A4)}$$

安定性指標 ${}_G\mathrm{SI}_i$ の最大値は r=1.0 の時，第 2 層の 12.80，r=0.8 の時，第 2 層と第 3 層の 15.02 となる．すなわち，座屈関連層(BAS)は r=1.0 の時は第 2 層，r=0.8 の時は第 2 層と第 3 層となる．すなわち r=1.0 の時，座屈関連層 ${}_Gi_{cr}$ は ${}_Gi_{cr}$=2 で ${}_G\gamma_{Gi_{cr}}$=1.60，$Z_{Gi_{cr}}$=2.24，r=0.8 の時 ${}_Gi_{cr}$=2，3 で ${}_G\gamma_{Gi_{cr}}$=1.55，$Z_{Gi_{cr}}$=2.50 である．

骨組全体の座屈に関する j 層の座屈長さ係数 ${}_G\tilde{\gamma}_i$ は下式で算定できる．

$${}_G\tilde{\gamma}_i=\frac{Z_{G^{i_{cr}}}}{Z_i}\cdot{}_G\gamma_{G^{i_{cr}}} \qquad (i=1,2,\ldots 6) \qquad \text{(A5)}$$

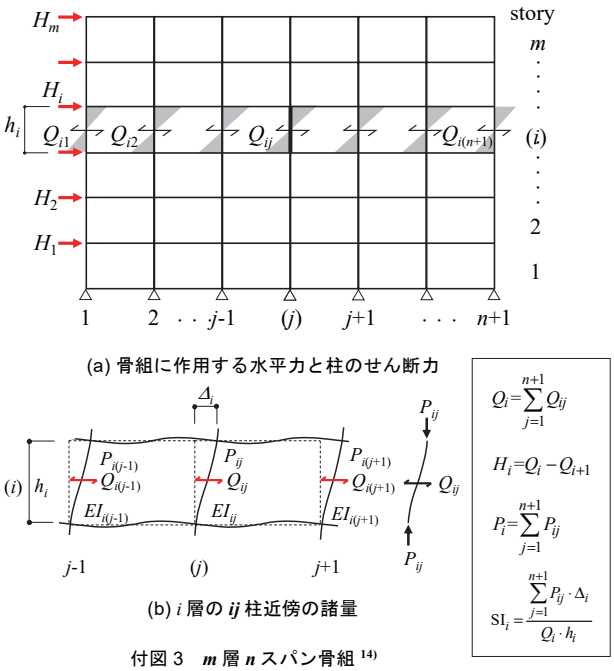
付表 3 にこのようにして算定した座屈長さ係数 ${}_G\tilde{\gamma}_i$ を正解の γ_i とともに示す．また，付図 2 に座屈長さ係数と層 i の関係を示している．表中の ${}_G\tilde{\gamma}_i/\gamma_i$ によれば，正解との比は r=1.0 の場合に 1.10，r=0.80 の場合に 1.05 となり，1 割以内の誤差で正解値の座屈長さ係数を評価できると言える．なお，この場合の座屈長さ係数 ${}_G\tilde{\gamma}_i$ は，各柱間でのあるべき関係に整合しているので，層によらず ${}_G\tilde{\gamma}_i/\gamma_i$ は一定の値を取る．

付録 4　SI 法 [14), 21)]

(a)　安定性指標 SI_i の算定

付図 3 に示す m 層 n スパンの骨組で，その形状・寸法は与えられているものとする．ヤング係数を E，i 層 j 通りの柱の断面 2 次モーメントを I_{ij}，負担軸力を P_{ij} とする．また，i 層の全負担軸力を P_i とする．

各階の床位置に水平力を載荷し，各層の層間変位を，線形 1 次解析（微小変形理論による弾性解析）プログラムを用いて算定する．本論文では，i 層の層せん断力を Q_i，層間変位を Δ_i とし，i 層の階高を h_i とする．各層の安定



付図 3　m 層 n スパン骨組 [14)]

性指標（SI）を層モーメントに対する PΔモーメントの比として式(A6)で算定する．下式では i 層の SI を SI_i と表記している．

$$\mathrm{SI}_i=\frac{P_i\cdot\Delta_i}{Q_i\cdot h_i}=\frac{\sum_{j=1}^{n+1}P_{ij}\cdot\Delta_i}{Q_i\cdot h_i} \qquad (i=1,2,\ldots,m) \qquad \text{(A6)}$$

(b)　座屈長さ係数 ${}_{SI}\gamma$ の算定（構造システムの全体座屈）

各層の安定性指標 SI_i を比較し，一番大きな値となる層をクリティカルな層 i_{cr} と考える．この層を座屈関連層（Buckling associated story : BAS）と呼ぶ．クリティカルな層の $\mathrm{SI}_{i_{cr}}$ が 1.0 となる時が座屈条件式となり，i_{cr} 層 j 通りの柱が負担する軸力 $P_{i_{cr}j}$ の i_{cr} 層の全負担軸力 $P_{i_{cr}}$ に対する比を式(A7)のように $\alpha_{i_{cr}j}$ とすると，座屈長さ係数の定義より，式(A8)でこの柱の座屈長さ係数 ${}_{SI}\gamma_{i_{cr}j}$ が算定できる．

$$\alpha_{i_{cr}j}=\frac{P_{i_{cr}j}}{P_{i_{cr}}}=\frac{P_{i_{cr}j}}{\sum_{k=1}^{n+1}P_{i_{cr}k}} \qquad (j=1,2,\ldots,n+1) \qquad \text{(A7)}$$

$${}_{SI}\gamma_{i_{cr}j}=\sqrt{\frac{1}{\alpha_{i_{cr}j}}\cdot\frac{\Delta_{i_{cr}}}{Q_{i_{cr}}\cdot h_{i_{cr}}}\cdot\frac{\pi^2EI_{i_{cr}j}}{h_{i_{cr}}^{\,2}}}=\sqrt{\frac{1}{\alpha_{i_{cr}j}}\cdot\frac{\mathrm{SI}_{i_{cr}}}{\sum_{k=1}^{n+1}P_{i_{cr}k}}\cdot\frac{\pi^2EI_{i_{cr}j}}{h_{i_{cr}}^{\,2}}}$$

$$(j=1,2,\ldots,n+1) \qquad \text{(A8)}$$

任意の k 層 l 通りの柱の座屈長さ係数 ${}_{SI}\gamma_{kl}$ は，一般的な k 層 l 通りの柱剛性パラメータ Z_{kl} を式(A9)で定義すると，k 層 l 通りの柱の座屈長さ係数 ${}_{SI}\gamma_{kl}$ は式(A10)で求めることができる．

$$Z_{kl}\equiv\sqrt{\frac{P_{kl}\cdot h_k^{\,2}}{EI_{kl}}} \qquad (k=1,2,\ldots,m,\ l=1,2,\ldots,n+1) \qquad \text{(A9)}$$

$${}_{SI}\gamma_{kl}=\frac{\pi}{Z_{kl}}=\frac{\pi}{Z_{i_{cr}j}}\cdot\frac{Z_{i_{cr}j}}{Z_{kl}}=\frac{Z_{i_{cr}j}}{Z_{kl}}\cdot{}_{SI}\gamma_{i_{cr}j} \quad (k=1,2,\ldots,m,\ l=1,2,\ldots,n+1) \quad \text{(A10)}$$

(c)　座屈長さ係数 ${}_{SI}\gamma^*$ の算定（層の座屈）

式(A6)において，SI_i が 1.0 となる時が座屈条件式となり，層の座屈に関する座屈長さ係数 ${}_{SI}\gamma^*_{ij}$ は式(A11)で求めることができる．

$${}_{SI}\gamma^*_{ij}=\sqrt{\frac{1}{\alpha_{ij}}\cdot\frac{\mathrm{SI}_i}{\sum_{k=1}^{n+1}P_{ik}}\cdot\frac{\pi^2EI_{ij}}{h_i^{\,2}}} \qquad (i=1,2,\ldots,m,\ j=1,2,\ldots,n+1) \qquad \text{(A11)}$$

式(A8)と式(A11)を比較すると分かるように（式(A11)で $i=i_{cr}$ とすると），${}_{SI}\gamma_{i_{cr}j}={}_{SI}\gamma^*_{i_{cr}j}$ である．すなわち，座屈関連層(BAS)では，構造システムの全体座屈および層の座屈に関わる座屈長さ係数は等しい．

（2025 年 3 月 6 日原稿受理，2025 年 6 月 27 日採用決定）