構造設計のための
メモランダム
3

比強度と構造自重の累積

建築の設計を進めるうえで，建物の姿が或る程度はつきりしてくると，その建物の構造を何にすべきか——RC造か，SRC造か，S造か，或いはPS造か——という選択と決断のときがやつてくる。この決断は，建物の機能などから容易に行なわれることもあるが，設計が完了した後になつても，あの決断が正しかつたのだろうかと悩むこともあり，構造設計を進めるうえでの大きな分岐点の一つになつている。

わが国では，ほとんどの大スパン建築と，100m 以上の高層ビルのすべてに鉄骨造が採用されている。鉄骨造の建物では，壁などの仕上材が乾式になるため，建物の一体性や遮音性が要求され，それをみたそうとする場合には，鉄骨造は比較的やつかいな構造になる。それでも鉄骨造が採用されるのは，そうすることによる明確なメリツトがあるからだとみてよいだろう。

今回は，各種の構造材料の基本的な性質を比較することによつて，なぜ大スパン建築や高層ビルに鉄骨造が採用されるのか考えてみたい。

■ 比強度の大きな鋼とジユラルミン

建築と航空機に使われている4種の構造材料——鋼，ジユラルミン，コンクリート，木材——の物理的な性能を表1にまとめてみた。どの材料についても表中のものより高性能のものがあるが，できるだけ公平に性能を比較できるように，各材料には一般的に使われている材質のものを選んである。

許容応力度などは日本建築学会の値を採用したが，諸外国の規準と大差はない。表中のカツコ内の数字は，鋼の値を100％としたときの百分率を示している。

表のA段を見ると，鋼の密度はジユラルミンやコンクリートの約3倍あり，木材に対しては15倍にもなつている。コンクリートと密度が変わらないのにジユラルミンで造られた航空機が空を飛んだり，木材よりはるかに密度の大きな鋼がスパン1 300mの橋を可能にしたりするのはなぜだろうか。

「密度の割に強度が高いから」と誰もが考えるだろう。B段

表 1：構造材料の物理的・力学的性質

物理的・力学的性質		鋼材（SS41）		コンクリート（F_c210）		ジユラルミン（A6061）		木材　（杉）	
A　密　度（t／m³）		7.85	(100)	2.40	(31)	2.70	(34)	0.50	(6)
B　許容応力度（kg/cm²）	圧　縮	1 600以下	(100)	80	(5)	1 500以下	(94)	60	(4)
	引張り	1 600	(100)	————*		1 500	(94)	70	(4)
	せん断	924	(100)	7.4～14.8 (0.8～1.6)		867	(94)	5	(0.5)
C　許容圧縮応力度／密度		204	(100)	33	(16)	557	(277)	120	(59)
D　ヤング係数（t /cm²）		2 100	(100)	230	(11)	700	(33)	70	(3)
E　ヤング係数／許容圧縮応力度		1.31	(100)	2.88	(220)	0.47	(35)	1.16	(87)

＊）コンクリートの引張強度は無視することになつているが，鉄筋で補強されるので圧縮と同じと考えてよい。

＊＊）図1と図2のグラフはこの表に示された値を用いて作られている。

の許容応力度の圧縮欄を見ると，たしかに，鋼とジユラルミンはコンクリートや木材の約20倍の強さを持つている。

「密度の割に」の意味を明確にするために，許容応力度を密度で割つたC段の値を見てみよう。この値は一般に比強度と呼ばれており，構造材料の強度性能を示す数値として使われている。表から，比強度はジユラルミンが最大で，鋼の2.7倍，コンクリートの17倍になつている。この数字を見れば，機体を空中に浮かせるだけでなく，自重と同じ重さの乗客と燃料を運ぶ航空機（ボーイング747の場合）にジユラルミンが多用されるのも当然とうなずけよう。

表1のB段の許容せん断応力度をながめると，コンクリートの値がきわめて小さいことが分かる。これはコンクリートの引張強度が小さいことに起因する材料本来の性質で，許容圧縮応力度（f_c）と許容せん断応力度（f_s）の比でみると，鋼とジユラルミンでは $f_c/f_s=\sqrt{3}$ であるのに対して，コンクリートでは $f_c/f_s=5\sim10$ と，圧縮強度に比べてせん断強度のバランスが欠けている。一般にコンクリートの部材の断面をI形でなく長方形とするのはこのためであり，最近の地震の被害に見られる短柱のせん断破壊もこの性質によるものである。「鉄骨造の設計のポイントは座屈とデイテール，RC造の場合はせん断」とよくいわれるが，そのとおりであろう。

現在世界最大の民間用輸送機
1機約70億円
全幅　59.6m
全長　70.5m
自重　168 t
ペイロード　56.5 t
総重量　352 t
発動機　P & W JT 9 D—7 A 21t×4
巡航速度　0.84M
航続距離　8 300km（最大ペイロード時）

写真 1　ボーイング 747-200 B

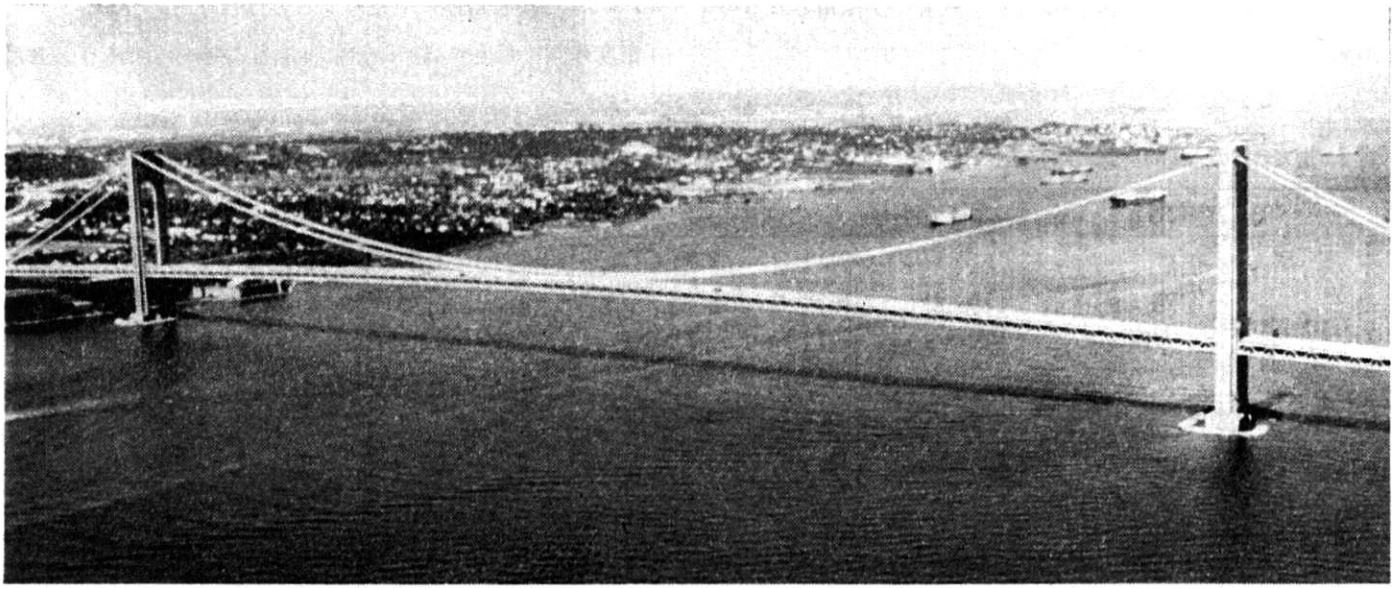

写真 2　Verrazano Narrows 橋

米国，ニューヨーク州のブルツクリンとスタテン・アイランドを結ぶ世界最大のスパン（1 298m）を持つ吊橋。
デツキは上下2段式で幅は約30m（各6車線）である。橋の重量は，主径間（中央スパン）において固定荷重55 t /m，積載荷重7.0 t /mである。
主塔の高さ211m，竣工1964年，設計 Triborough Bridge and Tunnel Authority

■ 比強度と自重の累積

比強度の持つ意味をもつと詳しく調べてみたい。**図1**は断面が長方形の片持ばりの先端に集中荷重が作用する場合について，はり自重／集中荷重の値とはりのスパンの関係を示している。このグラフははりの許容せん断力がはりの根元に生じるせん断力に等しいとして求めたもので，曲げモーメントについてははりの成を自由に大きくできるものとして無視している。

コンクリートのカーブを見ると，スパンが大きくなるにつれてはり自重が増し，スパンが20.6mで，はり自重＝集中荷重となつている。これに対して鋼やジユラルミンでは，はり自重の増加はきわめて小さい。この違いは比強度の違いによるもので，比強度が小さいと自重の増加⟶応力の増加⟶自重の増加というサイクルを繰り返して，自重が累積してゆくことになる。この累積効果によつて，構造自重は比強度の比率以上に増加することになる。

ここでは，構造自重の累積効果を片持ばりで示したが，床スラブ⟶小ばり⟶大ばり⟶柱と力が流れる長期応力の場合も同じである。RC造とS造のビルを設計した経験者ならば誰もが実感していることである。

この自重の累積効果は，地震力が作用する場合にもあてはまる。建物の階数と構造材料が決まると，その建物の固有周期がほぼ決まり，地震時に各階に生じる層せん断力係数（震度と読み替えてもよい）がほぼ決定される。各階の層せん断力はその階より上の全重量に層せん断力係数を乗じたものであるから，或る階の構造重量を大きくすれば，その下の階の構造重量をさらに増すことになり，自重の累積効果が発生するわけである。つまるところ，地震時の建物は，片持ばりと同じメカニズムなのである。一般のビル建築の重量はほとんどが建物の自重であるため（建物の重量を1.2 t／m² とし，積載荷重を80kg／m²とすれば93％が自重となる），この累積効果は大きな意味を持つている。鉄骨造の高層ビルの場合，2階の重量は最上階の重量の10～15％増しで納まつているのではなかろうか。高さが100m 以上の日本の高層ビルがすべて鉄骨造なのは，建物の軽量化により耐震性能を高めようとした結果の表われといえよう。

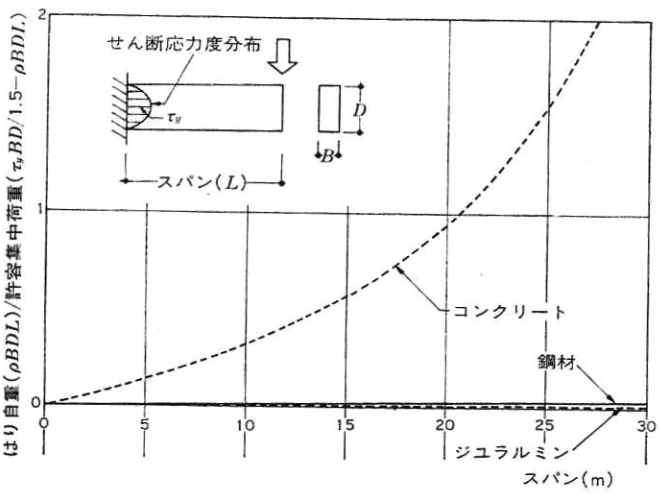

図 1　はり自重の累積

■ はりのスパンと積載能力

図2は，両端が固定されたはりに等分布荷重が作用する場合について，はりのスパンと積載能力（積載荷重／はり自重）の関係を示している。このグラフは応力的にもつとも効率のよい断面（その許容曲げモーメントと許容せん断力がはりに生じる応力に等しい）を持つはりを画いたもので，RCばりの断面は長方形，鋼とジユラルミンのはりではI形である。積載能力が大きいほど効率が良い。図中の L/D は，はりのスパンと成の比である。3本の実線で画かれた鋼のはりは，その左右に点線で画かれたコンクリートとジユラルミンの中間の強度性能を持つていることがよく分る。

コンクリートのカーブのうち L/D=5.4 のカーブは，許容せん断応力度がアーチ効果で最大（最小値の2倍）になる場合である。このカーブはX軸と98mの点で交差しており，自重だけでも98mを超えるスパンは不可能なことを示している。積載荷重をはり自重の4倍程度とし，$L/D \fallingdotseq 10$とすれば，RCばりのスパンは12m以下とすべきことが見てとれる。

鋼のはりのカーブを見ると，L/D=30 の場合でも，積載能力はスパン30mで12，60mで5を保つており，L/Dを小さくすればさらに大スパンが可能である。

ジユラルミンの性能は鋼よりもさらに良い。そうならば，なぜジユラルミンは建築構造に使われないのだろうか。ジユラ

ルミンの材料単価は鋼の約6倍であるから，比強度，自重の累積効果，加工費などを考えれば，むしろジユラルミンのほうが有利ではなかろうか。

■ 建物に必要な剛さ

表1のD段には材料の剛さ（変形しにくさ）を示すヤング係数が，E段にはヤング係数を許容圧縮応力度で割つた値が記入されている。

鋼のヤング係数はジユラルミンの3倍，コンクリートの9倍になつている。E段の値は応力だけに着目して設計した建物の剛性に比例する値で，剛さの点ではRC造が優れていることが分る。

ビル建築など人間が生活する建物の床は，軽すぎたり，軟らかすぎると不安感や不快感を人に与えるため，床やはりには相応の質量と剛性が要求される。実際の設計の経験から判断すると，鋼のはりは応力だけに着目して設計すると剛性が不足気味で，一般にははりをコンクリートスラブとの合成ばりにすることで必要な剛さが確保されている。

このような実状から考えると，ジユラルミンのはりは，はり成を大きくしないかぎり，鋼のはりの3倍の断面積が必要となり，比強度の高いメリツトは消えてしまう。ジユラルミンが建築構造に使われない最大の理由は，そのたわみやすさにあるといえる。

■ 座屈による比強度の低下

比強度が大きく，若干不足気味ではあるが剛性も大きく，バ

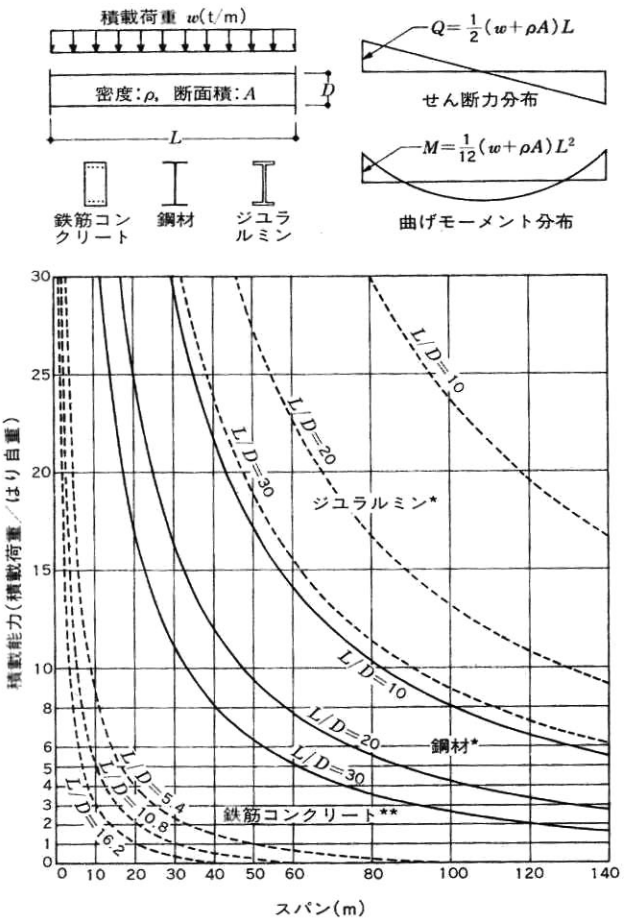

図 2 はりのスパンと積載能力

★鋼材とジユラルミンの場合（図2の説明）

はりの材料の密度を ρ，片側フランジの断面積を A_f，ウエブの断面積を A_w，許容引張応力度を σ_a，許容せん断応力度を τ_a とし，はり自重の γ 倍の積載荷重を受けているはりを考える。材端に発生する曲げモーメントとせん断力がおのおのその許容値に等しいと置き，(1)，(2)式が得られる。

$$\frac{1}{12}(1+\gamma_B)\rho(2A_f+A_w)L^2=\frac{2A_f\left(\frac{D}{2}\right)^2+\frac{A_w}{12}D^2}{\frac{D}{2}}\sigma_a \quad \cdots\cdots(1)$$

$$\frac{1}{2}(1+\gamma_S)\rho(2A_f+A_w)L=A_w\tau_a \quad \cdots\cdots(2)$$

(1)，(2)を整理し，γ_B，γ_S を求めると(3)，(4)式が導かれる。

$$\gamma_B=\frac{\left(12\frac{A_f}{A_w}+2\right)\sigma_a D}{\left(2\frac{A_f}{A_w}+1\right)\rho L^2}-1 \quad \cdots\cdots(3)$$

$$\gamma_S=\frac{2\tau_a}{\left(2\frac{A_f}{A_w}+1\right)\rho L}-1 \quad \cdots\cdots(4)$$

(3)，(4)式を用いて，曲げモーメントとせん断力に関する γ が等しくなるような (A_f/A_w) を求めることができる。

$$\left(\frac{A_f}{A_w}\right)=\frac{1}{6}\left(\frac{\tau_a}{\sigma_a}\frac{L}{D}-1\right) \quad \cdots\cdots(5)$$

結果として，(5)式をみたすような断面形状のはりを用いれば，γ_B と γ_S が等しくなり，はりの L/D，L に応じた γ の関係を図化することができる。

★★鉄筋コンクリートの場合（図2の説明）

コンクリート強度を F_c240，鉄筋をSD35とし，日本建築学会の鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説に示されているはりの断面計算図表により，p_t を0.84%，引張側に対する圧縮側の

ランスのとれた鋼にも，強いがゆえに生じる弱点——座屈現象による強度の低下——がある。

図3は，鋼構造計算規準の許容圧縮応力度と細長比（λ）の関係を示している。SS41の場合，$\lambda=0$ で 1.6 t／cm² の許容圧縮応力度が，$\lambda=107$ で50%に，$\lambda=150$ では25%に低下している。許容応力度の低下は比強度の低下を意味しているから，できるだけ細長比が小さくなるように，部材の形状と組み方を工夫することが大切である。

よく知られているように，細長比の大きな領域で生じる座屈は弾性座屈（オイラー座屈）と呼ばれ，その座屈強度は細長比が一定ならばヤング係数に比例する。つまり，高強度の鋼を使つても座屈強度は変わらない。ヤング係教が鋼の1/3しかないジユラルミンの場合，実質の比強度は座屈現象によつて大幅に低下する。航空機の骨組は，部材の細長比を小さくするために細かい部材を組み立てて造られており，その細かさは手工芸的といえるものである。

大スパン建築や高層ビルに鋼構造が採用される理由を，比強度と剛さという材料の特性に目を向けて調べてみたが，実際には，工場生産性や現場での施工性，工期の短縮など多くの要因を含めた総合判断が大切である。

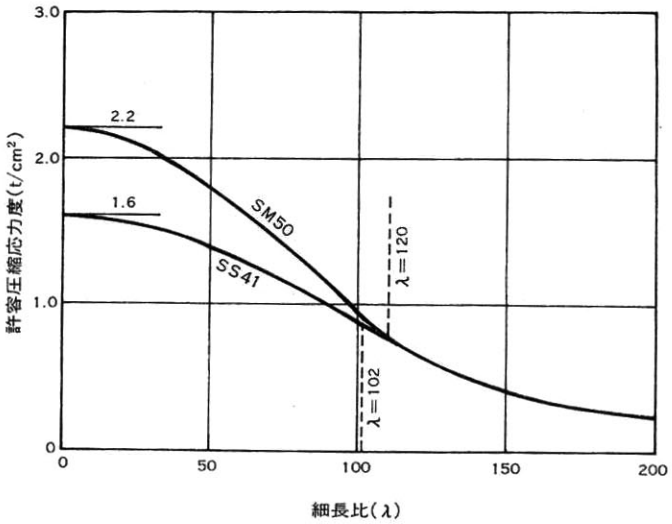

図 3　細長比と許容圧縮応力度

（筆者の方々・㈱日建設計構造設計主管　堀井昌博，同コンピューター部　和田　章）

鉄筋比を0.6とすると釣合鉄筋状態となり，許容曲げモーメントを求める係数 C は 16.5kg/cm² となる。許容せん断応力度はあばら筋による補強を無視すると 7.4kg/cm² となる。はりのせん断スパン比（M/Qd）は荷重が等分布であることを考慮し，$d=0.9D$ とおくと(6)式のように表わせる。

$$\frac{M}{Qd}=\frac{\frac{1}{12}wL^2}{\frac{1}{2}wL\cdot 0.9D}=\frac{1}{5.4}\frac{L}{D} \quad \cdots\cdots(6)$$

以上の条件を用いて，はりの自重に対する許容積載荷重の比 γ を求めることができる。

はりの端部に発生する曲げモーメントとその許容耐力，せん断力とその許容力を等しいと置くことにより，(7)，(8)式が得られる。

$$\frac{1}{12}(1+\gamma_B)\rho BDL^2=C\cdot Bd^2 \quad \cdots\cdots(7)$$

$$\frac{1}{2}(1+\gamma_S)\rho BDL=\tau_a\alpha Bj \quad \cdots\cdots(8)$$

(7)，(8)に関して $d^2=0.8D^2$，$j=0.8D$ と置き，γ_B，γ_S について整理すると(10)，(11)式が導かれる。

ここに，α ははりのせん断スパン比 M/Qd による割増し係数であり

$$\alpha=\frac{4}{\frac{M}{Qd}+1}=\frac{4}{\frac{L}{5.4D}+1},\ 1\leqq\alpha\leqq 2 \quad \cdots\cdots(9)$$

$$\gamma_B=\frac{12C\cdot 0.8D}{\rho L}-1 \quad \cdots\cdots(10)$$

$$\gamma_S=\frac{2\tau_a\cdot 0.8\alpha}{\rho L}-1 \quad \cdots\cdots(11)$$

図2のグラフは $L/D=5.4$，10.8，16.2 について γ_B，γ_S の小さいほうを示してあるが，これは $\alpha=2.0$，1.3，1.0 に対応している。

「建築家の良識」解答

(1) ④建築基準法第2条第4号，(2) ④建築基準法施行令第121条第1項第1号（加藤）

(3) ②，(4) ②（宮田）

(5) ③，(6) ②（川瀬）

(7) ⑤室温を θ ℃とすると，熱平衡の微分方程式は，$Cd\theta/dt=q-S\theta/R$ になる。これを $t=0$ から t まで積分すると⑤が得られる。(8) ⑤（坂本）