鋼構造に関する展望

講 演 者
小 西 一 郎
正会員 工博 京都大学名誉教授・中部工業大学教授

講 演 者
奥 村 敏 恵
正会員 工博 東京大学名誉教授・埼玉大学教授
工学部建設基礎工学科

担当：中部支部・鋼構造委員会

❶ 特に安全性，信頼性について

小 西 一 郎

1. 概　　説

構造物の設計理論は，弾性学，弾塑性力学の発展によってますます精密の度を加えてきた．これらの理論に立脚した許容応力度設計法も，また時代の進展とともに進歩，改良が加えられて，長年，設計法の本流をなしてきた．許容応力度設計法は線形理論，準線形理論に基礎を置き，その理論体系が明確であることから――許容応力度設計法には，どうしても避けて通ることのできない安全率という不明確な工学的，技術的因子が含まれることは承知のうえで――長年慣用されてきたことは，周知のとおりである．しかしここに含まれる工学的技術的な安全率は，長年にわたる技術的経験によって合理化が加えられ，したがって構造物の設計は時代とともに合理化され，時代の要求によって経済的設計へと移行してきたことも事実として認めなければならない．

しかしながら，事象の本質に立ち返って考えるならば次の事実を認めなければならない．

① 構造材料の強度にはばらつきがある

② 構造材料から種々の工作過程を経て構造物に作り上げるには，避けることのできない工作上の imperfection がある．例えば，リブ付平板は，溶接によってリブを平板に取り付けるが，このとき溶接熱によって生ずる溶接ひずみがあり，これはリブ付平板の安全性に重大な影響を与える．

③ その他，安全率設定のため通常の教科書的説明に列挙せられている種々の因子，以上のほかにさらに構造物の巨大化に伴う外力の不規則性

これらの因子は，伝統的な許容応力度法においては，経験的技術的事実を反映して安全率を設定しているとはいえ，不満足なものである．

一方，構造物の設計においては

1) 構造解析（Stress analysis）
2) 破損解析（Failure analysis）
3) 荷重解析（Environmental and/or load analysis）

の三つの過程を必ずとおる必要がある．

このうち 1）の構造解析は，特に電子計算機の発達，応用によって，従来不可能とされてきた応力解析が可能となってきた．有限要素法はこのうちの重要な一例である．また 2）の破損解析は，疲労，クリープ，脆性破壊等の実験的，理論的研究によって本質が次第に明らかにされつつある．

これに反し上記 3）の問題は鋼構造物の巨大化に伴ってますます重要の度を加えてきた．巨大構造物に作用する荷重，特に風荷重，地震，波浪荷重は最も重要なものである．その重要であるという意味は以下のとおりである．すなわち工学的には

① 不規則現象を，いかに工学的，技術的にとらえるか，すなわち観測，測定の統計的処理の問題と，このような不規則現象による構造物の応答，応力，変形をどのようにとらえるか．

② 破壊的風，地震は常時作用するものではないから構造物の設計という立場から，構造物の安全性，信頼性をどのように調和させるか．

先に述べた構造物の設計に必要な三つの解析，応力解析，破損解析，荷重解析は互いに調和のとれたものであることが必要である．応力解析のみに力を注いで，巨大構造物に作用する不規則な外力の評価を誤ったのでは問題にならない．この観点からすると鋼構造物の巨大化に伴って設計上問題になるのは，上記三つの解析のうち荷重解析である．もっとも上記 2）の破損解析にも問題はある．例えば，長大吊橋の風による安定性，安全性をどのように評価するかという問題は，内外各方面の研究成果はあるが，なお，例えば風の乱れた流れに対する吊橋の応答，安定性に及ぼす影響等，さらに研究成果が期待される問題である．

コンクリート構造物については，コンクリートの力学的性状が鋼と異なり，線形理論の適用は特に限界状態の問題，安全性の問題では難点があること，強度，温度，収縮等のばらつき等を考慮して，安全性，信頼性については早くから研究，調査が続けられている．いわゆる安全性，信頼性を統計的手法により，合理的に把握しようとするものである．これはいわゆる安全性の静的アプローチ（Static approach）といえよう．

これに対して鋼構造物，特に巨大鋼構造物に対して最も問題になるのは上記 3）の荷重解析すなわち，風，地震，波浪等の不規則現象であることは上に述べた．このためには，不規則現象を観測，測定により工学的に，より合理的に統計的にとらえるとともに，これらの再現期待値，構造物の耐用年数を設計の基本問題として技術的にとらえることが必要である．他方，巨大鋼構造物が不規則現象を受けたときの応答を統計的手法によりとらえることが必要となってくる．これは鋼構造物自身の保有する振動性状を filter として外的かく乱が，どのようにして応答として統計的にとらえるかの問題であり，これにより安全性，信頼性をより合理的に把握しようとするものである．これは前者に対して安全性の動的アプローチ（Dynamic approach）といえよう．この方面の研究は，アメリカ合衆国，ソ連において早くから始められ，最近わが国においても，土木，建築，造船，航空機，機械等の各方面で研究調査が始められている．

ここでは以下において，1975 年 10 月，名古屋工業大学における研究討論会資料に掲載した例題を引用して，模型的な例題ではあるが，統計的取り扱い方の主として Static approach について説明したい．本例題については鳥取大学・高岡宣善教授の協力を得た．

2. 例　　題

（1） 表—1，表—2(再現期間 T_r，破壊待ち時間 T_f)

荷重の大きさ（kg）が表—1 のように変化し，これに対する材料の強度（kg）が表—2 のようにばらつくとする．このとき，例えば，材料強度 70 kg よりも強力な荷重（この場合には 75 kg，85 kg，95 kg）の生起する確率 $p=0.50$，再現期間 $T_r=1/p=1\div(1/2)=2$（年），この荷重が作用すると，材料強度 70 kg のものは破壊するから，$p_f=p=0.50$，再現期間 $T_r=T_f$（破壊待ち時間）

表—1　荷重 S の分布

荷重番号	①	②	③	④	⑤
大きさ（kg）	55	65	75	85	95
個数	20	30	40	9	1
生起確率 p	$\frac{20}{100}$	$\frac{30}{100}$	$\frac{40}{100}$	$\frac{9}{100}$	$\frac{1}{100}$
分布関数 $F(s)$	0.20	0.50	0.90	0.99	1.00
$\psi(s)=1-F(s)$	0.80	0.50	0.10	0.01	0
再現期間（年） $T_r=\frac{1}{\psi(s)}$	1.25	2	10	100	∞

注：この荷重集団のうちから任意の 1 個が 1 年間に 1 回の割合で作用するものとする．

表—2　材料強度 R の分布

材料番号	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ
強さ（kg）	70	80	90	100
個数	1	3	5	1
破壊率 p_f	$\frac{40+9+1}{100}=\frac{1}{2}$	$\frac{9+1}{100}=\frac{1}{10}$	$\frac{1}{100}$	0
破壊待ち期間（寿命）（年） $T_f=1/p_f$	2	10	100	∞

注：この棒集団の平均的破壊率は

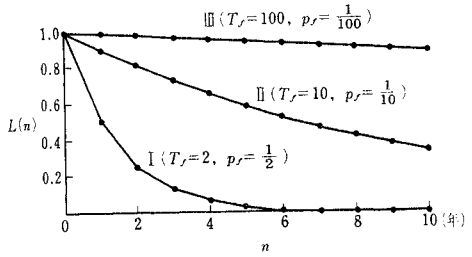
$$\bar{p}_f=\frac{1}{2}\times\frac{1}{10}+\frac{1}{10}\times\frac{3}{10}+\frac{1}{100}\times\frac{5}{10}+0\times\frac{1}{10}=\frac{85}{1\,000}=0.085$$

（2） 表—3，図—1（信頼性関数（$L(n)$））

表—2 の材料強度のばらつき Ⅰ，Ⅱ，Ⅲ を有する材料について，これらがそれぞれ 1 年，2 年，……10 年経過した後にも破壊しない確率，すなわち信頼性関数 $L(n)$

表—3

材料番号 / n（年）	Ⅰ（p_f=0.50）		Ⅱ（p_f=0.10）		Ⅲ（p_f=0.01）	
	$L(n)$	$F(n)$	$L(n)$	$F(n)$	$L(n)$	$F(n)$
1	0.5000	0.5000	0.9000	0.1000	0.9900	0.0100
2	0.2500	0.7500	0.8100	0.1900	0.9801	0.0199
3	0.1250	0.8750	0.7290	0.2710	0.9703	0.0297
4	0.0625	0.9375	0.6561	0.3439	0.9606	0.0394
5	0.0313	0.9687	0.5905	0.4095	0.9510	0.0490
6	0.0156	0.9844	0.5314	0.4686	0.9415	0.0585
7	0.0078	0.9922	0.4783	0.5217	0.9321	0.0679
8	0.0039	0.9961	0.4305	0.5695	0.9227	0.0773
9	0.0020	0.9980	0.3874	0.6126	0.9135	0.0865
10	0.0010	0.9990	0.3487	0.6513	0.9044	0.0956



図—1

を 表—3 に示した．

$$L(n)=(1-p_f)^n=\left(1-\frac{1}{T_f}\right)^n=\left(1-\frac{1}{T_r}\right)^n$$

図—1 は 表—3 をグラフにしたものである．この表，図にはないが，同様の計算によって，次のことが明らかである．いま耐用年数 30 年の構造物が，再現期間 T_r=100 年の荷重（例えば大地震，台風）に耐えぬく確率は

$$L(30)=\left(1-\frac{1}{T_r}\right)^n=\left(1-\frac{1}{100}\right)^{30}\fallingdotseq 0.74$$

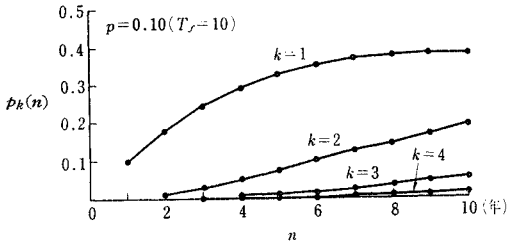
破壊確率 $F(n)=F(30)=1-0.74=0.26$

（3） 表—4，図—2

生起確率 p の荷重が，n 年間に k 回作用する確率 $p_k(n)$

$$p_k(n)={}_nC_k p^k(1-p)^{n-k}\qquad（2項分布）$$

この式により p=0.10 の場合につき，n=1～10，k=1～10 に変化したときの $p_k(n)$ を 表—4 に示した．いま p=0.10 の場合，10 年間にこの生起確率を有する荷重が，それぞれ 1，2，……，10 回作用する確率は，



図—2

表—4 中 n=10 に相当する k=1，2，……，10 の値を合計したものである．すなわち表の右下に示す

$$F(n)=\sum_{k=1}^{n} p_k(n)=0.6513,$$

この材料が破壊しない確率は

$$L(10)=1-F(10)=1-0.6513=0.3487$$

これは 表—3 の値と一致する．

図—2 は 表—4 の数値をプロットしたものである（したがって p=0.10 の場合）．表—4 あるいは 図—2 から得られるように，再現期間 10 年の荷重が，10 年間に k=2 回，3 回，4 回生起する確率はそれぞれ，0.1937，0.0574，0.0112 である．再現期間 10 年の荷重は，平均して考えれば，10 年に 1 回の割合で生起するが，10 年間に 2 回，3 回，4 回，……と生起することもありうることを示している．

（4）

生起確率 p（再現期間 $T_r=1/p$）の荷重が使用期間 n 年間に平均して作用する回数は $p_k(n)$ を用いて，

$$\bar{k}=\sum_{k=1}^{n} k p_k(n)=\sum_{k=1}^{n} k\,{}_nC_k p^k(1-p)^{n-k}=np$$

（要証明）

p=0.10，n=10 の場合には 表—5 に示すように $\bar{k}$=1 となる．

（5） 寿命分布 $f(n)$

n 年目に構造物はいくらの確率で破壊するかを表わすものが寿命分布 $f(n)$ である．これは n 年後に破壊する確率 $F(n)$ からその前年（$n-1$ 年目）までに破壊する確率 $F(n-1)$ を差し引くことによって求められる．

$$f(n)=F(n)-F(n-1)=p_f L(n-1)$$

表—4 $p_k(n)$　（p=0.10 の場合）

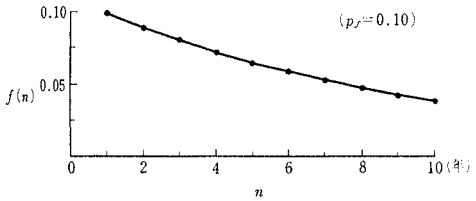
n \ k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	合　計
1	0.1000										0.1000
2	0.1800	0.0100									0.1900
3	0.2430	0.0270	0.0010								0.2710
4	0.2916	0.0486	0.0036	0.0001							0.3439
5	0.3280	0.0729	0.0081	0.0005	0						0.4095
6	0.3543	0.0984	0.0146	0.0012	0.0001	0					0.4686
7	0.3720	0.1240	0.0230	0.0026	0.0002	0	0				0.5218
8	0.3826	0.1488	0.0331	0.0046	0.0004	0	0	0			0.5695
9	0.3874	0.1722	0.0446	0.0074	0.0008	0.0001	0	0	0		0.6125
10	0.3874	0.1937	0.0574	0.0112	0.0015	0.0001	0	0	0	0	0.6513

表—5 （p=0.10，T_r=10 年）

k	×	$p_k(n)$	
1	×	0.3874	0.3874
2	×	0.1937	0.3874
3	×	0.0574	0.1722
4	×	0.0112	0.0449
5	×	0.0015	0.0075
6	×	0.0001	0.0006
7	×	0	0
8	×	0	0
9	×	0	0
10	×	0	0
合		計	1.000

表—6 （p_f=0.10）

n	$f(n)$
1	0.1000
2	0.0900
3	0.0810
4	0.0729
5	0.0656
6	0.0591
7	0.0531
8	0.0478
9	0.0431
10	0.0387



図—3

表—6，図—3 は p_f=0.10 の場合の $f(n)$ と，寿命 n との関係を示している．

平均寿命 $\bar{n}$（寿命の期待値）は

$$\bar{n}=\sum_{n=1}^{\infty} nf(n)=\sum_{n=1}^{\infty} np_f(1-p_f)^{n-1}$$

$$=p_f\frac{1}{p_f{}^2}=\frac{1}{p_f}=T_r \qquad \text{（要証明）}$$

すなわち再現期間は平均寿命になっている．

（6） 構造物のトータル・コスト D

$$D=A+pB$$

ここに　p：構造物の破損確率

A：構造物の当初コスト；一般に構造物の破損する確率 p を小さくしようとすれば，構造物の当初コスト A は上昇する

B：構造物の破損したときの構造材料の損失，人命の損傷，復旧，補強等に要する経費の支出といった損失

したがって，経済的観点から D を最小にするように，破損確率 p を決定するという考え方が出てくる．構造物の破損が，一国の威信にかかわるとか，あるいは単に金だけでは解決できないような損失をもたらすというような重要な構造物の場合には，単に経済的観点のみから構造物の最適安全性を決定するだけでは不十分である．上述の例からもわかるように，構造物の信頼度をいくらに規定すべきかという問題は，構造物設計上最も重要な問題である．

$Bf(n)$ は n 年目に破損が生じたときに支払う補償費の期待値．したがって，耐用年数を m としたときの補償費は，

$$C=\sum_{n=1}^{m}\{Bf(n)\},\quad \text{トータルコスト } D=A+C$$

3．土木学会構造物安全性研究小委員会の活動

構造物の安全性，信頼性の調査，研究の必要性から，土木学会構造工学委員会では，昭和 47 年 7 月の準備会を経て，構造物安全性研究小委員会を新しく組織し，小委員長・小西一郎以下 20 名の委員をもって，この調査研究を開始した．初年度においては，阪神高速道路公団より「長大橋梁の安全性に関する調査研究」について研究委託を受け，主として長大橋梁の耐震，耐風性に関する安全性を総括的に調査し，昭和 48 年 3 月報告書をとりまとめ，これを学会より委託者に報告した．これに引き続き昭和 50 年 1 月より，小委員会に下記の 4 分科会を設け，構造物の安全性，信頼性に関する総合的調査研究を開始した．

第 1 分科会：理論……主査　星谷　勝
第 2 分科会：荷重……主査　伊藤　学
第 3 分科会：強度……主査　山田善一
第 4 分科会：設計指針…主査　前田幸雄

これらの調査研究は，委員各位の熱心な調査，研究，討議を経て，構造物安全性研究小委員会報告として，昭和 51 年 9 月ころ発刊される予定である．

4．結　　び

構造物の巨大化に伴い，構造物の安全性，信頼性をどのように評価するかは非常に重要な問題である．この場合，構造物が大型化するのに伴い構造物の大きさ，広がりとの関係における外的環境の変化，荷重の不規則性，構造物の強度のばらつきをどのように設計にとり入れるかが重大問題である．これらの不規則現象は確率統計的にとらえることが必要であり，これによって構造物の安全性，信頼性を，応力解析，破損解析と同一レベルの有効性をもって評価することができる．

本文は鋼構造物に関する展望の一部として，安全性，信頼性の面から述べたものであるが，紙数の制限のため十分意を尽くすことができない．しかし鋼構造物の大型化に伴う重要な問題であることを読者に読み取っていただければ筆者も幸いである．構造物の安全性，信頼性については最近各方面からの研究発表があるが，次の文献を参照せられることも，一方法かと思われる．

1） 小西一郎・篠塚正宣：不規則現象と安全性——構造物の大型化に伴う問題の提起と，設計の方向づけについての序説（第 1 回，第 2 回），日本鋼構造協会誌，Vol. 11, No. 110, No. 111, 1975.
Freudenthal, A.M.・篠塚正宣・小西一郎・金沢　武編：

Reliability Approach in Structural Engineering, 丸善, 1950.
3) 伊藤　学：構造設計における安全性の規範，土木学会誌 Vol. 60, No. 9, pp. 35-43, 昭和 50 年 9 月.

注：本文は昭和 50 年 10 月 16 日名古屋工業大学における研究討論会において筆者が行った講演の筋書きにそってとりまとめたものであって，当日の研究討論会資料――鋼構造に関する展望――に記述された内容と趣旨は同一であるが，内容において異なった記述となったことをお断わりしたい．

❷ 長支間橋梁における鋼構造の問題点

奥 村 敏 恵

はしがき

ここ 25 年の間，わが国において西海橋，若戸橋，天草架橋，関門橋，港大橋など多くの長大橋梁が，規模・技術両面にわたって段階を経ながら建設され，関係した多くの人びとのなみなみならぬ苦労と，その社会的背景のもと，優れた技術成果が蓄積され，明日の橋梁技術の前進に明るい光明を与えていることは何人も否定し得ないところである．しかし現在は計画段階の話であるにしろ，なお本四連絡橋，東京湾横断および東京，大阪湾岸道路をはじめとした湾岸沿い，および海峡または湾を横断する橋梁建設に，わが国の橋梁技術者は真剣に取り組まねばならない運命と責任を担っていることも事実とみてよい．

もちろんこの場合，それぞれ異なった社会的価値観より見た意見もあり，時代の流れとともに新しいいろいろな問題も発生し，一つ一つ正しい形に解決せねばならないことが多い．このことは工学，技術の所産が社会と密接な関係をもっている点において共通する課題と考えるべきであろう．

それはそれとして，筆者は技術的観点より，これらの長大橋建設技術にからんだ鋼構造の面についての問題点にふれて見ることにする．

わが国のように台風，地震など厳しい自然環境のもとで長支間橋梁を建設することは，先進国の経験以上の多くの問題点を有する．これらを全般にわたって詳細に論ずることは，筆者に与えられた紙面では不可能であるので，ここでは本四連絡橋上部構造委員会で取り上げた問題の一端および，その検討の大要を述べて筆者の責を果たしたい．

したがって，長大橋に伴う大きな問題点である耐風，耐震の点にふれていないが，構造物を設計施工するときにこれらの点を無視できないので考えの中にはこの方面の研究成果がなんらかの形で生かされているか，相互の連係のもとで解決すべき問題点が存在していることは断わっておく必要があると思う．

1. 土木学会・本州四国連絡橋鋼上部構造研究小委員会のあゆみ

本委員会は昭和 46 年発足して現在に至っている．分科会としては，荷重・座屈・疲労・鋼材・塗装・解析の 6 つで出発し，48 年度に製作・構造分科会が，49 年度に非破壊検査・支承構造分科会が，50 年度にケーブル・安全率分科会が加わった．

審議の内容を簡単に説明すると次のようである．

荷重分科会では，既存の道路橋示方書，鉄道橋示方書の適用範囲を超えた支間長，および各種形式橋梁に対して，合理的でその特徴に適合するような活荷重について検討を行った．

この結果，支間長 200 m で従来の規定と一致し，500 m 以上より荷重低減を行う値とした．一方，列車荷重については貨車重量，新幹線車両重量その他条件を考慮し，3.8 t/m にする案について検討した．

座屈分科会では，主塔の変形を考慮し，終局耐荷力まで照査のうえで，主塔の設計方法を考えた「主塔設計要領案」[1] をとりまとめた．なお，主塔の耐荷力は補剛された板要素の耐荷力に支配されるとの認識のもと，主塔を構成する補剛された板要素に対し，その終局耐荷力およびそれに影響を与える補剛材の設計方法について検討を行い，設計の指針として「補剛材つき圧縮板の設計要領」をまとめた．これに引き続いてアーチリブ腹板のような曲げと軸方向圧縮とを受ける補剛板についての設計上の基本方針をまとめた．この場合の鉄道橋示方書，道路橋示方書，DIN 4114, AASHO, BS, メリソン委員会報告書，最近の研究などを総合し，最小板厚，補剛材の必要断面二次モーメントを算定する基本的考え方をまとめた．詳細は昭和 49 年度の調査研究報告書[1] を参照してほしい．

疲労分科会では従来の実験結果を整理し，その結果，特に不足していた主要な継手である縦ビード継手およびリブ十字継手に関し，特に両振範囲の試験を行った後，これらの集めた資料を分析し，41 キロ鋼から 80 キロ鋼まで統一した見方で表―1 に示す疲労許容応力度を定めた．この場合，継手として 20 種類に分類し，これらを