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

表—1 母材および溶接継手の疲労許容応力度

(単位：kg/cm²)

継手分類	引張		圧縮	備考
	$-1.0\leq k<0.3$	$0.3\leq k\leq 1.0$	$-1\leq k\leq 1.0$	
A	$\frac{1530}{1-0.7k}$	$\frac{1355}{1-k}$	$\frac{2160}{1-1.4k}$	ただし，それぞれの応力の種類について各鋼種ごとに定められた基本許容応力度以下とする．ただし k は $k=\frac{\lvert\sigma\rvert_{min}}{\lvert\sigma\rvert_{max}}$ または $k=\frac{\lvert\tau\rvert_{min}}{\lvert\tau\rvert_{max}}$ 片振れの場合：正 両振れの場合：負
B	$\frac{1275}{1-0.7k}$	$\frac{1130}{1-k}$	$\frac{1800}{1-1.4k}$	
C	$\frac{1050}{1-0.7k}$	$\frac{930}{1-k}$	$\frac{1480}{1-1.4k}$	
D	$\frac{800}{1-0.7k}$	$\frac{710}{1-k}$	$\frac{1130}{1-1.4k}$	
継手分類	せん断			
	$-1.0\leq k\leq 0.3$	$0.3\leq k\leq 1.0$		
S_1	$\frac{920}{1-0.7k}$	$\frac{815}{1-k}$		
S_2	$\frac{820}{1-0.7k}$	$\frac{725}{1-k}$		
S_3	$\frac{650}{1-0.7k}$	$\frac{580}{1-k}$		

引張り，圧縮を受けるものについては A～D の 4 つの等級として取り扱い，前述の分類した継手が疲労の立場よりどの等級に属するかを定めた．また，せん断を受ける場合には（溶接継手に隣接しない母材か，腹板とフランジの連結またはフランジの材片を互いに連結する連続側面すみ肉溶接およびそれに隣接する母材），すなわち母材で破断する可能性のある型，側面すみ肉ののど断面で破断する型，前面すみ肉ののど断面で破断する型の 3 つに分類し，母材の強度とからんでその許容応力度を定めている．なお橋桁の応力計算方法とも関連して，列車荷重による累積被害効果を検討し，「本四連絡橋の疲労設計」[1] をまとめた．この基本的考え方は，① 疲労寿命は直接累積被害法則で推定できる．② 疲労強度は応力振幅のみで定められ，実用上平均応力の影響は無視する．③ 設計寿命期間（100 年）において列車ダイヤはランダムと考える．④ S-N 線は，勾配を 0.2 と 0.1 とした 200 万回で折れた 2 本の直線で与えられるものとする．⑤ 現在推定される将来の輸送量は疲労寿命の推定（昭和 65 年の推定値）と同程度の精度で正しいものとする．

以上の条件を前提に荷重累積効果を考えるとき，列車単線載荷だけでなく，複線載荷も同時に考え確率的に取り扱い，列車荷重のばらつきを考慮し，頻度分布を仮定した累積効果を検討した結果，その効果を断面割増率 α の形で求め，疲労応力に対する所要断面積 A_f を次式で示している．

$$A_f \geqq \alpha \frac{p_{d0}}{\sigma_d}$$

ここに p_{d0}：一列車通過による応力変動範囲（設計荷重）

σ_d：200 万回疲労許容応力度

代表的な橋梁で求めた結果，α は 1.15～1.42 であることを示し，橋の形式によりある幅の差が見られることを明らかにした．

鋼材分科会では，鋼上部構造に用いられる鋼板の仕様および施工基準等作成のため，鋼板の特性について検討を行ったが，特に鋼種別板厚範囲および溶接条件を想定して，強度，伸び，じん性，炭素当量などの要求性能を検討した．この場合，溶接継手に考えられる欠陥として，① 溶接趾端部の縦われ，② 溶接趾端部のアンダーカット，③ 溶接金属の横われ，を取り上げ，これらより脆性破壊を発生せしめないことを条件として，溶接継手および母材に必要なじん性値を応力拡大係数 K 値を用いて算出した．これは「鋼上部構造用鋼板の所要性能」[1] にまとめている．なお，T_y 評価，C·O·D 理論の応用などによりさらに検討を加え上述の評価がそれほど間違いないことを確かめている．この分科会は**製作分科会**に発展し，鋼上部構造の工場製作における品質を保証するための考え方を，① 製品に対する要求品質，② それを満足するための作業基準，③ それらに基づいて施工した結果が要求品質を満足し得たかどうかの検査基準，等を既存の道路橋および鉄道橋なみに関門橋の実例を参照して，できるだけ具体的な形でまとめている．

なお，**非破壊検査分科会**では，特にトラス部材のかど溶接部の検査に着目し，超音波検査で発見できる欠陥の限界およびその有害度を検討した．

塗装分科会では，橋梁のおかれている環境，部材の状態を考慮した塗装系の選択について検討を行い，防錆塗装の基本的な考え方をまとめ塗装基準をつくった．さらに亜鉛溶剤を含む各種塗装系の施工，検査の基準，適用が考えられるエッチングプライマー，鉛系さび止めペイント類，アルミニウムペイント，長油性フタール酸樹脂系塗料，ジンクリッチペイント類，フェノール樹脂系ジンクロメートさび止ペイント，塩化ゴム系塗料，エポキシ，ポリウレタン，タールエポキシ，タールウレタン樹脂塗料等 21 種類に及ぶ塗料品質規格の原案を作成した．さらに構造部分別の塗装系の適用に関する方向を明らかにした．一方，新設時の工場および現場における補修塗装と架設後の保守塗替塗装についての検討を行い，その方策をまとめた．

解析分科会では対傾構の影響を考慮したトラスの立体解析，吊橋のねじれ解析，水平横荷重を受ける場合の解析，振動問題の扱い方，大変形解析の概念を示し具体的適用例としてアーチ橋の解析上の特徴を示した．その成果の一例を示すと次のようになる．

（1） トラスの立体解析

この問題では特にねじれ解析に用いられる各種解析方法の比較，対傾構，横構の役割，折れ角をもつトラスの

挙動について検討した．ウラソフの微分方程式，釣合式によるせん断場理論，ウラソフ式より剛性マトリックスをつくる方法，パソー流の方法，いずれも変形法による立体解析とその結果に差がない．これより使い方を間違えなければ，どの方法でも断面力が推定できることを明らかにした．

対傾構，横構の役割を見るために，ねじれ剛性と曲げねじれ剛性の比の平方根に支間長をかけた値（μl），主構・横構面の幅厚比（ρ），中間対傾構剛性とねじり剛性の2倍の比の平方根に支間長をかけた値（γl），端対傾構と中間対傾構の剛性の比（c）をパラメーターにとり，その影響の定量化を図っている．なお大局的には μl, ρ はねじれ剛性，γl, c は，ずれ剛性に関係する量と見なせるが，対傾構・横構の役割には特に γl と c が重要であることを示した．

なお，吊橋の補剛トラスでは γ だけで議論できるが，トラス橋の場合には γl, c の用いられる範囲が，上路，下路，ダブルデッキなどの形式の相異により相反する傾向をもち，その挙動も複雑になる点が注目されることを明らかにした．一般的には，① 主構弦材および斜材ならびに対傾構の部材については常時，地震時，疲労検算時とも慣用法（主構面の平面解析）によってよい．ただ，対傾構の設計でずれ変形にある制限を設ける必要がある点に注意してほしい．② 横構の設計については，ⓐ 折線橋の場合，横構のうち弦材の伸縮によって応力の生じる組み方の部材は，折れ角の影響による応力増と重なるので，支点付近には設けないほうがよい．ⓑ 立体解析によると，地震時において上横構の慣性力は中間対傾構を通じ下横構に部分的に移る．このため慣用設計による場合，下横構の荷重分担に特別の考慮を必要とする．この合理的設計方法を見つけるため，なお検討中である．

（2） 吊橋の解析

吊橋については，ねじれ解析法と大変形解析法が検討された．この結果，鉛直荷重に対しては大変形理論と撓度理論では数%の差しかないことがわかった．現在の吊橋のねじれ設計（ブライヒの理論）には問題があり，改良を図った．風荷重を受ける吊橋（現設計ではモイシェフの弾性分配法を用いている）には桁のねじれ影響を考慮していないし，風荷重として横力のみを考え，空力モーメントを考慮していない点など，耐風委員会と関連する問題が残っている．

構造分科会は塔頂部補強構造，塔基部補強構造，トラス格点構造について吟味した．塔頂部補強構造では，大鳴門，南備讃，因島，いずれも補強構造をせん断変形を考慮した格子構造として設計されているが，補剛材の位置，塔頂部へのサドル反力の分布，サドルの剛性の影響，格子構造の支持条件等について三橋とも考え方が統一されておらず，補強構造を格子構造とするモデル化にも問題が残っている．このため有限要素法解析を行い，変形については塔頂部をほぼ主塔断面最大寸法の 25% 増しの長さのばねで塔壁部を連続的に支えられたせん断格子と見なし，塔壁はリブ高さの 1.35 倍のはりであるとするモデルの修正化について一つの提案をした．

主塔基部補強構造については，① 塔基部をせん断格子とする．② 基礎コンクリートを半無限板とみなす，ことにより実用的な解析法が得られる．この方法を用い大鳴門橋に適用すると，補強構造の剛度をかなり高めても支圧応力の集中率は 2.0 に近くなるので，コンクリート強度設計について十分配慮する必要があることを明からにした．

トラス格点構造については，その設計指針案[1]を提案した．ここではガセットプレート板厚設計，フィレット半径に対する規定，ガセットプレートの局部座屈に対する検討，弦材格点部のかど溶接の設計などに言及している．

支承構造分科会では，ⓐ その構造の設計条件，ⓑ 金属の摩耗特性，ⓒ 考慮すべき材料特性，ⓓ ピン構造製作上の意見等について体系的にその基本的考え方をまとめている．この場合，特に連続補剛吊橋の中間支点における支承構造は，① 正負の鉛直反力および水平横反力に抗し，② 橋軸方向の移動，回転の拘束を与えず，③ 水平面内の回転を許し，④ 橋軸直角鉛直面内のねじれを拘束するなどの機能を 100 年以上にわたって発揮するためリンク支承を主体にしたものとなるとの結論を下した．この場合，(i) 反力，(ii) すべり摩擦距離，(iii) すべり速度，(iv) 環境条件などを考慮する必要があり，このため直径 330 mm クラスのリンク支承の大型摩耗試験および直径 60 mm のリンク支承の小型摩耗試験を行い，比較検討することにより，その設計の見通しを得た．なお「吊橋リンク支承構造設計の指針」[1]をまとめた．

ケーブル分科会は審議しはじめたばかりであり，なお今後にその成果が期待されているが，① ケーブル許容応力度の検討，② ハンガーロープ設計許容応力度の検討，および ③ ケーブルバンド設計法の検討を行っている．① についてはケーブル二次応力の計算方法の確立，その実測，ケーブル材料強度の検討，ケーブル施工誤差の検討などが主要な課題となっている．

以上，委員会で問題になった点の主要なるものを列挙したが，これらを通じ長支間橋梁の上部鋼構造の設計に関し問題となる諸点に，いささかの関心をもっていただくことができれば幸甚である．

参 考 文 献

1) 本州四国連絡橋鋼上部構造に関する調査研究報告書，昭和 46 年度～昭和 50 年度，土木学会．