

## 橋梁「設計編」\*

猪瀬幸太郎\*\*, 大畑 和夫\*\*\*, 岡田 誠司\*\*\*



猪瀬幸太郎



大畑 和夫



岡田 誠司

Bridge (Design)\*

by INOSE Koutarou \*\*, OHATA Kazuo \*\*\* and OKADA Seiji \*\*\*

**キーワード** 橋梁設計, 橋梁形式, 座屈防止, 脆性破壊防止, 疲労設計

### 1. はじめに

橋梁の中でも溶接技術と密接なつながりがあるのは種々の鋼部材を溶接により組み合わせて断面を構成する鋼橋である。鋼橋への溶接の適用は、1920年代の初期頃から検討が進められ、製鋼技術、製作技術、接合技術の発展とともに鋼橋の構造自体も飛躍的な進化を遂げて来た。

鋼橋に適用される溶接には、主として消耗式電極を用いた保護アーク溶接（被覆アーク溶接、サブマージアーク溶接、ガスシールドアーク溶接など）が用いられている。戦後の高度経済成長期には、「より軽く、より強い」構造を求め、高強度の鋼材を用い、これに種々の補剛部材を溶接で取り付けた薄肉構造を用いた長支間橋梁が多数建設されることとなった。しかし、当時の道路橋は、その後現在に至るまでの自動車交通量の劇的な増加を必ずしも上手く予測しているとは言えず、さらに直接輪荷重を支える鋼床版を除いては、疲労耐久性の照査は現在ほど重要視されてはいなかった。

その結果として近年、重交通下で供用されている鋼橋の各部位に疲労によると思われる損傷が多数発生する事態が生じた。このため平成14年3月の道路橋示方書改訂時に、耐久性向上を目的として疲労への影響を設計に考慮することが明記され、鋼橋に対する部材の継手構造、溶接品質（仕上げ）に対する配慮が強く求められる事となった<sup>1)</sup>。

ここでは、鋼製橋梁の代表的な形式とその特徴、設計思想、用いられる溶接継手の特徴と要求性能、疲労設計の考え方について概説する。

### 2. 製品紹介

橋梁には様々な形式のものがあり、支間長（支間距離）がその重要な決定要因となる事が多い。

図1、図2は吊橋と呼ばれる形式であり、長大支間の橋梁に適用される。主塔頂上と架橋地点の両岸にメインケーブルを張り渡し、その両端をアンカレイジと呼ばれる巨大



図1 第2ボスボラス橋  
(吊橋：イスタンブール、1988年)

\*原稿受付 平成25年1月16日

\*\*正 員 株式会社IHI Member, IHI Corporation

\*\*\* 株式会社IHIインフラシステム IHI Infrastructure Systems



図2 イルティッシュリバー橋  
(吊橋：カザフスタン，2000年)

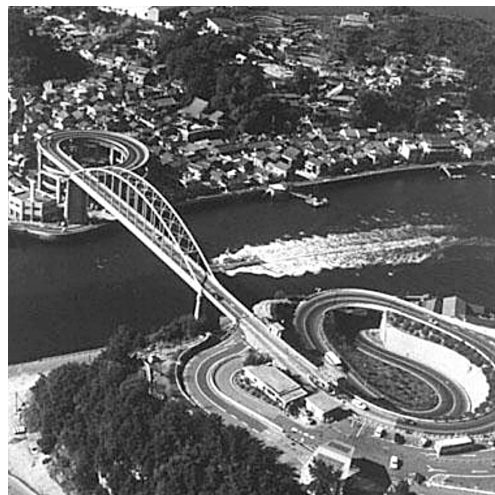


図4 音戸大橋  
(アーチ橋：広島県，1961年)



図3 横浜ベイブリッジ  
(斜張橋：神奈川県，1989年)



図5 荒川放水路橋  
(トラス橋：東京都，1985年)

なコンクリート構造物に固定して構造的な安定性を得る。メインケーブルの架設技術は吊橋建設において特に重要であり、現在はエアスピニング工法が主流となっている<sup>2)</sup>。このメインケーブルから吊り下げたハンガーケーブルによって橋桁を支持することから桁全体のねじり剛性は他の形式と比較すると小さくなる。よって吊橋にとって危険な発散振動を防止する耐風安定性能が架設中も含め重視されている。

図3は斜張橋である。吊橋に次ぐ長大径間に適した形式である。吊橋のメインケーブル、アンカレイジに相当する構造部材がなく、斜めに張ったケーブルによって主塔が桁を直接支持する。よって使用するケーブルは吊橋のメインケーブルよりも短く、小径であり予め工場で作製したものを設置することが多い。景観設計の結果と適正支間長のためと推察しているが、港湾に建設されるベイブリッジとしてよく採用されているようである。

図4、図5はそれぞれアーチ橋、トラス橋である。吊橋や斜張橋などケーブル構造が多用される以前は、長大径間に対応する形式として位置づけられていた。古くからある伝統的な橋梁形式であり、例えば鉄材を用いた世界初の橋梁アイアンブリッジ(図6、イングランドシュロップシャー州：1779年建設)はアーチ橋である。構造特性上、板厚を減じて高い剛性を確保できることから、高強度鋼の適用とその効果なども検討されている<sup>3)</sup>。

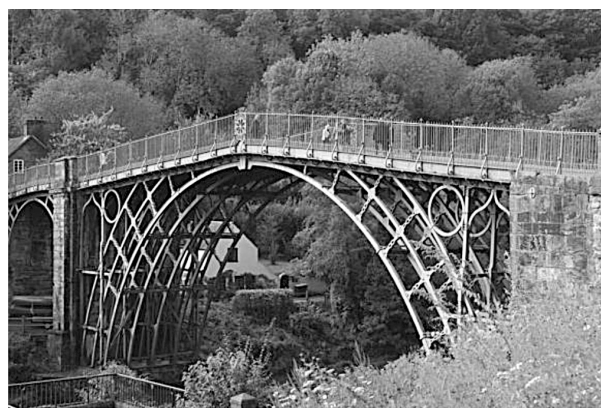


図6 アイアンブリッジ  
(アーチ橋：イングランドシュロップシャー州：1779年)

図7は桁橋と呼ばれる形式である。最も一般的な構造形式であり、中小規模の橋梁に適用される事が多い。標準的に適用される最大支間長は路面を支える床版がコンクリート製(鋼コンクリート合成構造、PCコンクリートも含む)か、鋼製(鋼床版)かにより大きく異なる。前者は約80m、後者は約150mである<sup>4)</sup>。

図8はラーメン構造橋である。桁橋と鋼製橋脚を剛結一

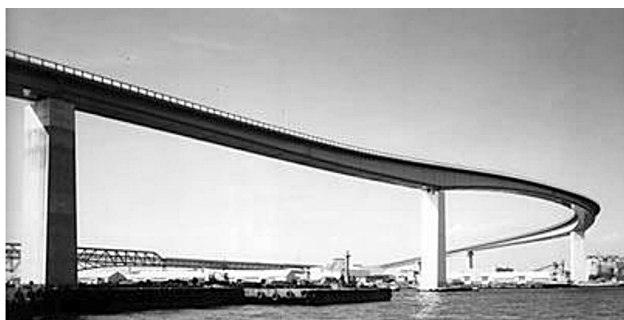


図7 なみはや大橋  
(桁橋：大阪府，1995年)



図8 首都高速道路  
(ラーメン橋：神奈川県，2003年)

体化した構造である。不静定次数の高い構造形式であるため、耐震性能に優れるとされている。また他の形式のように橋脚や橋台上に設置して橋体を支える支承がない事も耐震性能上の弱点が少ないと評価される。

### 3. 溶接構造物としての設計思想

橋梁設計（構造設計）のために用いられる設計手法としては現在、①許容応力度法と②限界状態設計法があり、前者は伝統的な設計手法、後者はそれに続く新たな設計手法とされている。ただし、許容応力度法は設計実務上の利便性が高く、一方の限界状態設計法は大規模橋梁の合理化に威力を発揮するなどそれぞれが利点を有している。

限界状態設計法では①終局限界状態、②使用限界状態、③疲労限界状態の3区分が規定されている。①終局限界状態は、最大耐荷力に対応する限界状態であり、構造物の崩壊を防止するため耐力を照査する。②使用限界状態は、使用性等に関する限界状態であり部材のたわみや変位を照査する。③疲労限界状態では、繰り返し荷重に起因する疲労破壊に対して強度が十分であることを照査する。

鋼道路橋の設計基準<sup>9)</sup>では“発生する応力度が許容応力度以下であることを確認する”という許容応力度法のフォーマットによって記述されている。このため旧態依然とした設計手法とみなされる事もある。しかし、例えば腹板の座屈耐力照査では荷重モード毎に後座屈強度を考慮した安

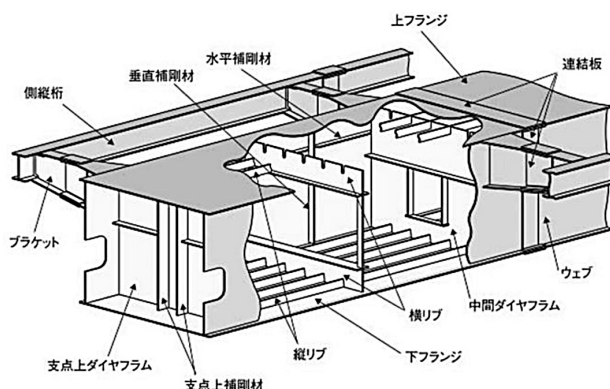


図9 箱桁タイプの主桁構造  
(「鋼橋へのアプローチ」より)

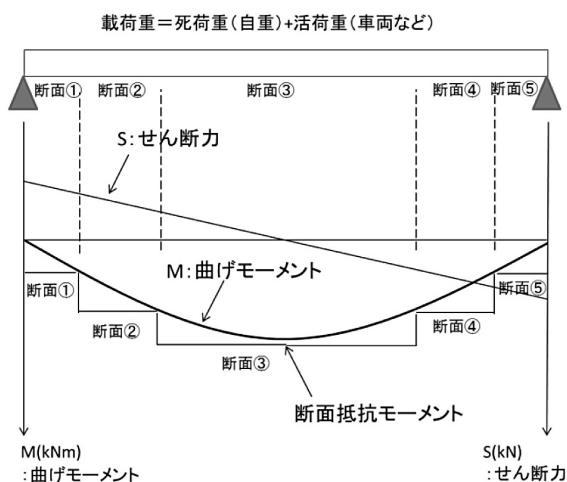


図10 主桁断面設計概念図

全率が設定されるなど、内容としては限界状態設計法と同じ思想が取り入れられている。また、たわみの照査、疲労設計、巨大地震に対する耐震性能照査なども行われることから、限界状態設計法で行われる照査はすべて内包していると言える。

図9に桁橋のなかの箱桁と呼ばれる主桁構造を示す<sup>9)</sup>。通常、桁橋の設計は路面を支える床版を設計し、その重量を確定した後主桁を設計する。設計には死荷重（自重）、活荷重（車両などの荷重）、そして必要に応じて雪荷重、風荷重、地震荷重（発生頻度の高い地震）、車両の衝突荷重などを考慮する。これらの荷重に対応する主要材片は上下のフランジ（リブも含む）とウェブであり、主桁断面を構成する。これに座屈を防止する補剛材や断面の形状を保持するダイヤフラムなどが配置される。

図10に主桁断面設計の概念図を示す。ここでは簡単のため、単径間の直線橋を例示する。設計荷重によって発生する曲げモーメントに対し、主桁断面が十分耐力を有するように上下フランジ、リブ、ウェブの板厚を決定する。曲げモーメントと断面抵抗モーメント（耐力）とを同じ図に示すことで、主桁が過不足のない断面構成となっているかを検証する。本図からは主桁が5つの断面によって構成されていることが分かる。せん断力は専らウェブによって支えられるとして設計される。曲線橋の場合はねじりによるせ

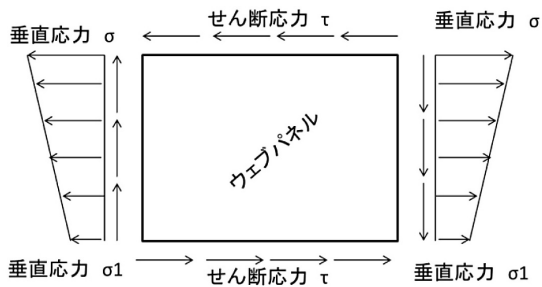


図11 ウェブパネル設計計算モデル

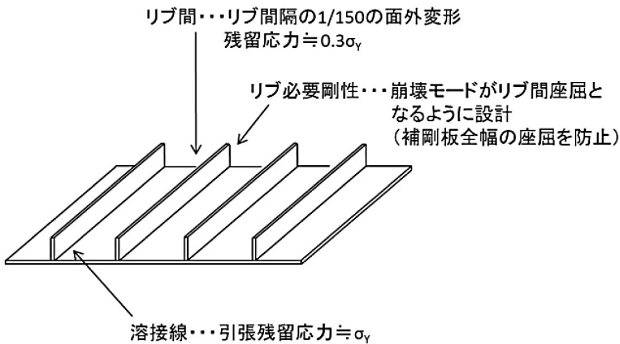


図12 補剛板設計の前提条件

せん断力も加算される。橋梁は強度が十分であっても、剛性が不足すると通行に支障がでることからたわみの照査も行われる。

鋼構造物の設計において、補剛材が適切に配置されない場合は補剛材間で座屈が発生し、耐荷力が著しく損なわれる。そこで主桁のウェブでは補剛材と上下フランジの接合部で区切られたパネルの座屈照査が行われる。その設計計算モデルを図11に示す。ここで圧縮荷重による座屈は座屈後の残存耐力（後座屈強度）が少ないことから、安全率を1.7として設計する。一方、曲げ座屈、せん断座屈の場合は比較的后座屈強度に余裕があることから、安全率はそれぞれ1.4, 1.25とされている。また圧縮、曲げ、せん断が重畳する場合の安全率の定め方も規定されている。

図12にフランジなどでよく用いられる補剛板の設計における前提条件を示す。座屈防止のためのリブの剛性は、補剛板の全幅が面外に変形する全体座屈を防止できるように設計する。リブはスキムプレートに溶接されることから、溶接変形と溶接残留応力は不可避であり、これを前提として耐荷力を評価する。初期の面外変形はリブ間隔の1/150までが許容されており、溶接残留応力はリブ間中央（局部座屈が発生する箇所）において降伏応力の30%圧縮応力が発生するとされている。このため図13に示すように、道路橋示方書や船級規則などが定める耐荷力曲線は理論上の座屈強度（耐荷力）より低い<sup>9)</sup>。参考として同図に圧縮試験結果を示す。アーク溶接で製作した部材の最高耐荷力は、船級協会が定める耐荷力曲線と一致した。残留応力の小さいレーザ溶接で製作した場合は理論的な値まで最高耐荷力が向上している<sup>7)</sup>。本図からは橋梁で定めた耐荷力曲線は合理性を欠いているような印象を受けるが、供用開始後は交通を止められない橋梁と、建造時と同じ環境で

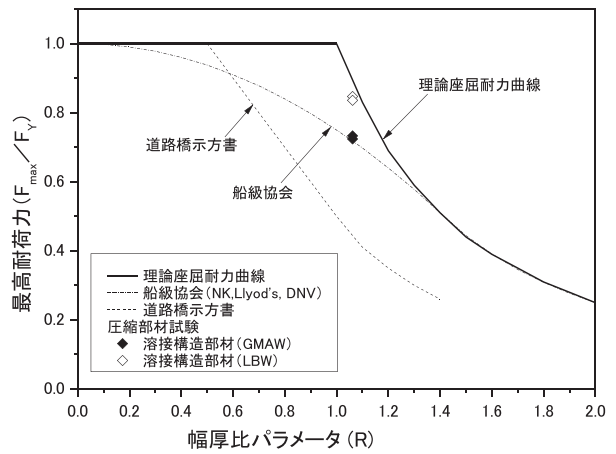


図13 補剛板の耐荷力曲線

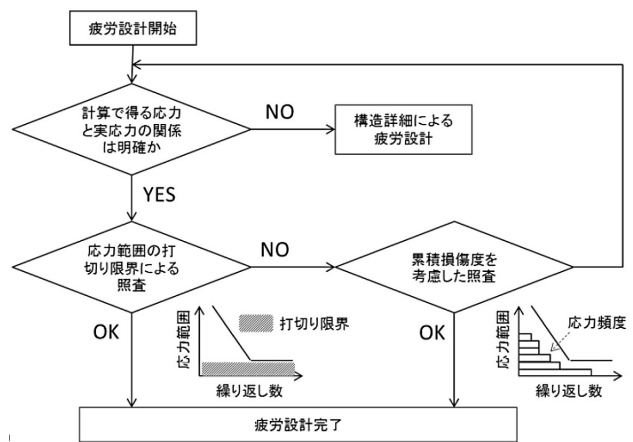


図14 道路橋疲労設計フロー概要

の整備が可能であり、かつ軽量化の効果が収益に直結する船舶との違いであると言える。

図14に道路橋における疲労設計フローの概要を示す<sup>8)</sup>。まず疲労耐久性に配慮した継手の選定や、継手の疲労強度等級の前提となる品質確保を前提となる。そのうえで、計算で求まる応力と実応力の関係が明確である場合は応力範囲の打ち切り限界を用いた照査を行い、疲労強度不足の判定がでた場合は、より精緻な累積損傷度を考慮した照査を行う。それでも疲労強度が不足するときは、構造詳細の再設計を行う。計算で求まる応力と実応力の関係が明確でない場合は構造詳細による疲労設計が行われる。例えば鋼製のデッキプレートで路面を支える鋼床版では、構造詳細、溶接金属の溶け込み量などが詳細に規定されている。

巨大地震に対応する設計は主にラーメン構造橋と鋼製橋脚において行われる。図15に設計要領を策定するために実施した実験を例示する。構造物の安全性評価は①構造物の耐震応答と②構造物の耐震性能に分けて検討されることが多く、本実験は後者に分類される。この研究ではそれまで明確になっていなかった高軸力の橋脚の部材曲率（あるいは圧縮ひずみ）の限界値が明らかになった<sup>9)</sup>。巨大な地震動に対しては発生するひずみが降伏ひずみの数倍に至るまで部材として機能させる。このような部位はいわゆる塑性ヒンジ状態となり、地震エネルギーを吸収して橋脚基礎

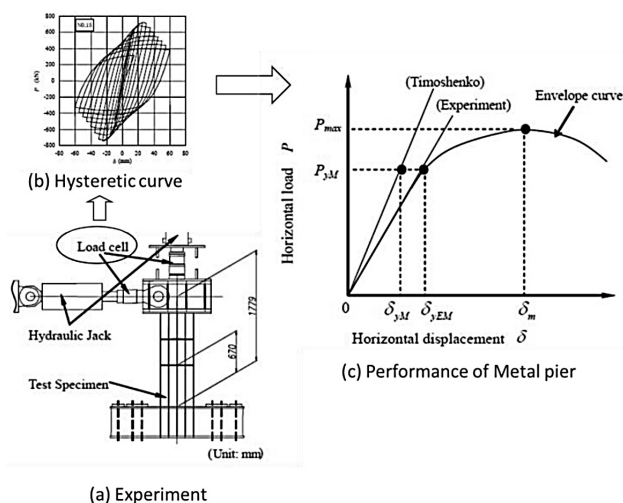


図15 鋼製橋脚耐震性能概要

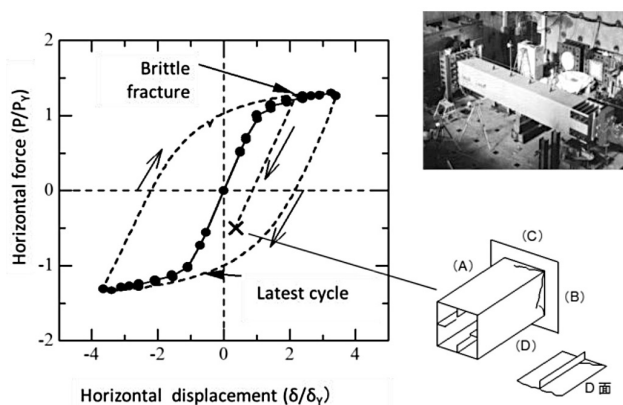


図16 低サイクル疲労発生状況

や他の部位への負担を軽減する。

耐震性能実験では、図16のようにベースプレートと鋼製橋脚本体との接合部から低サイクル疲労によるき裂が発生する場合がある。巨大地震時でも同様の現象が起きる可能性があるため、その照査方法が提案されている<sup>10)</sup>。

### 4. 溶接継手の特徴と要求性能

一般的な橋梁では、合理化のため工場溶接をできるだけ少なく設計する。よって工場における突合せ溶接は以前よりは少なくなっているが、現場では溶接施工が多用される傾向にある。

橋梁を含む大型鋼構造物の突合せ溶接継手の重要な要求性能として継手じん性がある。鋼橋の場合、継手じん性は母材と同等以上として施工管理される場合が多い。しかし、使用実績の少ない材料を用いる場合や、新たに開発された溶接施工を行う場合は継手の要求じん性を検討して仕様が決定される。例えば、最初に HT780 を大量に採用した港大橋では初期許容欠陥寸法が設定されており、これに対応する  $K_t$  値が継手の所要じん性値として要求されている<sup>11)</sup>。その検証のため大型のディープノッチ試験が数多く実施された。図17は HT780, HT980 のレーザ・アークハイ

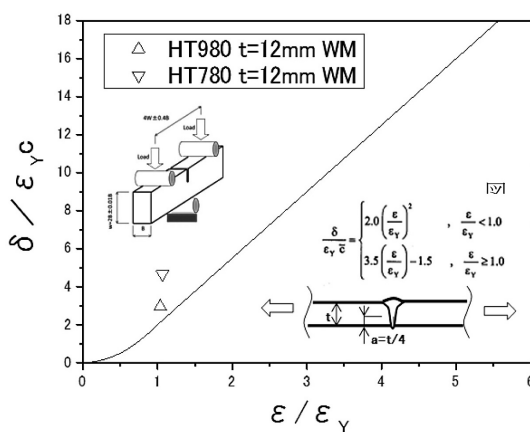


図17 CTOD を指標とする継手じん性評価例

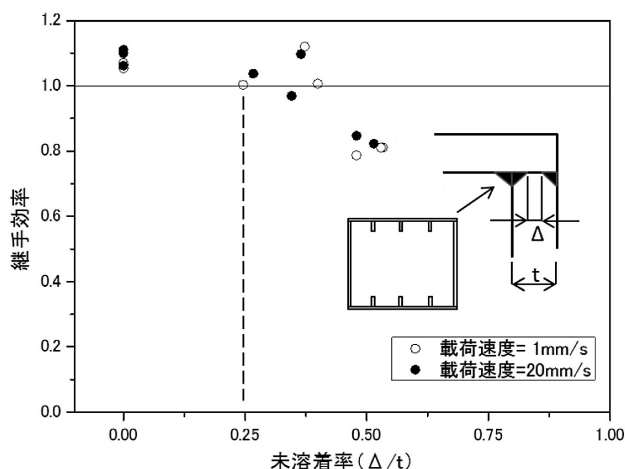


図18 角継手引張耐力

ブリッド溶接継手のじん性評価の一例である。ここでは発生したき裂が板厚の1/4に至る連続表面き裂まで進展したとしても脆性破壊を起こさないじん性を継手に要求した<sup>12)</sup>。CTOD を指標としており WES2805 をベースとしてその値を設定している<sup>13)</sup>。レーザ・アークハイブリッド溶接は母材と溶接金属の強度比が高い、溶接金属が狭隘である、など本規格が前提とするアーク溶接継手とは異なる特性を有する。ただしこれらの影響は照査においては安全側となる<sup>14)</sup>。本図に示した例では、HT980, HT780 の継手ともデザインカーブの上方の領域にプロットされており、要求じん性を満たすことが示されている。

次に継手強度であるが、フランジとウェブを接合する角継手は部材を弾性範囲内で使用するのであればフランジとウェブが一体で挙動する“断面保持”が満たされればよく、これに必要な継手強度は小さい。そのため想定されるすべての設計荷重下においても塑性化しない主桁などでは完全溶込溶接継手とする事はまれである。一方、大規模地震時において塑性化を許容する部材では角継手の破断は構造物の崩壊に直結することから母材相当強度 (継手効力率  $\geq 1$ ) を要求する。図18に角継手の引張耐力試験結果を示す<sup>15)</sup>。供試体は塑性化にともなう面外変形による曲げも重畳するように設計した。設計温度は設計温度である  $-15^{\circ}\text{C}$  としている。継手強度が母材相当以下となるのは未溶着が

表1 疲労に対する安全性が確保されていると見なしてよい条件

橋梁形式	コンクリート床版を有する鋼桁橋
使用継手	疲労強度等級 A~F 等級に分類される継手
使用鋼種	SS400, SM400, SM490, SM490Y, SM520, SMA400, SMA490
支間長	最小支間長が 50m 以上
ADTT <sub>SLi</sub>	ADTT <sub>SLi</sub> : 一方一車線あたりの日大型車通行量 1000 台 / (日・車線) 以下

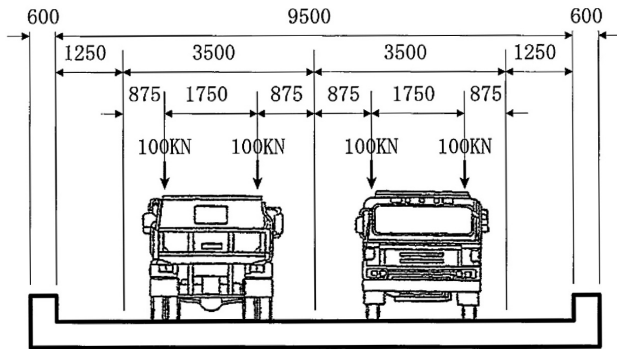


図19 疲労設計荷重載荷例 (T 荷重)

1/4 以上となった場合であった。従って角溶接は部分溶込み溶接継手として設計できる。ただし実際には重要部位である隅角部 (梁と柱の接合部) については完全溶込み溶接としている。

リブやダイアフラムとウェブやフランジなどの接合はすみ肉溶接継手となっている。これも部材を弾性範囲内で使用する時には必要強度は小さく、滞水による腐食が問題にならない構造物では断続溶接 (タック溶接) による施工実績さえある。しかし、断続溶接では活荷重などによる応力範囲が大きい場合や、施工が良好でない場合は、すみ肉溶接の止端から疲労き裂が発生する事があり、設計上その防止に留意する必要がある。疲労耐久性に関する要求性能については次項で詳述する。

### 5. 道路橋の疲労設計の実際

鋼橋の疲労設計は、先述した図14に示される疲労設計フローに従って実施され、「応力による疲労照査」と「構造詳細による疲労照査」に大別される。

応力による疲労照査は、鋼桁の主部材のように、計算で求まる応力と実応力の関係が比較的明確な構造を対象とするもので、大きく3段階に別けて実施される。

まず第1段階として、コンクリート床版を有する標準的な鋼桁橋に対しては、多くの試設計の結果より、一般に疲労に対する安全性が確保されているとみなされる条件が表1のとおり定められており、この条件をすべて満足する橋梁は、実際に作用応力を算出して照査することなく、疲労耐久性が確保されていると判断される。

上記以外の橋梁に対しては、第2段階として、疲労設計

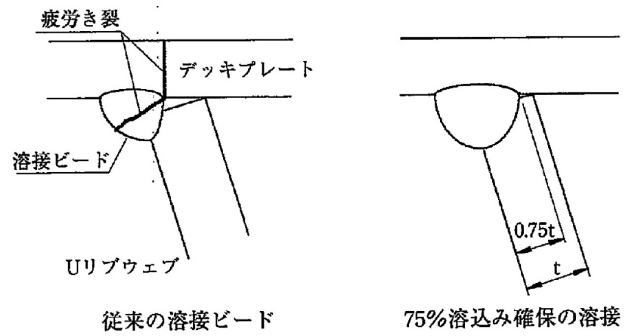


図20 閉断面Uリブと鋼床版デッキプレートの溶接詳細 (リブ板厚の75%以上の溶込み量を確保)

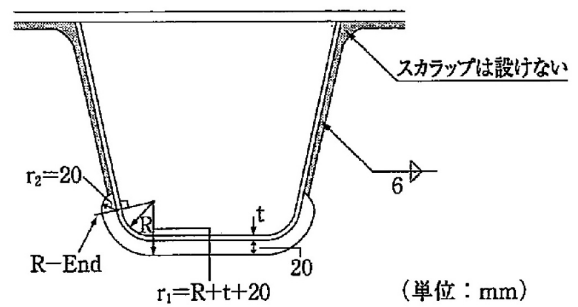


図21 閉断面 U リブと横桁との交差部構造の標準 (スカラップ形状に関する標準構造)

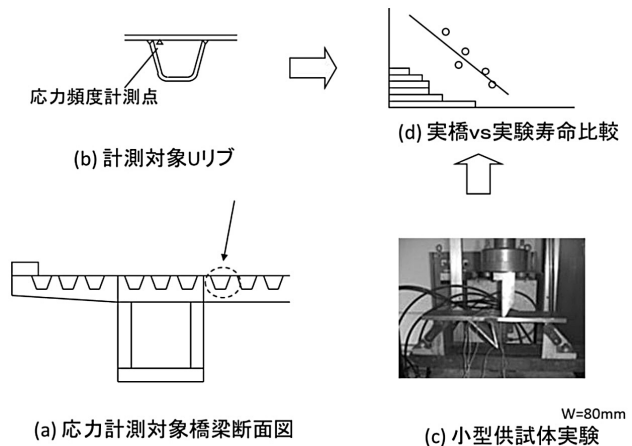


図22 鋼床版継手疲労試験

荷重 (図19に示す、道路橋示方書に規定される T 荷重) を各車線に対して移動荷重して構造解析を実施する<sup>10)</sup>。その解析結果にモデル荷重と実荷重の差異を補正する活荷重補正係数  $\gamma_s$ 、衝撃の影響  $i_s$ 、および構造解析結果と実応力の差異を補正する構造解析係数  $\gamma_a$  を考慮して応力変動を求め、これに対して算定した応力範囲の最大値  $\Delta\sigma_{max}$  が、部材の各継手の一定振幅応力に対する応力範囲の打ち切り限界  $\Delta\sigma_{ce}$  に平均応力 (応力比) の影響  $C_R$  と板厚の影響  $C_i$  を考慮して補正した照査値以下であるかどうかを照査する (寿命無限としての照査)。

これを満足しない場合には、第3段階の照査として、設計で考慮する供用期間 (疲労設計指針では、目安として100年) と一車線あたりの日大型車交通量の条件から、繰り返

し、荷重の影響を考慮した累積線形被害則の考え方に基づく照査を行う(寿命有限としての照査)。この照査において照査条件を満たさなかった場合は、当該継手を疲労等級の高い継手に変更したり、継手位置を発生応力の低い位置に変更したりするなどの対処を実施する。場合によっては板厚や継手形式を変更して応力発生を低減をはかり、その上で再度適切な段階から照査フローに従い再照査する。

一方、鋼床版のように通常の構造計算では応力の変動を適切に評価することが困難であるときには、過去の知見による疲労耐久性に優れる構造を採用する“構造詳細による疲労照査”が実施される。

構造詳細による疲労照査では、具体的な部材の接合詳細が定められており、これをすべて満足する場合には疲労に対する安全性が確保できているとみなす。図20、図21に、鋼床版の構造詳細に関する規定の一例を示す。

また、近年の研究事例として、図22に鋼床版継手疲労強度試験の一例を示す。このように、現状では構造詳細による疲労設計がなされる継手に対しても、疲労強度の定量的な評価や、新たな施工方法による長寿命化の研究が進められている<sup>17)</sup>。

## 6. おわりに

近年、鋼道路橋の構造はますます多様化する傾向にあり、構造を合理化した新形式の橋梁や、コンクリートとの複合構造などが多数提案され、建設されている。これらの構造を実現させるための基本的な接合技術は溶接であり、70 mm を超える板厚を有する高張力鋼の現場溶接や、交通供用下の部材に対する現場拡幅溶接など、従来に無かった条件での溶接がますます採用される傾向にある。新たな構造、新たな材料を用いた橋梁は、社会インフラに対する安全性、経済性両面でのニーズの高まりから、今後もさらに検討が重ねられ、発展していくものと思われるが、その実現に対しては、同時にこれらの接合部の安全性を確保できる溶接接合技術の進展が必要不可欠であり、今後のさらなる技術革新が強く期待される。

## 参考文献

- 1) (社)日本道路協会, 道路橋示方書・同解説, (2002).
- 2) 例えば, 宮田明, 船木正志, 山本裕一, 工藤光弘, 加藤千明, カザフスタン共和国「イルティッシュ河橋梁」建設工事, 石川島播磨技報橋梁特集号, pp148-157, (2001).
- 3) 例えば, 中西保正, 井元泉: 大型構造物への高張力鋼適用における技術的課題, STX-21 組織・強度に関する評価とモデリング・シミュレーションに関する調査報告書, 未踏科学技術協会, 第2集, pp11-43, (2001).
- 4) (社)日本橋梁建設協会, デザインデータブック, p15, (2011).
- 5) (社)日本橋梁建設協会 HP 掲載, 「鋼橋へのアプローチ」.
- 6) 船体構造強度評価のための技術指針: (財)日本海事協会, 1999, 12.
- 7) 猪瀬幸太郎, 廣畑幹人, 中西保正, 金 裕哲: レーザを用いて製作した無補剛溶接構造部材の終局強度, 構造工学論文集 Vol.54A (2008年).
- 8) 日本道路協会: 鋼道路橋の疲労設計指針, (2002).
- 9) OKADA Seiji, ONO Kiyoshi, NISHIMURA Nobuo, TASAKI Shingo, TAKAHASHI Minoru, An Experimental Study for Estimating Seismic Performance of Steel Members under High Compressive Axial Force, 5th JAPAN KOREA Joint seminar on bridge maintenance pp141-148, (2004. 11).
- 10) 例えば, 陵城成樹, 足立幸郎, 猪瀬幸太郎, 杉浦邦征, 渡邊英一: 鋼製橋脚基部の地震時低サイクル疲労挙動に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.48A (2002年3月).
- 11) 阪神高速道路公団編: 港大橋工事誌, 土木学会 (1975).
- 12) 猪瀬幸太郎, 杉野友洋, 神林順子, 阿部大輔, 松本直幸, 高張力鋼へのレーザ・アークハイブリッド溶接適用と性能評価, 第77回レーザ加工学会講演論文集, pp69-74, (2012).
- 13) 日本溶接協会企画: WES2805 「溶接継手の脆性破壊発生及び疲労き裂進展に対する欠陥の評価方法」, (2007).
- 14) 中西保正, 山岡弘人, 猪瀬幸太郎: NEDO プロジェクト「鉄鋼材料の革新的高強度・高機能化基盤研究開発, 溶接技術, Vol.60, No.11 (2012).
- 15) 猪瀬幸太郎, 岡田誠司, 井元泉, 中西保正: 塑性化を許容する高構造物の角継手強度に関する研究, 溶接学会全国大会講演概要, No.72, (2003).
- 16) (社)日本橋梁建設協会, 鋼道路橋の疲労設計資料, p24, (2003).
- 17) 例えば, 猪瀬幸太郎, 中西保正, 神林順子, 大脇桂, 倉田幸宏, レーザ・アークハイブリッド溶接継手の疲労強度, 土木学会第64回年次学術講演会, pp361-362, (2009).