

2. 鋼床版の設計及び鋼床版の疲労

(1) 鋼床版の設計

鋼床版は、図2-1に示すように縦リブ、横リブでデッキプレートを補剛して、デッキプレート上に舗装を施したものであり、縦桁、横桁を介して主桁で支持される。また、鋼床版を主桁と合成することが構造上も有利となる。

鋼床版の解析は、下記のような解析法により解析されている。

- ①有限帯板法 (FSM 法, Finite Strip Method)
- ②Pelican-Esslinger による実用計算法 (参考文献タイトル集 A 41, 42 参照)
- ③格子桁法
- ④直交異方性版法 (Guyon-Massonnet Method)

このうち、電子計算機で計算の効率化が図れる有限帯板法が最近は多く使用されている。

鋼床版の設計では、鋼床版を主桁構造の一部としての作用と床版及び床組としての作用についてそれぞれ安全であること及びそれらを同時に考慮した場合に対して安全であることを照査する。また、鋼床版は、直接輪荷重を受けること、活荷重応力の占める割合が大きくその繰り返し回数も多いことから、疲労に対する照査も必要である。道路橋示方書¹⁾では、疲労の影響の照査として、鋼床版の縦リブの溶接継手の溶接部の許容応力度を表2-1のように規定している。この許容応力度は、疲労試験の結果から200万回程度の繰り返しに対して疲労クラックが発生しないような応力振幅に基づいている。

この規定は、横リブを支点として縦リブを連続ばりと考えて、輪荷重の移動による縦リブの応力変動に伴う疲労を照査するためのものである。

鋼床版上の舗装によって輪荷重の分布作用が生じると考えられるが、夏季においてはアスファルト

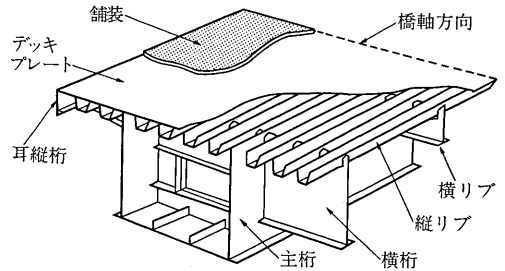


図2-1 鋼床版の構造の例⁴⁾

表2-1 T荷重1台載荷に対する縦リブの許容曲げ引張・圧縮応力度¹⁾
(kgf/cm²)

種類		鋼種	SS 41	SM 50	SM 50Y	SM 58
		SM 41 SMA 41W	SM 41	SM 53 SMA 50W	SMA 58W	
母材			1 400	1 600	1 600	1 600
工場溶接	仕上げた全断面溶込みグループ溶接部		1 400	1 600	1,600	1 600
	仕上げしない全断面溶込みグループ溶接部		1,000	1 000	1 000	1 000
	リブ十字すみ肉溶接部 ¹⁾		900	900	900	900
	連続縦すみ肉溶接部 ²⁾		1 100	1 100	1 100	1 100
現場溶接			原則として上記の値の80%とする。			

1) 応力方向に連続した母材上にある。応力方向に直角なすみ肉溶接
2) 応力方向に連続したすみ肉溶接

が軟化することも考えられるため、舗装による輪荷重の分布効果は考えないものとしている。

鋼床版は、このような設計計算の配慮のほか、縦リブ、横リブがデッキプレートに溶接によって取り付けられることから、溶接によるひずみや施工性にも配慮しなければならない。そのため、構造細目として、道路橋示方書ではデッキプレートの厚さを 12 mm 以上、縦リブの最小板厚を 8 mm (ただし、腐食環境が良好または、腐食に対して十分な配慮を行う閉断面縦リブでは最小板厚を 6 mm) と規定している。

現在設計されている鋼床版の多くは、縦リブについては U 型の閉断面縦リブ (以下では U リブという)、横リブについては I 断面リブを使用し、各縦リブの中心間隔は 60 cm ~ 70 cm、横リブ間隔 (縦リブ支間長) は U リブの場合には 2.0 ~ 4.5 m となっている設計例が多い^{2)~4)}。板厚は、デッキプレートが 12 mm、閉断面縦リブでは 6 ~ 8 mm と道路橋示方書に規定される最小板厚の例が多い。

(2) 鋼床版の構造詳細

1) 縦リブ

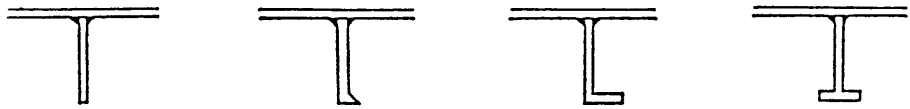
鋼床版の縦リブは各種の形状がある。図 2-2 にその形状を示す²⁾。また、図 2-3 に主としてドイツにおける橋梁の鋼床版の縦リブの形状を示す³⁾。現在使用されているものの多くは図 2-2 に示す(a)の平鋼、(b)のバルブプレート、(c)の U リブである。特に、U リブは横リブ間隔を長くすることができることから近年主流となりつつある。平鋼、バルブプレートは曲線桁で縦リブを曲線加工しなければならない場合に全面的に用いられている。また U リブが使用されており、かつ幅員が変化する橋梁において、縦桁の近くに U リブが配置できない場合や、U リブの配置本数が変化し、リブ間隔の調整が必要な場合に平鋼、バルブプレートが部分的に用いられている。

縦リブとデッキプレートの溶接は、開断面リブでは両側からすみ肉溶接を行い、U リブでは図 2-4 に示すようにすみ肉溶接によるものとグループ溶接によるものがある。施工性はすみ肉溶接の方がよいが、U リブでは内側から溶接できないため十分な溶け込みが必要となる。板厚が 6 mm のものはすみ肉溶接、板厚 8 mm 以上のものはグループ溶接を行っている例が多い。

縦リブの板厚は、開断面リブでは、8 mm 以上であり、U リブでは、現場継手付近は 8 mm とし、ダイヤフラムを配置して密閉構造とした部分は 6 mm としていることが多い (図 2-5)。

2) 縦リブと横リブの交差部

縦リブと横リブの交差部は、縦リブからのせん断力を確実に横リブに伝えることができる構造としなければならない。また、橋梁端部で端横けたにとりつく場合や横リブを境にして縦リブ断面が変化する場合などを除き、縦リブは、横リブの腹板を貫通して連続させるのが望ましい。鋼床版は、一般に溶接量が多くなるのが避けがたいので、縦リブと横リブの交差部のように溶接線が集中する箇所では、交差部の構造、スカーラップのとり方、溶接サイズなどに留意して溶接ひずみがなるべく少なくなり、施工性も良いように配慮しなければならない。縦リブと横リブの交差部の構造例を図 2-6 に示す。



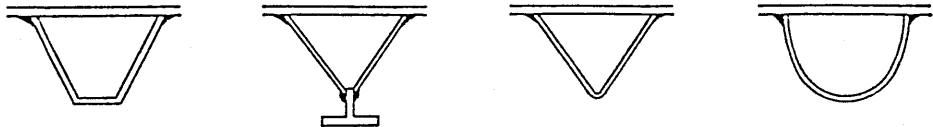
(a) 平鋼断面

(b)バルブプレート断面
(球形平鋼断面)

(c)山形鋼断面

(d) T形断面

開断面縦リブの形状



(e)台形断面
(Uリブ)

(f) Y形断面

(g) V形断面

(h)丸形断面

閉断面縦リブの形状

図 2-2 縦リブ形状²⁾

Ausführungsbeispiele	Fertigstellungsjahr	Ausbildung der Längsrippen	Rippenabstand a in mm	Querträgerabstand b in mm
Rheinbrücke Düsseldorf-Neuß	1951		440	1910
Rheinbrücke Köln-Mülheim	1951		305	1770-1810
Bürgermeister Smidt Brücke Bremen	1952		300	1750-1960
Rheinbrücke Speyer	1956		350	1750
Nordbrücke Düsseldorf	1957		400	1800
St. Albanbrücke Basel	1955		300	1670
Savebrücke Belgrad	1956		300,2	1582
Severinsbrücke Köln	1959		293-388	2000
Rheinbrücke Kehl-Straßburg	1960		300	2560
Europabrücke Innsbruck	1963		370	1500
Nordereibebrücke Hamburg	1957		340-360	2670
Rheinbrücke Mainz-Weisenau	1961		300	1540
Kaiserleibrücke Frankfurt	1962		300	1425
Brücke Jülicherstraße Düsseldorf	1963		300	2000

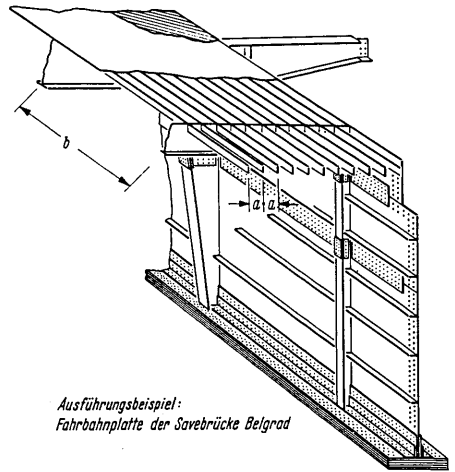
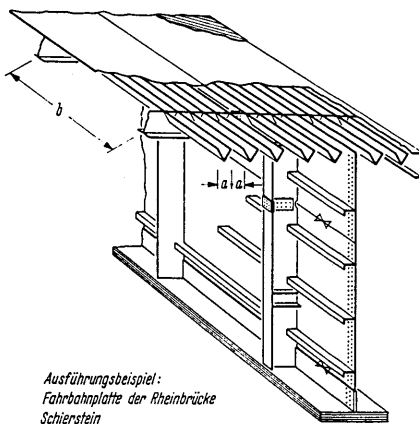


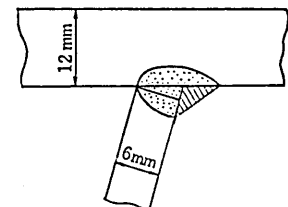
図 2-3-1 外国 (主としてドイツ) における縦リブ形状 (開断面縦リブ)⁵⁾

Ausführungsbeispiele	Fertigstellungsjahr	Ausbildung der Längsrippen	Rippenabstand a in mm	Querträgerabstand b in mm
Weserbrücke Porta	1954		316	2360
Rheinbrücke Duisburg-Hornberg	1954		300	2014-2069
Rheinbrücke Mannheim-Ludwigshafen	1958		300	2030
Stadtautobahn Duisburg	1963		270-330	2000-2200
Hasellaerbrücke	1961		310	2310
Rheinbrücke Schierstein	1962		300	3000
Fuldaerbrücke Berghausen	1962		300	2650-2750
Rheinbrücke Leverkusen	1964		300	2530
Rheinbrücke Emmerich	1964		296	2525
Rheinbrücke Bonn-Nord	im Bau		300	2243

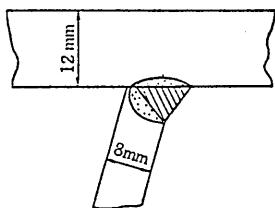


Ausführungsbeispiel:
Fahrbahnplatte der Rheinbrücke
Schierstein

図2-3-2 外国（主としてドイツ）における縦リブ形状（閉断面縦リブ）⁵⁾



(a) すみ肉溶接



(b) グループ溶接

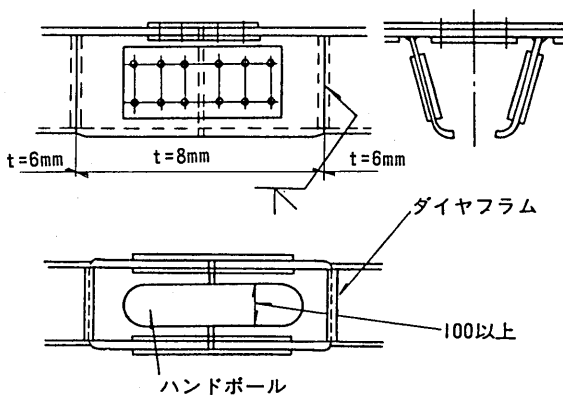
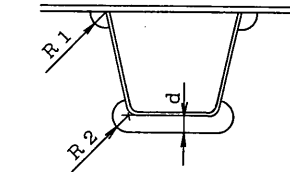
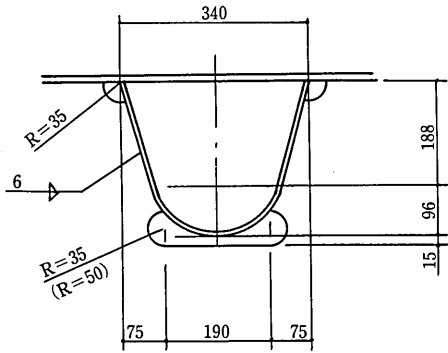
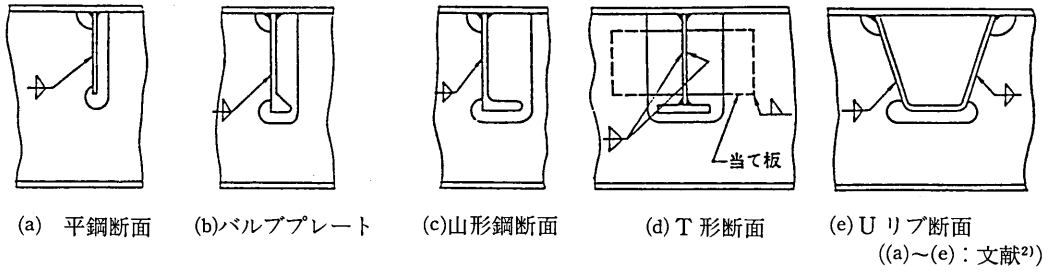


図2-4 デッキプレートとUリブとの溶接例²⁾

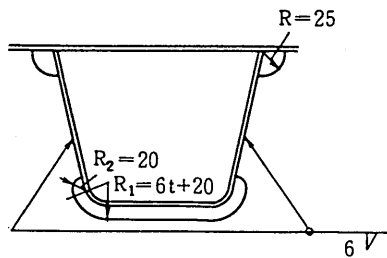
図2-5 高力ボルト現場継手部付近のUリブの板厚⁶⁾



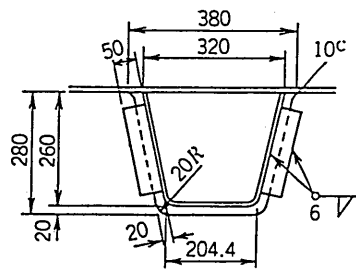
公団、公社	R 1 (mm)	R 2 (mm)	d (mm)	備考
首都高速道路公団	35	35	20	設計例
阪神高速道路公団	30	35	30	⁷⁾
名古屋高速道路公社	35	35	35	⁸⁾

(f)丸形断面を使用した例 (江戸川橋梁・建設省)

(g)U形リブを使用した例^{7),8)}

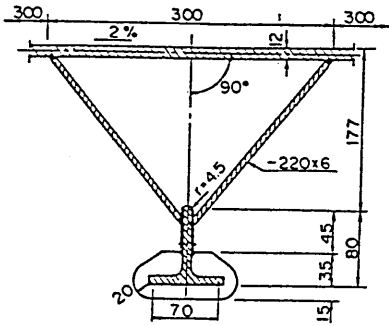


(h)U形リブを使用した例 (本州四国連絡橋公団)⁹⁾

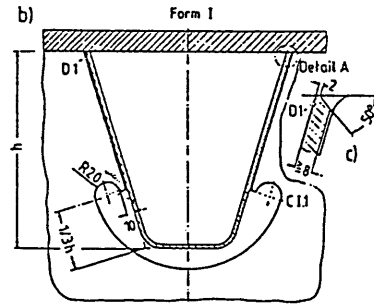


(i)変更スクーラップを使用した例 (福岡北九州道路公社(106工区))⁹⁾

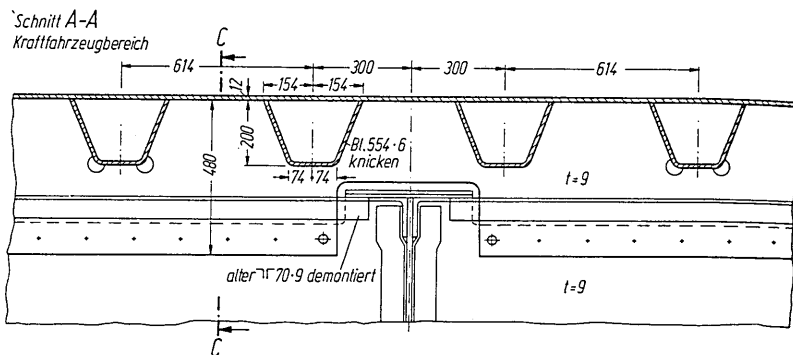
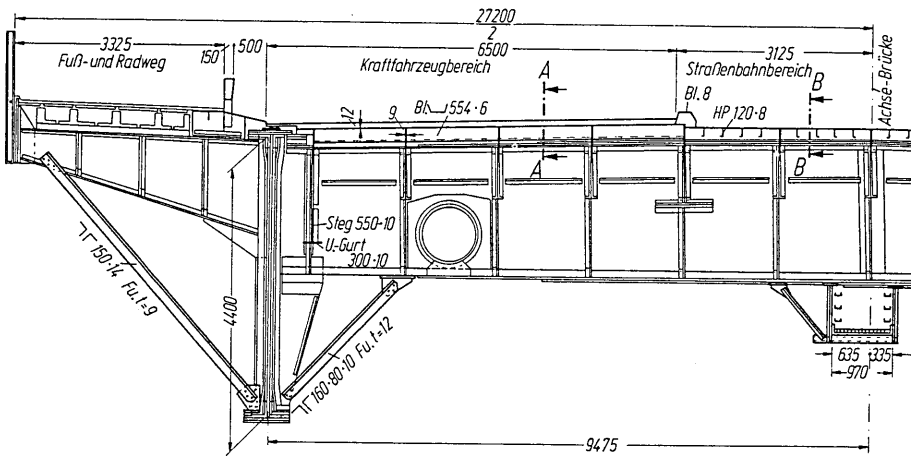
図2-6 各種の縦リブと横リブの交差部の構造例 (その1)



(j)ドイツの斜張橋 (橋梁名不明)



(k)鋼鉄道橋の鋼床版を対象とした試験体¹⁰⁾



(1)縦リブを橋軸直角方向に配置した例 (Köln-Mülheim 橋)¹¹⁾

図2-6 各種の縦リブと横リブの交差部の構造例 (その2)

3) 現場継手部

縦リブの現場継手の例を図2-7⁶⁾に示す。開断面リブの現場継手は高力ボルト継手の例が多いが、Uリブでは、高力ボルト継手と現場溶接継手の両方がある。デッキプレートが現場溶接継手でUリブが高力ボルト継手では、図2-7(d)のようにデッキプレートの裏当て材や放射線透過試験のフィルムを通すための貫通孔を設けておかなければならない。

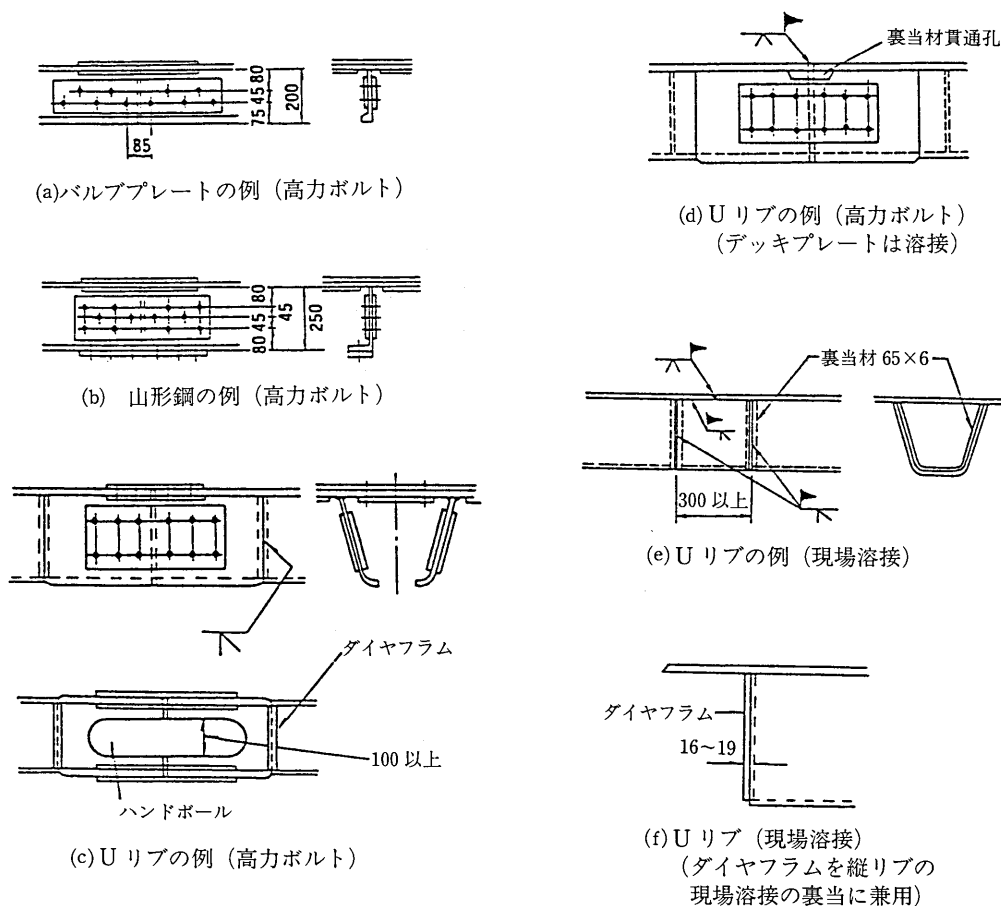


図2-7 縦リブの現場継手の構造例⁶⁾

横リブの現場継手の例を図2-8に示す。横リブの現場継手は、施工性から高力ボルト継手とするのが一般的である。横リブの現場継手部付近の構造は狭隘な空間となっていることが多いので施工性を配慮して高力ボルトの配置などの構造詳細を決めなければならない。

デッキプレートの現場継手の例を図2-9に示す⁶⁾。デッキプレートの現場継手は、高力ボルト継手と現場溶接継手がある。現場溶接継手は、鋼材重量の軽減および舗装に与える影響では有利であるが、施工性、架設精度管理では劣る例もある。最近では、現場溶接の利点が評価され、現場溶接継手が増加する傾向にある。

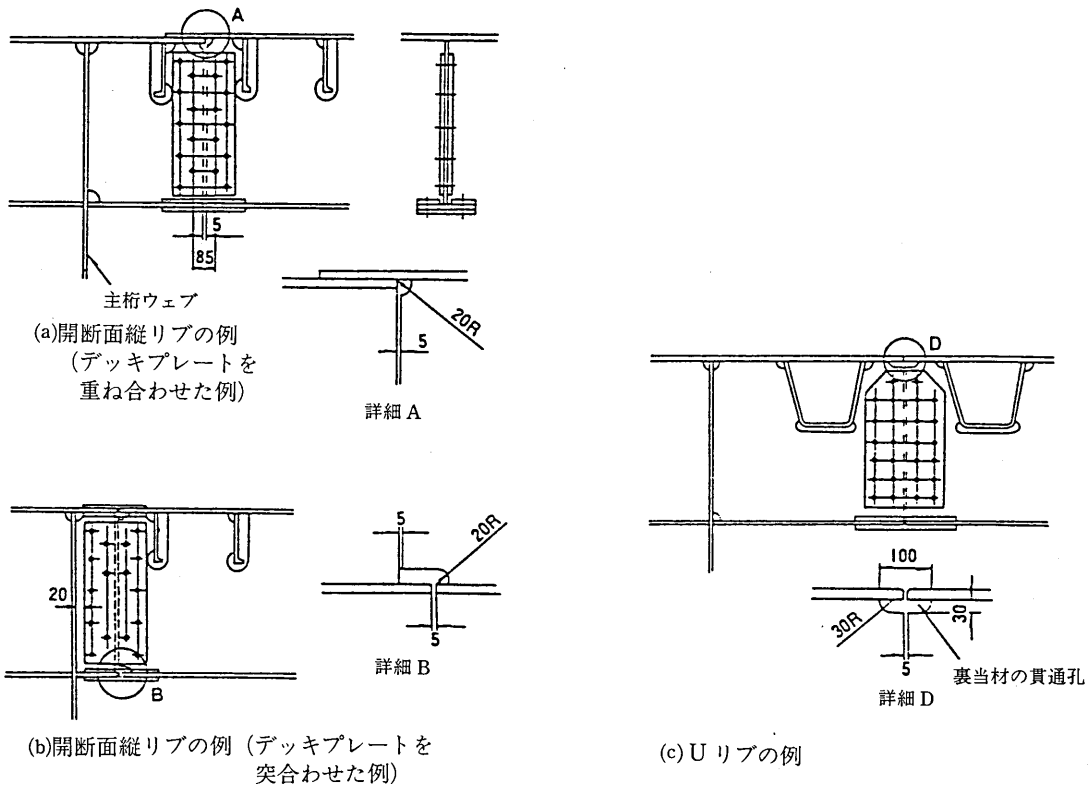


図 2-8 横リブの現場継手の構造例⁶⁾

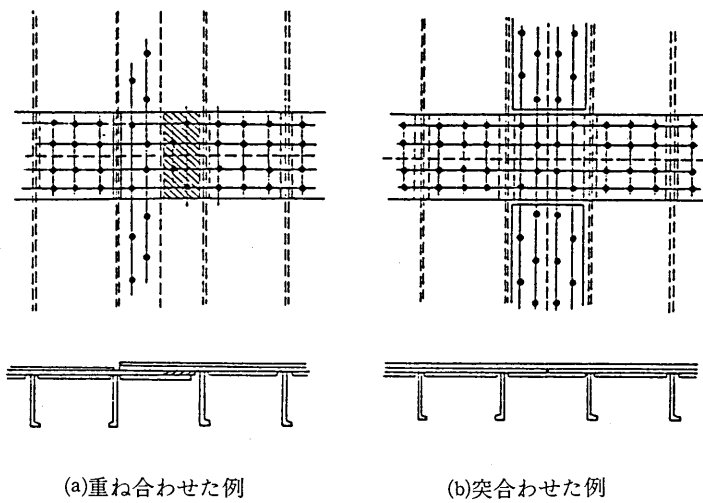
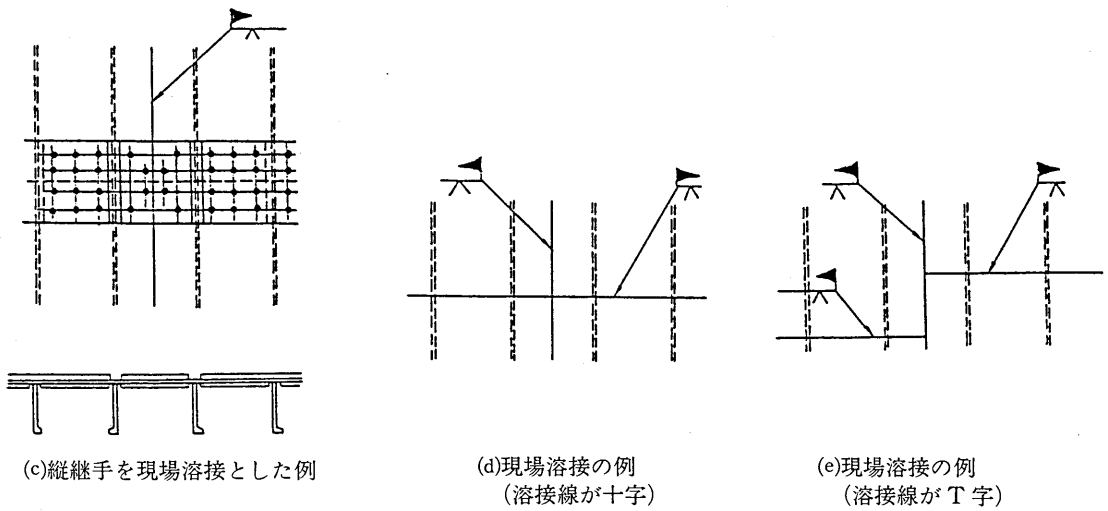


図 2-9-1 デッキプレートの現場継手の構造例⁶⁾

図2-9-2 デッキプレートの現場継手の構造例⁶⁾

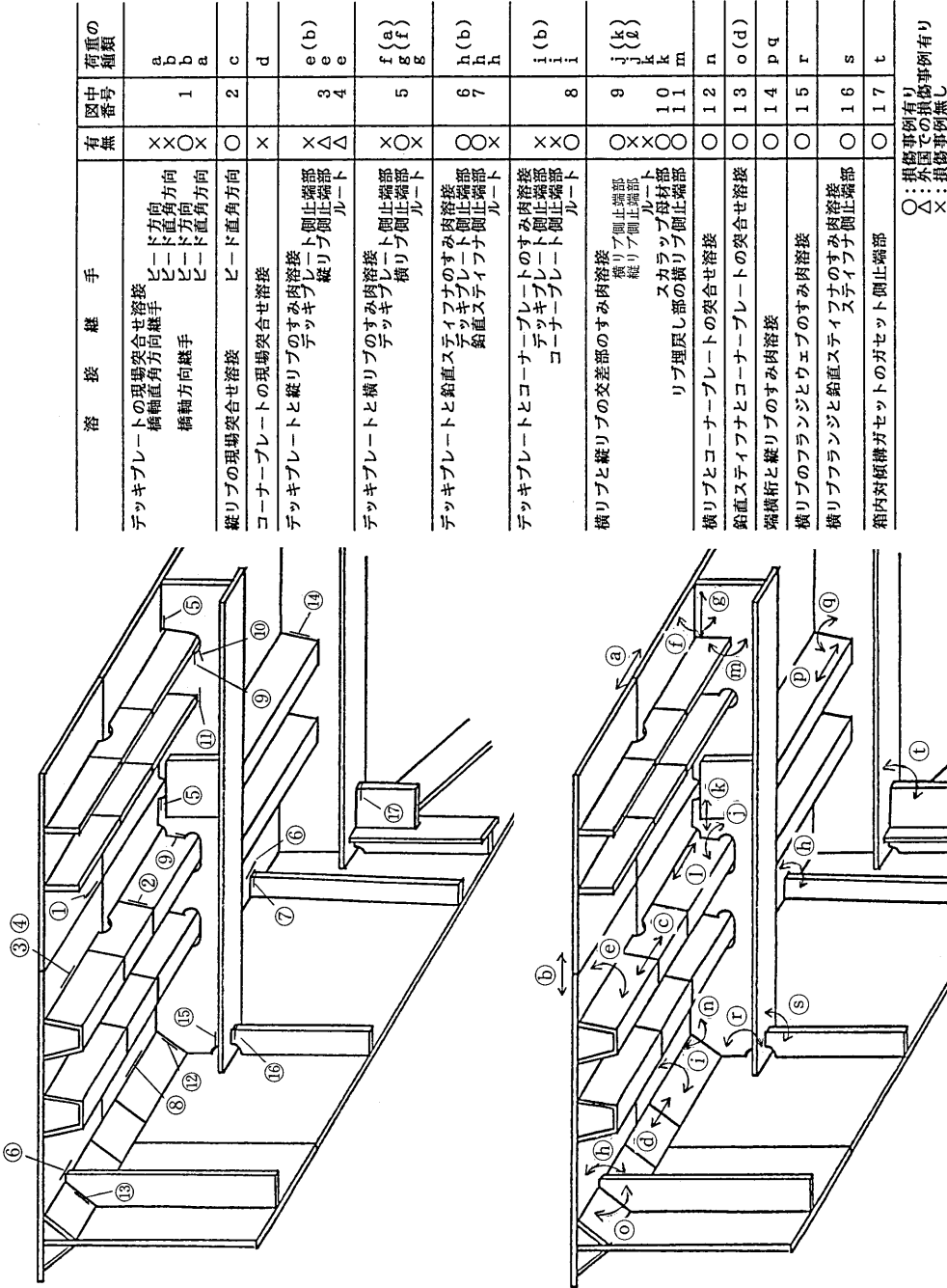
(3) 鋼床版の疲労設計の現状について

鋼床版に関しては、設計時に道路橋示方書に示される突合せ溶接および横リブとの接合部も含めた縦リブ溶接継手部の応力度の照査が行われている。縦リブ支間はUリブの場合でも2.0~3.0m程度と比較的小さくすることが多い。縦リブ支間を大きくすると主桁作用と床組作用を同時に考慮した場合の応力度の照査で設計が決まる場合が多く、また鋼床版舗装に対する影響を考慮して鋼床版の剛性を高める配慮が行われる傾向にある。さらに、疲労の照査は、T荷重1台のみの荷重であることから道路橋示方書で規定されている応力度まで達することがないのがほとんどである。このため材質の点でも鋼床版としてはSS41材で十分であるが、主桁作用を考慮してSM50材以上が使用されることが多い。このようなことから、現行の鋼床版の設計では、疲労の照査により、板厚や材質が決定されることはほとんどない。

現在、パソコンを使用したFSM法の自動設計システムにて鋼床版の設計を行うことが一般的に行われている。これは鋼床版を中間部および張出し部に分割し、帯板要素を橋軸直角方向に分割する方法である。縦リブの溶接継手以外の複雑な構造詳細や特殊な構造詳細の場合は、FEM解析により、大部分の箇所を照査は可能であるが、モデル化の妥当性および費用がかかる等の問題がある(表6-1参照)。

(4) 実橋における鋼床版の疲労損傷事例

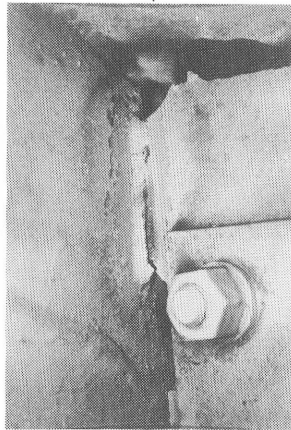
国内外で鋼床版の疲労損傷の事例が報告されている箇所を図2-10に示す。また、それらの損傷事例のうちの国内での損傷例のいくつかの写真を図2-11に、Severn橋(英国)での損傷の例を図2-12に示す¹²⁾。これらの資料は疲労損傷が発生したいくつかの橋梁の疲労損傷箇所をひとつにまとめたものであり、すべての橋梁の鋼床版が図で示した箇所に疲労損傷があるとか、損傷する可能性があるという意味ではない。道路橋示方書では疲労に関して縦リブ溶接継手のみ着目しているが、これらの資



○：損傷事例有り
△：外国での損傷事例有り
×：損傷事例無し

図 2-10 国内外で疲労損傷事例の報告されている箇所

デッキプレート突き合わせ溶接部、工場溶接では施工性がよく溶接欠陥も発生しにくいですが、現場溶接の場合溶接欠陥が発生することがある。

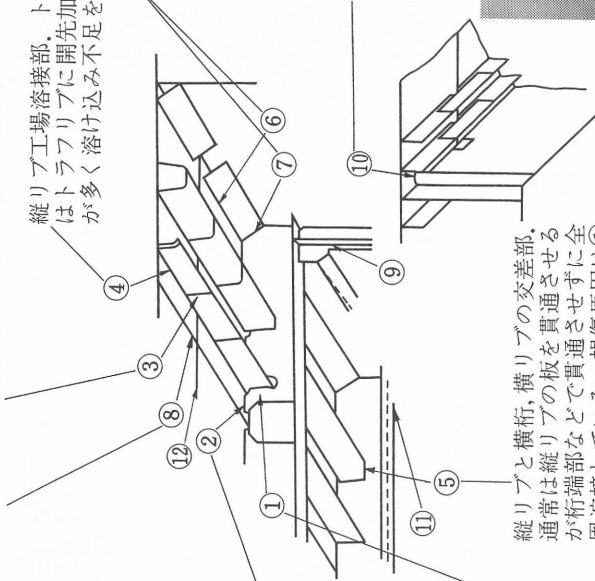


縦リブの現場溶接部、溶接時の溶け込み不良、作業空間が狭いことによる施工不良が起りやすい箇所である。

縦リブ工場溶接部、トラフリブの場合にはトラフリブに開先加工をしないことが多く溶け込み不足を生じやすい。

施工性が悪く溶接欠陥が発生しやすい箇所である。

鉛直スライフナーとデッキプレートとの溶接部、直上を輪荷重が通過することによる鋼床版の面外変形により発生したと考えられる。



縦リブと横桁、横リブの交差部、通常は縦リブの板を貫通させるが桁端部などで貫通させずに全周溶接している。損傷原因は①②と同様と考えられる。

縦リブと横リブ交差部、デッキプレートと横リブ溶接部、車輪が横リブ、横桁上を通過することから横リブ、横桁が面外方向に変形を受け、溶接部に応力集中が生じたため発生したと考えられる。溶接施工性が悪く溶接欠陥が発生しやすい箇所である。

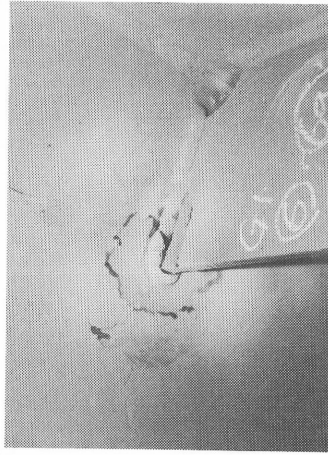
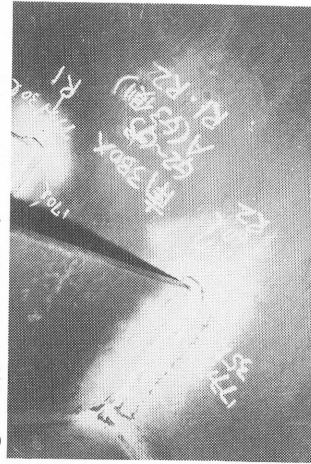
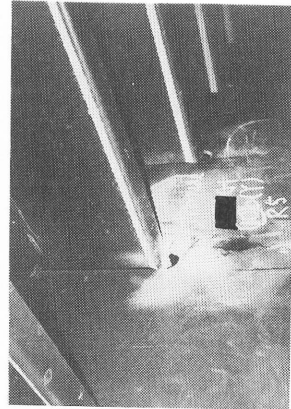
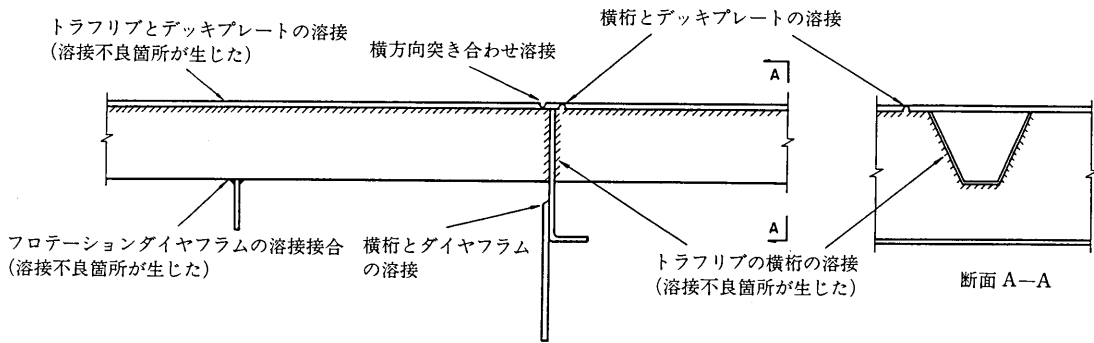
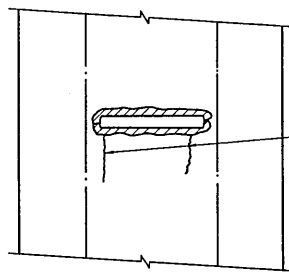
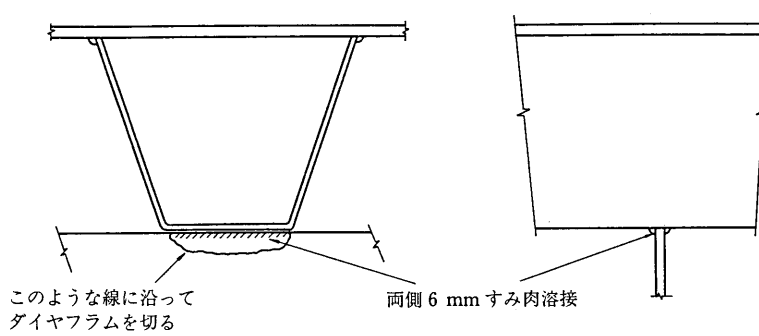


図2-11 国内の橋梁の鋼床版の疲労損傷例



ダイヤフラム位置の橋軸方向断面



典型的なひび割れを内面からみた図

典型的なひび割れ
(ひび割れは、さまざまだが、全部溶接端から派生し
大部分は、トラフリブに沿って走っている)

トラフリブとフロテーションダイヤフラムの溶接

図 2-12 セパン橋での溶接部の疲労損傷¹²⁾

料より縦リブ溶接継手以外の箇所の疲労損傷が報告されていることがわかる。

もちろん、これらの疲労損傷が発生しても、橋梁が落橋するような重大な状況にはすぐには結びつかないが、そのまま放置しておけば、舗装の損傷、平坦性の欠如、路面の陥没などの道路としての機能の低下が生じ、さらには橋梁の耐久性が低下することも考えられる。したがって、疲労環境の厳しい既設の鋼床版では、疲労損傷に対する点検をし、疲労損傷が発見されれば早期に対策を講じなければならないし、今後設計する鋼床版については、疲労に配慮する必要がある。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，II 鋼橋編，平成 2 年 2 月。
- 2) 日本道路協会：鋼道路橋設計便覧，昭和 54 年 2 月。
- 3) 本州四国連絡橋公団：鋼床版設計要領・同解説，1989 年 4 月。
- 4) 阪神高速道路公団，鋼構造検討委員会：鋼床版設計指針，平成元年 2 月。
- 5) F.R.Weitz：Entwicklungstendenzen des Stahlbrückenbaus, Der Stahlbau,1966,10.
- 6) 日本橋梁建設協会：鋼橋構造詳細の手引，1983 年 3 月。
- 7) 阪神高速道路公団：鋼構造物標準図集，昭和 63 年。
- 8) 名古屋高速道路公社：鋼構造物標準図集，昭和 62 年。
- 9) 上床，赤根：U 形鋼を使用した曲線鋼床版箱桁製作報告，東骨技報 Vol.16, 1983, 1
- 10) E. Haibach, I. Plasil：Untersuchungen zur Betriebsfestigkeit von Stahlleichtfahrbahnen mit Trapezhohlsteifen im Eisenbahnbrückenbau, Der Stahlbau, 1983. 9.
- 11) F. Ernst, H.J. Rdderscheidt：Umbau-und Unterhaltungswaßndhmen an der Rheinbrücke Köin-Mülheim, Der Stahlbau, 1976. 11.
- 12) 日本橋梁建設協会：'84 欧州橋梁調査団報告書，昭和 59 年 6 月。