

鋼床版縦リブ継手部の圧縮疲労強度

The compressive fatigue strength of longitudinal joints in orthotropic steel decks

藤井裕司*、松本毅**、三木千寿***、小野秀一****

By yuji FUJII, tsuyoshi MATSUMOTO, chitoshi MIKI, shuichi ONO

Compressive fatigue strength of longitudinal joints of orthotropic steel decks were examined by fatigue test, aiming at the proper design of steel box girders of long span cable stayed bridges of Honshu-Shikoku Bridges.

In this research, fatigue tests were conducted for five types of longitudinal joint systems with full compressive loading. Various fatigue cracks occurred in each specimen were classified in several types and their fatigue strength and suitable joint details were discussed.

1. まえがき

本州四国連絡橋公団では、死荷重を軽減するために長大鋼橋においては鋼床版を採用してきている。現在下部工工事が開始されている世界最大スパンを持つ斜張橋の多々羅大橋では桁は箱桁として計画されており、鋼床版が採用されている。斜張橋ではケーブル張力の水平分力として桁に圧縮力が作用するが、多々羅大橋はスパンが長大であるため作用する圧縮力も大きい。このことは桁の塔付近で特に顕著である。

本試験は、斜張橋の鋼床版に圧縮応力（橋軸方向）が作用する場合を想定し、圧縮応力場における鋼床版の疲労強度を検証し、疲労から見て好ましい構造ディテールを明らかにする目的で実施したものである。

着目している箇所は、鋼床版の橋軸方向の現場溶接部である。現設計では、デッキプレートの接合は現場溶接とし、それを行うための鋼床版同士の引き寄せとトラフリブの接合方法を、①引き寄せプレートを用いて、デッキプレートの溶接を行った後に、トラフリブを溶接で接合する方法（溶接タイプ）と、②トラフリブをボルト継手で接合する方法（ボルトタイプ）の2通りが考えられている。この試験ではこれらの各ケースについて、継手部の詳細構造を再現した供試体を製作し疲労試験を実施した。

* 工修 本州四国連絡橋公団 設計部設計第二課 課長 (〒105 港区虎ノ門5-1-5)

** 工修 本州四国連絡橋公団 設計部設計第二課 課長代理 (同上)

*** 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科 (〒152 目黒区大岡山2-12-1)

**** 工修 建設機械化研究所 研究第二部 (〒417 富士市大淵3154)

2. 試験概要

(1) 供試体

供試体は鋼床版箱桁のデッキプレートとそれに取り付けられる縦リブ（トラフリブ）1本を組み合わせたものであり、中央部には橋軸方向のデッキプレートとトラフリブ（以下、トラフと称す）の継手部を配置し、その両側にはダイアフラムを想定した横リブが取り付けられた構造である。また、供試体は載荷のバランスを考えて同一の継手構造の2体を、デッキプレート面を挟んで抱き合わせた形状とし、それを1組として試験に使用している。継手構造は従来から採用されている①溶接タイプと②ボルトタイプの2タイプで、②タイプのトラフ継手付近での詳細構造を変更したものを含めて全6供試体を作製し、試験を行った。

供試体の種類と名称を表-1に、供試体の形状・寸法を図-1に示す。試験機の載荷能力より、トラフの大きさは図に示すように本州四国連絡橋公団鋼床版設計要領（以下、本四要領と称す）の標準よりも若干小さいサイズとした。デッキプレート板厚は12mm、トラフ一般部では6mm板厚とし、横リブは10、12mmの2種類とした。

表-1 供試体

継手タイプ	供試体名	継手構造	試験荷重 (MPa)
溶接タイプ	CT-1-1	トラフリブの現場溶接接合 (裏当て金付き突合せ溶接) ・イレクシオンプレートの設置	150
ボルトタイプ	CT-2-1	継手部のトラフ板厚を変更したボルト接合 (一般部 $t=6\text{mm}$ →継手部 $t=8\text{mm}$) ・裏当て金 ($W=50\text{mm}$) の両側溶接	150
	CT-2-2		98
	CT-2-3	CT-2-1改良タイプ ・裏当て金のサイズ変更 ($W=50\text{mm}$ → 32mm) ・裏当て金の溶接方法変更 (両側→片側) ・両面突合せ溶接の採用	150
	CT-2-4	CT-2-1改良タイプ ・トラフの突合せ溶接省略 (全断面のトラフ板厚 $t=6\text{mm}$)	150
	CT-2-5	CT-2-1改良タイプ ・トラフの突合せ溶接省略 (横リブ間のトラフ板厚 $t=8\text{mm}$) ・横リブ貫通タイプへの変更	150

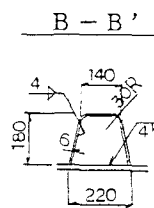
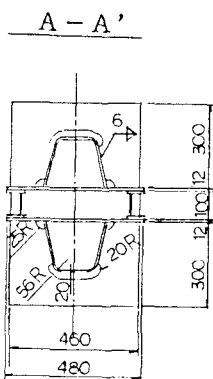
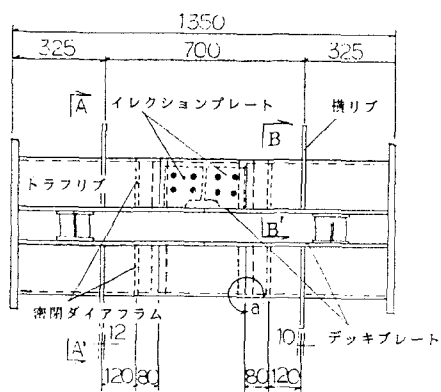
CT-1-1はトラフを現場溶接で接合するタイプで、継手付近のトラフ内部にはデッキプレート引き寄せ用のイレクシオンプレートが配置されている。トラフの現場溶接部は上向きの姿勢で溶接を行っている。

CT-2-1～CT-2-5はトラフをボルトで接合するタイプで、トラフの接合はM20、F10Tによる高力ボルト摩擦接合によった。なお、デッキプレートの突合せ溶接時には普通ボルトで固定しておき、その後高力ボルトで接合している。

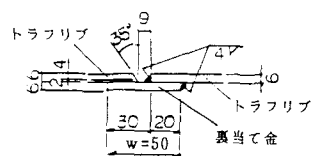
現段階ではボルトタイプが溶接タイプより工程上有利となることから、現場ボルト継手を採用する可能性が高い。したがって、CT-2-1の疲労試験の結果を踏まえ、CT-2-3～CT-2-5供試体では、CT-2-1の詳細構造を変更し、供試体の製作にあたった。

主な変更箇所は、CT-2-3ではトラフの裏当て金付き突合せ溶接の裏当て金の幅(W)を変更し、裏当て金の

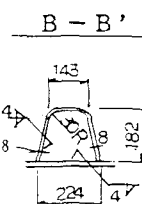
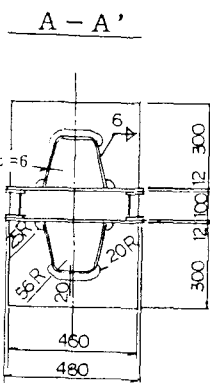
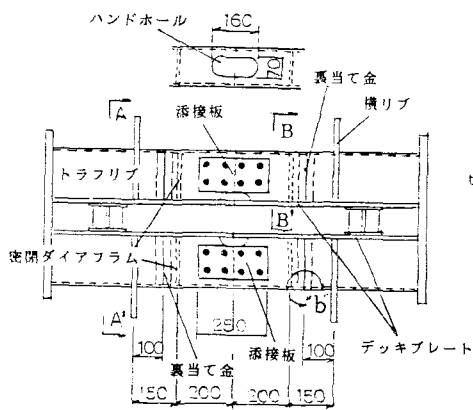
CT-1-1



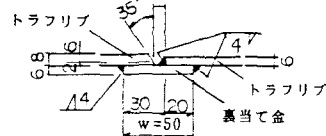
"a" 部詳細



CT-2-1, CT-2-2



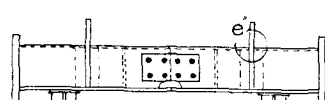
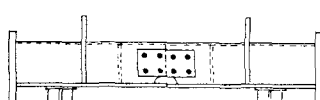
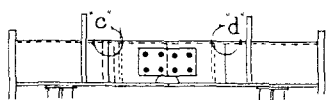
"b" 部詳細



CT-2-3

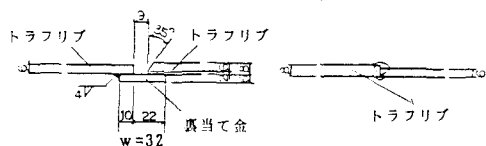
CT-2-4

CT-2-5



"c" 部詳細

"d" 部詳細



"e" 部詳細

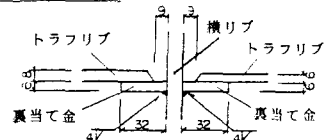


図-1 供試体の形状・寸法

トラフへの溶接を片側のみとした。また、一部では裏当て金を用いない両面突合せ溶接も行った。CT-2-4は、トラフの突合せ溶接部をなくし、通常ハンドホール等による断面欠損や腐食を考慮して行うトラフ板厚を8mmに増厚することなしに、トラフ全断面の厚さを6mmとした。CT-2-5は、CT-2-4と同様にトラフの突合せ溶接を省略する目的で、横リブ間の全部を8mm板厚のトラフとした。これに伴って、CT-2-5では、横リブがトラフ貫通タイプとなり、横リブとトラフは裏当て金付きの十字溶接継手型となっている。

使用材料はトラフとデッキプレートがSM490YA材で、その他はSS400材である。これら鋼材の機械的性質と化学成分を表-2に示す。

溶接方法はデッキプレート突合せ溶接がサブマージドアーク溶接で、その他は手溶接である。なお、デッキプレートの溶接により発生した角変形はプレス等により矯正している。そのほか組立順序等は実際の鋼床版の方法に準じている。

本試験での着目ディテールは次の通りである。

- ① デッキプレート突合せ溶接部
- ② デッキプレートとトラフのすみ肉溶接部
- ③ デッキプレートと横リブの十字溶接継手部
- ④ トラフの突合せ溶接部
- ⑤ トラフと横リブの十字溶接継手部
- ⑥ トラフと密閉ダイアフラムの十字溶接継手部
- ⑦ イレクションプレートとデッキプレートの溶接部（CT-1-1のみ）
- ⑧ ハンドホールR部（CT-1-1を除く）

表-2 鋼材の機械的性質と化学成分（ミルシートより）

材 料	板厚 (mm)	機 械 的 性 質			化 学 成 分						
		降伏点	引張強度	伸 び	C	S _i	M _n	P	S	C _u	C _{e q}
		(N/mm ²)	(N/mm ²)	(%)	×100			×1000		×100	
SM490YA	6	425	557	25	16	44	140	11	2	1	41
	8	454	573	19	16	44	140	11	2	1	41
	12	426	558	26	17	47	141	13	2	1	42
SS400	6	340	455	29	15	17	68	20	6	1	—
	10	313	437	28	15	18	69	22	6	1	—
	12	299	435	31	15	18	69	22	6	1	—

（2）試験方法

疲労試験は本州四国連絡橋公団所有の動的能力4MNの大型疲労試験機を用いた。供試体は図-2に示すようにセットし、試験機と供試体の上下載荷板の間に硬質ウレタンゴムを挟み、供試体全断面に均等な応力が作用するようにした。

試験荷重は、まず、下限応力が多々羅大橋において床組作用と主桁作用により生じる応力（-196MPa）と等しくなるように下限荷重を-3.43MNと設定し、次にき裂を発生させて疲労強度を検証するための応力範囲として150MPaを定めることにより、上限荷重を-0.83MNとした。ただし、CT-2-2供試体については、CT-2-1と全く同じ供試体であるため上限荷重を下げて公称応力範囲を98MPaとした。

繰り返し載荷は荷重制御の部分片振り載荷で3.5Hzの速度で行った。さらに、繰り返し回数約50万回に1度の割合で応力範囲を1/2にして、破面にビーチマークを残し、それによりき裂の進展状況を観察できるようにした。

疲労試験中のき裂検出方法は、約10～20万回の繰り返し載荷ごとに、主として目視で行い、必要に応じて

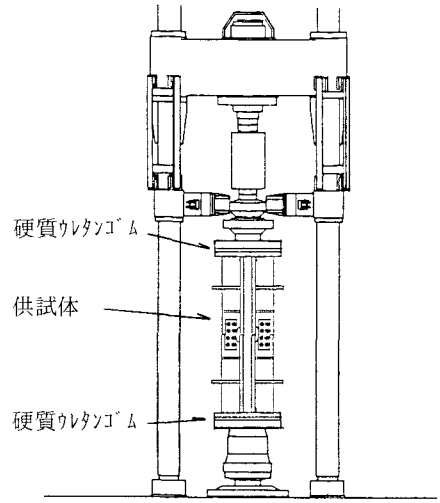
磁粉探傷試験（湿式）を併用することとした。検出されたき裂については適宜にき裂長調査を行い、き裂の進展状況を調査した。

疲労試験終了後、供試体を解体し、検出された疲労き裂はき裂に沿って破壊することにより破面を露呈し、疲労き裂の発生と進展の状況およびビーチマーク等を観察した。

3. 疲労試験結果

（1）き裂の検出状況

疲労試験の結果、検出されたき裂を表－3に示す。また、図－3に代表的き裂の模式図と検出時および破面の写真を示す。なお、き裂の破面ではビーチマークの観察が難しいものが多く、き裂の発生起点が推測できる程度であった。これはき裂が延びるに従って、き裂面同士が接触するようになるためである。



図－2 試験状況

表－3 検出き裂一覧表

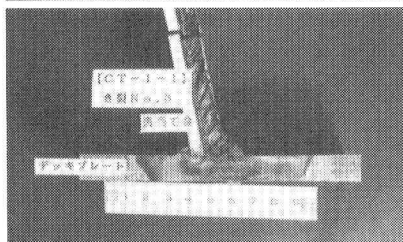
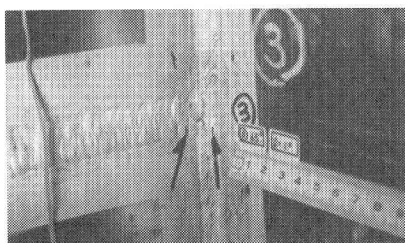
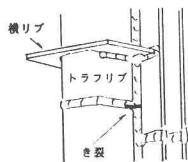
供試体名	き 裂 検 出 箇 所	検出数	初回検出時 繰返し回数
CT-1-1	デッキプレートとトラフリブ突合せの溶接交差部	4	$(\times 10^4)$ 60
	トラフリブ突合せ溶接部	4	
	トラフリブと密閉ダイアフラムの十字溶接部	1	
CT-2-1	裏当て金すみ肉溶接部	9	50
	デッキプレートとトラフリブ突合せの溶接交差部	4	150
	トラフリブ突合せ溶接部	1	201
CT-2-2	検出なし	—	—
CT-2-3	トラフリブ突合せ溶接部	3	48
	横リブとトラフリブの十字溶接部（トラフリブ貫通）	1	173
	裏当て金すみ肉溶接部	1	190
	ハンドホールR部	1	215
	トラフリブ両面突合せ溶接部	1	—
CT-2-4	トラフリブと密閉ダイアフラムの十字溶接部	4	93
	ハンドホールR部	4	93
CT-2-5	横リブとトラフリブの十字溶接部（横リブ貫通）	5	83
	ハンドホールR部	1	149

CT-1-1とCT-2-1で分類したデッキプレートとトラフ突合せの溶接交差部は2方向の溶接線が交差している部位であり、き裂の破面からは起点の判定が困難であった。そのため、位置的にトラフの突合せ溶接部から検出されたき裂と交差部から検出されたものでは区別した。

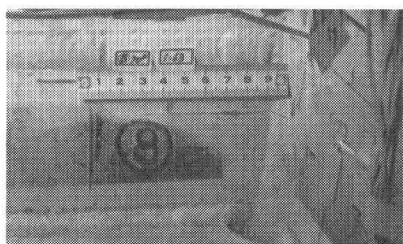
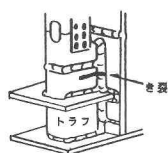
CT-1-1では上向きの現場溶接となるトラフの突合せ溶接付近からのき裂が大半を占めている。

CT-2-1ではトラフ突合せ溶接に際し取り付けられた裏当て金のすみ肉溶接部からのき裂がほとんどであり、それら大半はビード止端を起点とするもので、かつ試験の前半に検出されている。

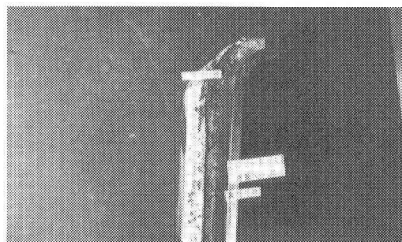
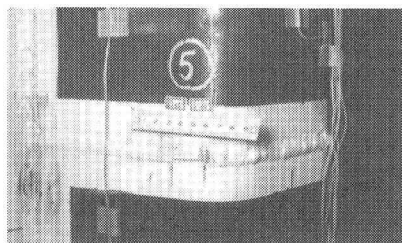
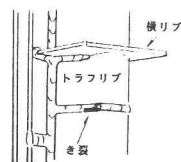
デッキプレートと
トラフ突合せの溶接交差部(CT-1-1)



裏当て金すみ肉溶接部(CT-2-1)



トラフ突合せ溶接部(CT-1-1)



横リブとトラフの十字溶接部 (トラフ貫通)
(CT-2-3)

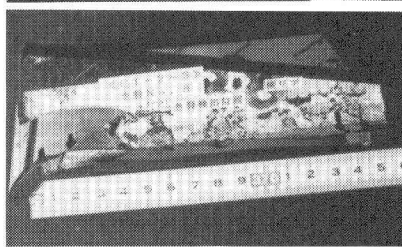
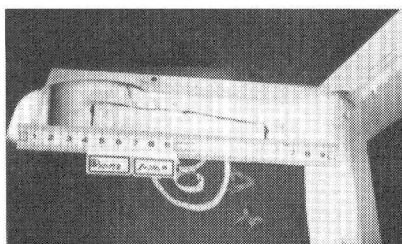
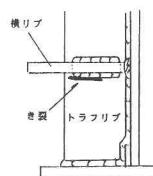
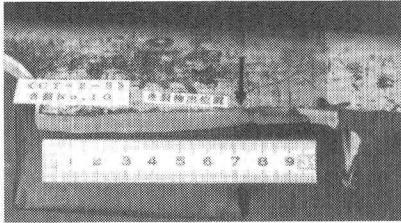
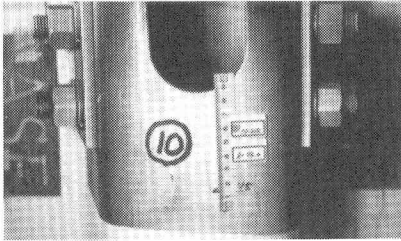
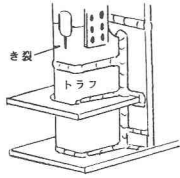
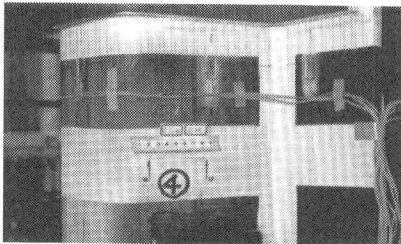
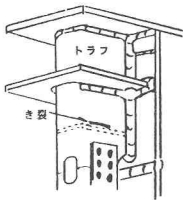


図-3(1) 代表的検出き裂

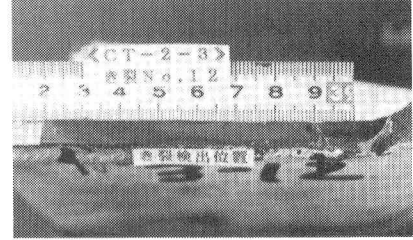
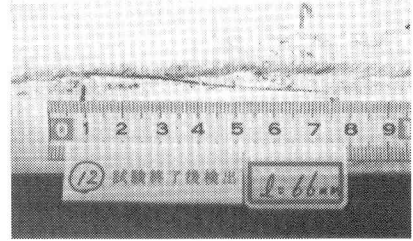
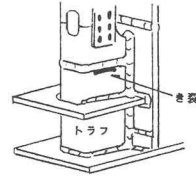
ハンドホールR部(CT-2-3)



トラフと密閉ダイアフラムの十字溶接部
(CT-2-4)



トラフ両面突合せ溶接部(CT-2-3)



横リブとトラフの十字溶接部(横リブ貫通)
(CT-2-5)

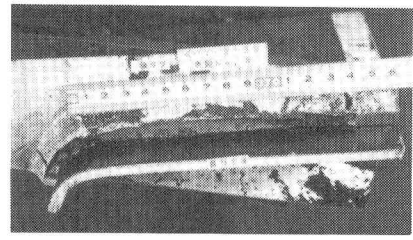
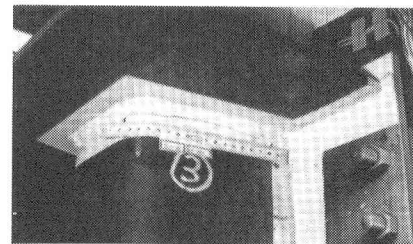
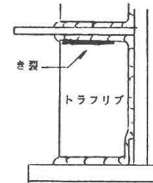


図-3(2) 代表的検出き裂

CT-2-1と全く同じ構造の供試体で応力範囲を下げたCT-2-2では繰り返し回数400万回まで疲労試験を行ったが、1箇所のみき裂も検出されなかった。さらに、疲労試験終了後に供試体を解体し、CT-2-1でき裂が検出された各部を中心に、磁粉探傷試験等によって細部までき裂調査を行ったが、ここでもき裂は検出されなかった。

CT-2-3では、CT-2-1で多数検出された裏当て金すみ肉溶接部からのき裂は減少した。これはCT-2-3では裏当て金のトラフへの溶接を片側のみとしたためと考えられる。またその反面、トラフ突合せ溶接部からのき裂が若干増加した。これは裏当て金の片側だけをトラフに溶接しているため、直接応力が突合せ溶接部に流れたためと考えられる。さらに、疲労試験後のき裂の破面調査では、裏当て金の取付位置が不適当であることが判明し、このために裏当て金端部に溶接の溶け落ちをも確認することができた。この溶け落ちていた箇所からもき裂が検出されており、他のき裂も同様に裏当て金位置に原因があるとも考えられる。

本供試体でトラフ両面突合せ溶接部から検出されたき裂は、疲労試験終了後に発見され、本来検出されるべき繰り返し回数は不明である。

CT-2-4は継手部近傍のトラフ板厚を6mmのままにし、トラフの突合せ溶接を省略したタイプである。き裂はハンドホールR部4箇所の全部から検出され、き裂の種類はトラフリブと密閉ダイアフラムの十字溶接部との2タイプであった。ハンドホールR部で検出されたき裂については、き裂の進展が非常に早く密閉ダイアフラムまで到達している。また、ハンドホールR底部より3mm離れた場所では、約138MPaの引張応力（橋軸直角方向）が作用していた。供試体解体後、ハンドホールR部からのき裂を観察したところ、R部に加工時にできたと思われるバリの様なものが多数見られ、これらがき裂発生の起点となっていることが考えられる。

CT-2-5では、横リブが貫通タイプであり、トラフとの十字溶接部からのき裂がほとんどであった。またこれらはルート部を起点としている。本供試体では横リブを挟んだ上下の溶接ビード部からき裂が検出されるなど、圧縮疲労試験を特徴付けるようなき裂の発生状況であった。

（2）き裂のタイプとS N線図

本試験で検出されたき裂のタイプごとに供試体を分類し、表－4に示す。表ではそのき裂が発生した継手構造を鋼構造協会疲労設計指針（案）の等級で分類し、その等級も記載した。

それぞれの分類ごとに、検出されたき裂の発生をS N線図にプロットし、図－4に示す。ここで、本試験が片振りの完全圧縮疲労試験であるため、許容応力範囲を3割増しとして、疲労設計曲線を設定している。

これら図より、ハンドホールR部から検出されたき裂以外は、どれもそれぞれの疲労設計強度を上回る結果となっている。

表－4 き裂の分類

き 裂 検 出 箇 所	き裂検出供試体	等級
トラフ突合せ溶接部	CT-1-1, CT-2-1, CT-2-3	F'
裏当て金すみ肉溶接部	CT-2-1, CT-2-3	F'
デッキプレートとトラフ突合せの溶接交差部	CT-1-1, CT-2-1	F'
トラフと密閉ダイアフラムの十字溶接部	CT-1-1, CT-2-4	E'
横リブとトラフの十字溶接部（トラフ貫通）	CT-2-3	E'
横リブとトラフの十字溶接部（横リブ貫通）	CT-2-5	E'
トラフ両面突合せ溶接部	CT-2-3	D'
ハンドホールR部	CT-2-3, CT-2-4, CT-2-5	C'

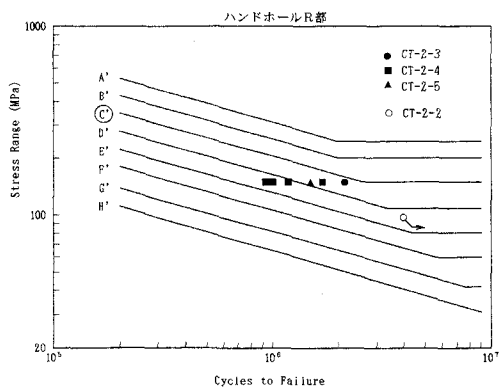
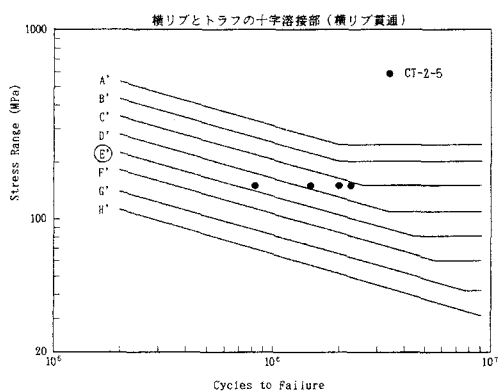
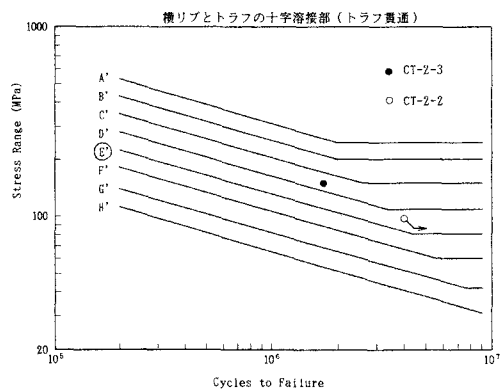
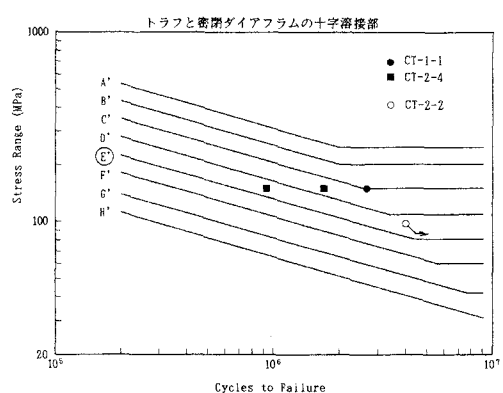
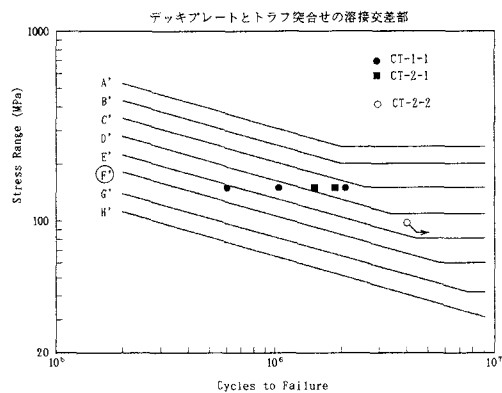
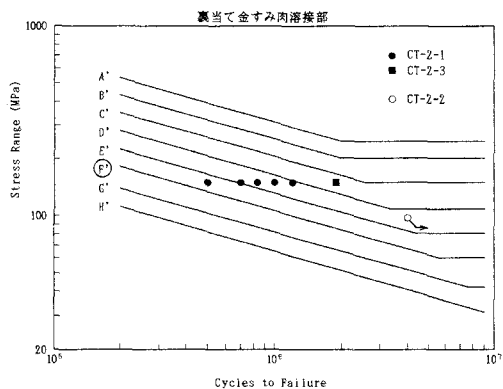
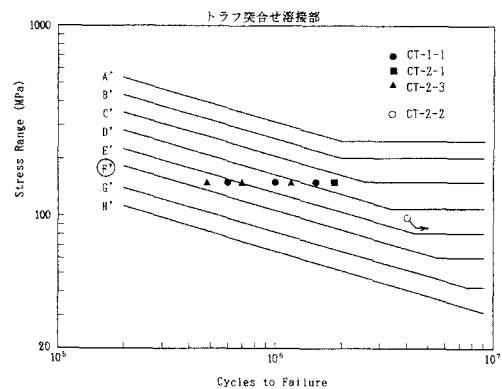


図-4 継手別疲労等級分類

(3) き裂の進展状況

CT-1-1とCT-2-1で検出されたき裂（前出の表-3参照）のうち、疲労試験の前半（繰返し回数100万回以前）に検出されたき裂の進展状況を図-5に示す。き裂が表面で検出されると急速に進展し、あるところまで進展すると停留してしまうことがわかる。これは、溶接による局部的な残留応力がき裂の発生によって解放されたためと考えられ、圧縮疲労試験でのき裂進展挙動の特徴と考えられる。

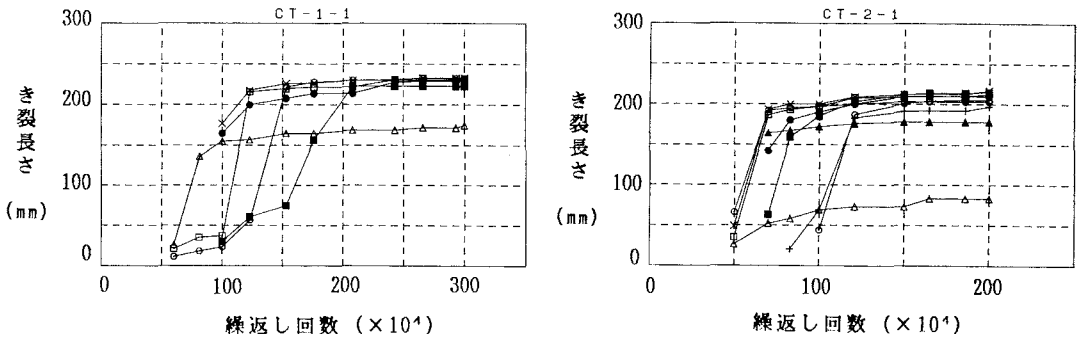


図-5 き裂の進展状況

4 まとめ

表-3より判断すると、CT-2-4（6mm板厚のトラフを通したもの）が最も疲労強度が高い。これはCT-2-1、CT-2-3にある疲労上弱点となっているトラフ突合せ溶接がないためである。しかしながら、一般部での6mm板厚のトラフは腐食環境が厳しくないとして採用しており、トラフの両面が腐食環境に置かれるような現場継手部では、一般に8mmに増厚している。したがって、この形式を採用するには防錆上の検討が必要となる。

CT-2-5も弱点であるトラフ突合せ溶接部がないためCT-2-4に次いで疲労強度が高い。しかし、トラフを横リブに取り付けるのに裏当て金付きの溶接としているため、この部分が弱点となっている。またこの形式は、横リブ間がすべて8mm板厚であるため鋼重が少し増す傾向にある。

トラフの密閉ダイアフラムは疲労上弱点となることもある（CT-2-4参照）が、この場合は横リブ間がすべて8mm板厚のトラフであるため省略することも可能である。

CT-2-1は裏当て金の両端をトラフにすみ肉溶接したもので、製作上からはやりにくい方法である。CT-2-1は早くからき裂が発生したが応力範囲を150MPaから98MPaに下げたCT-2-2（CT-2-1と全く同じ構造）では、き裂は発見されなかった。（図-4の裏当て金すみ肉溶接部のグラフから200万回以内に疲労き裂が発生することが予想されたが、実際には発生しなかった）

CT-2-3は本四公団で一般的に採用されている詳細構造であるが、疲労強度はCT-2-1と同程度である。このことから、構造の似ているCT-2-3も98MPaで試験を行えばき裂が発生しない可能性もある。

CT-1-1は現場溶接で接合するタイプであるが、疲労強度はCT-2-1、CT-2-3と同程度である。しかし工程上高力ボルト継手より時間がかかる。

以上から、実際に発生する応力レベルから考えると、CT-2-3でも構造上問題がない可能性がある。またCT-2-4、CT-2-5はより望ましいが、CT-2-4では腐食に対する検討が、CT-2-5では鋼重増の確認が必要となる。

謝辞

本実験を実施するにあたり、(財)海洋架橋調査会に設置された鋼上部構造委員会疲労分科会の委員各位に有益な助言を頂きました。ここに深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 鋼床版設計要領・同解説 1989年4月 本州四国連絡橋公団
- 2) 上部構造設計基準・同解説 1989年4月 本州四国連絡橋公団
- 3) 疲労設計指針(案) 平成元年11月 日本鋼構造協会
- 4) 鋼床版の疲労 鋼構造シリーズ4 平成2年9月 土木学会

(1992年9月21日受付)