

3径間連続鋼床版箱桁端部の応力性状と補修

神戸管理部 神戸維持事務所 杉山 功
 同部 同所 佐藤 仁男
 同部 保全課 前田 俊雄

まえがき

昭和57年8月、高欄水切部の点検実施中、神戸西宮線の湊川付近で、鋼床版箱桁端部に亀裂が発見されたので、同種桁の調査をした結果、16箇所中、15箇所にも端支点脊のソールプレートと下フランジとの隅肉溶接止端部に、同様の亀裂のあることが判明した。

そこで、これらの亀裂の原因を明らかにし、また応力の実態把握ならびに補修方法などを検討するために、実橋における応力性状の調査を行うとともにFEM解析も実施した。

その結果、亀裂は活荷重応力の繰り返しによりもたらされたものと推測され、補修方法としては、

亀裂箇所の補修溶接をしたうえで、ソールプレートが大きくなり、疲労には弱いといわれる隅肉溶接はさけ、ボルトにより接合する方法を採用した。

亀裂調査、応力性状計測、解析などを含め発見より14ヶ月で補修を完了した。

本報告は、これらの内容について紹介するものである。

1. 亀裂調査

1-1 構造概要

亀裂の発見された3径間連続鋼床版箱桁は、昭和43年7月に供用され、発見時まで既に14年を経過していた。

図-1に示すように下部構造は全て鋼製橋脚で

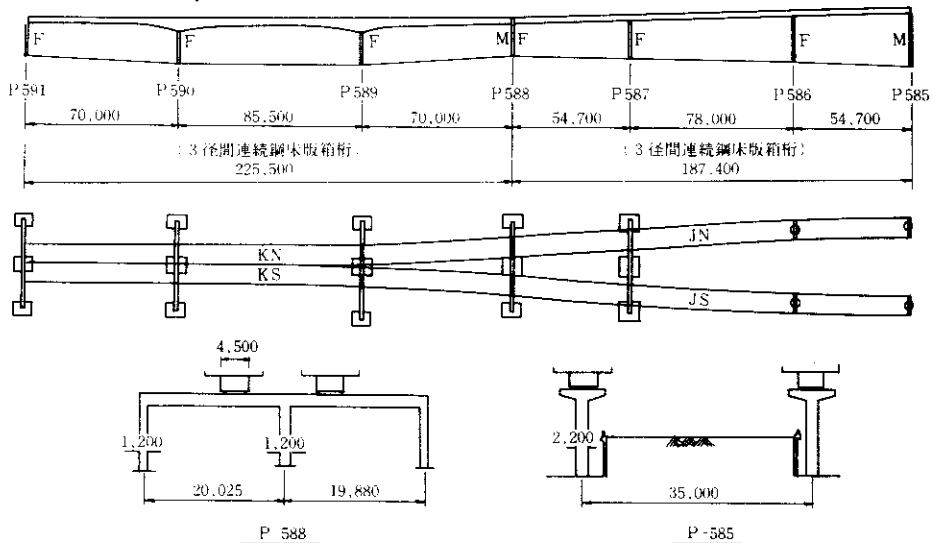


図-1 一般図

上部構造は、上下線が分離し並列した構造であり、同種桁が4橋（JN、JS、KN、KS橋）あり1 Box 2 Shoeとなっている。主桁断面はそれぞれ4500×2500程度であり、端支点はベアリング沓を採用している。

1-2 調査結果

亀裂の発生状況の調査結果を図-2、表-1に示す。なお調査方法は、塗膜の除去後、研磨を行い、液体浸透試験（PT）により実施した。

調査の結果、次のようなことが明らかになった。

①可動沓、固定沓の区別なく亀裂が発生（発生箇所 15箇所）。

②下フランジ母材に亀裂（発生箇所 15箇所）。

③腹板に亀裂が進展したものは3箇所あり、その内2箇所はKS橋でP-588上にある。

④亀裂は、図-3に示すように、下フランジとソールプレートとの隅肉溶接止端部のほぼソールプレートの中心あたりから発生し、伝播したようである。

⑤沓（可動沓）は大きく移動している痕跡がある。

⑥各支点の水準測量から大きな支点沈下は、みられない。

なお、代表的な亀裂の状況を図-4および写真-1に示す。

表-1 亀裂性状

橋名	種別	沓動固定	亀裂位置	フランジ下面		P-588上面		腹板、外周
				山側	海側	外側	内側	
JN P585-P588 山側	P585	可	山	◎	107	0	144	0
			海	◎	81-20=61	0	113	0
	P588	固	山	◎	230	0	113	0
			海	◎	225	0	208	0
JS P585-P588 海側	P585	可	山	◎	191	0	114	0
			海	◎	90+72+44+22 228	0	141	0
	P588	固	山	◎	254	0	202	0
			海	◎	144	0	0	0
KN P588-P591 山側	P588	可	山	◎	0	0	0	0
			海	◎	67-27=36	0	0	0
	P591	固	山	◎	87	0	0	0
			海	◎	381	90	0	80+55+20 =155.1
KS P585-P588 山側	P588	可	山	◎	242	50	0	57.5-45=107.5
			海	◎	377	90	0	59+53+73+50+20 =215.3
	P591	固	山	◎	96	25	0	0
			海	◎	121-48=73	24	0	0

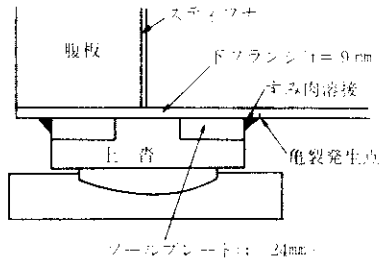


図-3 亀裂発生説明図

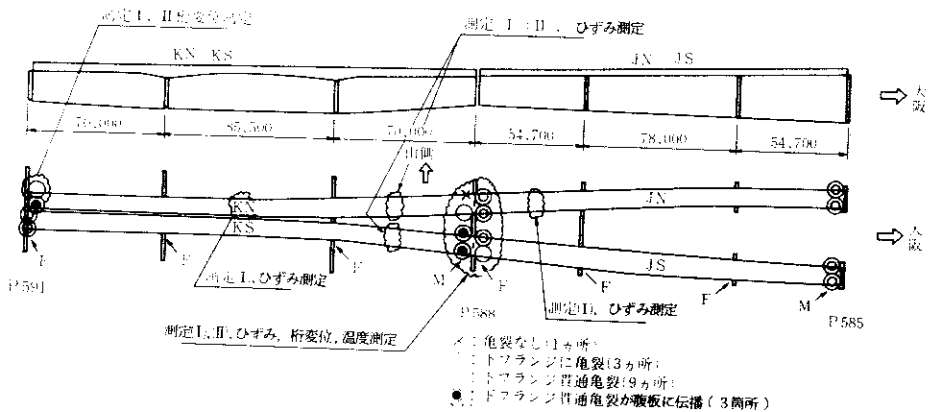


図-2 亀裂発生箇所図

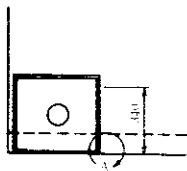
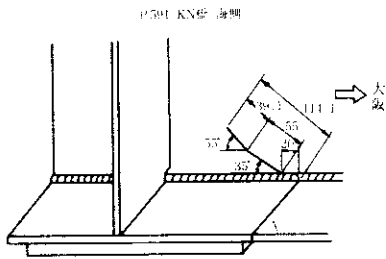


図-4 亀裂伸展状況図

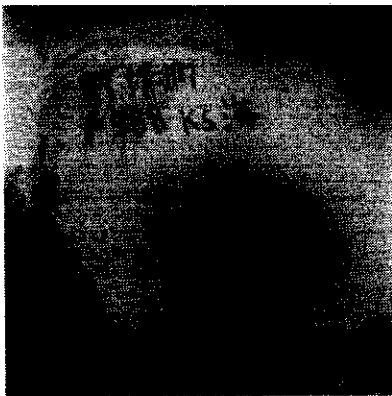


写真-1 亀裂状況

1-3 亀裂追跡調査

腹板まで亀裂の伸展していた3箇所(表-1、 \odot 印)について追跡調査をした結果、1ヶ月当たり5mm程度伸展した箇所もあった。図-5にその結果を示す。図中で2月以後、亀裂の伸展が遅くなっているのは、応急措置として、下フランジの亀裂発生箇所に対板を溶接し腹板亀裂の伸展をおさえたためである。

2. 応力性状調査

2-1 測定内容

亀裂の発生した桁端支那部におけるソールプレート近傍の下フランジ応力、腹板応力ならびにそれらの頻度、およびベアリング沓の滑動と回転機能がどのような性状を示しているのか、また荷重実態(活荷重)がどのようになっているのかなどに着目して、測定は次のような2種類に大別して実施した。

①測定Ⅰ 試験車載荷による静的測定(ケース1~5)

②測定Ⅱ 一般車による24時間連続測定

なお、桁端部の応力性状を把握するために、唯一亀裂のない箇所であるP-588、KN橋山側部を選定した。測定箇所は図-2に \odot 印で示す。

(1)測定Ⅰ(試験車載荷)

試験車(11tダンブトラック、積載総重量20t、T-20荷重相当)を6台使用し図-6のように、ケース1~5の静的載荷試験を行った。

測定項目は、次のとおりである。

(イ) 沓部下フランジおよび腹板のひずみ測定

(ロ) 載荷位置下フランジのひずみ測定

(ハ) 桁端部の変位測定

(2)測定Ⅱ(24時間連続測定)

一般車走行による動的測定であり、各測定項目は次のとおりである。

(イ) P-588沓部とKN、KS橋の側径間中央部の下フランジおよび腹板のひずみ測定

(ロ) 桁端部の変位測定

(ハ) 温度測定

測定Ⅰの静的載荷試験は、夜間の交通量の少ない時間帯を選び片側車線交通規制で、極力試験車

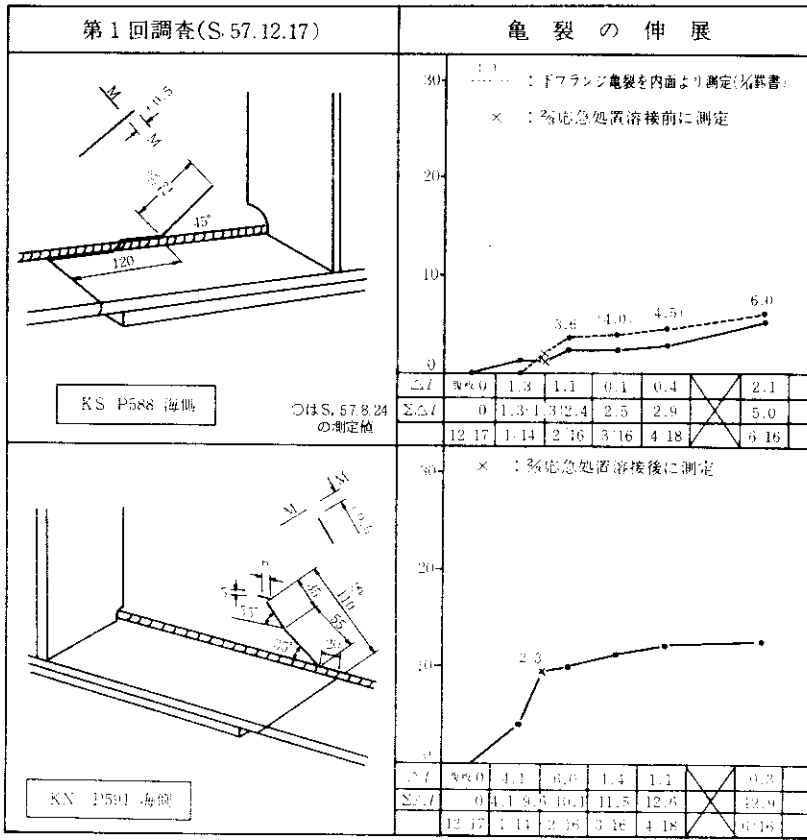


図-5 亀裂追跡調査図

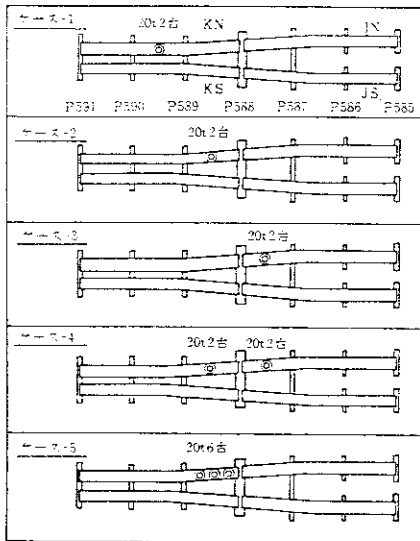


図-6 載荷ケース

以外の一般車が載荷しないような体制で準備したが実際は、載荷時間(約2分)、計測時間(約40秒)を要するため、一般車による影響を防ぐことはできなかった。

したがって、1回だけの測定では、確かなデータを得ることは困難なので実際の測定では、初期値測定7回および各載荷ケース3~4回測定した。(実測値は21~28個のデータ数となる。)

2-2 測定結果および分析

静的載荷試験については、一般車の影響もあり各載荷ケース、1回の測定値では偏ったデータになる可能性もあるのでデータ数(21~28個)を多くとり、その平均値で各々の応力性状を把握することとした。またケース4と5については、FEM解析を行い実測値との比較を行った。

静的な応力性状については以上のような方針に基づいて分析を行ったが、その結果も含め、以下にベアリング沓の挙動、応力頻度（24時間連続測定）などの結果について述べる。

(1) 桁端部の応力性状（試験車載荷）

KN橋P-588山側部（亀裂のない箇所）の下フランジ外面の測定結果は図-7に示すとおりであり、実測値（平均値）はFEM解析値とはほぼ近似している。なかには実測値（図中・で示す）のかなり大きい部分があるが、これらは一般車の影響などにより初期値に偏りがあったためであろう。また、腹板の測定結果からは、顕著な局部曲げの現象は見受けられなかった。

なお、支承部の応力性状をさらに詳しく把握するためFEM解析を行った。図-8にソールプレート前面5mm位置での下フランジの橋軸方向の応力度分布を示す。これによるとフランジ内外面でかなりの応力差があり板曲げの現象のあることがわかる。応力度の分布がほぼ一樣になる位置は、図-9に示すようにソールプレート前面より175

mm（桁端部より635mm）付近である。

同じように腹板についても解析を行っているが、これによれば鉛直方向の応力度の分布状況はフランジ下端から40mm程度離れば一樣となっている。これらの結果はいずれもケース5の場合である。

(2) ベアリング沓の挙動

自動車荷重に対して主桁はたわみ、端支点部で回転角を生ずる。したがって可動沓が正常に機能していれば図-10に示すように水平滑動と回転変位を生じ、ソールプレート近傍に拘束応力は生じないはずである。しかし、水平滑動機能が欠けると下フランジに水平拘束応力が生じ、また回転機能が欠けると腹板に拘束曲げモーメントを生ずる。

表-2、表-3に静的荷重試験による沓の変位量および腹板応力の実測値と計算値との結果を示す。

表-2より沓は水平方向にはほとんど滑動していないことがわかる。また表-3より沓の回転を完全に拘束した場合の腹板応力の計算値に対し、実測値は最大値の方で比較しても1割程度にしか

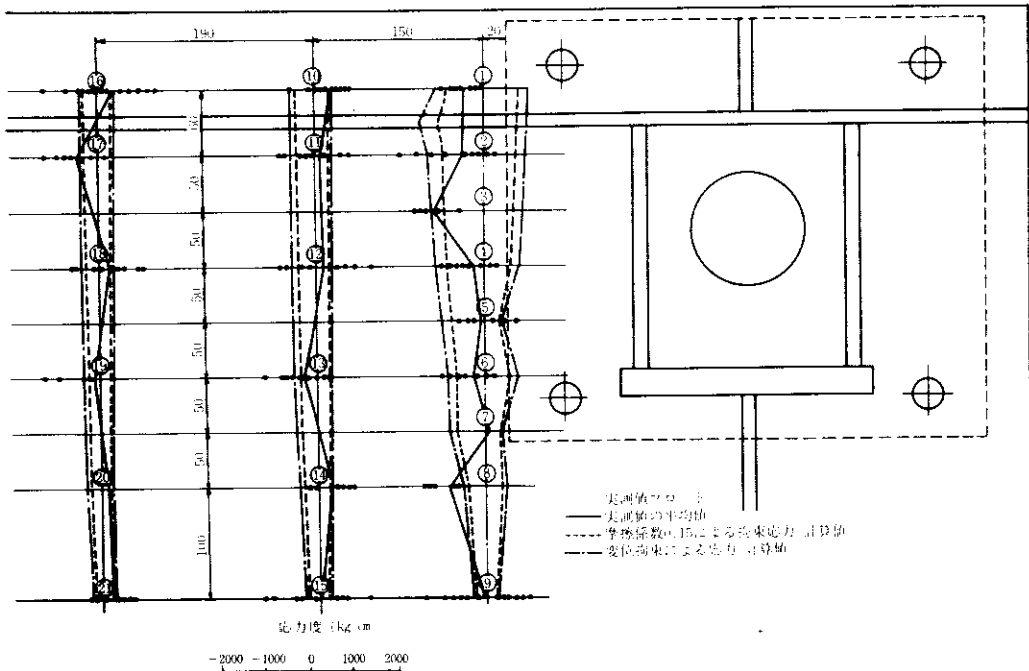


図-7 下フランジ外面橋軸方向応力分布図（ケース5）

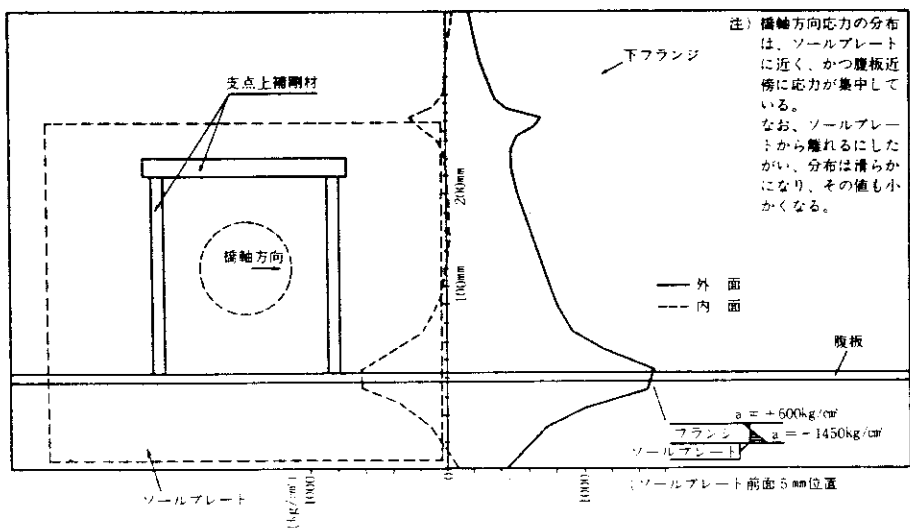


図-8 下フランジ橋軸方向応力分布図(ケース5)

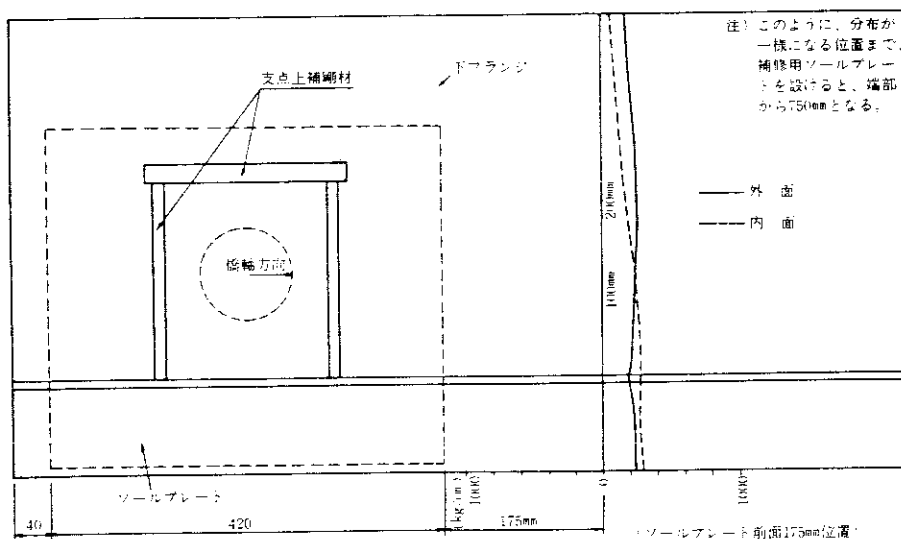


図-9 下フランジ橋軸方向応力分布(ケース5)

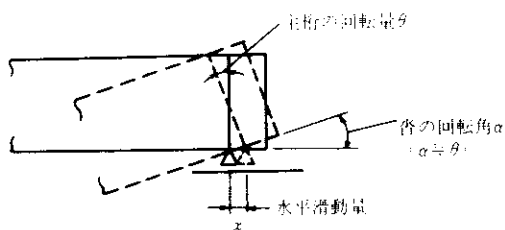


図-10 桁端変位形状

っていないことから判断して、回転量は表-2の回転量の結果も考え併せるとほぼ計算値に対して満足されるような値を示している。

次に24時間連続測定による桁の滑動は図-11からもわかるように、温度日変化7℃の滑動量(計算値)6mmに対して、1.4mm(可動桁)、1.7mm(固定桁)であり日温度変化に伴う移動は見られなかった。

表-2 実測変位と計算値

観測 ケース	水平滑動量 (mm)			回転量 ($\times 10^{-5}$ rad)				
	実測値			実測値		計算値		
	最大	最小	平均	最大	最小	平均	計算値 (条件I)	
①	0.34	-0.17	0.09	1.1	32.0	12.0	22.0	45.7
②	0.30	-0.21	0.05	3.1	86.0	17.0	52.0	132.2
③	0.29	-0.21	0.04	1.2	20.0	-8.0	6.0	4.2
④	0.22	-0.32	-0.06	4.3	86.0	60.0	73.0	128.1
⑤	0.20	-0.52	-0.16	6.3	180.0	140.0	160.0	256.7

条件I: Δx : \bigcirc $\Delta \theta$: \bigcirc 条件II: Δx : \times $\Delta \theta$: \bigcirc
 Δx : 水平滑動 $\Delta \theta$: 回転
 \bigcirc : 拘束なし \times : 拘束 (100%)

表-3 腹板応力の比較

(単位 Kg/cm^2)

載荷 ケース	実測値			計算値 (100%拘束値)
	最大	最小	平均	
④	515	-460	28	4287
⑤	840	-14	413	7735

D-3 KN・P591・山側

D-6 KN・P588・山側

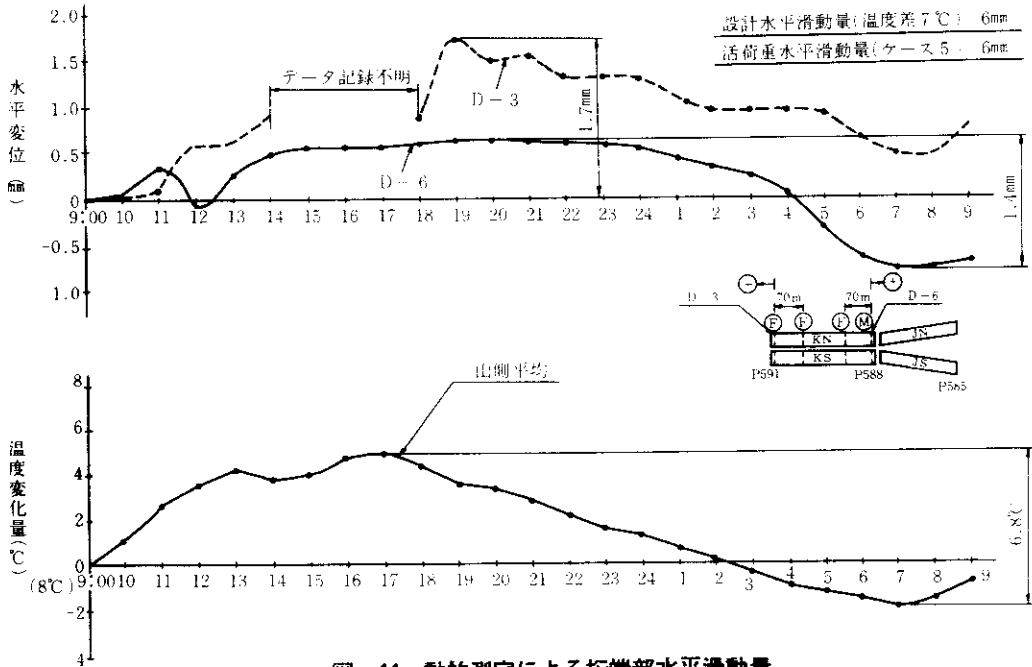


図-11 動的測定による桁端部水平滑動量

なお、今回の調査対象としたベアリング沓の外観検査では大きく移動している痕跡があり、大きな温度変化(季節による変化)に対しては、機能しているようである。

(3) 亀裂先端部の応力測定

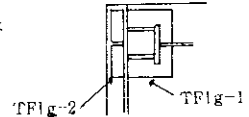
KS、JS橋のP-588上で測定した亀裂先端部の最大応力度振幅値(24時間連続測定の結果)を、表-4に示す。KS橋海側、JS橋山側、海側のそれぞれ下フランジの測定応力度が300 ~ 400 kg/cm^2 となっているのに比してKS橋山側の

表-4 亀裂先端部の応力振幅

(Kg/cm^2)

	P588 KS橋山側		P588 KS橋海側		P588 JS橋		
	Web	TF1g-1	TF1g-2	Web	TF1g	山側 TF1g	海側 TF1g
$\Delta \sigma$ (kg/cm^2)	500	1724	1733	348	373	340	333

注) ① $\Delta \sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$
 ② KS橋山側TF1gの値は右図の通り。



* 変位量は、該当時間付近の最大値(絶対値)を示す。

下フランジ応力度の値が約 1700 kg/cm^2 と高いのは、まだ亀裂が端部まで貫通していないために、応力開放がされていないためであろうと予想される。

(4) 疲労照査 (応力頻度)

亀裂部および側径間中央部のひずみゲージによる24時間連続測定の結果をもとに検討した事項は次のとおりである。

(イ) 図-12に示すように、それぞれの想定した载荷ケースの応力値 (設計値) を大幅に超過する荷重が相当数あることが実測された。特にKS橋 (下り車線) の走行車線の超過荷重がはなはだしく亀裂伸展状況と符合している。

(ロ) KN橋 (P-588 上) 山側下フランジの応力-頻度曲線をもとに、BS 5400 による疲労照査の計算をした結果、 $\sum \frac{n}{N} > 1.0$ となり疲労亀裂が発生しうることがわかった。なお、 $\sum \frac{n}{N} = 1.0$ となる時期を計算すると、ソールプレート部に最初に亀裂の発生した時期は昭和46~47年度頃と推定された。

(ハ) KS橋 (P-588 上) 海側の亀裂を単純モデル化し、今回の測定で得られた σ - N 曲線を用いて亀裂発生時期を計算すると次のような結果となった。

亀裂発生時期; 昭和47~50年度頃
 下フランジ貫通亀裂開始; 昭和50~52年度頃
 腹板伝播開始; 昭和52年度頃

以上の検討に用いた各ひずみゲージの応力-頻度関係の一例を表-5に示す。

なお、これらの推定された亀裂の発生時期は、 σ - N 曲線の妥当性、亀裂の単純モデル化など仮定のうえで計算されたものであり、現地での亀

表-5 応力-頻度 (24時間)
(P 588 KN橋)

($\times 50 \text{ kg/cm}^2$)	山側フランジ面 内	山側フランジ面 外	山側腹板面 外	海側フランジ面 外
2000	40	0	0	0
	39	0	0	0
	38	2	1	0
	37	0	0	0
	36	2	0	0
	35	4	0	0
	34	4	0	0
	33	4	1	0
	32	4	4	0
	31	10	4	0
1500	30	10	4	0
	29	10	4	0
	28	15	5	0
	27	28	5	0
	26	27	15	0
	25	25	25	0
	24	40	26	0
	23	34	34	0
	22	40	44	0
	21	72	48	0
1000	20	113	75	0
	19	124	86	0
	18	180	121	0
	17	178	165	0
	16	285	211	0
	15	370	271	0
	14	408	344	0
	13	489	452	0
	12	535	519	0
	11	627	682	0
500	10	890	989	0
	9	1344	1507	0
	8	2198	2634	0
	7	3971	5142	0
	6	7692	9669	0
	5	16402	18685	0
	4	34322	33552	0
	3	68655	49968	0
	2	93379	61139	0
	1	133969	86303	0

注 () 内数値は応力レベル 単位 kg/cm^2

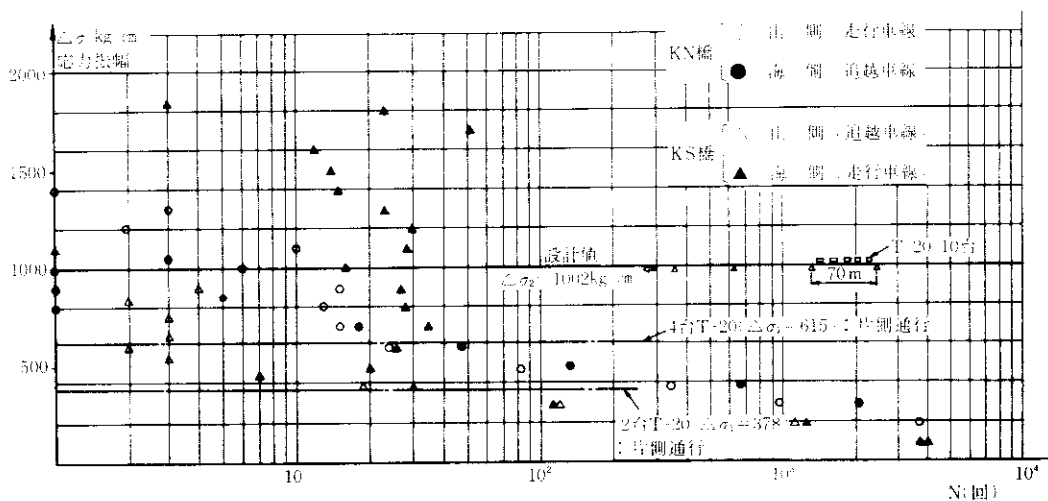


図-12 KN、KS橋応力頻度分布 (24時間)

裂の状態および追跡調査の結果（腹板亀裂の伸展 5 mm / 月）などから判断すると、実際の亀裂の発生時期は少なくとも腹板においては、昭和52年度以降のように思われる。

15) 亀裂の原因

以上、測定結果について述べてきたが亀裂の原因をまとめてみると次のとおりである。

- (イ)ベアリング沓が自動車荷重（活荷重）に対して自在に滑動しないため、活荷重による主桁の回転を拘束し、その結果ソールプレート(24mm)前面の下フランジ(9mm)に繰り返り応力（最大約 2000 kg/cm²）が発生している。
- (ロ)下フランジ応力をソールプレートに伝達する隅肉溶接は、フランジ側止端部に大きな局部応力を生ずるため、疲労に弱い構造であるうえに、荷重と走行頻度が予想外に大きく疲労亀裂を発生したと考えられる。

3. 亀裂補修

3-1 補修方法

損傷亀裂はソールプレートと下フランジとの隅肉溶接止端部に局部応力が生ずるためであり、補修方法としては、桁からの荷重を徐々にソールプレートに幅広く伝達するようにソールプレートを大きくし、図-13に示すようにボルトにより接合する方法を採用した。プレート寸法は、図-9のFEM解析の結果より、下フランジ応力が均等に分布する範囲とした。

長さ；750 mm = 650 mm + 100 mm
(解析結果)(余裕長)

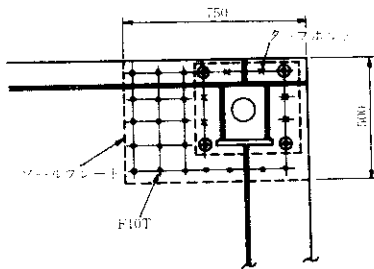


図-13 補強図

3-2 補修工程

箱桁端部の補修工程は、次のとおりである。

- ①溶接施工試験を行う。
- ②ジャッキアップ用脚内部補強、桁仮受け支点、水平反力受け（横移動止め）を設置。
- ③図-14に示すジャッキ A（300t）をセットする。ジャッキアップ前に既設沓のセットボルトを撤去し、ソールプレート、ベースプレートのガウジングを行う。
- ④ジャッキアップ（アップ量は5mm）を行い、既設沓を解体撤去する。沓の取替補修は、本線規制をせずに片側ずつ行う。
- ⑤既設沓の撤去完了後、油圧ジャッキBを沓の位置にセットし、Bを作動させジャッキAを解体撤去する。
- ⑥ジャッキA位置に鋼製サンドル、仮受け沓を設置し、桁を受け替える。
- ⑦ジャッキBを解放撤去。
- ⑧桁端亀裂部のガウジング、補修溶接（溶接方法は後述）、仕上げ、検査を行う。
- ⑨新しいソールプレートを取り付ける（図-13参照）。

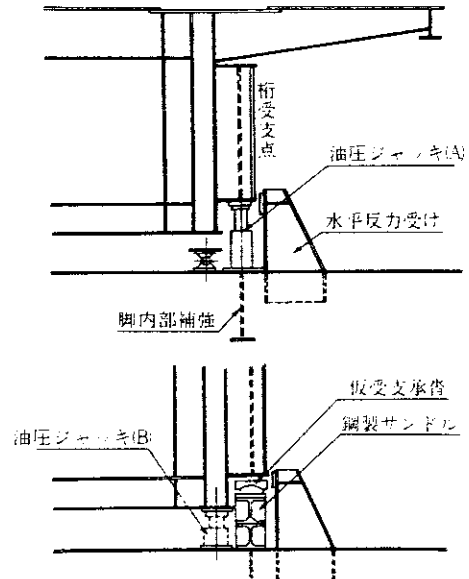


図-14 補修方法

⑩ 沓を再設置。

⑪ ジャッキダウン。

以上の補修を1サイクル(1支承)7日で実施した。

また、既設のベアリング沓を撤去したところ、ベアリングプレートに割れなどの損傷が16箇所中4箇所にあることが発見され、その箇所については新たに製作し取り替えを行った。

3-3 補修溶接

補修溶接の作業方法は、次のサイクルを基本に各部位の補修溶接を実施した。

- ① PT検査で亀裂先端位置を確認する。
- ② アークエアガウジングおよびグラインダーにより亀裂部の開先を作成する。
- ③ PT検査により亀裂先端が除去されているかどうか、また表面に欠陥がないかどうか十分に確認する。
- ④ 亀裂部の補修溶接を行う。

亀裂部分に対し、図-15に示すように次の順序で各部位の補修溶接を行った。

- ① 下フランジ下面
- ② 下フランジ上面
- ③ 腹板外面
- ④ 腹板内面
- ⑤ 下フランジと腹板との隅肉溶接部の外側
- ⑥ 下フランジと腹板との隅肉溶接部の内側

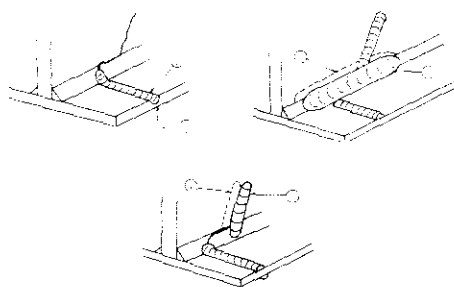


図-15 補修溶接順序

あとがき

本報告は、鋼構造物の損傷の一例としてその発見から補修に至るまでの経過を述べたものである。

その損傷の原因究明および補修方法などの検討をするために亀裂の追跡調査をするとともに現地での応力性状の調査を実施した。その結果やFEM解析などによりおおむねその原因を究明し、補修方法などを見つけ出すことができた。

しかし今回の現地での測定(特に試験車載荷による静的測定)が一般車による影響を受けたため、細部については不明確なままの結果しか得られなかった。今後、このような実橋を用いての計測には事前の準備を十分に行い、測定計画に沿った実測が行えるようにすることが大切である。

また、本損傷事例はBox桁の桁端部の母材に発生した亀裂(疲労亀裂)であり、早急に補修する必要があったが、過去に同じような損傷事例がなく適切な補修方法を見出すためにも現地での応力性状の調査を行ったものであり、本格的な補修までの亀裂の伸展を抑えるために応急措置を施した。

今後とも実橋などに新しいタイプの損傷が発見された場合、過去の疲労亀裂の発生事例、補修事例などを参考のうえ、実橋での応力測定も含め、総合的見地より補修方法、補修時期などを決定する必要があると思われる。

参考文献

- 1) 山本、前田；3径間連続鋼床版箱桁支承部の応力性状調査、第16回技術研究発表会、阪神高速道路公団
- 2) 杉山、佐藤、安福、安藤；鋼構造物の亀裂損傷と補修(神戸管内)第16回技術研究発表会、阪神高速道路公団