

重量物落下事故により大変形した損傷桁の補修

神戸建設部 山手工事事務所 荒井 洋 幸
大阪管理部 調査設計課 中本 寛 一
同 部 保全第一課 加賀山 泰 一

要 約

平成3年8月29日未明、阪神高速道路1号環状線の本町インターチェンジにおいて、走行中のトレーラーから積荷のクレーンに装着する約20tと約10tのカウンターウェイト（鋼製）の落下する事故が発生した。20tのカウンターウェイトは、荷台より高欄に接触後約12m下を並行して走る1号環状線に落下し、舗装・床版の陥没、鋼桁の大変形と大きな損傷をあたえた。補修は全面交通開放を第一目途とした1次復旧と、原形復旧を目途とした2次復旧に分けて実施した。

- (1) 損傷状況を調査した結果、主桁は損傷部の剛度低下が隣接桁に再分配されたものとして、許容応力度の25%割増（2次復旧までの割増）内に収まることを確認した。
 - (2) 1次復旧では、床版は主桁が損傷したまま復旧することとしたため、約7mほどのスパンとなる。そのため床版厚を18cmから24cmに増厚し、さらに鋼板（ $t=4.5\text{mm}$ ）にジベル鉄筋を溶接して合成床版とした。また、床版スパンを縦桁増設により7mから5mに短くした。以上の補強を施こし第一目途の交通開放をおこなった。
 - (3) 2次復旧は、ベント支持による桁損傷部の部分取替えにより補修した。取替時にジャッキによるアップダウン操作により、補修桁への再々分配がおこなわれたことを確認した。
- 以上、重量物の落下による桁損傷という特異なケースの補修を、平成4年3月までに施工した。

キーワード：補修、重量物落下、損傷、復旧、緊急工事、床版陥没、桁変形

はじめに

平成3年8月29日未明、阪神高速道路1号環状線の本町インターチェンジにおいて、走行中のトレーラーから積荷のクレーンに装着するカウンターウェイト（鋼製）の落下する事故が発生した。

事故は13号東大阪線下りから1号環状線に合流する渡り線で発生し、落下したカウンターウェイトは約20tと約10tの2個であった。

10tのカウンターウェイトは、走行中の渡り線部に落下したため、舗装・床版に損傷をあたるとどまった。一方の20tのカウンターウェイトは、荷台より高欄に接触後約12m下を並行して走る1号環状線に落下し、舗装・床版および鋼桁に大きな損傷をあたえた。カウンターウェイトの直撃による床版の抜け落ちとともに、主桁の損傷が

一部塑性変形にまで至ったため、補修には損傷部の一部を切取り、取替が必要であった。補修は、4車線のうち2車線が規制された状態であったため、交通開放を第一目途とした1次復旧と、原形復旧を目途とした2次復旧に分けて実施した。以下1号環状線の環S-152を主にその補修の概要を報告する。

1 損傷桁の概要

損傷を受けた橋梁（環S-152）の諸元を図-1および下記に示す。

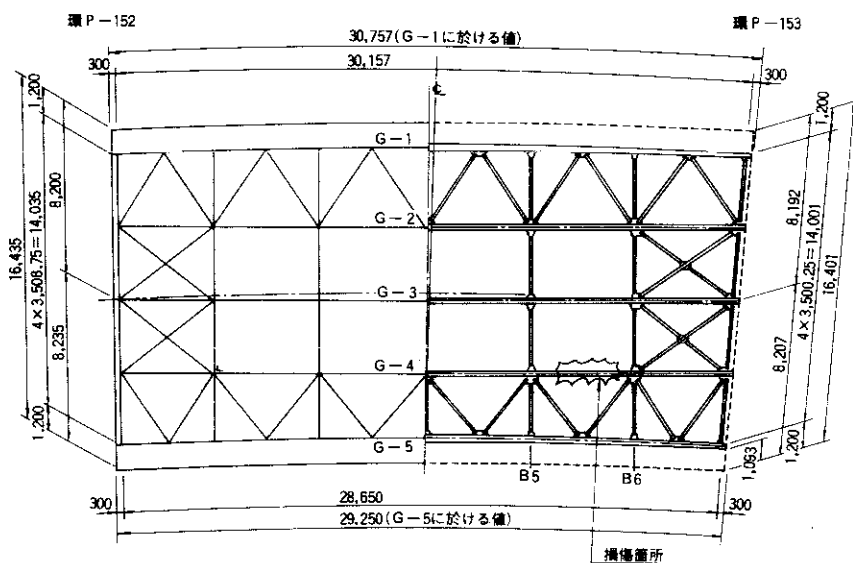


図-1 環S-152 平面図

橋	長：	30.0m
支	間：	29.4m
幅	員：	16.435m～16.401m
主	桁	高さ：1.8m（5主桁）
対	傾	構間隔：≒5.0m（但し、端部≒4.5m）
材	質：	SM490A, SS400
平	面	線形：クロソイドおよび円曲線（R=270m間）
形	式：	鉄筋コンクリート床版（t=18cm）を有する活荷重合成I桁
竣	工	年月：昭和39年12月

2 損傷状況

環S-152の事故直後の現場状況は、写真-1のとおりである。落下場所は、G4主桁上のB5・

B6の分配対傾構間で4車線（南行き一方通行）中の3・4車線間であった。事故後ただちに点検した結果、各部材の損傷状況は以下のとおりである。

2-1 床版部の損傷

床版は、2.1m（橋軸方向）×3.7m（橋軸直角方向）の大きさで陥没し、床版コンクリートおよび舗装は剪断破壊されていた。鉄筋の一部に破断がみられたが、重ね継手部の滑りも多くみられた。また、当箇所は鋼板接着（ $t=4.5\text{mm}$ ）による床版補強が施されており、直撃部は剥離されていた。

2-2 主桁の損傷

カウンターウェイトの直撃を受けたG4主桁は、写真-2に見られるとおりに大きく変形し床版合成用の馬蹄形ジベル筋1本が破断していた。変形は、直撃を受けたG4主桁の分配対傾構B5、B6間全般におよんでおり、上フランジ（ $t=11\text{mm}\sim 12\text{mm}$ ）が約300mm鉛直方向に、ウェブ（ $t=9\text{mm}$ ）が約200mm水平方向に変位していた。

2-3 その他の損傷

- ・ 分配対傾構・横構および支承については、特に異常はなかった。
- ・ 継手部について、目視および高力ボルトの全数ハンマー叩きによる点検をおこなった結果、多くの緩みが確認されたほか、添接板と母材の取り合い部および高力ボルト周りの塗装の剥離が多く見られた。これは、カウンターウェイト落下時の衝撃によって損傷したもので、摩擦接合面のすべりが懸念された。
- ・ 溶接部は、目視およびカラーチェック等により全箇所点検をおこなったが、直撃を受けたG4主桁で塑性変形した上フランジとウェブ間に割れがみられたほかは異常がなかった。

3 補修の方針

補修の基本方針は、原形復旧であり早期の交通開放である。事故後4車線のうち2車線を規制した状態であるが、1号環状線は大阪市内交通の幹線であり、渋滞を長期化させることは社会的影響が大きいと判断した。事故の事例が特異で復旧の検討には時間を要するところであるが早急な対応が望まれた。したがって、床版・舗装を復旧し早期



写真-1 事故の現場状況



写真-2 主桁の損傷状況

の交通開放を目途とする1次復旧と、供用下で原形に近い復旧を行う2次復旧に分けて補修することとした。

4 1次復旧

4-1 損傷後の構造耐荷力照査

損傷状態での耐荷力の照査は、床版および舗装を復旧し交通開放をおこなう一次復旧の、応力度照査をおこなうことにより、交通開放時に桁各部の応急補強の必要性が推測できるものとした。

4-1-1 損傷による死荷重応力度の把握

床版および主桁が損傷を受けたことにより、損傷桁（G4主桁）が保持していた死荷重応力度の一部が、健全な部材に再分配されたものと考えた。計算上の仮定において、損傷桁（G4主桁）がどの程度健全度を失っているかを判断することが重

要である。判断材料としては、変形状態やキャンパー実測等が拠り所となる。本照査では、G4主桁の変形状態を第一義の判断基準と定め、図-2に示すような状況より桁高（H=1.8m）の下半分が健全であるものと仮定した。

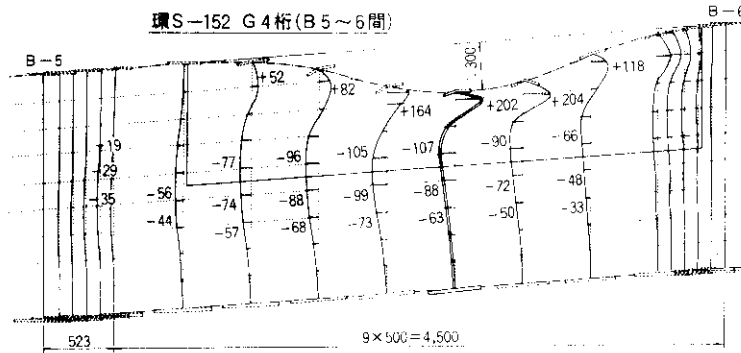


図-2 G4主桁変形状況図

部分取替え案 (ベント使用)			G3	G4	G5
			① 補修部	① 損傷部	② 補修部
正常時 応力度	死荷重時	U	-1526	-1469	-1331
		L	1071	1071	1085
	死+活荷重時	U	-1595	-1539	-1429
		L	1821	1802	1717
損傷・ 一次 復旧	死荷重時	U	-1550	—	-1354
		L	1199	682	1167
	死+活荷重時	U	-1612	—	-1441
		L	1982	1413	1802
$\delta a = 1900 \text{ kg/cm}^2 \times 1.25 = 2375 \text{ kg/cm}^2$					
本復旧 時	(ジャッキ・アップ)	U	24	—	34
		L	-305	-468	-251
	死荷重時	U	-1526	—	-1320
		L	893	214	916
本復旧 後 応 力 度	(ジャッキ・ダウン)	U	-20	-43	-30
		L	252	524	216
	死荷重時	U	-1546	—	-1350
		L	1146	739	1133
死+活荷重時	U	—	—	-1436	
	L	—	1471	1762	
$\delta a = 1900 \text{ kg/cm}^2$					

表-1 主桁応力度

			G2		G3		G4		G5
			M A.U.A.L	S A.S	M A.C.A.L	S A.S	M A.U.A.L	S A.S	M A.C.A.L
正常時 応力度	死荷重時	σ上	-37	103	99	-10	86	28	121
		σ斜	383	327	479	303	390	206	92
		σ下	346	430	578	294	476	234	213
一次 復旧 後	死荷重時	σ上		17		-213		-220	
		σ斜		162		186		-192	
		σ下		-124		335		335	
	死+活(正)時	σ上		-400		-642		-474	
		σ斜		463		518		5	
		σ下		535		749		749	
死+活(負)時	σ上		302		43		-116		
	σ斜		-139		-92		-498		
	σ下		-381		-223		136		
本復旧 後 応 力 度	死荷重時	σ上		-7		-173		-159	
		σ斜		183		69		-99	
		σ下		127		218		218	
	死+活(正)時	σ上		-426		-594		-402	
		σ斜		487		386		105	
		σ下		577		611		611	
死+活(負)時	σ上		276		85		-52		
	σ斜		-116		-221		-388		
	σ下		-370		-182		91		

表-2 対傾構応力度

4-1-2 活荷重に対する安全性の把握

死荷重応力度に活荷重応力度を加え、床版・舗装復旧後の交通開放に対する桁の安全性を照査した。補修する床版断面は、補修の手順より主桁との合成効果が得にくいいため全体の一部が非合成となる。これについては、健全合成桁モデル(A)と、一部合成作用の期待できないモデル(B)を用いFEM解析による比較をした。その結果、モデル(B)の合成作用の期待できない部分に応力分布の差はあるが、その他の部分についてはほぼ等しい分布となった。また、モデル全体の剛性として、たわみを比較してもほとんど差がないことから、一部合成作用の期待できない部分があるとしても全体の挙動は合成桁として計算して問題ないものとした。主桁部材の応力度を表-1、対傾構部材の応力度を表-2に示す。主桁部材の一部に許容応力度

を超過している部位があるが、25%割増（短期荷重の割増を想定）内の範囲であり、速やかな2次復旧を予定していることから応急補強の必要はないものと判断した。

4-2 補修

4-2-1 床版および舗装の補修

図-3に示すとおり、損傷したG4主桁で床版を支持することが出来ないため、主鉄筋方向のスパンは2倍の約7mとなる。このため鉄筋は従来の位置に重ね継手にて配筋したが、床版の厚さはハンチを無くし180から240mmに、さらに床版下面にスラブアンカーを溶接した鋼板（板厚 $t=4.5$ mm、材質SS400）を設置し、鋼板と合成させた床版として施工した。この鋼板は床版コンクリート打設時の型枠をも兼用する。

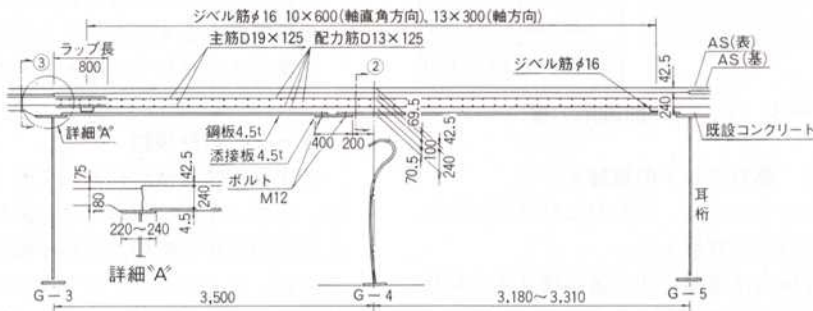


図-3 1次復旧 施工図

床版各断面の照査応力度は表-3のようになる。床版の照査は、道路橋示方書に準拠した。すなわち、道路橋示方書の床版設計の曲げモーメント算出式は、4m以下を適用範囲としているが、当事例はそれ以上となるため、計算によって4~7mの範囲の設計曲げモーメントを求め、算出式との比較をおこない適用の妥当性を確認した。その結果、連続版として照査したときに既存床版部（ $t=180$ mm）に応力超過がみられたが、床版打設時の支保工を存置できること、引き続き写真-3に示す補強をすることなどから、ごく短期間であれば床版の安全性に問題がないと判断した。これら一連の工事は、事故発生後5日間の工程で完了し交



写真-3 床版補強工

通開放をおこなった。

写真-3に示す補強は、上記床版応力の低減を目的として実施した。設置は、一部垂直補剛材を利用して補剛材を設けブラケットで縦桁を支持し、床版支持スパンを約4.75mに縮小した。縦桁と床版面は、活荷重が十分伝わるようシールをしエポキシ系の接着剤を圧入した。この補強をおこなうことにより、25%割増の短期荷重に対する許容応力の範囲となり、2次補修までの安全性が確保されるものとした。

②	(kg/cm ²)				③	(kg/cm ²)	
	連続版		単純版			連続版	
	主鉄筋	配力筋	主鉄筋	配力筋		主鉄筋	配力筋
σ_c	78	46	97	58	σ_c	148	114
1.25 σ_{ca}	133	133	133	133	1.25 σ_{ca}	133	133
σ_s	881	551	1101	689	σ_s	2702	2993
1.25 σ_{sa}	1750	1750	1750	1750	1.25 σ_{sa}	1750	1750
					SD30の降伏応力度	3060	3060

表-3 ②、③-断面応力度

4-2-2 高力ボルトの取替え

高力ボルトについては、緩みおよび滑りと認められたものについて取替えた。

施工は、阪神高速道路公団「道路構造物の補修要領」（平成2年6月制定）により、1本毎に取替えた。

5 2次復旧

5-1 施工法の検討

「供用下での復旧」・「原形より近い復旧」の2条件を最重点に、路下条件・変形状態・施工性および安全性等を検討し施工法を決定した。その経緯を要約すると以下のとおりである。

環S-152は河川上（東横堀川）に位置するため、下方支持（以下「ベント」という。）の有無の両案について、設計・施工の比較検討をおこなった。ベントの設置は、河川管理上船舶の航行幅を確保しなければならず、損傷桁直下に限定した。

変形した主桁を、最小限（主桁の1/2程度）の

範囲で取替える案（以下「部分取替え」という。）について比較検討をおこなった。上記の検討より①ベント支持無し・部分取替え、②ベント支持・部分取替え、③ベント支持・全体取替えの3案に絞られ、各方面に意見聴取および下協議がおこなわれた。その結果、

- (1) 河川管理者のベント設置に理解が得られ、ジャッキのアップダウンで隣接桁に再分配された応力が補修桁に再々分配（応力改善）できること
→②、③ベント支持案
- (2) 一部変形が残っていても、道路橋示方書に規定された範囲であれば、加熱矯正による補修が可能なこと→①、②、部分取替え案
- (3) 損傷部桁切断時に大規模な補強がいらぬこと→②案

以上の他、桁の安全性・補修後の耐久性ならびに施工上の安全性を総合的に判断して、②案の損傷桁を2カ所のベントで支持する部分取替え案により補修することとした。

5-2 設計検討

2次復旧時の検討においても1次復旧時と同様に、床版・主桁の損傷により隣接桁への再分配と1次復旧に伴う断面力を格子解析により計算した。さらに、ジャッキのアップダウンによる損傷桁・隣接桁の応力度の変化について解析し、損傷により再分配された死荷重応力度を改善するための突き上げ力を定めた。2次復旧の概念を図-4に示す。

5-2-1 突き上げ力の決定

ベントの支持点は損傷部付近の分配対傾構B5・B6の2カ所とし、この位置でのジャッキアップ時の作用力（ジャッキ支持力）は以下の点に着目して決定した。

- ① ジャッキのアップダウンによるG3・G5主桁の応力度の改善
- ② 損傷部分切断後のG4主桁損傷部の応力度
- ③ 床版および対傾構の応力度
- ④ ジャッキ支持点位置の腹板と垂直補剛材の耐荷力
- ⑤ 主桁支脊部の負反力の発生

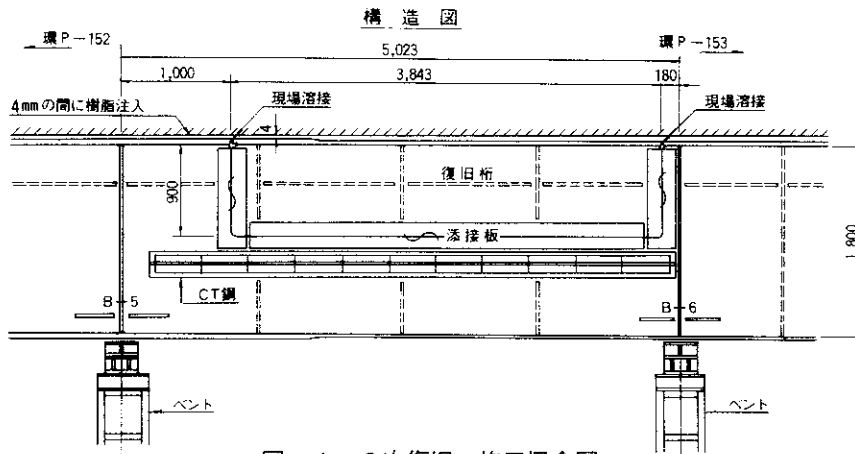


図-4 2次復旧 施工概念図

検討の結果、突き上げ力は2点でそれぞれ30tずつとした。

5-2-2 主桁の死荷重応力度の改善

各主桁の復旧前後の応力度は表-1に示すとおりである。損傷時に再分配された死荷重応力度の改善が図れ、主桁に作用する応力を許容応力度内に行うことができた。対傾構部材についても、同様の結果が得られた。

5-2-3 その他の照査

②についてFEM解析の結果、ジャッキアップ時に損傷部切断後の腹板コーナー部で応力集中が見込まれたため、図-4に示すようなCT鋼による補強をおこなった。また、突き上げ時床版に20kgf/cm²程度の引張応力度の発生がみられたが、一時的な荷重であり特に問題ないものと判断した。

格子解析および部分的にFEM解析により照査したが、損傷部付近の応力度分布はその性状を十分再現できないが、橋全体の挙動を把握するうえでは妥当な結果が得られたものと思われる。

5-3 施工検討

5-3-1 主桁切断範囲の検討

図-2の変形状況に示すとおり、カウンターウェイト直撃部の主桁上部は完全な塑性変形域に達している。一方、腹板中央部から下フランジは最大100mmの面外変形がみられるが、以下の理由か

ら弾性変形であると判断した。

- ① 主桁下半分の変形が滑らかであり、塗装の剥離がみられないこと
- ② 水平方向の面外変形は100mmであるが、対傾構間隔で変形量を徐すと0.1%となり一般的に言われている弾性限度の0.2%以内であること
- ③ ウェブと下フランジの直角度が保たれていること

以上のことより、主桁の切断範囲は桁高の1/2を、対傾構間隔では添接板のスペースを確保した図-2のような範囲とした。

5-3-2 桁の歪み取り補修

損傷部の主桁を切断撤去することにより、変形は概ね元に戻ると思われたが、添接板のスペースを確保しなければならなかったB6対傾構付近や、一部に変形が残ると考えられた。そこで、道路橋示方書に規定されている範囲の板の平面度 $H/250=7.2\text{mm}$ 以下、フランジの直角度 $B/2=2.1\text{mm}$ 以下に戻らない場合は、加熱矯正による補修をしてよいとした。補修箇所の材質がSM490Aであることより、靱性劣化の発生しない700℃に加熱し、500℃に冷却した後濡れ雑巾等にて水冷することとした。

5-3-3 現場溶接

接合は高力ボルトによる摩擦接合を基本としたが、補修手順の関係から上フランジの接合は上向き突き合わせ片面の現場溶接となる。この溶接の

経験が少ないことから、施工現場の足場上にて施工試験を行いルートギャップ、溶接電流および電圧、溶接棒の種類および径等を決定した。試験施工は、開先角度60°、ルートギャップ6mmおよび8mmの2種類、溶接棒のLT-52で1～3層目がφ3.2mm、4層目以降をφ4.0mmとし、振動や開先変位を押さえるためのエンドタブを付けた拘束溶接にて8個の試験体を製作した。いずれも正常な溶接ビードが得られ超音波探傷試験、X線透過試験、引張試験、曲げ試験およびマクロ試験でも問題はなかった。ルートギャップは、入熱量が少なく溶接残留応力の少ない6mmにて施工することとした。

6 施工

ベント設置後からの、施工順序およびジャッキの突き上げ力とそれによる主桁のレベル変化を表-5に示す。

6-1 ベント沈下量の確認

ベントの耐荷力を確認するため、ジャッキアップ位置2カ所にそれぞれ30tの突き上げ力を入れ、一昼夜放置したのちレベル計測をおこなった。レベル計測およびゲージ測定値に変化がなく、ベントの沈下がないことを確認した。

6-2 主桁切断後の変形量

切断は、ウェブ水平方向、ウェブ鉛直方向（ウェブ中心から上フランジに向かって切断）、最後に上フランジの順序でおこなったが、変形の残留は概ね1～2割であった。よって、当初の計画どおり、変形の残留が大きい箇所を線状加熱することにより許容値内に矯正補修した。

6-3 ジャッキ反力の管理

施工順序に伴うジャッキ反力と主桁レベルは表-5のとおりである。桁を切断してからは、スパン中央寄りのB5ジャッキに偏る傾向となった。これはジャッキを支点とした、連続桁の挙動をした

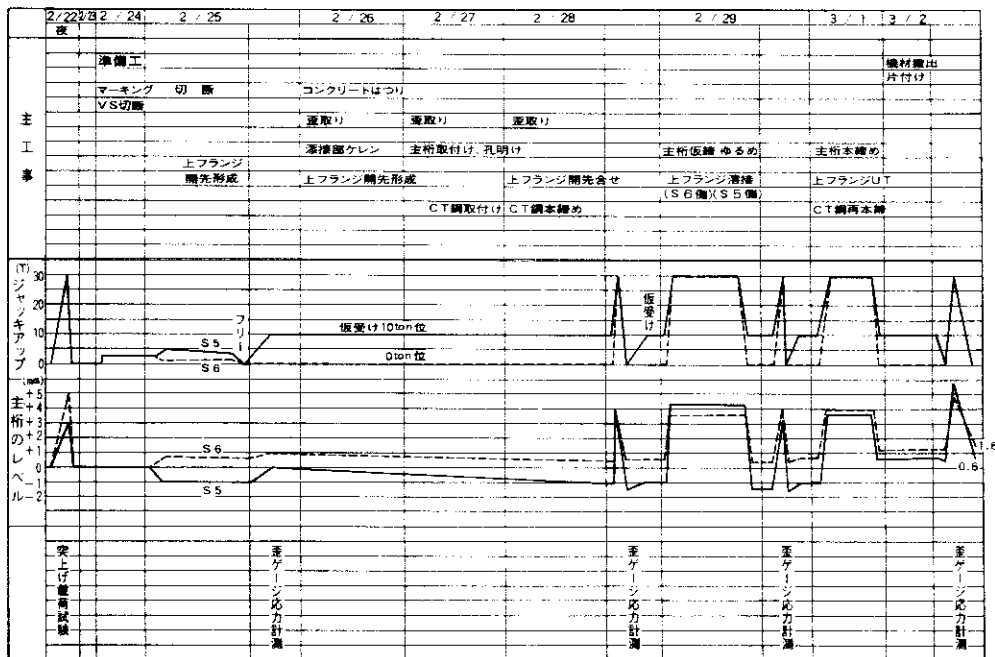


表-5 施工順序および主桁のレベル

ものと思われる。上フランジ溶接後、検討の30 tで突き上げ主桁・近隣対傾構の高力ボルトの本締めをおこない、ジャッキを開放した。

開放後、上フランジ溶接部の超音波探傷試験をおこない異常のないことを確認した。さらに、表-5のとおり主桁レベルで1 mm前後の改善が見られたことを確認した。

6-4 計測

補修と並行して各施工段階での応力の推移を確認するため、歪みゲージ等による応力測定をおこなった。主な確認事項は、

- ① 主桁切断時、特にウェブ水平方向の切断で、変形による応力がほとんど開放された。
- ② 線状加熱による発生応力度は、わずか20 kgf/cm²であった。
- ③ G3・G5主桁の応力改善は、表-5に示す各施工段階の主桁レベル変化と同様に、計算値と近似していることを確認した。

以上より、検討どおり損傷時の応力が補修桁に再々分配されたものと確信した。

あとがき

本補修は、「重量物の落下事故による損傷」という特異な事例で、その損傷度は当公団がかつて経験したことのない規模であった。想像を越える衝撃による損傷で、損傷直後の橋全体の健全性の把握・応力状態の把握、供用下での補修とどれをとっても殆ど経験したことのないものばかりであった。しかし、関係諸氏の経験と努力、かつ当公団が補修工事で積み重ねた実績を組み合わせる事によって、1次復旧において5日間という短い期間で全面的に交通開放をすることができた。また2次復旧においても、補修後の桁の耐久性や安全性、および施工上の安全性等を総合的に判断するとともに、製作・架設・計測技術を駆使し、橋全体の健全性を維持するに十分な補修工事ができたものと考えている。

最後に、今後はこのような補修が無いことを祈るとともに、ご指導を賜った関係諸氏に感謝をす

る次第である。