

鋼製橋脚（11号池田線出入橋付近）隅角部の補強設計

大阪建設局 建設企画部設計課 高田 佳彦
大阪管理部 調査設計課 山本 剛士

要 旨

平成10年度の定期点検時に、11号池田線の鋼製ラーメン橋脚1基の隅角部にひび割れが発見された。平成12年に工事足場を利用して前後13基について詳細点検を実施したところ、10基に同様なひび割れが発見された。このうち損傷が大きかった3基について、あて板補強による応急復旧工事を実施した。補強鋼板は、橋梁の供用下で発生する活荷重の繰り返し作用応力による隅角部の亀裂損傷の拡大を抑制することを目的に設置しており、補強後の応力測定から、応力集中が平均して補強前の50%程度に緩和されたことが確認された。平成14年夏に再調査を実施したところひび割れの進展は認められず、初期の目的を達成しているものと考えられた。

本稿では、亀裂調査結果、補強鋼板の設計および補強効果の確認のために実施した応力計測について報告するものである。

キーワード：溶接亀裂、磁粉探傷検査、応力頻度、せん断遅れ、補強鋼板

まえがき

平成10年度の定期点検時に、11号池田線の鋼製ラーメン橋脚1基の隅角部にひび割れが発見された。平成12年に他工事足場を利用して前後13基について詳細点検を実施したところ、10基に同様なひび割れが発見された。

その背景には近年増加している大型車両の荷重の繰り返し载荷による疲労の影響と昭和40年前後に使用された材料や製作時における溶接技術等に起因する問題があると考えられる。隅角部は、梁および柱のフランジやウェブの鋼板が交差しており、フランジ両端の溶接が集中する箇所では溶接部に不溶着部を生じやすい構造となることがある。この不溶着部を起点として荷重作用による溶接部の局所的な応力集中により損傷が発生することが考えられる。



図-1 池田線出入橋付近

1. 隅角部亀裂調査結果

1-1 空P25の構造概要

空P25は1964年（昭和39年）竣工の図-2に示す2層式のラーメン橋脚で柱・梁共に矩形断面となっている。

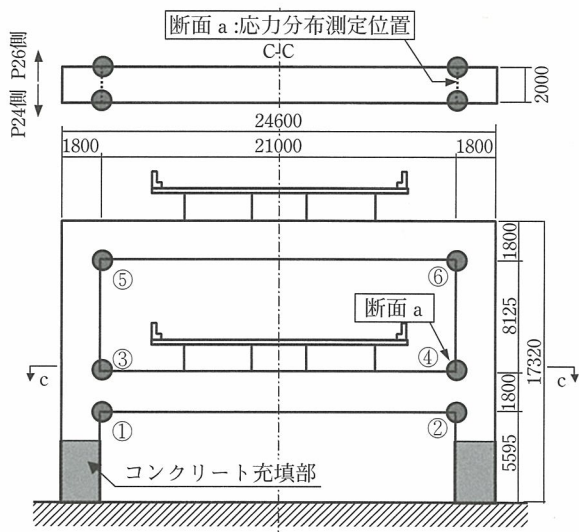


図-2 空P25構造図

1-2 空P25の亀裂損傷の特徴及び調査結果

隅角部の柱と梁のフランジおよびウェブの板組みは、梁のフランジを貫通させて柱のフランジが突き合わせ溶接構造となっており、柱ウェブは柱

フランジの内側に挿入されている。損傷は2層ラーメンの上下フランジ各部に発生し、最大130mmであった。図-3に亀裂損傷の模式図を示す。

ほとんどが溶着金属内または溶接止端部であったが、一部フランジ同士の溶接部から止端部を廻り、柱のフランジとウェブの溶接部を越えている箇所もあった。写真-1に写真を示す。



写真-1 空P25亀裂写真

箱部材の内側の調査においては亀裂が発見されなかった。さらに超音波探傷調査結果により、突き合わせ溶接部が十分溶け込んでいないことが確認された。表-1には亀裂調査結果を示す。

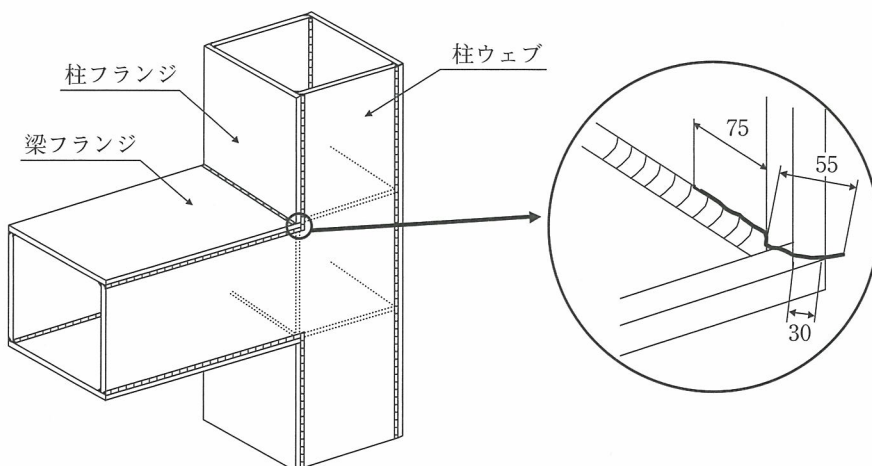


図-3 空P25亀裂損傷模式図

表-1 空P25橋脚外面調査結果一覧表

調査箇所	外観検査	MT	亀裂長
大阪側 ①	●	▲	15mm
空港側 ①	●	▲	50 (30, 25) mm
大阪側 ②	●	▲	48 (35, 13) mm
空港側 ②	●	▲	60 (35, 25), 25mm
大阪側 ③	●	▲	45 (25, 20), 12mm
空港側 ③	●	▲	60 (40, 20) mm
大阪側 ④	●	▲	130 (75, 55) mm
空港側 ④	●	▲	100 (60, 40) mm
大阪側 ⑤	●	▲	25 (18, 7) mm
空港側 ⑤	●	▲	60 (30, 30) mm
大阪側 ⑥	●	▲	65 (35, 20, 10) mm
空港側 ⑥	●	▲	25, 5mm

MT：磁粉探傷検査 ●：塗膜割れあり ▲：亀裂あり

主な調査結果は、次のとおりである。

- ・空P25の隅角部において全箇所にて亀裂損傷が発見された。
- ・亀裂損傷は隅角部止端のみで発見されているが、他の溶接部では損傷は見されていない。(渦流探傷試験にて確認済み)
- ・空P25の亀裂損傷部位は、現在施工されている鋼製橋脚と異なる方法で組み立て、溶接されており、溶接線が複雑に交差する構造となっている。そのため溶接時における内部応力は過大なものであったと推定される。

1-3 池田線出入橋付近亀裂調査結果

空P25の調査結果をうけて、その他の出入橋付近の鋼製橋脚について亀裂調査を実施した。対象とする橋脚は空P17～空P29とした。まず隅角部や溶接部の塗膜割れ等を目視により点検した。その後、塗膜を除去し、磁粉探傷検査により詳細調査を行った。点検の流れを図-4に示す。

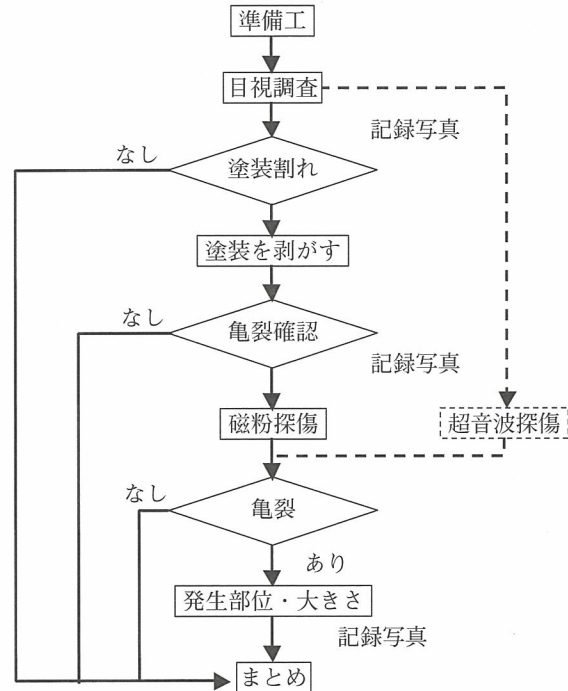


図-4 点検の流れ

隅角部の外面調査結果を表-2に示す。一部の箇所において工事足場の単管が障害となって調査不可となったものもある。表-2の中の [MT (磁粉探傷検査) による亀裂なし], [調査出来ない箇所], [亀裂数量] の下行の比率は塗装割れありの165隅角に対する割合を示したものである。図-5には亀裂総数101箇所に対する亀裂のサイズの比率を示す。

空P25の代表的な亀裂損傷部の溶接ビードを実測したところ (実測位置は、図-6参照)、ルートギャップ2mm残しの45°開先の完全溶け込み溶

表-2 隅角部外面調査結果まとめ

検査対象隅角部 (隅角数)	異常なし	塗装割れ あり	MTによる 亀裂なし	調査でき ない箇所	亀裂数量 (箇所)	亀裂損傷の大きさ (箇所あるいはmm)						最大値	
						10mm未満	10mm以上 30mm未満	30mm以上 50mm未満	50mm以上 70mm未満	70mm以上 100mm未満	100mm以上		
空P17	10	0	10	4	6	0							
空P18	12	0	12	7	5	0							
空P19	16	0	16	5	0	13	2	8	1	1	1	0	82
空P20	19	0	19	10	0	12	4	5	3	0	0	0	46
空P21	14	0	14	11	0	5	4	1	0	0	0	0	20
空P22	14	0	14	10	0	7	2	5	0	0	0	0	20
空P23	14	0	14	5	0	12	2	2	5	1	1	1	111
空P24	14	0	14	7	0	9	0	4	3	2	0	0	74
空P25	12	0	12	0	0	14	1	5	2	4	0	2	130
空P26	12	0	12	0	0	12	0	4	3	0	4	1	102
空P27	12	0	12	10	2	0							
空P28	12	4	8	1	6	9	1	4	3	1	0	0	60
空P29	12	4	8	4	4	8	3	4	0	1	0	0	45
合計	173	8	165	74	23	101	19	42	20	10	6	4	
比率 (%)	—	5%	95%	45%	14%	41%	19%	42%	20%	10%	6%	4%	—

接に対してサイズ不足であり、溶け込み不足が確認された。これは溶接ビードの実測結果と、溶接亀裂部のマクロ試験結果、および超音波探傷試験結果によって推察できる。これらにより、例えば、溶接ビードサイズが15mm必要な部位に対し、実測結果は平均10.5mm（最小は角部で7.5mm）であった。

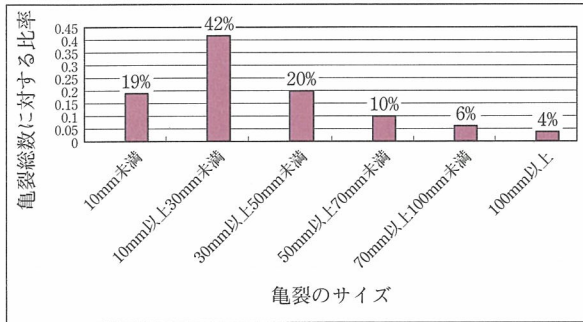


図-5 亀裂のサイズ別発生状況

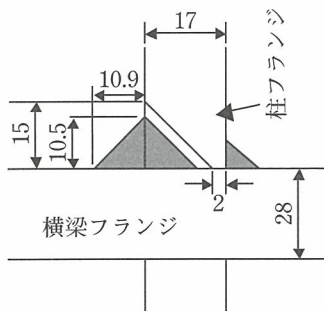


図-6 溶接ビードの実測平均値

その他、調査より次のことが言える。

- ・調査対象隅角部173箇所に対して、その95%にあたる165箇所に塗膜の損傷が発見された。
- ・塗装割れが発見された165箇所を100%とした場合、MTによって亀裂が発見されたのは41%の101箇所におよぶ。
- ・100mm以上の特に大きなひび割れが発見されたのは、空P 23、空P 25及び空P 26である。それぞれの亀裂の大きさ、形状は酷似している。
- ・隅角部内面については総数374箇所に対してその19%の70箇所に塗膜の損傷が発見された。しかし空P 23、空P 25及び空P 26について内面のMTを実施したところ、亀裂はないことが確認された。また総数に対して30%の112箇所には耐震補強のために中詰めコンクリートが充填されており、調査ができなかった。

1-4 隅角部応力測定結果

空P 25の亀裂部位の活荷重応力および応力頻度を計測した。活荷重応力計測結果によると、柱フランジにはせん断遅れによる応力集中が亀裂損傷部近傍（フランジ両止端）でみられ、最大で1.4倍程度であった。亀裂部直近はゲージ貼付が不可能なため計測していないが、亀裂部では応力集中がさらに大きくなっていると思われる。

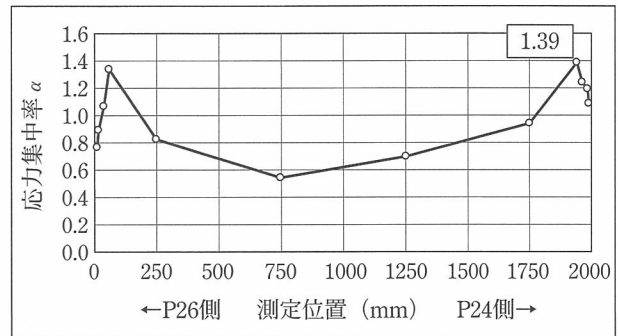


図-7 空P25 応力集中率 (a断面)

2. 補強鋼板の設計

2-1 補強鋼板の目的

亀裂損傷による損傷により橋脚の全体耐力が低下し、すぐに破壊に至るとは考えられないが、構造物を健全な状態に保全し、耐久性を向上させるため補修を行うことにした。

また、隅角部の亀裂損傷部には、せん断遅れによる応力集中により、鋼材の許容応力度を上回る繰返し活荷重応力が作用していることから、補強鋼板の添加により応力の再分配により、応力集中の軽減を図ることにした。

2-2 補強設計

補強設計は、以下の点を考慮した。

- ・補強対象橋脚は、基準等がないなかで総合的に判断して、クラック延長 $L=100\text{mm}$ を超えている、空P 23、25、26の3基とすることにした。
- ・補強は、隅角部ウェブにコーナプレートを高力ボルトで添接することとし、設計は活荷重に対してコーナプレートで分担で

きるよう板厚等を決定する。

- ・添接箇所は全隅角部とし、損傷がない隅角部でも、剛性のアンバランスを防ぐため添接板を設置することとした。
- ・亀裂部位については、溶接時の熱影響などによる溶接境界部分の割れが懸念されるため再溶接しないものとする。
- ・適用設計基準は、「阪神高速道路公団 設計基準 第2部 構造物設計基準(橋梁編) 10.3 隅角部の設計」を参照し、活荷重応力の算出にあたっては、せん断遅れによるフランジ垂直応力を考慮した。
- ・亀裂進展の有無を確認するため、観察孔を設けた。
- ・下部工の活荷重応力を算出するための上部工支点反力は、レーンに活荷重を載荷することで算出した。
- ・下部工の断面力を算出するためのフレームモデルは、橋脚基部の充填コンクリートを無視した。
- ・コンクリート充填部に対する補強鋼板の施工工法については、打ち込みボルトによる添接工法の検討を別途実施し、その施工性を確認した。

2-3 断面力計算結果及び設計計算

空P 25を例として、上部工支点反力の計算結果を表-3に示す。

解析により算出した断面力をもとに、隅角部のフランジ垂直応力を算出した。断面力の集計結果を表-4に示す。

表-3 上部工支点反力計算結果

G4側載荷		支点反力 (KN)			
		G1 (G1L)	G2 (G1R)	G3 (G2L)	G4 (G2R)
空上 P 25	老番側	2.0	632.3	126.3	842.5
	若番側	1.5	33.7	118.0	216.2
空下 P 25	老番側	1.4	616.0	153.8	794.5
	若番側	1.0	31.9	118.9	229.1

断面力照査の流れを図-8に示す。活荷重による実応力全てをコーナプレートで伝達する。活荷重応力分を柱フランジ断面のみを有効とし断面力を計算する。

写真-2には補強鋼板の設置完了状況を示す。

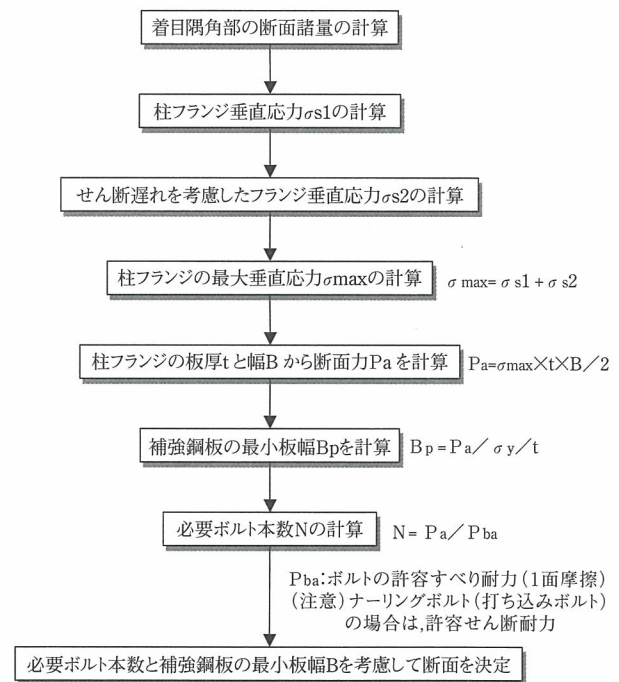


図-8 補強鋼板設計フロー

表-4 フレーム解析断面力集計結果

橋脚 番号	格点 番号	フランジ 幅 (mm)	フランジ 厚 (mm)	ウェブ 幅 (mm)	ウェブ 厚 (mm)	柱断 面積 (cm ²)	2次 モーメント (cm ⁴)	曲げモ ーメント (KN・m)	軸力 (KN)	曲げ 応力 σ _M (N/mm ²)	軸応力 σ _N (N/mm ²)	断面力 σ(N/mm ²)	せん断 遅れ σ(N/mm ²)	合計 応力 σ(N/mm ²)
P 25	①	2,000	17	1,766	17	1,460	7,663,274	-1,057	-1,490	-12.4	-10.2	-22.6	-7.8	-30.4
	②	2,000	17	1,766	17	1,460	7,663,274	1,577	-2,429	-18.5	-16.6	-35.1	-8.6	-43.7
	③	2,000	17	1,766	17	1,460	7,663,274	1,752	-737	20.6	-5.0	15.6	-7.8	7.8
	④	2,000	17	1,766	17	1,460	7,663,274	1,664	-1,235	19.5	-8.5	11.0	-8.6	2.4
	⑤	2,000	22	1,756	17	1,657	9,210,195	-2,729	-737	-26.6	-4.4	-31.0	-11.3	-42.3
	⑥	2,000	22	1,756	17	1,657	9,210,195	-2,817	-1,235	-27.5	-7.4	-34.9	-6.8	-41.7

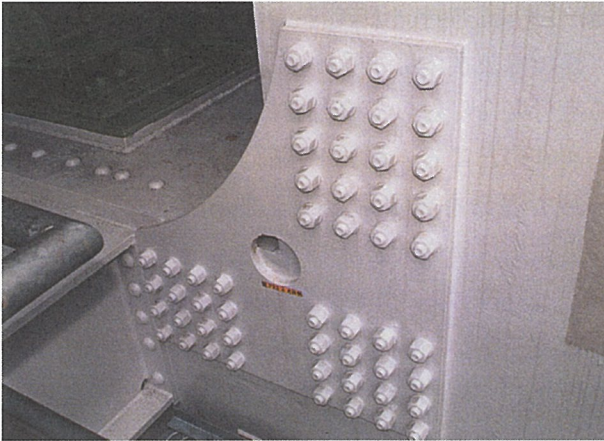


写真-2 補強鋼板設置状況

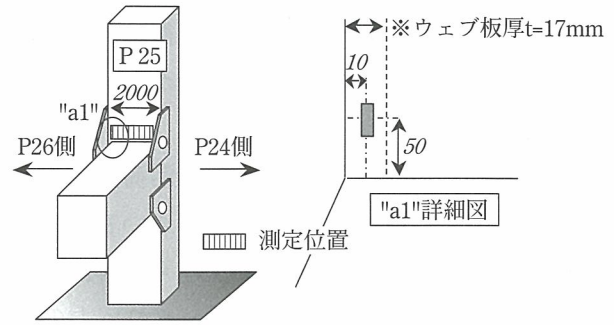


図-9 空P25補強前後の脚フランジ応力測定ゲージ配置

3. 応力測定及び疲労寿命の照査

3-1 格点応力測定

亀裂損傷部の応力を軽減することを目的とした補強を行い、補強効果を確認するために、動ひずみ測定および応力頻度測定を実施した。

動ひずみ測定はひずみゲージ添付位置に作用する動ひずみを測定することにより、部材に作用する作用応力を算出する。測定箇所を複数設けることにより、応力分布を把握することができる。

応力頻度測定は、供用中の構造物（ラーメン橋脚）が実際にどのような応力を受けているかを調べる方法である。すなわち、通常の使用状態において発生する応力の繰り返しを、そのピーク値やふれ幅の分布として捉えようとするものである。よって、応力頻度測定により、部材に作用する最大応力が得られ、また平日72時間程度の頻度計測データから疲労寿命の算定をおこなうことができる。

本測定は空P25およびコンクリート充填部を有する空P26に対して実施した。測定は、それぞれの隅角部の亀裂発生部位に着目し、補強鋼板の設置前における測定と、補強鋼板設置後における測定を実施した。なお、本章においては、空P25の断面a（図-2、図-9参照）の応力測定検討について報告する。

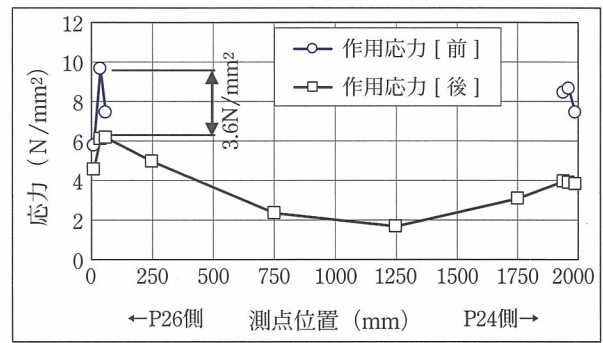


図-10 空P25補強前後の脚フランジ断面応力分布（動ひずみ計測）

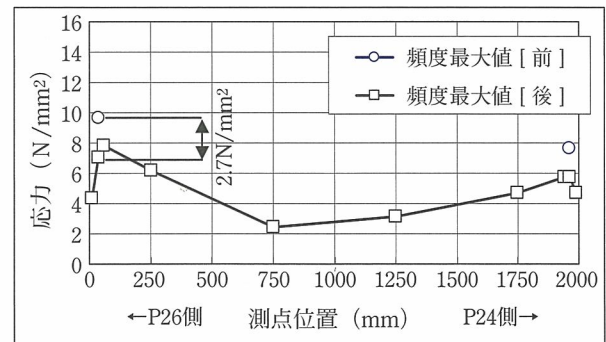


図-11 空P25補強前後の脚フランジ作用応力分布（頻度最大値）

図-10には補強前後の脚フランジ断面の応力分布、図-11には作用応力分布をそれぞれ示す。

補強前の橋脚フランジにはせん断遅れによる応力集中が亀裂損傷部近傍（フランジ両止端）で見られる。

補強鋼板を設置したことで、発生応力は軽減しており、最大で2.7MPの軽減効果が得られた。また応力分布も補強後は非常になだらかな分布に改善された。

補強前の亀裂先端部に生じている活荷重応力を応力振幅として計算すると、最も大きいものでゲージNo.25においては140N/mm²を越えていた。補強後には172.7N/mm²が54.1N/mm²となり応力の軽減効果が確認された。

また応力頻度測定結果より、平日3日間（72時間）の応力頻度を測定し、溶接亀裂先端部および橋脚フランジ両止端における応力集中部の最大応力範囲（=Δσ：応力振幅）を解析した。その結果、補強鋼板を設置したことにより、図-12に示すように、最大で補強前の29%まで低下しており、亀裂部4箇所での平均では47%まで応力が軽減された。空P26も同様の結果が得られた。

3-2 疲労寿命の検討

溶接亀裂損傷部が受ける繰り返し作用応力による疲労寿命に対して検討を行った。

現在のところ、鋼製橋脚隅角部等の溶接亀裂部の疲労寿命を算定する明確な基準がない。そこで「鋼構造物疲労設計の手引き（阪神高速道路公団）¹⁾」を参考に、亀裂損傷部位の疲労寿命を算定した。亀裂損傷部は、溶接継手形状からH等級を仮定し、橋脚フランジ部については、EあるいはF等級相当として算定した。表-5に補強によって亀裂損傷部の疲労寿命がどのように改善されたのかを、補強前後の疲労寿命の比率で示す。この結果から、最も疲労寿命が短いゲージNo.25では、補強前に推定2.5年であったものが、900年以上の疲労寿命となり、補強によって亀裂損傷部の延命効果があったことを示している。

ゲージNo.	補 強 前		補 強 後		補 強 前	補 強 後	補 強 効果
	最大値 (μ)	最小値 (μ)	最大値 (μ)	最小値 (μ)	Δσ (N/mm ²)	Δσ (N/mm ²)	$\frac{\text{補強後}\Delta\sigma}{\text{補強前}\Delta\sigma}$
15	304	-37	34	-64	70.3	20.2	29%
20	251	-338	217	-103	121.4	65.9	54%
25	688	-150	69	-194	172.7	54.1	31%
30	408	-149	213	-208	114.7	86.6	76%

平均 47%

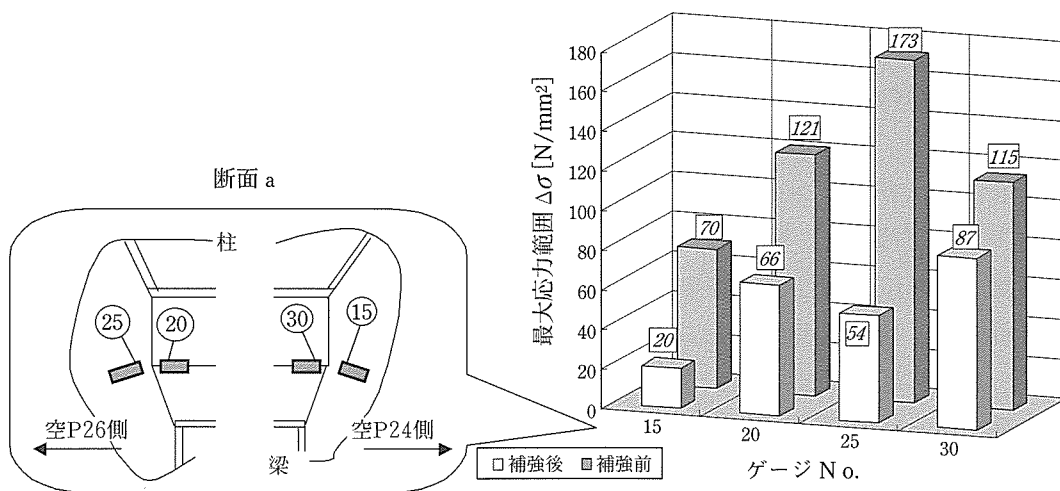


図-12 空P25亀裂先端部の応力の軽減効果

表-5 補強による疲労寿命の延命効果

部位	ゲージ No.	補強の有無	繰返しを考慮した疲労照査(H等級相当)		
			等価応力 σ_{eq} (MPa)	許容応力 σ_R (MPa)	疲労寿命 (年)
亀裂先端	15	補強前	35.7	11.2	271.0
		補強後	18.2		43879.5
		比率	0.51		161.93
	20	補強前	35.3	11.2	17.4
		補強後	17.3		124.4
		比率	0.49		7.14
	25	補強前	46.3	11.2	2.5
		補強後	17.4		927.5
		比率	0.38		378.59
30	補強前	37.1	11.2	8.0	
	補強後	18.6		52.1	
	比率	0.50		6.52	

和されたことが確認され、緊急補強としての効果が立証された。

これらの応急補強を実施した鋼製橋脚に対して、今後は追跡点検が必要不可欠となるが、点検作業をより効率よく行うために、隅角部検査専用の検査路を設置した。この検査路設置にあたっては、先に行った隅角部の詳細点検結果から、特に継続的な監視が必要な空P23から空P26の4橋脚に対して設置した。その後、設置された検査路を使用して、隅角部の非破壊検査を実施した上で亀裂部にはポンチ打ちを行い、亀裂サイズの初期状態がわかる処置を行った。施工一年後の追跡調査では亀裂の進展は見られなかったことを確認している。

4. おわりに

補強前後における応力集中の低減効果を確認するため、空P25・P26の応力頻度測定を実施したところ、隅角部に作用していた疲労寿命に関係する応力振幅が平均して補強前の50%程度に緩

参考文献

- 1) 阪神高速道路公団：鋼構造物 疲労設計の手引き，1998. 3.

REINFORCEMENT DESIGN FOR CORNERS OF METAL PIERS ABOUT DEIRIBASHI IN IKEDA ROUTE 11

Yoshihiko Takada and Takashi Yamamoto

Cracks were discovered on corners of a metal rigid frame pier by regular survey in Ikeda Route 11 in 1998. We surveyed thirteen piers in scaffolds that we could avail around it in 2000, and cracks were discovered in ten of them. We took emergency works used metal plates for reinforcement, for three piers of them badly damaged. We adopted the metal plates to restrain cracks that spread by live load stressed repeatedly, on corners of them. We measured the stress at corners of them after reinforcement work, and confirmed that concerning stress averaged half, compared to before it. We surveyed cracks again in summer 2002, and found they had not spread. We will survey them in the future.

Here we report results of cracks surveys, design of metal plates for reinforcement, and measure of stress to confirm effect of it.