

3 径間連続鋼床版箱桁橋（空上 P27 支承）の負反力対策

阪神高速道路(株) 大阪管理部 調査設計グループ 兒玉 崇
阪神高速道路(株) 大阪管理部 調査設計グループ 濱田 信彦
阪神高速道路(株) 大阪管理部 調査設計グループ 山村 清

要 旨



阪神高速 11 号池田線梅田付近の元国鉄貨物ヤード上に設置された 3 径間連続鋼床版曲線箱桁橋（空上 P27～空上 P30, 1 箱桁 2 支承橋）は周辺状況との関係上構造的に制約があり, 3 径間連続桁としては変則な支間割や斜角 74 度(空上 P27 上)を有する曲線桁橋となっている. このため, 当該橋梁端部に位置している空上 P27 は建設時より常時で死荷重負反力が生じる状態となっており, 幾度となく支承の損傷が発生していたことから, 過去の工事でも負反力対策工事が行われてきたが, 問題の解決には至っていなかった.

空上 P27 における過去の支承の損傷発生状況から, 死荷重負反力状態に加えて通常走行状態での活荷重載荷による負反力の変動が支承の損傷発生に影響を与えていると予想されたため, 今回新たに当該橋梁に隣接する梅田入路の梅田入 P3 橋脚側面に新設ブラケットを設置し, 中央径間（空上 P28～空上 P29 間）に新たに支点を設け, 支承高さを調整することによって, 端支点空上 P27 での負反力を解消することができた.


過去の調査結果より, 反力計算結果と実反力とは異なる状況が発生することが懸念されたため, 今回の施工に際しては, 事前に梅田入 P3 における支点高さ空上 P27 での反力の発生状態の関係を調査（事前モニタリング）することにより, 実橋梁の挙動に対応した支承高さを調整量を決定することができ, 負反力対策として確実な成果を得ることができた.

キーワード: 曲線桁, 負反力対策, 新支点追加, 支点高さ調整, 事前モニタリング, 追跡モニタリング

はじめに

本件の対象となる空上 P27 は, 3 径間連続鋼床版曲線箱桁橋（空上 P27～空上 P30, 上下線分離構造, 1 箱桁 2 支承橋, 昭和 42 年 10 月竣工）の端部に位置している（,  参照）.

本橋梁は, 元国鉄貨物ヤード（現在は無い）, 国道が入り組んだ位置に架設されており, 橋脚の位置に制限があったことから, 変則な支間割（上り線 40+100+60m, 下り線 39+90+60m）や斜角 74 度（空上 P27 上）を有する曲線桁橋となっている.

これらの要因により, 空上 P27 上では常時で死荷重負反力が生じる状態となったことから, この死荷重負反力に対処するため, 隣接する合成鋼桁橋からブラケットを張り出して, 合成鋼桁橋の死荷重反力をカウンターウェイトとして使用し, 連続桁の負反力を抑えるという特殊な構造となっている¹⁾（ 参照）.

なお, 本橋梁については, 建設当初より設計・製作・架設の面で種々の問題が論議されており, 設計値と実挙動の照査, 支点反力の実態, その他理論計算では把握できない問題等を明確にするた

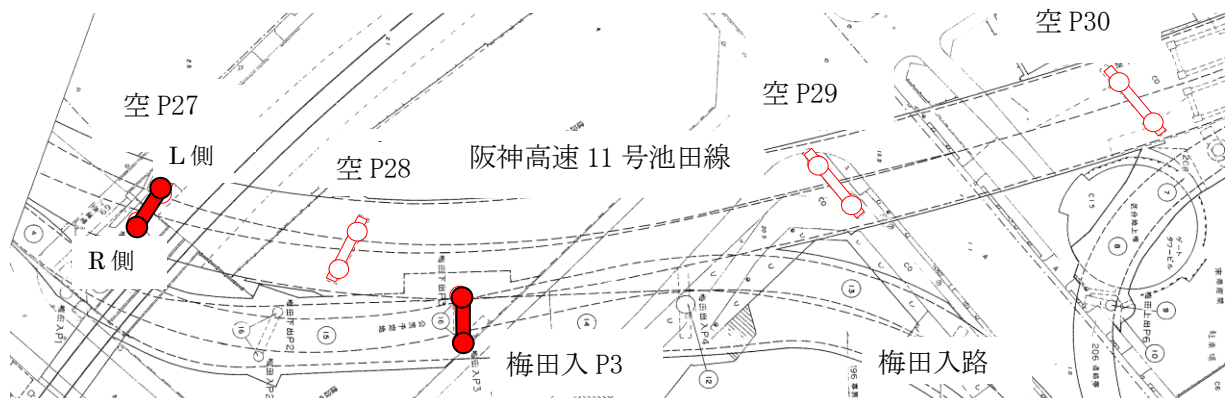


図-1 対象橋梁の概要

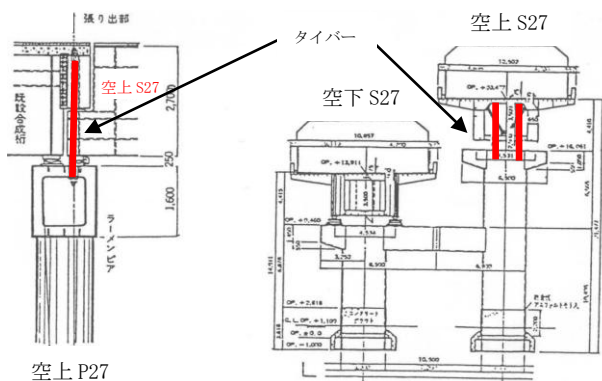


図-2 対象橋脚上の構造

めの模型実験が行われ、この模型実験の結果では、空上 P27 の支点反力は、原設計計算値とは大きく異なるなど、支点反力の状態はかなり複雑な機構を呈していると考えられた²⁾。

さらに、完成後、車両走行上の安全性（見透し視距の確保）から曲線内側に拡幅を行い、床版張出しの延長で処理が行われているため、反力、桁の変形等は一層複雑になっていると思われる。

1. 空上 P27 の負反力対策の経緯と構造検討

1-1 空上 P27 の負反力対策の経緯

本橋梁では、昭和 52 年の道路パトロール中に異常音の発生が確認され、その後の調査で空 P27 上下線の曲線外側（以降、R 側）の支承の損傷や負反力抵抗用のタイバー（図-2 参照）の破断等が発見されたことから、昭和 58 年に支承の取替工事が実施された。この取替工事では、支承形式

を、死荷重負反力をサイドブロックで抵抗する構造に変更した³⁾。

しかし、平成 12 年に実施された上部耐震補強に伴う支承取替工事の事前調査において、空上 P27R 側支承の全てのセットボルトが破損し、上支承と下フランジ間に約 9mm の隙間が確認された。

そこで、平成 12 年の支承取替工事では、空上 P27 R 側の負反力変動により発生していると思われる支承の疲労損傷をこれ以上繰り返さないために、詳細な調査（試験車走行試験による挙動調査、死荷重負反力調査、施工管理計測等）が実施され、橋梁の構造変更も含めた抜本的な対策の検討が行われた。

検討の結果、空上 P27 の支承取替に際して、空上 P27 の支承高さは変更せず、空上 P28R 側を 10mm 下げることにより、死荷重負反力により浮き上がっている空上 P27R 側の負反力を低減するという方法が採用された。なお、交換された支承は、セットボルトを必要数の 2 倍の 8 本設置し、サイドブロックで死荷重負反力をすべて受け持つことが可能な形式とした。平成 13 年 4 月に支承取替工事が完了し、空上 P27R 側にのみ発生していた死荷重負反力は、R 側・L 側の両支承に分散されることになった。支承設置後の死荷重反力モニタリング調査の結果では、桁温が 20℃の時に R 側 = 196kN, L 側 = -225kN であり、温度上昇に伴い R 側は正反力が増加, L 側は負反力が増加し, 温度が低下すると逆の傾向が認められていた。

ところが、支承取替工事完了後の平成 13 年 11 月に、今度は空上 P27 の L 側支承において、負反力抵抗用のサイドブロックの取付ボルト 2 本 (M22) が、活荷重による挙動が原因と考えられる疲労により破断するといった損傷が発生し、さらに、平成 14 年 1 月には、空上 P27 の L 側支承のセットボルト 1 本 (M39) が破断するといった損傷が発生した^{4), 5)}。

このような過程を経て、今回の負反力対策工が実施されることになった。

1-2 今回の負反力対策の概要

これまでの支承損傷発生状況からみて、空上 P27 において生じている死荷重負反力が支承の損傷発生に影響を与えていることが予想され、これを極力小さくする、あるいは正反力とすることが重要と考えられた。

当初は、現在公園となっている路下に橋脚を新たに設置して負反力に対応することも検討されたが、最終的に当該橋梁に隣接する梅田入路の梅田入 P3 橋脚に新設ブラケットを設置し、中央径間 (空上 P28～空上 P29 間) に新たな支点を設けることにより、端支点空上 P27 での負反力に対応することとした (図-1, 図-3 参照)。

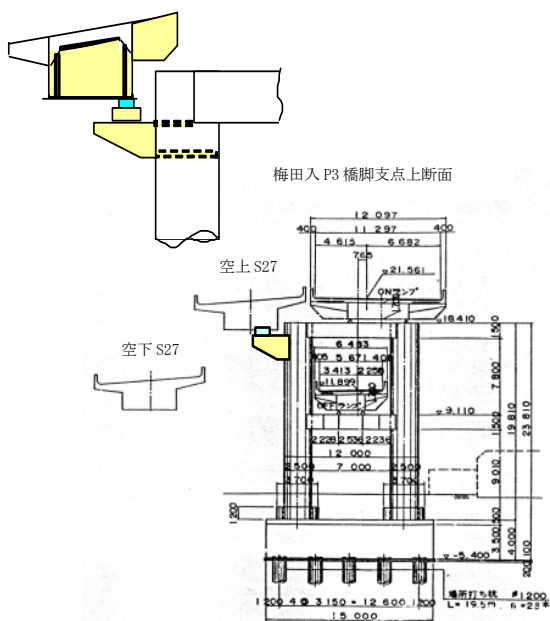


図-3 補修 (支点追加) 概要図

2. 負反力対策の詳細検討

予備検討段階では、梅田入 P3 位置において支点高さの調整を行うことで空上 P27 の負反力を解消できるとしていたが、前節に示した構造で詳細検討を進めていく中で、梅田入 P3 位置に新しい支点を設けて支点嵩上げを行った場合、+55mm の支点嵩上げが必要となるが、逆に空上 P28 上において「死荷重+B 活荷重」反力で大幅な負反力が生じる状態 (「死荷重」反力では負反力は発生しない) となる結果が得られた (表-1 参照)。

このため、梅田入 P3 に加えて空上 P27, P28 の支承で高さ調整を行うことで、「死荷重+B 活荷重」反力においても、(依然小さな負反力が生じる支承はあるが) 梅田入 P3 のみで支点高さ調整するよりバランスのとれた支点反力状態となり、空上 P27 の負反力を解消できることが確認された。なお、設計時・施工時とも空上 P27, P28 の支点高さ調整は、R 側支承のみで行うこととした。

これまでに行われた工事記録 (設計・計測等) から、空上 S27～空上 S29 の 3 径間連続桁橋については構造が複雑なため、設計計算とは異なった挙動を示し、特に支点反力については、建設時の設計段階では設計計算と模型実験で異なる符号の支点反力が生じ、平成 13 年の補修工事段階での設計計算でも、空上 P27 支承の R 側と L 側で負反力の発生が実橋と逆の傾向になる等の現象が生じていた。そのため設計計算だけでは実際に支点反力の状態を確定することは難しく、負反力対策工事の効果を実測して確認する必要があると考えられた。

また、詳細検討の結果から、ある程度大きな支点高さの調整を行う必要があると考えられたため、支点高さの調整によって既設構造物 (特に梅田入 P3 橋脚) に与える影響 (応力増加, 局部変形・局部応力の発生等) を確認しておく必要があると考えられた。

以上のことから本工事の設計の妥当性を確認すること、工事が構造物に与える影響を把握するこ

表-1 各支点の支点高さ調整量と空上 P27 支承への正反力導入検討（詳細検討）

梅田入P3+55mm	空上P27		空上P28		梅田入P3	空上P29		空上P30	
	Mov.		Fix		Mov.	Mov.		Mov.	
	GL	GR	GL	GR	GR	GL	GR	GL	GR
調整前死荷重	-92.58	207.64	5978.61	1899.99	0.00	3392.70	4340.48	353.91	986.44
調整死荷重 梅田入P3	305.80	141.35	-847.00	-894.30	1514.70	39.60	-355.30	147.40	-52.25
調整後死荷重	213.22	348.99	5131.61	1005.69	1514.70	3432.30	3985.18	501.31	934.19
B活荷重 (max)	984.87	1059.94	2251.42	2076.31	3406.79	2377.03	2507.31	1275.65	1081.53
B活荷重 (min)	-209.22	-149.99	-381.73	-1912.46	-924.31	-378.00	-455.62	-437.33	-255.37
死荷重+活荷重 (max)	1198.09	1408.93	7383.03	3082.00	4921.49	5809.33	6492.49	1776.96	2015.72
死荷重+活荷重 (min)	4.00	199.00	4749.88	-906.77	590.39	3054.30	3529.56	63.98	678.82

梅田入P3+35mm 空上P27+7mm 空上P28+10mm	空上P27		空上P28		梅田入P3	空上P29		空上P30		
	Mov.		Fix		Mov.	Mov.		Mov.		
	GL	GR	GL	GR	GR	GL	GR	GL	GR	
調整前死荷重	-92.58	207.64	5978.61	1899.99	0.00	3392.70	4340.48	353.91	986.44	
調整死荷重	空上P27	-413.40	411.65	367.02	-382.76	18.01	0.57	-1.27	0.28	-0.10
	空上P28	549.02	-546.80	-877.91	966.69	-162.61	259.69	198.84	-14.32	5.08
	梅田入P3	194.76	90.04	-538.89	-569.14	963.99	25.10	-226.21	93.70	-33.36
調整後死荷重	237.80	162.53	4928.83	1934.78	819.39	3678.06	4311.84	433.57	958.06	
B活荷重 (max)	984.87	1059.94	2251.42	2076.31	3406.79	2377.03	2507.31	1275.65	1081.53	
B活荷重 (min)	-209.22	-149.99	-381.73	-1912.46	-924.31	-378.00	-455.62	-437.33	-255.37	
死荷重+活荷重 (max)	1222.67	1222.47	7180.25	4011.09	4226.18	6055.09	6819.15	1709.22	2039.59	
死荷重+活荷重 (min)	28.58	12.54	4547.10	22.32	-104.92	3300.06	3856.22	-3.76	702.69	

■ : 支点高さ調整前（死荷重状態）で負反力発生箇所の負反力値 ■ : 支点高さ調整後（死荷重+B活荷重状態）で負反力発生箇所の負反力

と、支点高さ調整による効果を確認すること等を目的としてモニタリング計測を実施した。

3. 事前モニタリングの実施

3-1 実施内容

事前モニタリングで実施した調査・検討は下記の通りである。

- ①空上P27, P28, 梅田入P3における死荷重反力・活荷重反力（試験車両走行時）の確認, 支点高さ調整量の設定
- ②各工事段階での既設構造物, 新設構造物に生じる応力の確認
- ③気温変化による支点反力の変動の確認

支点反力の確認については、死荷重状態、活荷重載荷状態での支点反力以外に、気温変動による支点反力を確認する必要があることから、1日の気温変化による反力変動状況について調査を行っ

た。なお、活荷重については、設計活荷重（B活荷重）の全載荷を行うことは困難であることから、試験車両走行試験を実施した結果から活荷重による変動状況を把握するものとした。

3-2 実施結果

(1) 支点高さ調整量の決定

支点嵩上げ工を実施する前に、まず、空上 P27 支承において現在生じている負反力・浮きの大きさを確認するために、負反力抵抗用のタイバーが設置されていたブラケット位置に PC 鋼棒とセンターホールジャッキを設置してあらかじめ荷重を作用させ、その変動により負反力の発生状態を把握することとした。

その結果、R側支承（図-1 下側）については、死荷重状態での浮き上がりは認められなかったが、L側支承（図-1 上側）については、死荷重状態で 3mm 程度浮き上がりが生じており、その状態で発

生している負反力は約 130kN 相当であることが推定された (図-4 参照)。

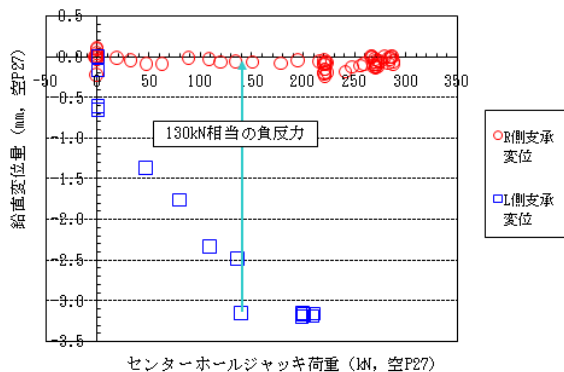


図-4 施工前の空上 P27 の支点反力

次に、梅田入P3に油圧ジャッキを設置し、新設支点の高さ調整を行い、詳細設計結果に従い空上P27、P28における支点高さ調整の必要性の有無、および必要量の検討を行った。

梅田入P3のみの支点高さ調整を行った測定結果 (図-5参照) を取りまとめると以下ようになる。

- ① 梅田入P3の約40mmの支点嵩上げをした結果、空上P27のR側支承の反力の増加は約60kN、L側支承の反力の増加は約160kNであった。
- ② R側支承は20mm以上の支点嵩上げを実施してもそれ以上の反力の増加は認められなかった。

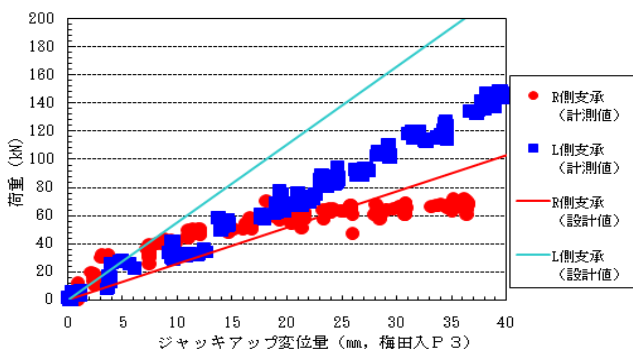


図-5 空上 P27 の支点反力と新支点高さ調整量

施工前の検討では、R側支承は、L側支承と比較して反力の増加量は少ないが、支点嵩上げにより線形的に増加すると考えられていたが、事前モニタリングの結果では、R側支承では、梅田入P3を20mm以上ジャッキアップしても主桁がねじれ変形するため、支点反力の増加の傾向が頭打ちになる

ことが確認された。

次に、空上P28側の支点嵩上げを行ったが、設計時に想定していた程度まではL側支承への十分な正反力の導入が見られなかった。

このため、空上P27の支点嵩上げはR側支承についてのみ実施することから、空上P27の支点嵩上げはL側支承の正反力を減少させることとなり、空上P28の支点嵩上げによる反力導入がなければ、梅田入P3の支点嵩上げで導入した正反力を相殺することになる。

上記のことから、空上P27、P28における支点嵩上げは行わず、梅田入P3においてのみ支点嵩上げを行い、空上P27に正反力を導入することとした。

ただし、梅田入P3の支点嵩上げによる正反力の導入では導入量が頭打ち状態となり、設計時の挙動と異なるため (図-5参照)、試験車走行試験の結果から設計時活荷重 (B活荷重) を想定することが非常に困難となった。そこで、現実的な「通常の車両走行時において、空上P27に負反力が生じないこと」を達成目標として導入正反力の大きさを設定することとした。

なお、梅田入P3のジャッキアップによって生じる橋梁および梅田入P3橋脚の各部の応力は、設計時に想定されたものより小さく、十分許容されるものであった。

過去の工事記録から夏季にはL側支承の正反力が減少することが想定されるため、40mm よりさらに梅田入 P3 の支点嵩上げを実施し、できるだけ大きな正反力を導入しておくこととした。

40mm 以上の支点嵩上げでは、L側支承は嵩上げ量に応じて導入正反力が増加していくが、R側支承については20mm (実際は+60mm) 以上の嵩上げでは、導入正反力が減少しており、19mm (実際は+59mm) 付近が導入正反力を最大にする支点嵩上げ量であったことがわかった (図-6 参照)。この結果から梅田入 P3 の支点嵩上げ量は59mmとし、最終的に、気温約20℃でR側支承は約70kN、L側支承は約165kNの正反力が導入できたと考えられる (図-5、図-6 参照)。

なお、梅田入P3での59mmの支点嵩上げに伴う主桁の各部材や支点近傍の橋脚部材での大きな応力発生、また設計時の課題としてあげられていた空上P28上での負反力の発生は見られなかった。

これらの設計値と計測値が異なった原因として、実橋と設計モデルのねじれ変形に差異があったこと等が推測される。

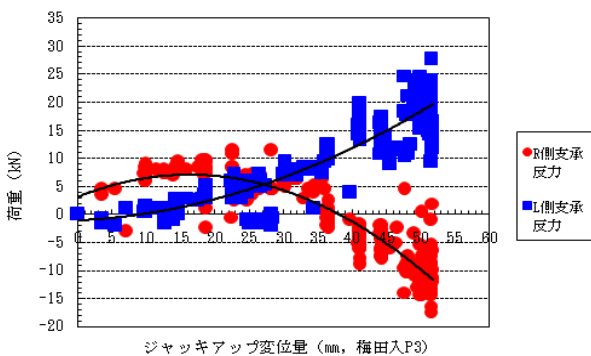


図-6 空上 P27 の支点反力と支点嵩上げ量 (図-5 からの追加量)

(2) 温度変化による支点反力変動量の推定

温度変化による導入正反力の変動量を把握することを目的に24時間連続計測を実施し、温度変化による導入正反力の増減の検討を行った。

測定時の1日の気温変化 (7.3℃) の中ででの支承鉛直変位量からR側支承の支点反力の変動量を推定すると約32kN, L側支承では55kNとなった (図-7参照)。

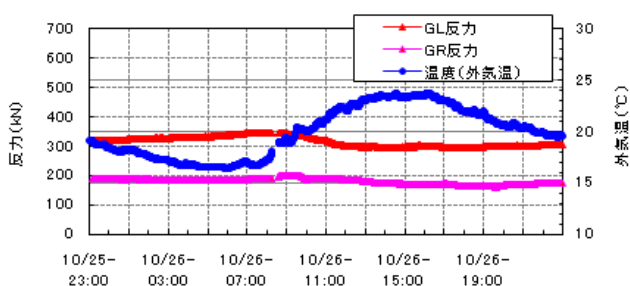


図-7 外気温と支点反力の推移 (秋季 24 時間)

これらの関係が年間温度範囲 (-5~35℃, 計 40℃) の中で線形的に推移すると仮定した場合, その変動量は, R側で約175kN, L側で約301kNとなる。反力測定時の気温 (20℃前後) が年平均気温に近いことから考えると, 約半分のR側で約88kN (冬季), L側で約150kN (夏季) の正反力の減少

があるものと推定される。年間の気温変化による支点反力の変動については, 必ずしも上記の線形関係が成立するとは限らないが, 梅田入P3での59mmの支点高さ調整により生じる正反力の増加分 R側支承約70kN, L側支承約165kNと反力測定時と夏季の温度差により減少する反力の想定値とがほぼ等しいこともあり, 夏季には注意をする必要があると考えられた。

(3) 活荷重影響による支点反力変動量の推定

通常走行状態における活荷重影響による導入正反力を把握するために, 考え得る不利な条件として, 343kN試験車による車両載荷試験を行った。

試験の結果より, 343kN トレーラー1 台が走行した際の空上 P27 に生じる反力減少の最大量は, R 側支承, L 側支承とも減少量は約 5~10kN となり (図-8 参照), 走行車線を連行した際に生じる減少量は約 10~15kN となった。また, 追越車線を走行した際の減少量はこれらより若干小さめの値を示していた。なお, これらの正反力の減少は, 施工時に導入した正反力に比べて十分小さく, 計測中に支承の浮き上がり等も確認されていない。

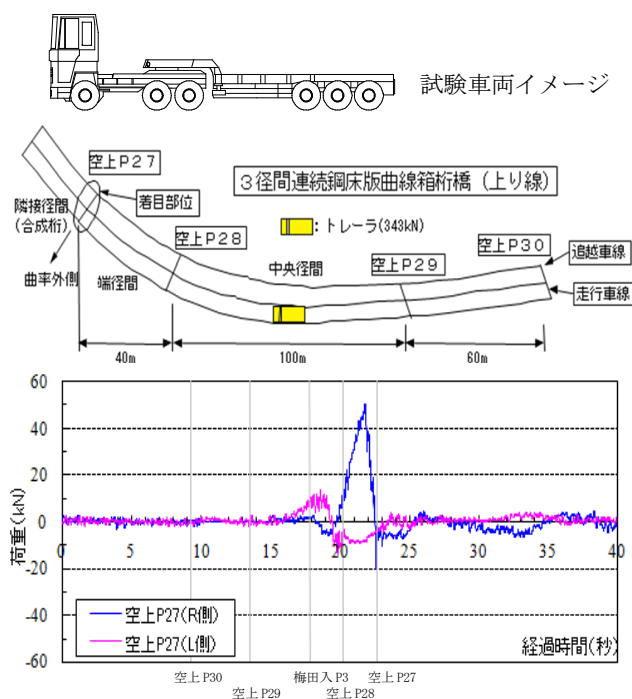


図-8 試験車走行 (追越車線単独走行) 影響による R 側・L 側支承の反力変動

本工事の結果からは夏季において、桁の温度伸縮等の影響で、導入された死荷重正反力増加分がほぼ相殺されることも十分予想され、また通常走行状態活荷重において生じる正反力の減少は、R側支承、L側支承とも約10～15kNであることから、夏季では負反力が発生する可能性が残る結果となった。

このため夏季に追跡モニタリングを実施し、空上P27での支点反力を再度確認することとした。

4. 追跡モニタリングの実施

4-1 実施内容

夏季に実施した追跡モニタリングでは、支点反力の確認として、秋季の事前モニタリング調査同様、気温変動による支点反力を確認するために、24時間連続計測を行った。また、活荷重影響の確認については、事前モニタリング結果から、その影響が分かっており、追跡モニタリングでは試験車両走行試験を行わず、12時間連続の動的計測を実施することで通常走行状態での応力変動を把握することとした。

4-2 実施結果

(1) 温度変化による導入反力の変動

反力の測定は、秋季の計測同様、支承近傍に油圧ジャッキを設置し、油圧ジャッキの反力から支承の死荷重反力を確認することにした。

調査結果から死荷重反力は、R側支承で392.3kN、L側支承で50.8kN（気温：約27℃）と算出された。ここで、秋季の工事で導入した支点反力は、R側支承で約70kN、L側支承で約165kNであり、秋季の計測結果から予想されているとおり、夏季では気温の変化によってR側支承、L側支承で大きさが逆転していた。また、R側とL側の支点反力の合計値は秋季の2倍程度となり、秋季と大きく異なる結果が得られた。

夏季におけるR側支承、L側支承それぞれの温度変化と支承反力相関関係から、R側支承は温度

上昇（約7℃上昇）により支承反力が大きくなる傾向（約150kN増加）にあり、L側支承は温度上昇（約7℃上昇）により支承反力が小さくなる傾向（約50kN減少）にあると言える（図-9参照）。

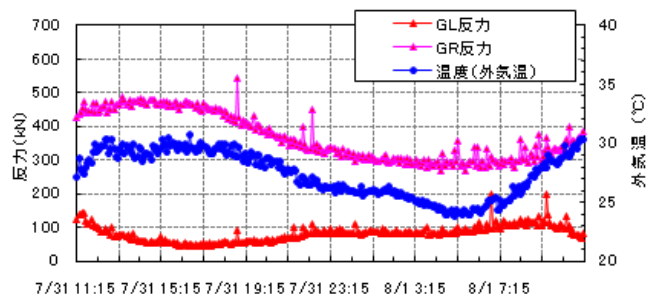


図-9 外気温と支点反力の推移（夏季24時間）

施工時（秋季～冬季）と夏季の計測結果から、R側支承では冬季が、L側支承では夏季が最も正反力が減少する傾向であると考えられた。

(2) 一般車走行による影響把握

一般車の通常走行状態における支点反力の状態を把握するために、12時間連続の動的計測結果をもとに頻度分析（PV法）を実施した。

なお頻度分析結果は、温度影響と車両走行影響の両方を加味したものとし、測定開始時の反力（R側支承450kN、L側支承50kN）をもとに算出した実反力の頻度分布で評価する（図-10参照）。

上記の分析結果から、活荷重影響を考慮した支点反力の最小値は、14～20時付近でR側支承で380kN、L側支承で30kNとなっており、夏季においても「通常の車両走行時において、空上P27に負反力が生じないこと」が確認された。

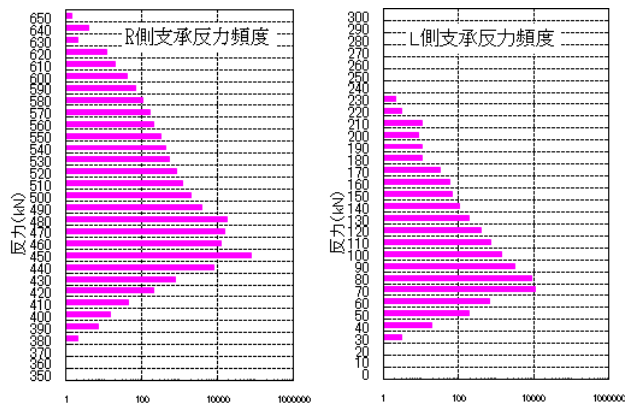


図-10 R側、L側支承の支点反力頻度（12時間）

なお、この支点反力が小さくなった状態は、12時間の計測中に2回発生した程度であり、いずれも偶然大型車両が2台並走した状態であり、頻度としてもごくわずかである。

5. まとめ

本件は、空上 P27 の負反力対策について過去に実施した対策および今回の対策の成果について述べてきた。主たる結論は以下のとおりである。

- ・空上 P27 では、建設時より、死荷重負反力が原因と思われる支承損傷が発生しているが、過去の支承補修では、十分な成果を得られていなかった。今回、中央径間に支点を設けることにより、抜本的な対策を行うことになった。
- ・今回の施工に際しては、梅田入 P3 における支点高さと同様に、空上 P27 での反力の発生状態の関係を事前モニタリングすることにより、実橋梁の挙動に対応した支承高さの調整量を決定できた。

- ・事前および追跡モニタリングの結果により、本橋梁は、温度変化（桁伸縮挙動）に伴い、曲線桁の影響で上部構造全体がねじれ、空上 P27 支点部では温度上昇時に R 側支承の反力が増大し、L 側支承の反力が減少すること、温度低下時は逆の傾向があることがわかった。また今回の施工によって、夏季・冬季においても支承反力が負反力になることはなく、一般車両走行による活荷重影響を考慮しても正反力を導入できており、空上 P27 支承の損傷発生の原因となっていた負反力を解消することができたと言える。

参考文献

- 1) 阪神高速道路公団：空 P27 構造検討業務，1979.
- 2) 阪神高速道路公団：空 P27 資料修正業務，1983.
- 3) (財) 阪神高速道路管理技術センター：連続曲線桁における負反力脊の取替え—空 P-27—，明日へはばたく技術，pp. 45-46, 1998.
- 4) 阪神高速道路公団：大阪府道高速大阪池田線上部耐震改善工事（11-2-池-大建）工事報告書，2001.
- 5) 浜田 信彦，志村 敦，山口 史夫，木村 恭介：死荷重負反力を受ける支承の取替工事，構造工学論文集，48A 巻，pp. 1011-1019, 2002.

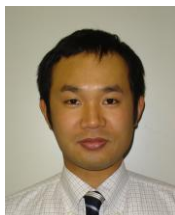
COUNTERMEASURE AGAINST UPLIFT FORCE ON A THREE-SPAN CONTINUOUS CURVED MONO-BOX GIRDER WITH STEEL DECK

The bridge in this study is a three-span continuous mono-box girder bridge with steel decks. It has irregular span lengths and a curved shape with a skew angle of 74 degrees. This unique configuration imposes constant uplift force on this bridge and has required repair of shoes repeatedly, which did not solve the problem fundamentally.

In the current countermeasure work based on the previous experiences, additional shoes were installed in the middle span of the bridge as a complete solution to the uplift force issue.

This paper describes the behavior of the bridge and the effect of the countermeasure obtained by monitoring measurement during the construction.

兒玉 崇



阪神高速道路株式会社
大阪管理部 調査設計グループ
Takashi Kodama

濱田 信彦



阪神高速道路株式会社
大阪管理部 調査設計グループ
Nobuhiko Hamada

山村 清



阪神高速道路株式会社
大阪管理部 調査設計グループ
Kiyoshi Yamamura