

## 第5章 支承挙動の調査事例

### 5.1 はじめに

支承は、その設計・施工方法、供用環境（自然環境、交通量）、維持管理手法等の様々な要因の影響によって、本来保有すべき水平変位や回転への追従機能を損なっていく可能性がある。このような支承の挙動の問題は、一般に、供用下で生じる腐食等による劣化・損傷に起因したケースや、例えば、鋼製支承からゴム支承に取替えて支承形式を変更したことによって生じるケースが多いように見受けられる。これらの支承の挙動が、正常なものではなくなった場合、ほかの橋梁部材の変形挙動へ影響を及ぼすだけでなく、異常音の発生による周辺環境への影響も懸念され、見過ごされて放置されれば、補修にもコストがかかるようになる。

本章では、支承の挙動として、常時における支承部の機能（移動、回転も含む）および応力性状も対象として取り扱い、そのような支承部の挙動に着目して事例を収集し、鋼製支承やゴム支承などの実験や解析事例についてまとめた。また、その結果を踏まえて、支承の挙動に関する問題点を抽出し、上部構造へ及ぼす影響をまとめた。

### 5.2 挙動の調査事例の紹介

支承の挙動に関する事例を4.2節で前述したように、公表文献等から支承・挙動をキーワードとして収集した。本節では、収集した文献の中から「鋼製支承の挙動事例」、「ゴム支承の挙動事例」、「ゴム支承および鋼製支承の挙動比較事例」、「支承部の応力性状の検討事例」を詳しく扱った文献について紹介する。紹介する事例については、文献より引用した文章、図表などは本章の内容と区別するためすべて枠で囲って示した。文章は要約して示し、図表については、掲載の便宜上トレースして書き直したものがある。さらに、図表の番号も本章内での通し番号にふり直して引用した。なお、各事例の見出しの右肩に付記した番号は、参考資料3に示した収集文献No.を表す。

#### 5.2.1 鋼製支承の挙動事例

ここでは、機能劣化した鋼製支承の変形挙動や取替え前後の新旧鋼製支承の挙動事例について紹介する。

##### (1) BP・B 支承の活荷重挙動に着目した事例（BP・A 支承から BP・B 支承に取替え）<sup>27)</sup>

本事例は、供用開始後約30年を経たBP・A支承からBP・B支承への取替えを行い、活荷重に対する移動・回転機能の実態および取替えによる改善程度を調査した事例である。対象橋梁は、鋼単純I桁橋であり、実橋の調査結果をまとめると、次のとおりである。

可動支承の水平移動は、取替え前（BP・A支承）は、ほとんど水平変位していない。取替え後（BP・B支承）は、約14倍水平変位しており、可動機能を回復した。回転角は、取替え前に比べて取替え後では2～3倍に増加している。固定支承の回転は、可動支承と同様の挙動を示している。BP・A支承からBP・B支承に取替えることにより、取替え直後から支承機能を大幅に改善することができる。

(2) BP・A 支承の活荷重挙動に着目した事例 (BP・A 支承から BP・A 支承に取替え) <sup>22)</sup>

既設橋の支承の機能を回復する方法として、支承の一部交換なども考えられるが、一部を交換しても元どおりの機能を回復することができない。したがって、全体を取替えることがもっとも望ましい。しかし、供用下での取替え作業は容易でない上、消耗品のように短い周期で取替えることは経済性の面からも難しい。新設、取替えの両面から、従来にも増して、耐久性に優れた支承の実用化が望まれている状況にあるが、支承の耐久性改善を目的とした研究は、支承本体に着目した事例が多く、桁の挙動から支承の機能を評価することはほとんどなかった。本事例は、桁の挙動から BP・A 支承の機能を評価するため、活荷重に対する支点回りの挙動を実橋調査し、取替え前後および取替え 1 年後に支点回りの挙動調査を行った事例である。対象橋梁は、T 型橋脚上の連続する鋼単純 I 桁橋であり、供用開始後約 22 年経過している。図 5.1 に計測対象橋梁の一般図を、図 5.2 に、BP・A 支承の一般図を、表 5.1 に新旧支承の構造比較を示す。実橋の新旧 BP・A 支承の調査結果をまとめると、次のとおりである。

可動支承の水平移動は、取替え前はほとんど水平変位していない。取替え後の水平移動は約 6 倍に、1 年経過後は 12 倍に大きくなっている。しかし、解析値と比較すると、1 年経過後でも約 55% である。回転角は、取替え前に比べて取替え直後では約 44% と小さくなるが、1 年経過後は可動支点、取替え直後は完全拘束の解析値にほぼ等しい。ソールプレートの前面ひずみは、取替えてもあまり変化がなく、実測値はどの計測段階においても完全拘束あるいは固定支点の解析値にほぼ等しい。固定支承の回転は、可動支承の場合と同様の挙動を示している。ソールプレートの前面ひずみは、約 20% 低下する傾向が見られる。特に高ひずみ域での低下が大きい。取替えによって、すべり機能はかなり改善されたにも係わらず、ソールプレート取合い部の応力については、あまり低減されなかった。原因は取替え前後での支承諸元の違いによるものと考えられる。

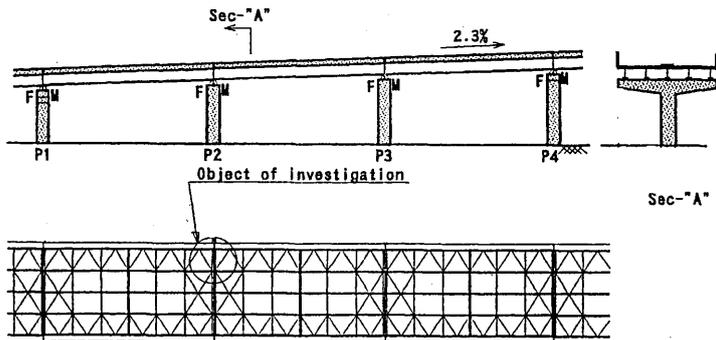


図 5.1 計測対象橋梁の一般図 (転載)

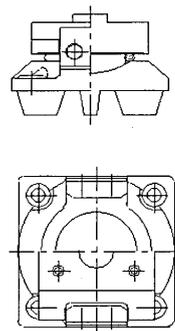


図 5.2 BP・A 支承 (トレースして転載)

表 5.1 新旧支承の構造比較 (トレースして転載)

		撤去支承	新設支承
設計反力		100tonf	100tonf
回転部 曲率半径 r		500mm	210mm
表面 処 理	Hu	固体潤滑剤被覆	SUS 316
	H1	固体潤滑剤埋込	PTFE
	Ru	固体潤滑剤埋込	固体潤滑剤埋込
	R1	固体潤滑剤被覆	固体潤滑剤被覆

(3) 橋梁振動に着目した事例（線支承から高硬度1本ローラー支承に取替え）<sup>29)</sup>

本事例は、車両の走行で民家が振動すると苦情があったため、振動計測を行い、既設の線支承が車両のたわみで移動しないため、橋脚もそのまま振動し、橋脚周囲の地盤から民家に振動が伝わっていることが判明した事例である。防振対策として、床版の連続化、上下線橋脚の一体化、支承の摩擦係数を低減する振動絶縁を検討した。床版の連続化は、桁の劇的な振動低減が期待できなく、構造上に問題があり、上下線一体化も振動の低減が期待できないことから、振動絶縁を採用した。橋脚の剛性が小さいことから、摩擦係数がきわめて小さい高硬度1本ローラー支承を採用した。対象橋梁は2径間単純合成桁であり、図5.3に計測対象橋梁の一般図を示す。

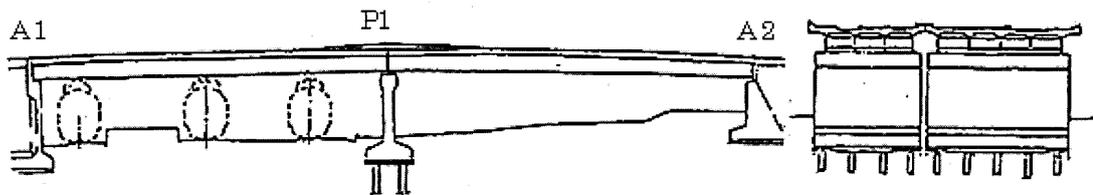


図 5.3 計測対象橋梁の一般図（転載）

実橋の調査結果をまとめると、次のとおりである。高硬度1本ローラー支承による絶縁効果は大きく、一次の桁の固有振動数の伝達が1/8に小さくなった。ローラーが滑り出す変位は0.01~0.02mmであり、ローラーが滑り出す変位よりも小さい変位は絶縁できない。低周波振動公害を防止するのに、高硬度ローラー支承はきわめて有効である。

(4) 設計活荷重作用時の4主桁橋の挙動事例（BP・A支承、ピンローラー支承）<sup>89)</sup>

軸重緩和による車両大型化に対応する目的で、既設橋梁の応力照査が行われ、主桁等の応力超過に対する補強が求められる事例が多くなっている。ここでは、3径間連続の4主桁橋を対象として、設計活荷重（L荷重）相当の曲げモーメントを作用させるために、200t相当の荷重を載荷し、橋梁各部の応力・変形挙動を計測している。図5.4に、橋脚および支承の変位測定位置を示し、図5.5に、橋脚および支承の変位測定結果を示す。このような荷重での計測事例は国内では、非常に珍しい。支承や橋脚の変位についての主な計測結果は、次のとおりである。

a) 支承の回転変位

50トントレーラーをスパン中央部に4台載荷したケースでは、支承変位測定位置（中心から60cmの距離）で最大0.37mmの回転変位が生じた。この時のスパン中央のたわみは約10mmであり、このたわみ量からの比例計算で回転変位測定位置のたわみを求めると約0.47mmとなる。実測値はこの値より若干小さく、これは車輪の一部が隣接スパンへ載荷されている影響が現れているものと推定される。橋脚の両側スパンに50トン車を2台ずつ載荷した場合、支承部両端の鉛直変位はおおむね同じであり、橋脚の水平変位もほとんど生じない。

b) 支承と橋脚の水平変位

50トントレーラーをスパン中央部に4台載荷したケースでは、橋脚が外側に0.7mm、支承も外側に0.2mmの水平変位を生じ、載荷スパンの外側へ変位する傾向が見られた。この水平変位の合計は

0.9mm であり、様々な荷重ケースにおいて、これらの水平変位の合計が 1mm を超えることはなかった。全荷重ケースにおいて、ローラー支承の水平変位に比べて橋脚の変位量の方が大きく、支承部の摩擦等により、橋脚が変位しながら外力を吸収している傾向が見られた。

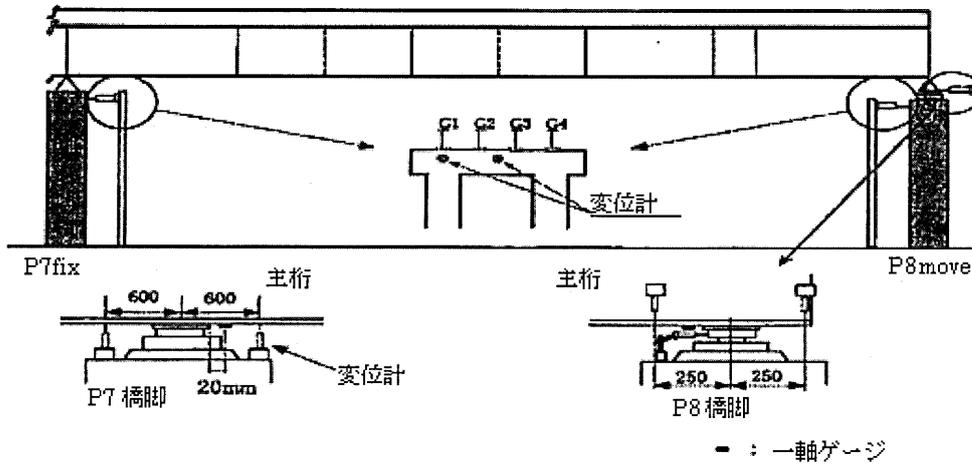
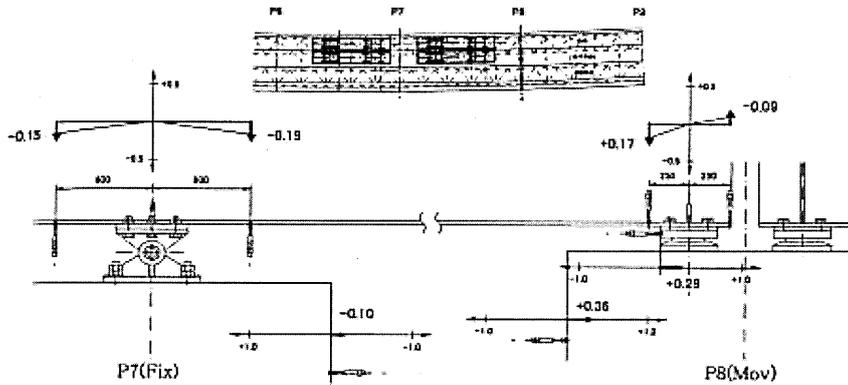


図 5.4 橋脚および支承の変位測定位置 (転載)

STEP12 : 支点上, 路肩・走行縦並列 4 台載荷



STEP13 : スパン, 路肩・走行縦並列 4 台載荷

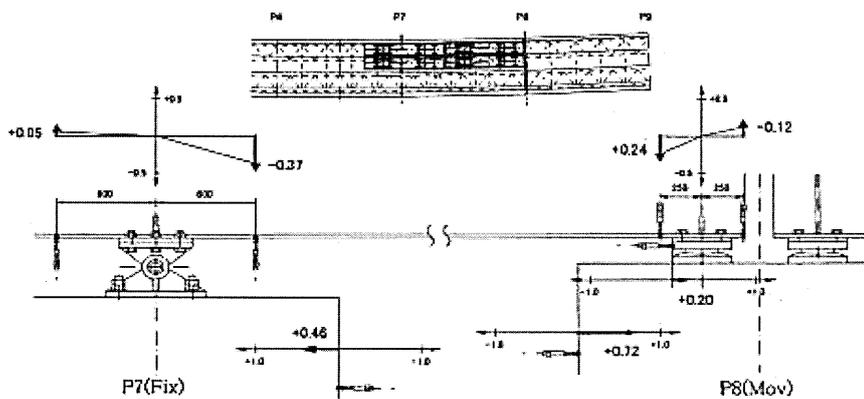


図 5.5 橋脚および支承の変位測定結果の例 (転載)

(5) 設計活荷重作用時の3主桁橋の挙動事例 (BP・A 支承, ピンローラー支承)<sup>90)</sup>

(4)に紹介した事例と同様の計測事例で、3主桁橋の事例を紹介する。設計活荷重 (L 荷重) 相当の曲げモーメントを作用させるために、200 t 相当の荷重を載荷し、各部の応力・変形挙動を計測している。図 5.6 に、橋脚および支承の測定位置を示し、図 5.7 に、橋脚および支承の測定結果の例を示す。支承や橋脚の主な計測結果は、次のとおりである。なお、計測の目的が主桁系の応力変位挙動の確認であったため、支承挙動の計測は一部の挙動に限られている。

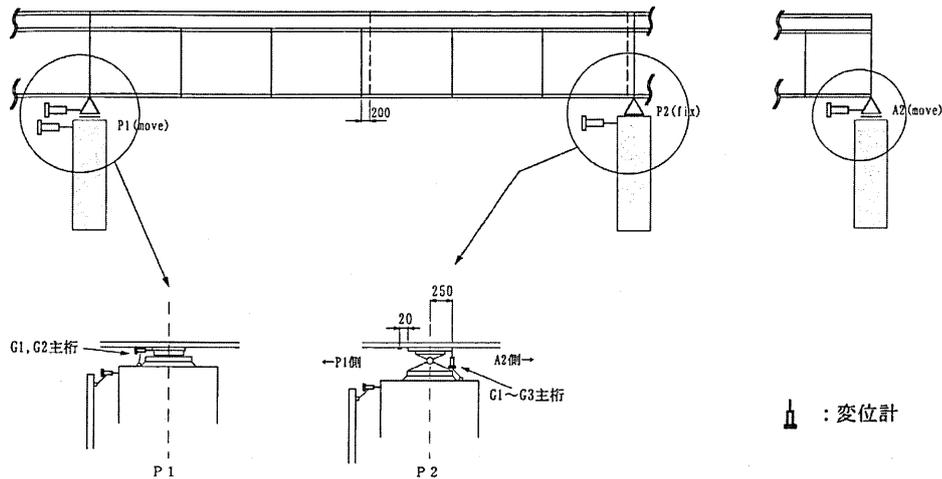


図 5.6 橋脚および支承の変位測定位置 (転載)

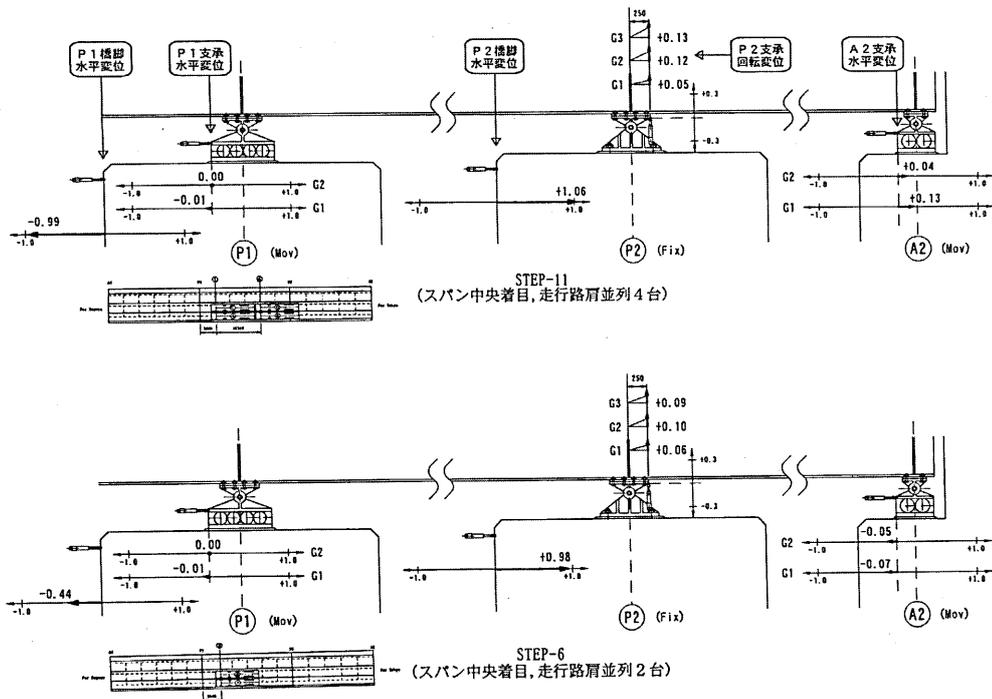


図 5.7 橋脚および支承の変位測定結果の例 (転載)

## a) 支承の水平変位

50 トントレーラーをスパン中央部に4台載荷したケースでは、P1, P2 橋脚ともに外側に約 1.0mm 水平変位した。P2 橋脚は固定支承であり、P1 は可動支承であるが、その水平変位がほぼ 0mm であることから、支承機能が不十分のために、橋脚がその影響を受けて変位していると推定される。A2 橋台の可動支承では、既に取替工事が完了しており、4台載荷したケースでは約 2.4mm の水平変位が測定され、可動機能は健全であった。

## b) 支承の回転変位

50 トントレーラーをスパン中央部に4台載荷したケースでは、P2 固定支承では最大 0.13mm の回転変位が生じた。この時のスパン中央のたわみは約 15mm であり、このたわみ量から比例計算で回転変位測定位置（支承中央から 25cm）のたわみを求めると、約 0.12mm となる。この値は、実測の回転変位とほぼ一致し、固定支承は、十分な回転機能を有している事が推定された。なお、ここでは P1 可動支承部の回転変位は計測していない。

(6) ソールプレート前面すみ肉溶接部の疲労き裂に着目した挙動事例（実橋計測）<sup>9)</sup>

3 径間連続の鋼桁橋において、桁端の固定支承ソールプレート前面すみ肉溶接部、および主桁のウェブとフランジ間のすみ肉溶接部に疲労き裂が発見され、その原因調査と対策立案のため、支承部周辺の応力変形挙動が測定された。損傷の原因は、主桁製作時の残留変形と、支承の回転機能不全と推定されている。ただし、緊急対策が実施されたため、実橋測定は、補強後のみしか行われていない。このあとに実施されたソールプレートの交換と大型化による補強対策により、支承の機能および主桁の応力状態が大幅に改善されたことが、実橋測定により確認されている。補強工実施前は、支承の回転機能が欠損していたと推定されたことから、新規取替支承について、その機能を確認するための測定が行われた。測定は、一般大型車が走行した際の測定と頻度測定（レベルクロッシング法）を実施し、それぞれ鋼製ピン支承の上沓と下沓の隙間にスペーサーを挟み込み、回転拘束の有無に応じた主桁下フランジの鉛直変位の変化確認している。図 5.8 に、ソールプレート部の補強構造を示す。主な測定結果は次のとおりである。

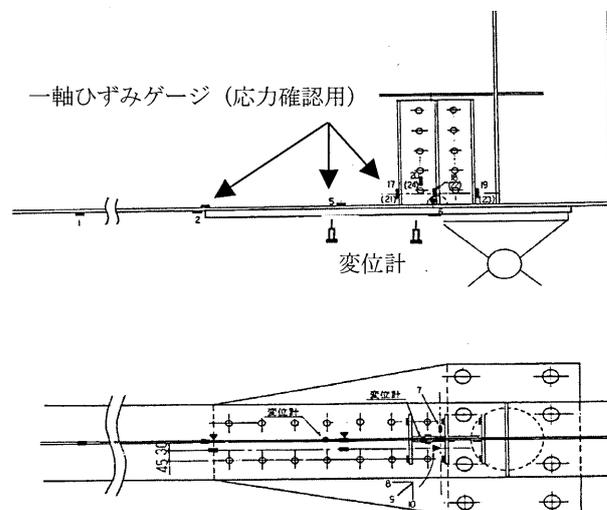


図 5.8 ソールプレート部の補強構造（転載）

- a) 支承近傍の主桁下フランジの回転変位を測定した結果、支承は十分な回転機能を有していた。
- b) ピン部にクサビを挿入して回転変位を拘束した場合、支承前面（支承中心から60cm）位置の回転変位は約3割低減した。
- c) 頻度測定によると、回転拘束を行った場合には主桁の回転が制限されて拘束が大きくなるため、ソールプレート下面および主桁下フランジ上面での発生応力が若干大きくなった。
- d) 新しく交換した大型ガセットプレートをボルト接合することにより、疲労き裂の発生原因を消去でき、また、主桁下フランジに発生する応力状態を著しく改善することができた。

(7) ソールプレート前面すみ肉溶接部の疲労き裂に着目した事例（载荷試験, FEM 解析）<sup>78)</sup>

鋼I桁橋支承部（ソールプレートと下フランジとの前面すみ肉溶接部）に発生した疲労き裂に対して、き裂の詳細調査、実橋载荷試験、静的・動的（疲労）試験、疲労寿命解析などを実施し、損傷原因を明らかにするとともに、損傷部周辺の局部応力を低減できる補強案を提示したものである。その結果、主桁下フランジ下面の補強板は、着目するソールプレートすみ肉溶接部近傍の応力を著しく低下させることが、静的载荷試験で確認された。さらに、疲労試験およびき裂の発生・進展寿命解析結果では、ウェブ補強リブがない場合でも、実橋換算で30年以上のき裂発生寿命と50年以上の板厚貫通寿命が確保できることが推定された。また、疲労試験では、試験体リブのまわし溶接部やウェブのスカーラップなどの応力集中部などから早期にき裂が発生した。これらの考察をもとに、実橋における疲労損傷の補修・補強要領が示されている。図5.9に、疲労損傷事例を、図5.10に、応力分布の一般性状を、図5.11に、補修・補強の詳細を示す。

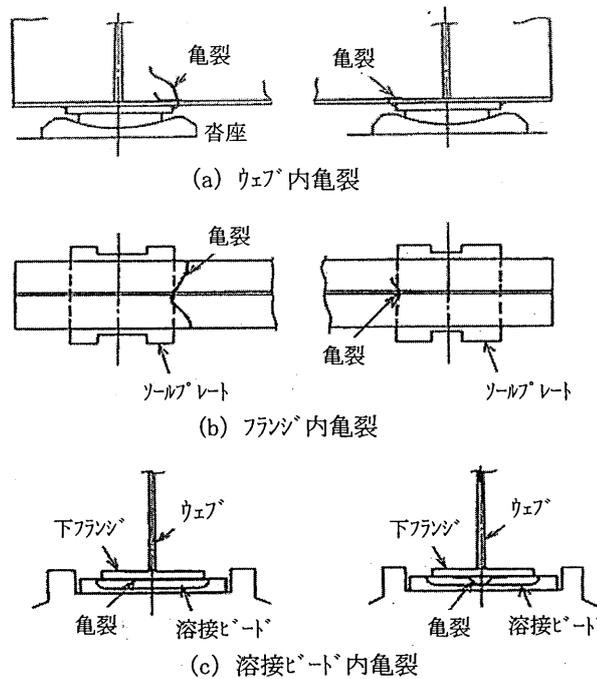


図 5.9 疲労損傷事例（転載）

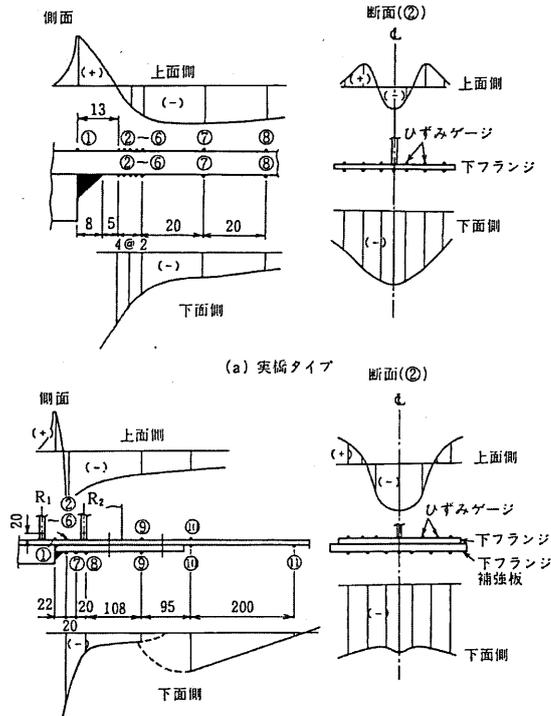


図 5.10 応力分布の一般性状

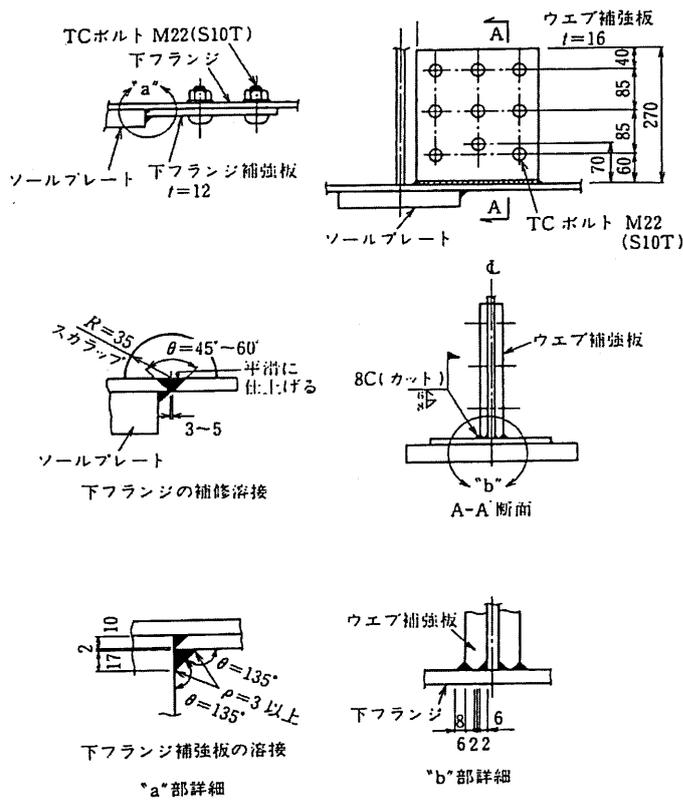


図 5.11 補修・補強の詳細 (転載)

5.2.2 ゴム支承の挙動事例

ここでは、ゴム支承の変形挙動の調査事例について紹介する。

(1) 低温下に着目した事例（免震支承 LRB）<sup>23)</sup>

本事例は、北海道のような低温地域において免震支承の適用を考えた場合、その低温特性を考慮した免震設計の試算を行っている。対象橋梁は、4径間連続I桁橋である。表5.2に、保有水平耐力レベルでの照査を示す。試算の結果をまとめると、次のとおりである。

表5.2 保有水平耐力レベルでの照査（Ⅱ種地盤）（トレースして転載）

	常温時					低温時				
	A1	P1	P2	P3	P4	A1	P1	P2	P3	P4
支承変位の仮定値 $u_B$ (m)	0.169	0.152	0.149	0.145	0.168	0.154	0.133	0.129	0.125	0.153
支承の等価剛性 $K_B$ (t/m)	369	1361	1372	1386	369	473	2032	2050	2070	473
支承の等価減衰定数 $h_B$	0	0.212	0.214	0.217		0	0.17	0.17	0.18	
橋の固有周期 $T$ (sec)	1.18					1.00				
橋の減衰定数 $h$	0.16					0.13				
設計水平震度 (保有水平耐力) $K_{hc}$	0.49					0.62				
支承変位の計算値 $u_B$ (m)	0.170	0.153	0.150	0.146	0.169	0.153	0.132	0.128	0.123	0.152

低温時には、橋の周期が短く、また減衰定数  $h$  が小さくなった結果、設計水平震度は  $K_{hc}=0.49$  から  $0.62$  に変化している。支承の変位は、小さくなる傾向があるものの、下部工への負担は増大することが分かる。

(2) ゴム支承の鉛直剛性と常時振動特性に着目した事例<sup>38)</sup>

本事例は、ゴム支承の鉛直剛性が、常時振動特性に及ぼす影響について着目した事例である。対象橋梁は、鋼単純I桁橋であり、図5.12に、荷重伝達率を、図5.13に、積層ゴム支承の鉛直方向固有振動数を示し、表5.3に、各種積層ゴム支承の諸元を示す。結果をまとめると、次のとおりである。

振動工学の基礎式により、強制的な正弦振動を受ける物体が、それを支える物に伝える荷重伝達率は、外力の振動数  $f$  と固有振動数  $f_0$  との比の関数になる。機械の防振では  $f/f_0$  を  $\sqrt{2}$  以上にするが、橋梁振動は機械振動と異なり広帯域の不規則振動のため、なかなかその領域に持っていきにくい状況である。そのため、図5.12のグラフの左の領域に近づけるのが次善の策となる。

支承の鉛直剛性を上げて行けば、固有振動数  $f_0$  は大きくなり、 $f/f_0$  が小さくなる可能性が高い。逆に、鉛直剛性が低いと、グラフの  $f/f_0$  が1付近の荷重伝達率が大きくなる領域になりやすく、交通振動をよく伝える可能性がある。このことからいえば、鉛直剛性はなるべく大きくし、できれば減衰を大きくすることが望ましい。次に一般に用いられている積層ゴム支承の鉛直剛性がどの程度なのか、鉛直剛性算定式をもとに検討した。使用ゴムは天然ゴム、せん断弾性率  $G=1$  MPa、平面形状  $\square 400$ mm、最大反力  $1250$  kN とし、一次形状係数を  $6\sim 10$  程度の3種類設定した。各モデルの諸元は表5.3に示す。一次形状係数および層数によって違いはあるが、いずれも  $10\sim 20$  Hz という振動数領域にある。これは、交通振動にも多く含まれる振動数領域であり、支承によって増幅される可能

性も高い。積層ゴム支承では、1層当たりの厚さを薄くして一次形状係数を大きくする等の対策が考えられる。すべり摩擦型免震支承のように、許容支圧応力の高い荷重支持機能をもった支承の採用も、選択肢のひとつとして考えられる。

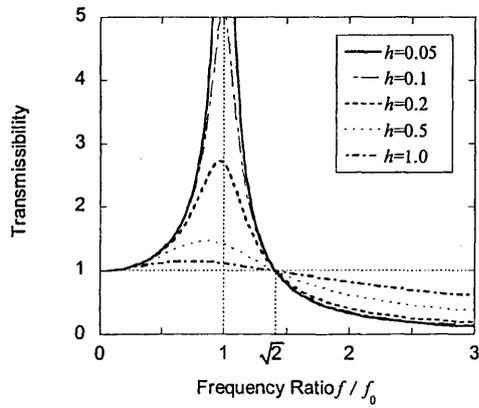


図 5.12 荷重伝達率 (転載)

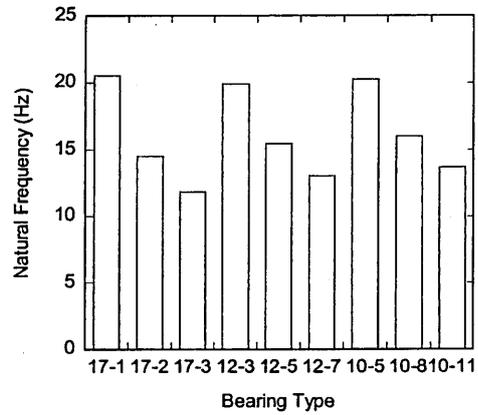


図 5.13 積層ゴム支承の鉛直方向固有振動数 (転載)

表 5.3 各種積層ゴム支承の諸元 (トレースして転載)

モデル名	17-1	17-2	17-3	12-3	12-5	12-7	10-5	10-8	10-11
一次形状係数	5.9			8.3			10.0		
一層厚 (mm)	17			12			10		
層数	1	2	3	3	5	7	5	8	11
鉛直ばね定数 (MN/m)	2128	1064	710	2003	1202	858	2073	1296	942

5.2.3 鋼製支承とゴム支承の挙動比較

ここでは、鋼製支承とゴム支承の挙動比較事例について紹介する。

(1) 鋼製支承とゴム支承の活荷重挙動を室内比較実験した事例<sup>22)</sup>

本事例は、実大モデル桁を用いて活荷重に対する比較実験を行い、各種形式の支承（ピンローラー支承、BP・A 支承、BP・B 支承、ゴム支承）の機能比較を行っている。図 5.14 に支承実験載荷方法を、表 5.4 に実験支承の諸元を、図 5.15 に各支承の概略寸法図を示す。表 5.5 は、最初に可動支承に用いたピンローラー支承を 100%とした場合の比率を示す。実験結果をまとめると、次のとおりである。

可動支承の水平移動は、ピンローラー支承に比べると、水平移動面が固定潤滑剤である BP-A1、BP-A2 は約 60%，ステンレス鋼と PTFE の組合せである BP-A3、BP-A4 は 66～69%と低い、BP・B 支承も約 75%と低いが、BP・A 支承と比べると改善されている。ゴム支承は、ゴムの弾性係数が高いため、低荷重段階で水平移動拘束が生じている。このため、25tonf までの水平移動量は BP・A と差がない。

回転角は、表 5.5 より各 BP・A 可動支承は、ピンローラー支承に比べて、水平移動面が固体潤滑剤の BP-A1、BP-A2 は約 17%，5%，PTFE 板の BP-A3、BP-A4 は約 49%，41%と低い。BP・A 固定支承も同様に低い。各 BP・A 支承の回転面の違いによる有意差はないと考えられる。BP・B 支承は、可動・固定で挙動が異なるものの、可動・固定ともに BP・A 支承に比べて十分に大きい。ゴム支承の場合は、可動の場合 145%と十分に高いが、固定の場合は、69%と低く差が大きい。図 5.15 で示したとおり、可動・固定のゴム厚に差があるためである。したがって、支承は、支承板と下沓とのすべりで回転するより、BP・B 支承やゴム支承のようにゴムで変形する方が優れている。

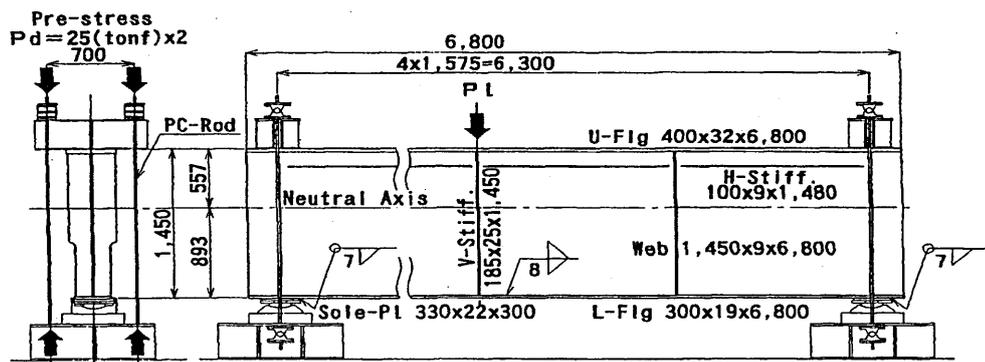


図 5.14 支承実験載荷方法（転載）

表 5.4 実験支承の諸元（トレースして転載）

	BP-A1	BP-A2	BP-A3	BP-A4	BP-B	ゴム支承
設計反力	100tonf	100tonf	100tonf	100tonf	100tonf	100tonf
回転部 曲率半径 r	500mm	210mm	210mm	210mm	—	—
表面 処 理	Hu	固体潤滑剤被覆	固体潤滑剤被覆	SUS 316	SUS 316	SUS316
	Hl	固体潤滑剤埋込	固体潤滑剤埋込	PTFE	PTFE	PTFE
	Ru	固体潤滑剤埋込	固体潤滑剤埋込	固体潤滑剤埋込	PTFE 粉末塗布	ゴム
	Ri	固体潤滑剤被覆	固体潤滑剤被覆	固体潤滑剤被覆	PTFE 粉末塗布	

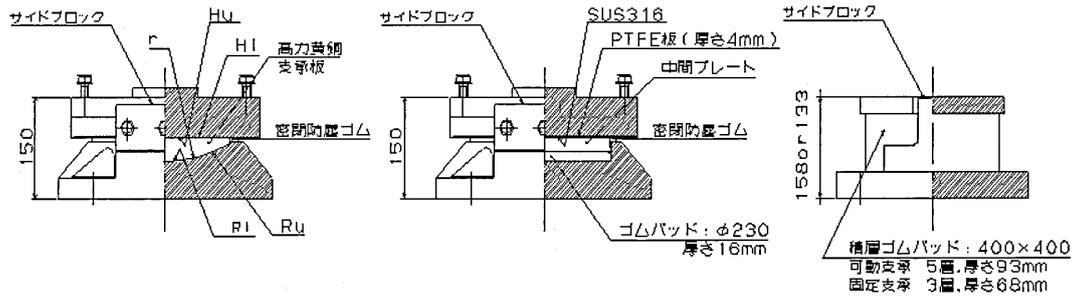


図 5.15 BP・A 支承, BP・B 支承, ゴム支承 (トレースして転載)

表 5.5 各種支承の水平移動量と荷重・回転角の傾き比較 (トレースして転載)

	移動量		可動支承回転角		固定支承回転角	
	(mm)	(%)	(° /tonf)	(%)	(° /tonf)	(%)
ピンローラー	0.217	100.0	0.00157	100	0.00157	100
BP-A1	0.138	63.6	0.00027	17	-	-
BP-A2	0.130	59.9	0.00008	5	0.00057	36
BP-A3	0.143	65.9	0.00077	49	-	-
BP-A4	0.150	69.1	0.00065	41	0.00018	11
BP-B	0.162	74.7	0.00141	90	0.00162	103
ゴム	0.184	84.8	0.00227	145	0.00109	69

(2) 鋼製支承からゴム支承に取替えによる合成桁床版の耐久性に着目した事例<sup>24)</sup>

本事例は、単純桁を連続化して、鋼製支承からゴム支承に支持条件を変更した場合の、コンクリート床版の応力増加を調査し、試験した事例である。鋼製支承（ピンローラー支承）とゴム支承で比較した。結果をまとめると、以下のとおりである。

鋼製支承からゴム支承に取替えた場合、縦方向のひずみの変化は小さく、横方向のひずみの変化は10%以上で、桁の近くで載荷されるときの影響は大きい。コンクリート床版の上面に対する引張りひずみの増加も、ゴム支承の使用により観察される。コンクリート床版中のねじりの成長による水平方向のせん断ひずみの増加は、支持条件が変更される場合大きくなり、鉛直のせん断ひずみは、コンクリート床版の耐用年数に直接影響する。

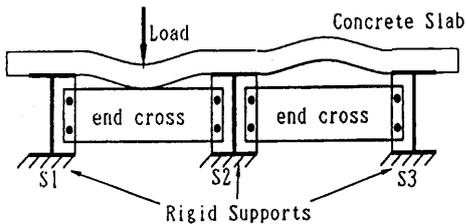


図 5.16 鋼製支承支持下のコンクリート床版の変形 (転載)

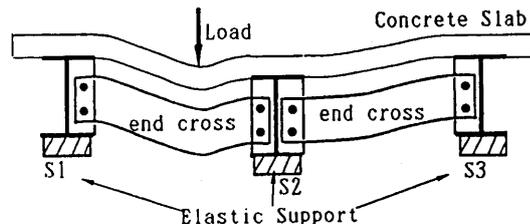


図 5.17 ゴム支承支持下のコンクリート床版の変形 (転載)

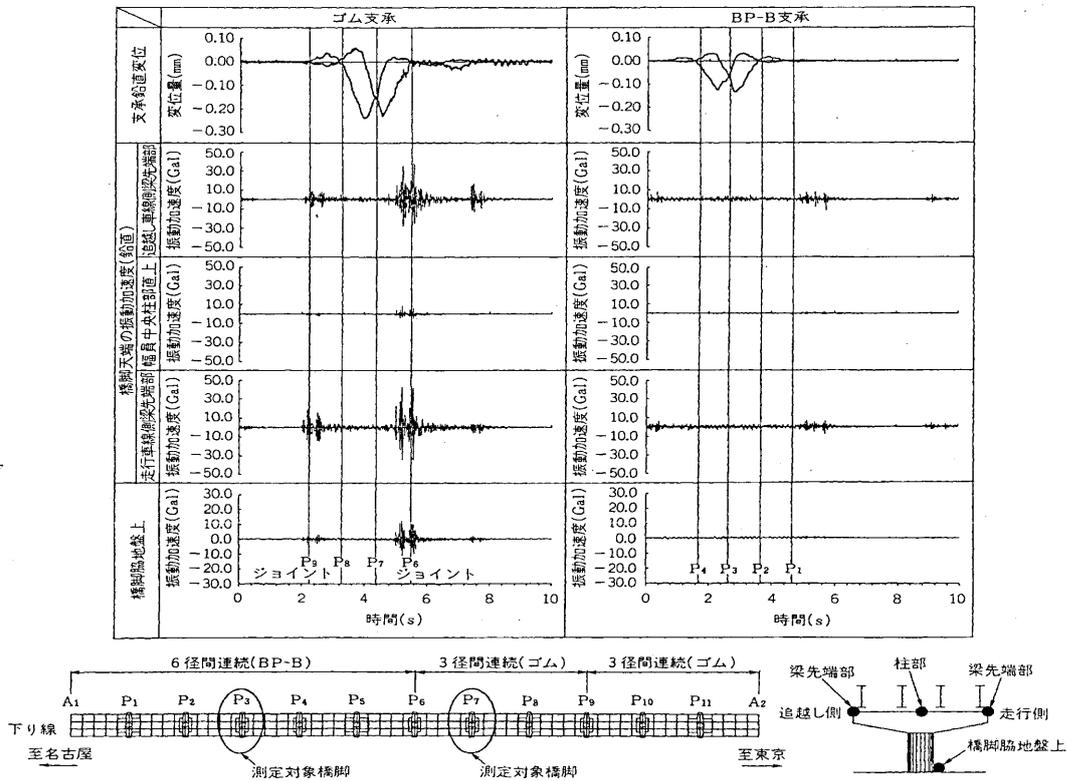
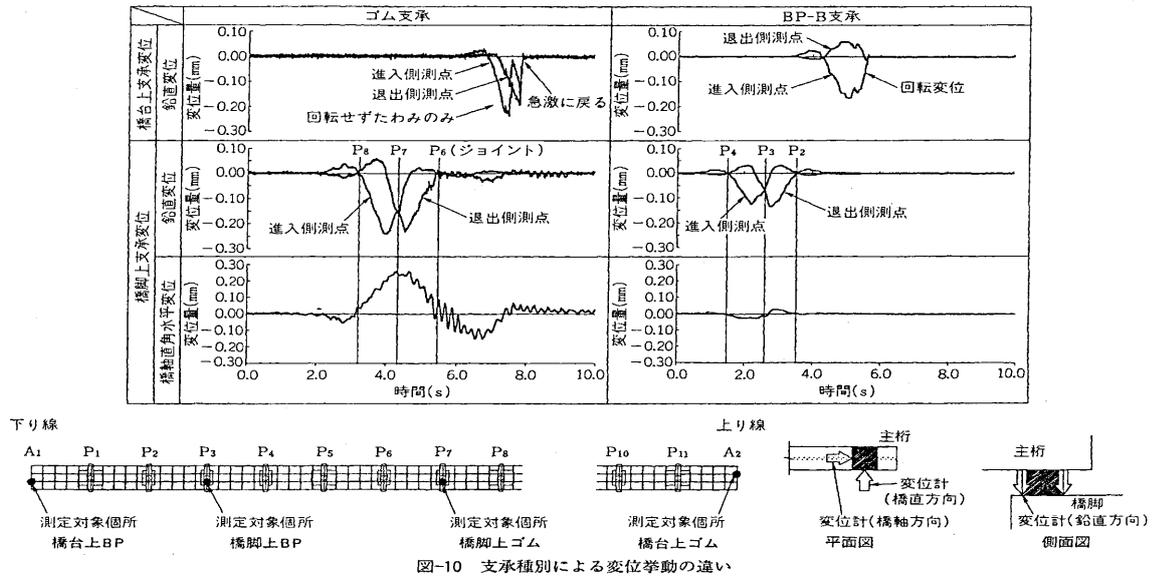
(3) 支承構造の違いによる振動特性に着目した事例<sup>41)</sup>

本事例は、供用後 36 年経過し、重交通により老朽化が進行した鋼桁橋梁であり、軟弱地盤上に構築された橋梁は、沿道住民の方から、通過交通による地盤振動を改善するように強い要望があった。そこで、車両大型化対策、老朽化対策、周辺地盤振動の低減を目的とした、橋梁補強工事による地盤振動の改善効果を検証した事例である。以下に、補強方法の概要を述べる。

- a) 補強工法としてガードレールをコンクリート製防護柵に改良し大型車両の防護柵突破事故を防止する。
  - b) 既設の縦桁を主桁に改造して増加死荷重、B活荷重を分担させる。
  - c) 張出し床版部に主桁を新設し、活荷重と死荷重を分担させ既設桁の応力低減を図る。
  - d) 老朽化した鋼製支承を鋼製支承 (BP・B 支承) およびゴム支承に改良して、支承の性能向上を図る。
  - e) 人家が近接する区間は、地盤振動の増幅が懸念されたため、BP・B 支承に改良し人家が近接していない区間をゴム支承に改良する。
  - f) 上下線の桁連結と床版連結を行い、走行性向上とジョイント走行車両による振動低減を図る。
- 結果をまとめると、以下のとおりである。

補強工事による地盤振動改善効果については、道路境界において最大 3 dB ( $L_{10}$  値) の低減効果が確認できた。また、ピークレベルの発生頻度も大幅な低減を確認した。図 5.18 に、支承種別による振動加速度波形の違いを示す。ゴム支承では BP・B 支承に比べて、偏載荷時に橋軸直角方向の変位が大きくなることが確認されており、今後、このような変位が橋脚のロッキング振動に与える影響について検討する必要があると考えられる。

橋台部における端部支承の変位挙動は、BP・B 支承では、支承のたわみはほとんどなく、桁のたわみに伴う回転変位が主な成分であるが、ゴム支承では、回転変位よりも支承のたわみ変位が大きいことが分かった。この支承たわみ変位は、支承直上に載荷される輪荷重に対応して生じるもので、除荷後は急激に復元する。この時の衝撃で、主桁に振動が生じている可能性がある。これは、橋台部だけではなく、連続桁の端支点でも同様な現象が生じている可能性がある。上記記述については、支承反力や使用するゴムの種類や構造によっても、その傾向は、異なることが考えられるため、普遍的な現象であるとはいえない。



5.2.4 ゴム支承を使用した支承部の応力性状検討事例

ここでは、支承部の応力性状について载荷試験やFEM解析による検討事例を紹介する。

(1) 鋼I桁の支点上補剛材およびソールプレート構造の検討事例<sup>72)</sup>

単純桁モデル試験体をゴム沓で支持し、静的载荷試験を行って、支承付近の鋼桁の応力状態を測定した。その結果、鋼桁端補剛材の脚長やソールプレートの厚さが桁の応力集中に及ぼす影響や、端補剛材と主桁ウェブの応力分担比などを明らかにしたものである。

鋼鉄道橋において、中小支間の鋼プレートガーダー桁等の支承に使用される材料としては、鋼製支承（線支承、ソール・ベッドプレート支承）が主であったが、最近では、ゴムの物理的特性を生かしたゴム支承が使用されるようになってきている。ここでは、静的载荷試験を行い、その中で、ゴム支承を使用した場合に、鋼桁支承付近の応力集中状態に関するソールプレートの厚さ、特に端補剛材形状寸法の影響について、以下のような点が明らかになった。

a) 端補剛材の形状寸法の影響

鋼桁端補剛材の脚長は、下フランジ外縁と間隔が大きい場合は、鋼桁支承部付近各部の応力集中度が非常に大きくなる。

b) ソールプレートの厚さ

ソールプレートの厚さ  $t=28$ ,  $50\text{mm}$  の場合の鋼桁支承部付近の応力集中度合いはほとんど同じで、 $t=28\text{mm}$  の方が若干応力集中度合いは小さくなる傾向が見られた（端補剛材の脚長を、下フランジ外縁近くまで延ばした構造の場合）。

c) 端補剛材と支点腹板部の支点反力分担割合

支点反力分担割合は、端補剛材で約55%、支点部腹板で約45%と推定される。これは、ソールプレート幅縦横比と同じであることが分かった。

表 5.6 クロロプレンゴムの材料（転載）

試験項目	試験値	試験方法
静的せん断弾性率	8.2 kgf/cm <sup>2</sup>	JIS-K-6386-6
硬度	51 度	JIS-K-6301-5
引張伸び（老化前）	620%	JIS-K-6301-3
引張伸び変化率	-11.3%	JIS-K-6301-3

表 5.7 载荷荷重 100 ト時の最大ひずみ（転載）

ひずみ計測箇所		試験種別	ソールプレート $t=28\text{mm}$	ソールプレート $t=50\text{mm}$	ソールプレート $t=28\text{mm}$ (端補剛材使用)	ソールプレート $t=28\text{mm}$ (脚シュー使用)	
下フランジ下面 (橋軸方向)	ソールプレート前面	①	503	460	362	310	
	ソールプレート前面	②	-275	-296	-156*	-338	
下フランジ上面 (橋軸直角方向)	ソールプレート前面	③	-194	-240	-127*	-251	
	シュー前面	④	-515	-658	-82*	-498	
	シュー前面	⑤	-85	-266	-70*	204	
腹板下端	ソールプレート 前面	水平	⑥	267	284	1296*	-201
		45°	⑦	-937	-985	-1248*	-1257
		鉛直	⑧	-126	-234	-396*	-384
	シュー 前面	水平	⑨	179	212	339	456*
		45°	⑩	-938	-940	-3678*	-1442*
		鉛直	⑪	-360	-418	-718*	-1292*
端補剛材下端 外縁端部	⑫	-1347	-1098	-2475*	-1226		
	⑬	-1061	-966	-1370*	-1146		
	⑭	-3095*	-1710	-1778*	-1292		
	⑮	-1513*	-1088	-1150*	-1098		

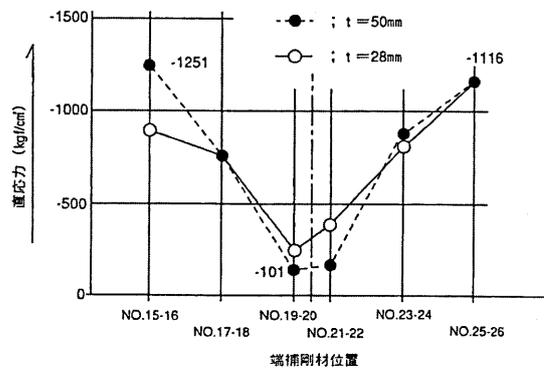
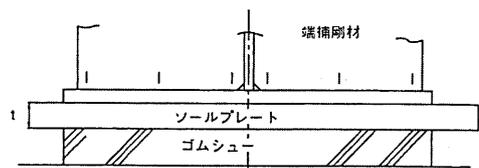


図 5.19 補剛材下端の直応力分布（転載）

(2) 鋼箱桁の支点上補剛材の検討事例<sup>74)</sup>

従来の鋼製支承に代えてゴム支承を用いた場合、鋼箱桁の主桁フランジやソールプレート、上沓には板曲げが生じる。このため、支点上の補剛材の断面や配置を変えた3タイプのモデルについて、3次元FEM解析を行い、応力分布を考慮した補剛構造を提案している。

支承の設計では、上部構造からの反力は、上沓の曲げ剛性で支承本体に伝達されるため、上部構造との接触面は、均等な支圧分布が行われるように、ソールプレートや上沓の厚みに規定を設けている。しかし、支承面積の大きいゴム支承を用いた場合の支点上補剛材を、単に支圧応力、鉛直方向応力それぞれを満足する最小断面として設計した場合、主桁下フランジ、ソールプレート、上沓には、少なからず板曲げ応力が発生すると考えられる。そのため、支点上補剛材の断面、配置を換えた3タイプのモデルを作成し比較・検討を行ったものである。主な結果は、次のとおりである。

- a) 下フランジやソールプレートに生ずる板曲げ応力を低減するためには、箱桁では一般的に行われているように、支点上補剛材を少なくとも2本設け、その位置については支承のセットボルトとの干渉を考慮したうえで、できる限りソールプレート端部まで補剛できるように配慮することが効果的と考えられる。
- b) 支点上補剛材に応力集中が発生しているため、支点上の補剛材をT型断面にするなど、部材の剛性を高めることが望ましい。
- c) 今回検討を行ったすべてのタイプで、板厚方向の変形が生じているが、高い応力が発生しているのは、急激な変形を生じている部分である。このことから、全体の変形形状が緩やかになるような補剛を行い、急激な変形を避けることが板曲げ応力の低減につながると考えられる。

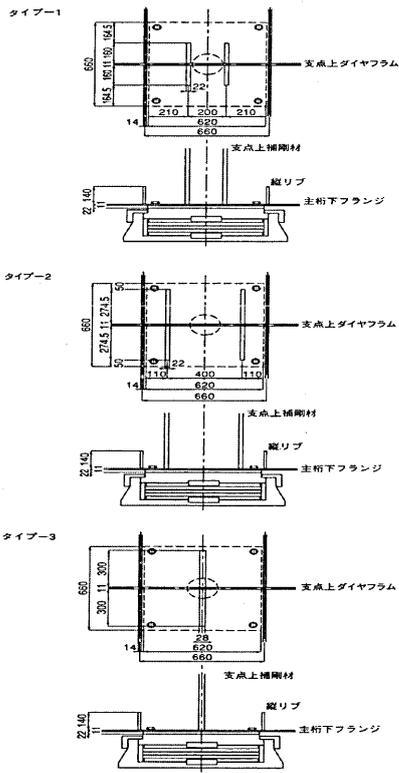


図 5.20 解析検討モデル (転載)

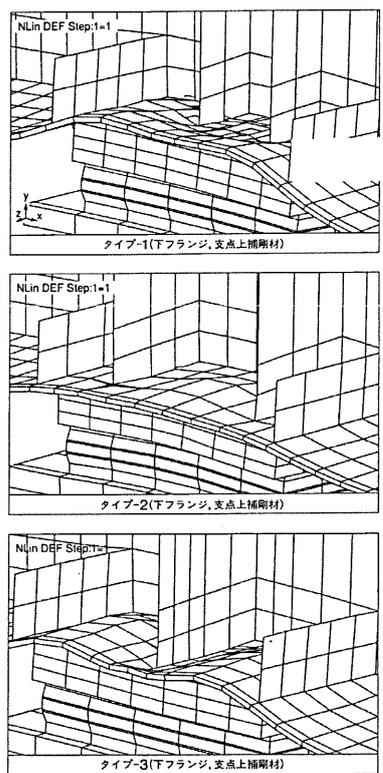


図 5.21 変形状態の解析結果 (転載)

(3) 鋼箱桁の支点上補剛構造の検討事例 (その1) <sup>75)</sup>

鋼箱桁にゴム支承を用いた場合に、下フランジに生じる応力状態を調べるため FEM 解析により検討した。また、支承部の荷重集中点の補強案として、垂直補剛材による補強、横リブによる補強について、その有効性を明らかにしている。

ゴム支承を使用する場合、鋼製支承を使用する場合に比べて、ソールプレートの面積が大きくなるため、荷重集中点の構造は従来とは異なり、留意が必要である。そこで、ゴム支承の採用が箱桁 (1 box・1 脊) 下フランジの支承付近に、どのように影響を及ぼすのか FEM 解析により検討した。また、荷重集中点の補強案として、支点上垂直補剛材による補強と横リブによる補強の効果について、調べた。主な結果は、次のとおりである。

- a) ゴム支承を使用することにより、ソールプレートの面積が大きくなるため、下フランジのソールプレートまわりの応力が大きくなる恐れがあるため、下フランジに着目したモデルを作成し解析を行った。縦リブがソールプレート上にあるモデル (モデル1) と縦リブがソールプレート上にないモデル (モデル2) の2つのモデルについて解析を行った。その結果、モデル1の場合は、応力がダイヤフラム、支点上垂直補剛材および縦リブに集中するため、下フランジには大きな応力は発生しなかった。しかし、モデル2の場合は、縦リブがソールプレートよりも外側にあるため、下フランジの X 方向の応力度は許容応力度を超えて、構造変更が必要であることが分かった。
- b) 荷重集中点構造の補強案として、支点上垂直補剛材による補強法、横リブによる補強法の二つについて解析を行った結果、これらの二つの補強案についてはその有効性が確認できた。
- c) 今後の検討課題としては、荷重条件の設定方法に応じたゴム支承のモデル化および反力の分布形状などを検討すること、反力を伝える縦リブを含めた荷重集中点構造の3次元モデルによる反力の伝達経路の解析、ならびにこれらを踏まえた上での実務的な補強構造の設計方法などの検討が必要である。

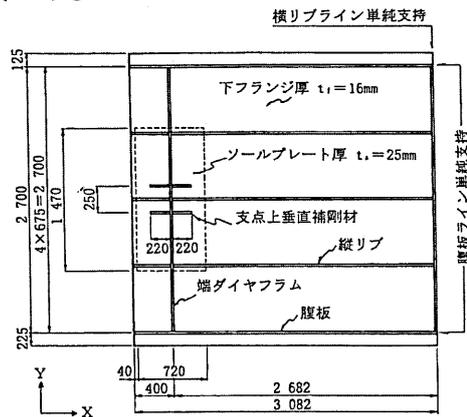


図 5.22 解析モデル (その1) (転載)

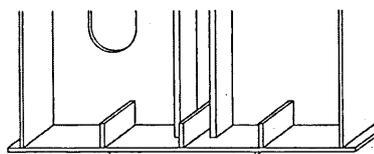


図 5.23 解析モデル (その2) (転載)

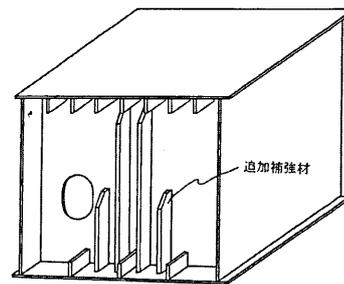


図 5.24 垂直補剛材による補強 (転載)

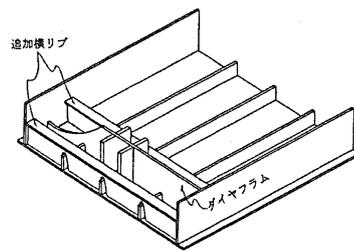


図 5.25 横リブによる補強 (転載)

(4) 鋼箱桁の支点上補剛構造の検討事例 (その2) <sup>76)</sup>

道示の耐震設計 (H 8. 12) に準拠して、免震支承 (ゴム支承) を鋼箱桁に採用する場合、下フランジに発生する応力状態が均一とならないため、従来の鋼製支承のような設計を行うことができない。このため、実橋をモデルとして平面格子解析による補強設計および FEM 解析による検証を行い、ゴム支承の支圧応力度、セットボルト設計力、支点上の各部材の発生応力に関する考察を加えた。

その結果、支点上の補剛材幅に対してゴム支承幅が大きい場合には、箱桁下フランジに発生する応力は応力集中が生じて不均一となるため、補強を行う必要性のあることが示された。

平面格子解析による簡易設計法の妥当性およびゴム支承に対して、従来の支点構造を用いた場合の問題点とそれに対する補強効果について、以下の項目が考察された。

- 平面格子解析による簡易設計の解析値は、FEM 解析結果と比較してほぼ等しいか、若干大きめの値となるが、ほぼその傾向は同様であり、各補強部材の断面の決定に有効であると考えられる。
- 補強のない通常の支点構造では、支圧応力は剛度の高いダイヤフラム直下に集中し、その分布は非常に不均等なものとなる。これに対し、支点部に補強を行うことにより、ゴム支承の支圧応力分布は均等化され、支承設計時の応力分布の仮定どおりに桁の回転変形に対して線形的に変化する。
- ゴム支承を用いた場合には、従来の鋼製支承に比べ平面寸法が大きくなる。これより、従来の補強を行わない構造では、通常の荷重集中点として支点上補剛材のみで反力を分担するのではなく、支承からの反力は、縦リブ等に分担されるため、縦リブに許容応力度を大きく超える応力が発生する。これに対し、補強を行うことにより、補強部材に反力を分担させることが可能となり、各部材の応力度を許容値内の値とすることができる。
- 従来の補強構造では、図 5. 27 に示すように、支点上補剛材幅に対してゴム支承幅が大きい。したがって、支圧応力による曲げが支点上補剛材と下フランジの交点に発生すると同時にその部分に応力集中が発生する。そのため、この部分に降状応力を大きく超える高い応力が発生する。これに対し補強を行うことによりこれを改善することができる。また、今回の設計においては、ソールプレート縁端にテーパを設け一層の応力集中の緩和を図った。
- セットボルトは、本解析においては、直接モデル化を行っていないため、支圧応力分布より算定を行っている。今回の設計対象となった鋼上部工は、RC 床版のため、死荷重反力の全反力に占める割合が大きいので、常時荷重では大きな設計力を生じなかったが、全反力における死荷重反力が小さく、活荷重回転角が大きい鋼床版桁の場合には、十分な注意が必要である。

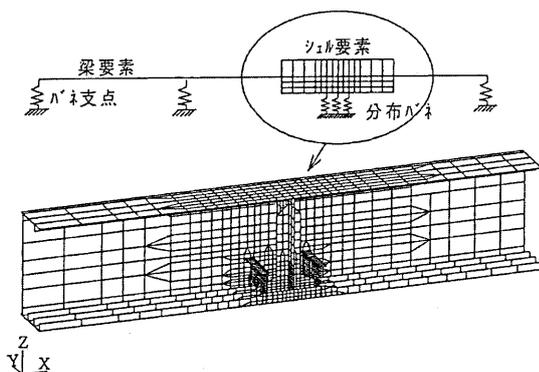


図 5. 26 FEM 解析モデル (転載)

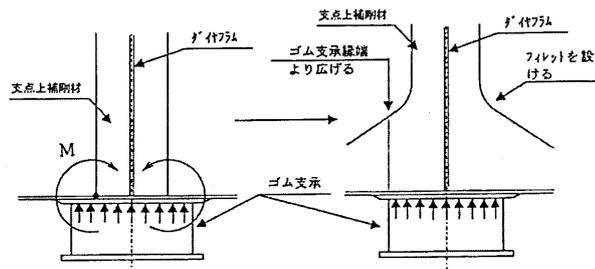


図 5. 27 支点上補剛材に発生する曲げ応力 (転載)

(5) 鋼箱桁の支承部構造の検討事例<sup>7)</sup>

実橋の鋼箱桁支点部をモデルとして、平面格子解析による補強設計および FEM 解析による検証を行い、ゴム支承の支圧応力度、セットボルト設計力、支点上の各部材の発生応力に関する考察を加えたものである。

その結果、支点上の補剛材幅に対してゴム支承幅が大きい場合には、箱桁下フランジに発生する応力は、応力集中が生じて不均一となるため、補強を行う必要性のあることが示された。これらの問題点や支点部補強構造の妥当性を解明するために、有限要素法（3次元弾性解析）を用いて検証を行った。解析から得られた結果は次のとおりである。

- a) 支承周りに補強材を配置しない通常の支点構造では、剛性の高い支点上ダイヤフラム直下に支圧応力が集中し、その分布形状は、不均等なものになると予想される。今回、支点上補剛材をソールプレート縁端まで広げ、補強材を支承周りに配置することにより、ゴム支承の支圧応力分布は、均等化されたと推察される。しかし、桁の回転変位に対しては橋軸方向の補強縦リブの剛性が大きいほど直線的に変化する傾向にあるため、補強リブ断面の採用に際しては適切な剛性を使用する必要がある。
- b) ゴム支承を用いた場合には、従来の鋼製支承に比べ平面寸法は大きくなる。そのため、荷重集中点として支点上補剛材およびダイヤフラムだけで反力を分担するのではなく、補強リブを支承部に配置することにより、反力の分散効果を考える必要がある。もし仮に、支承周りに補強材を配置しなければ、支承からの反力は縦リブに多く伝達され、縦リブ部材を多く配置して、反力の分散を図らなければならない。
- c) 主桁下フランジのソールプレート縁端部に応力が集中する傾向が見られたため、ソールプレートにテーパを設け応力集中を緩和する対策を行った。これ以外にも、箱内に橋軸方向の補強リブを支承周りより長く配置し、応力の分散を図れば、より効果があると推察される。
- d) セットボルトは、従来4本程度を配置すれば十分であったが、新道示（H16.4）では地震時保有水平耐力法レベルで、上下方向の地震力に耐えうる本数が必要となった。今回セットボルトは、12本～16本配置しており、別途、新道示（H16.4）に沿った照査を行ったが、この配置本数で、十分満足していた。したがって、できる限りセットボルトを多く用い、桁の回転に伴う引張力に対して抵抗できるように配慮しなければならない。

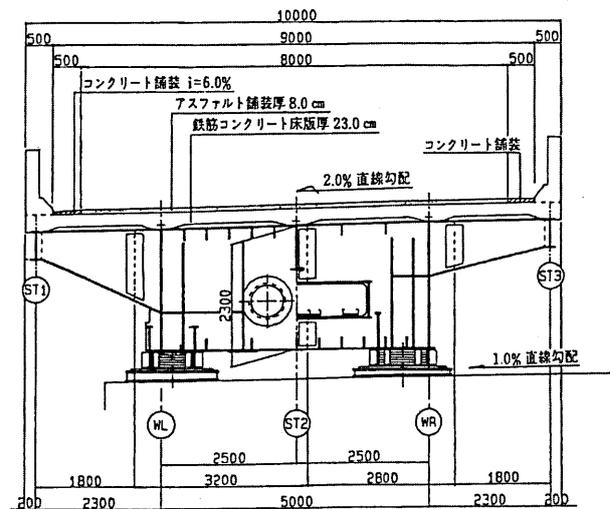
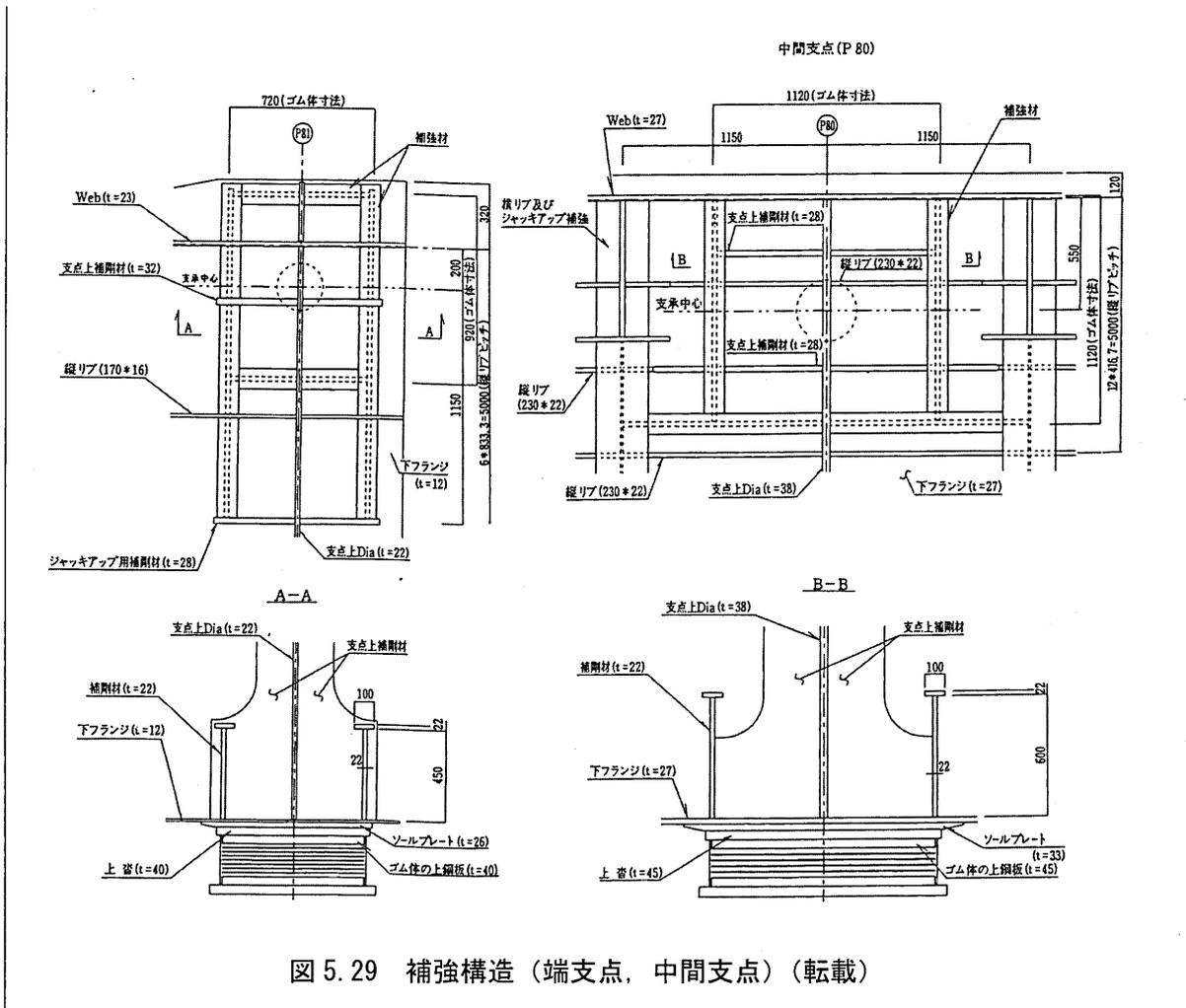


図 5.28 対象橋梁の構造（転載）



### 5.3 支承部の挙動の問題点

ここでは、第5章で収集した文献等を参考に、支承部の挙動に関連する問題点をまとめる。

#### 5.3.1 支承の取替えによる挙動の変化と問題点

事例紹介の中で、支承取替えや挙動確認実験に伴って調査された支承の挙動について、特徴的な挙動を以下に示す。

- (1) BP・A 支承を BP・B 支承に取替えたケースでは、支承の水平変位や回転変位が改善されると報告されている。
- (2) BP・A 支承（曲率半径 500mm，表面处理；固体潤滑剤被覆・固体潤滑剤埋込）を BP・A 支承（曲率半径 210mm，表面处理；SUS316・PTFE）に取替えたケースでは、支承の水平変位の改善は見られるが、回転変位の改善はあまり見られない。また、解析値ほどの変位は得られず特に回転変位の相違が大きいようである。また、取替え1年後の変化では、水平変位は、なじみが生じたように変位の増加が見られているが、回転変位は、明確な変化は見られないようである。
- (3) 腐食して固定化した線支承を、一本ローラー支承に取替えたケースでは、支承の摩擦係数の低減により、橋脚からの地盤振動が大幅に改善された効果が確認されている。ただし、一本ローラー支承は、移動と桁の回転をローラーで受け持っているため、ラックやピニオン等のずれ止めの損傷により、ローラーが逸脱する例も多いため、採用にあたっては留意する必要がある。
- (4) 設計活荷重相当のトレーラーによる載荷実験では、可動支承の機能が低下していると、主桁のたわみに伴って生じる（中立軸を中心とした回転に伴って生じる）橋軸方向変位により、橋脚にも水平変位が生じる。この橋脚の水平変位量は、可動支承の機能が低下すると、支承の変位量より大きな変位量が生じる場合もあると報告されている。
- (5) ゴム支承は、温度依存性を有していることから、低温下における保有水平耐力レベルでの照査をⅡ種地盤について行った結果、橋の固有周期が短くなり、また、減衰定数も小さくなるため設計水平震度は 0.49 から 0.62 に増加した試算結果がある。
- (6) 積層ゴム支承の固有振動数を試算すると、おおむね 10~20Hz となる。この振動数帯は、交通振動に多く含まれる振動数域であることから、積層ゴム支承に取替えた場合に、共振現象が生じ、振動が増幅される可能性がある。
- (7) 室内実験による比較で、ピンローラー支承を BP・A 支承に取替えた場合、活荷重作用時の水平移動量は 70%以下、BP・B 支承では 75%程度に若干機能が低下する。ゴム支承では、85%程度になるという結果が得られている。さらに、活荷重作用時の回転角は、BP・A 支承に取替えた場合は 50%以下に低下して機能の改善は図れないが、BP・B 支承では、90%程度、ゴム支承では、可動側は 145%と十分に高いが、固定側の場合 69%とゴム厚の差で回転性能が違うことも示されている。
- (8) 桁連続化において、鋼製支承を弾性支持のゴム支承に取替えた場合、コンクリート床版に生じる橋軸方向ひずみの変化は小さいが、直角方向ひずみは 10%ほど増加する。また、床版上面の引張りひずみも増加し、ねじりによる床版のせん断ひずみも増加する傾向がある。
- (9) 鋼製支承を BP・B 支承あるいはゴム支承に取替える場合、BP・B 支承に比べてゴム支承の方が鉛直変位や偏載時の直角方向変位が大きいと、主桁や橋脚に振動が生じる可能性がある。

以上、事例紹介したものの中から特徴的な挙動の変化に関する記述を集約して示した。これらの調査結果や報告は、それぞれの条件下で行われたものであるため、普遍的な特徴としてまとめ

ることはできないが、それぞれの傾向を整理すると①活荷重による支承の挙動（水平変位、回転変位など）と、②支承の挙動と橋梁の挙動の關係に集約される。

活荷重による支承の挙動は、水平変位、回転変位および鉛直変位からなる。機能が低下した鋼製支承は、活荷重による変位は生じなくなり、新しい支承に取替えることや清掃、グリースアップすることで機能改善を図ることができる。ただし、活荷重による変位は、1mmにも満たない微小な変形であり、特に、回転変位は上部構造の剛性とも関連しており、設計値どおりの計測値を得るのが難しいようである。一方、機能改善については、BP・B支承やゴム支承の改善効果は高く、ピンローラー支承等の摩擦の小さい支承と同程度の挙動を示すようである。ただし、ゴム支承の場合は、鉛直変位も生じるようになるため、その変位による影響を把握することが必要である。

支承の挙動と橋梁の挙動の關係については、ひとつは主桁や橋脚の振動に及ぼす影響が考えられる。支承が機能低下すると橋脚が変形し、振動する場合があります。また、ゴム支承に取替えても、橋脚や主桁が振動する可能性があることが報告されている。振動問題は上下部構造、地盤条件などが複雑に関連しており、支承構造との因果關係については、今後のさらなる調査研究が必要である。もうひとつは、ソールプレート溶接部の疲労損傷や床版に及ぼす影響が考えられる。ソールプレート溶接部に関しては、数多くの検討が行われており、支承の機能改善と同時に、溶接継手の改良や支点部の構造改良が提案されている。床版については、ゴム支承が弾性支持であるために不等沈下の影響が懸念されている。床版への影響も先の振動問題と合わせて、さらなる調査研究が必要である。

### 5.3.2 その他支承部の問題点

挙動事例の中で、設計の段階において、支承部の様々な挙動に対する配慮が不十分なために、問題となる点を以下に示す。

- (1) 支承取替え時の設計においては、鋼製支承を同じ鋼製支承に交換する場合は、特に問題はないが、ゴム支承に取替えた際には、主桁と支承間の荷重伝達状態が異なることになる。FEM等による応力解析の結果、支点上ではダイヤフラムや垂直補剛材に応力が集中しているため、補強リブの増設が不可欠とされている。このため、支承部においては、主桁の補強をいかに行つて応力集中を防止するかという課題に直面することが多い。この点については、既に代表的な支点構造や補強ディテールについての構造解析および載荷試験等による検証も進んできており、それらの文献や事例が参考になるが、特殊な構造や事例については、それぞれについて、別途検討が必要となる。
- (2) 上部構造のソールプレート縁端部には応力集中する傾向が見られ、劣化した鋼製支承の支承部では、疲労損傷を生じた事例もある。ソールプレート縁端部の応力集中や疲労損傷を防止するためには、ソールプレートを大型にしてボルト接合にしたり、溶接接合の場合もソールプレート縁端部をテーパ加工したりする等の対策が必要である。
- (3) 補修施工後において、同一支承線上であっても、一部が鋼製支承、ほかの一部がゴム支承となっているケースも見受けられる。それぞれの支承は、回転中心が異なる等、挙動差がある場合があり、上部構造へ予想できない影響を及ぼすことも考えられる。そのため、支承取替えの際は、損傷した箇所だけでなく、同一支承線上の全体で取替えを行う必要がある。
- (4) 劣化した支承を取替える際には、劣化対策だけでなく、耐震性の向上など、当該橋梁に期待する性能等を勘案して、どのような材料、種別、規模のものとするか詳細な検討が必要である。これらは、劣化の状態や、適用できる補修方法の制約、橋の立地条件や供用環境を踏まえて選

定しなければならないが、特に、鋼製支承をゴム支承に取替える場合には、挙動が大きく異なってくることや、支承の高さが低くなって、沓座や道路の縦断勾配、伸縮装置の挙動に影響を及ぼすことなどに注意が必要である。

- (5) 劣化して機能低下した鋼製支承は、完全固定支承に近く、支承部近傍に応力集中を生じさせたり、下部構造に変形を生じさせたりする反面、主桁のたわみを低減し、横桁の荷重分配作用を高めたり、主桁の振動抑制に寄与していることも考えられる。ゴム支承の場合、鉛直剛性が低いいため、挙動の差が顕著になることに留意する必要がある。

### 5.3.3 まとめ

支承は、上部構造からの死活荷重を下部構造に伝えるだけでなく、年間の温度変化に伴う伸縮にも追従し、安全な交通の確保に重要な役割を果たしている。しかしながら、ここで述べたように、建設時や供用下での補修・補強工事に伴って様々な問題を生じる可能性があることも明らかとなった。支承の挙動に異常が見つかったり各種の変状が生じていたりする場合は、本来保持すべき性能を満足できなくなっている可能性が大きいいため、確実な点検・調査で原因を究明し、異常や変状を取り除く対策を早め実施することが重要である。

特に、最近では耐震性向上を目的として、多くのゴム支承が使われるようになってきている一方で、鉛直たわみを生じやすい一次形状係数の小さなゴム支承を使用した場合には、振動や騒音の発生、伸縮装置の段差の発生が懸念されている。今後、これらの調査結果を支承の使い分けに利用することを考えた場合、一次形状係数が小さくなる場合には、形状の見直しや鋼製支承の選定も合わせて検討するのがよいと考えられる。特に騒音が問題になりそうな都市部の橋梁において、路面段差を生じる可能性がある端支点部では注意が必要である。

ここでとりまとめた事例は、将来の支承の計画・設計・施工・維持管理等の各段階にフィードバックさせて役立たせるとともに、今後開発、利用されると思われる新しい材料、形式の支承も含め、さらに多くのデータを収集し、情報交換していくことが望ましいと考える。

### 参考文献（第5章）

- 山本泰幹，森清，稲田育朗：密閉ゴム支承の活荷重挙動に関する実橋調査，土木学会第50回年次学術講演会概要集，1995.9（収集文献No.27）
- 徳田浩一，岩崎雅紀：支承の活荷重挙動に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.41A，1995（収集文献No.22）
- 中山博，藤本吉一，橋本和夫，小嶋喜八郎：ローラー支承による橋梁振動絶縁，土木学会第45回年次学術講演会概要集，1990.9（収集文献No.29）
- 日本道路公団東京第一管理局，社団法人日本建設機械化協会建設機械化研究所：平成9年度 東京第一管理局管内 鋼橋の補修・補強に関する検討報告書，1997（収集文献No.89）
- 日本道路公団東京第一管理局，社団法人日本建設機械化協会建設機械化研究所：平成10年度 東京第一管理局管内 鋼橋の補修・補強に関する検討報告書，1998（収集文献No.90）
- 渡辺真至，谷倉泉，西浩嗣，海野清司：鋼桁支承ソールプレート溶接部の疲労損傷と補強効果，土木学会第51回年次学術講演会概要集，1996.9（収集文献No.91）
- 鹿野顕一，小林潔，須藤典助，松本巧：曾我明：鋼I桁橋支承部の疲労亀裂損傷解析，三井造船技報，第145号，1992.2（収集文献No.78）

- 西村敦史, 西弘明, 佐藤昌志, 小野裕二: 低温下における免震支承の適用性に関する考察, 土木学会第 49 回年次学術講演会概要集, 1994. 9 (収集文献 No. 23)
- 伊津野和行, 宇野巧, 田中浩: 免震ゴム支承の鉛直剛性と常時振動特性との関係に関する一考察, 土木学会第 58 回年次学術講演会概要集, 2003. 9 (収集文献 No. 38)
- 朴滄珍, 松井繁之, 東山浩士, 江頭慶三: 弾性支承使用による合成桁床版の耐久性への影響に関する研究, 鋼構造論文集, 第 5 巻, 18 号, 1998 (収集文献 No. 24)
- 石田博, 岡本晃, 久保真一, 浜博和: 支承構造の違いによる橋の振動特性に関する調査, 橋梁と基礎, Vol. 39, No. 1, 2005. 1 (収集文献 No. 41)
- 鳥越弘行: ゴム支承を使用した鋼桁の支承付近における応力分布性状について, 宮地技報, No. 12, 1997. 1 (収集文献 No. 72)
- 西村 晃, 藤田政樹: ゴム支承使用時の支点付近の補剛方法について, 技報まつお, No. 33, 1997. 4 (収集文献 No. 74)
- 上田隆博, 玉田和也: ゴム支承を採用した箱桁下フランジの FEM 解析, 駒井技報, Vol. 16, 1997. 4 (収集文献 No. 75)
- 永谷秀樹, 井上雅夫: ゴム支承を用いた鋼箱桁支点部の補強設計, 宮地技報, No. 14, 1998 (収集文献 No. 76)
- 西澤正博, 種岡慎二: ゴム支承を用いた支点部の補強設計, 技報たきがみ, Vol. 16, 1998 (収集文献 No. 77)