

5号湾岸線の支承被災原因

神戸第一建設部 有野工事事務所 中村 求
神戸第二建設部 設計課 加賀山 泰一
大阪管理部 保全第一課 江川 典聰

要 約

5号湾岸線のうち、鳴尾浜から六甲アイランドまでの7つの埋立地を通る10.5km区間は、兵庫県南部地震において、地盤の液状化や過大な地震動により多大な被害を受けた。中でも、上部構造と下部構造の接点に位置する支承は、地震動や下部構造の水平移動により、支承構成部品が破壊したにとどまらず、支承本体が破壊し、上部構造が橋脚上に落下するなどの多大な被害を受け、復旧までに多くの時間を要した。本稿は、このような被害を受けた5号湾岸線の支承の被災状況と、被災原因究明のために実施した解析、実験結果について報告するものである。

キーワード：兵庫県南部地震、支承、有限要素解析、2軸載荷実験

まえがき

総延長20.1kmの5号湾岸線のうち、兵庫県南部地震により多大な被害を受けた区間は、鳴尾浜から六甲アイランドまでの10.5km区間であった(図-1参照)。この区間の5号湾岸線は、東から鳴尾浜、甲子園浜、西宮浜、芦屋浜、深江浜、魚崎浜そして六甲アイランドという7つの埋立地を結んでいる。これらの埋立地では、兵庫県南部地震により地盤の液状化が発生するとともに、水路の近傍で護岸の崩壊に伴い、地盤が水路側へ移動した。この液状化に伴う地盤流動により、橋脚に大きな残留水平変位が生じた。また、上部構造と下部構造を繋ぐ支承部周りは、この地盤流動だけでなく、過大な地震動の影響により、支承構成部品が破壊したにとどまらず、支承本体が破壊し、上部構造が橋脚上に落下するなどの多大な被害を受け、復旧に長時間を要することとなった。

本稿では、このような被災を受けた5号湾岸線の支承部の被災状況について概説するとともに、

被災原因を究明するために実施した、支承材料の強度試験、支承の有限要素解析および模型支承を用いた2軸載荷試験結果について述べる。

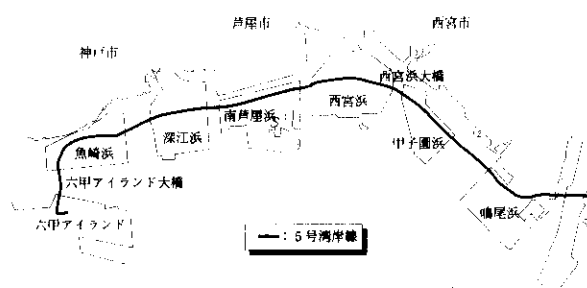


図-1 5号湾岸線位置図

1. 支承部の被災状況

被災分析の対象とした橋脚管理番号P51～P220の本線部区間の支承の管理数量と損傷ランクの関係を表-1に示す。損傷ランクは、道路機能から

見たランク分けであり、Sランクは落橋部の支承、Aランクは上部構造が下部構造上に落下して大破した支承を表す。Bランク以下は構成部品の一部に損傷を受けた支承である。3号神戸線と同様、高力黄銅支承板支承（以下、BP-A支承という）の管理数量が多い。しかし、損傷程度で見れば、ピボットローラー支承（以下、PVR支承という）が高い。これは、図-2に示す路線内における支承位置と使用支承種別、損傷ランク、支間長および橋軸方向移動量と可動支承の移動量の比率の関係からもわかるように、移動可能量を大きく採ることができるPVR支承が主に水路上を跨ぐ長大橋梁に多用されていた結果、地盤の側方流動の影響を最も大きく受けたためであると考えられる。したがって、支承の被災状況を分析する場合、支承種別ごとに分析する必要があると考えられた。以下に、損傷率の高いPVR支承（PV支承を含む）と管理数量の多いBP-A支承の被災状況をまとめる。

(1) PVR支承, PV支承

1) PVR支承, PV支承ともに、セットボルトが引張られて塑性変形あるいは破断した事例が最も多い。しかし、アンカーボルトが損傷した事例はない。他の構成部材に比べて、相対的にセットボルトの強度が低かったといえ、支承の構造偏心（上部構造の慣性力作用位置とその反力作用位置

の偏心）の量が多いためと推定される。

2) 次いで、PVR支承において、サイドブロックが破壊し、ローラーが脱落した事例が多い。この結果、上部構造端部の下フランジ、垂直補剛材やソールプレートが著しく変形した箇所も見られた。

3) PV支承では、上沓が破壊した3例の他、ピボットリングやピボットフランジが変形した事例も見られた。

(2) BP-A支承

1) BP-A支承もセットボルトの損傷が最も多い。PV支承ほどではないが、BP-A支承も支承の構造上の偏心があるので、その影響が考えられる。

2) 次いで、上沓ストッパーの損傷が多い。一方、サイドブロックの損傷がほとんどないことから、橋軸方向地震動に対して上沓ストッパーの強度が相対的に弱かったものと考えられる。

2. 支承材料強度分析

2-1 供試材料

支承の被災分析結果から、セットボルトと支承本体に損傷が多いことが明らかとなった。そこで、被災支承本体のほか、新たに実支承に使用されることの多い材質（SS400およびSNCM447）のセッ

表-1 支承の管理数量と損傷ランク

		支承タイプ**												小計
		BP-A		PV		PVR		Pin		PinR		RB		
		基数	%	基数	%	基数	%	基数	%	基数	%	基数	%	
* 損傷 ランク	S	0	0.0	0	0.0	8	7.8	0	0	0	0	0	0.0	8
	A	24	2.2	10	7.6	26	25.5	0	0	0	0	1	2.4	61
	B	83	7.5	15	11.4	10	9.8	0	0	0	0	14	33.3	122
	C	193	17.4	58	43.9	34	33.3	2	100	0	0	23	54.8	310
	D	810	73.0	49	37.1	24	23.5	0	0	0	0	4	9.5	887
小計		1110	100	132	100	102	100	2	100	0	0	42	100	1388

*: 損傷ランク

S: 落下

A: 大破

B: 中破

C: 小破

D: 無破

** : 支承タイプ

BP-A: 高力黄銅支承板支承

PV: ピボット支承

PVR: ピボットローラー支承

Pin: ピン支承

PinR: ピンローラー支承

RB: ゴム支承

不明 28

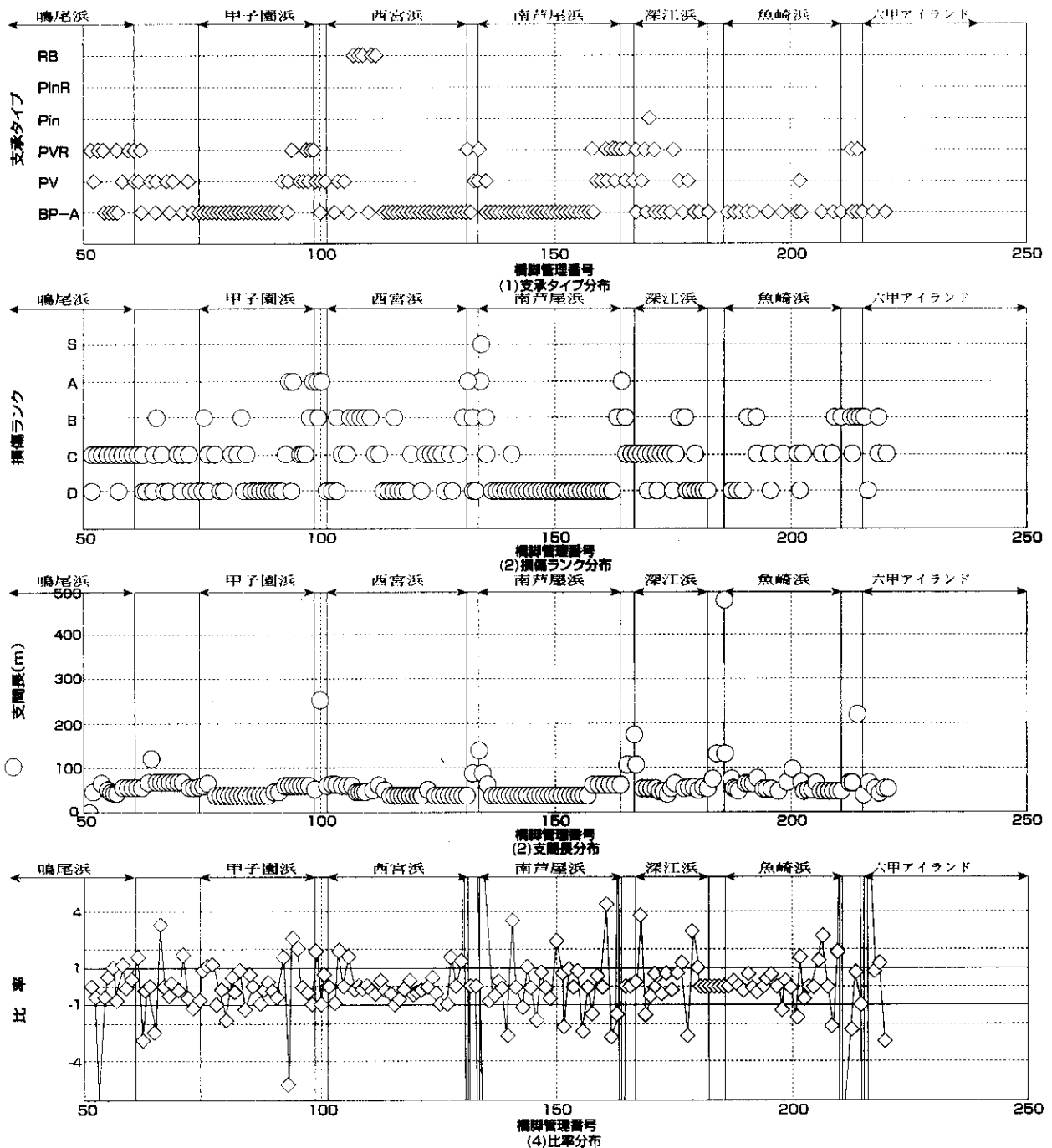


図-2 支保の被災分布

トボルトセット (M22) および鋳鋼材 (図-3 参照) を製造し、それらの材料強度分析を実施した。サンプリングした被災支保は写真-1 に示す、芦屋川橋ゲルバー部のPV支保 (全反力約900tf) と深江浜工区のBP-A支保 (全反力約350tf) である。

2-2 セットボルトセットの試験結果

セットボルトセットについては、静的引張試験

と静的せん断試験を実施した。試験結果を表-2 に示す。引張強度、せん断強度ともにJIS規格強度¹⁾ (引張強度はJIS規格値より算出、せん断強度は引張強度の $1/\sqrt{3}$) を満足している。また、SS400の破断伸びはJIS規格値を概ね満足しているのに対して、SNCM447はJIS規格値を一部下回りナット端部から絞りを伴わず破断したものがあつた。実橋

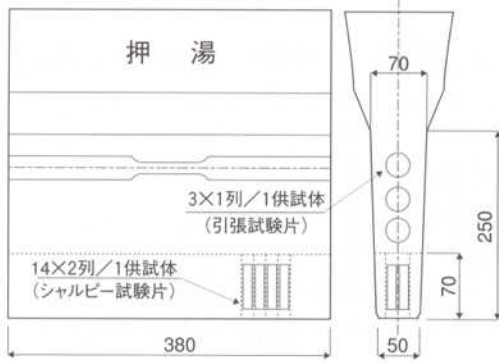


図-3 新規製造鋳鋼材形状



(1) PV支承



(2) BP-A支承

写真-1 サンプリング支承の外観

において、ナットが抜け出したように見られた箇所があったのは、このような理由によるものと考えられる。

2-3 支承本体材料の強度分析結果

被災した支承については、支承各部から試験片を採取し、静的引張試験(JIS4号試験片)とシャルピー衝撃試験(0℃および-20℃)を実施した。また、新規製造鋳鋼材については、静的引張試験(JIS4号試験片)とシャルピー衝撃試験(20、

表-2 セットボルトセットの製品試験結果

		引張強度 (KN)	伸び (%)	せん断強度 (KN)
SS400	JIS規格値	≥117.0	≥22.0	≥175.6
	T 1	149.5	21.3	248.0
	T 2	150.5	20.0	249.0
	T 3	151.0	22.7	244.5
SNCM447	JIS規格値	≥304.1	≥9.0	≥456.5
	T 4	340.0	6.7	523.0
	T 5	344.0	10.7	538.0
	T 6	342.0	9.3	502.0

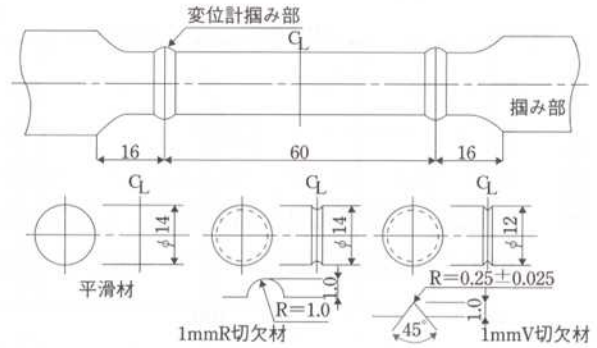


図-4 高速引張試験片の形状

0、-20、-40および-60℃)のほか、図-4に示す各種ノッチ形状を有する丸棒引張試験片の高速引張試験を実施した。材質は後述の図-5中に示す5種類とした。

図-5に引張試験結果(平均値)の一例を、図-6にシャルピー遷移曲線を示し、以下に試験結果の概要をまとめる。

(1) 引張試験結果

1) 被災した支承の内部から切出した試験片の引張強度は、一部JIS規格値²⁾⁻⁴⁾を満足しないものがあった。

2) 新規製造鋳鋼材は、全てJIS規格値²⁾⁻⁴⁾を満足した。

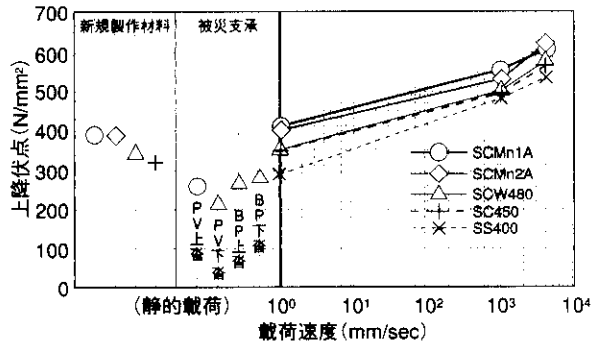
3) 荷重載荷速度が増加するに従って、降伏点は向上したが、引張強さ、伸びはあまり変化しなかった。

4) 切欠き効果により、降伏点と引張強さは向上したが、伸びは低下した。

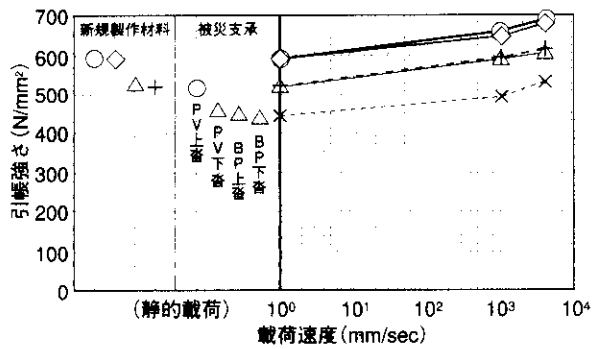
5) 試験温度については、-10℃まではほとんど変化しないのに対し、-20℃では、降伏点と引張強度は向上したが、伸びは低下した。

(2) シャルピー衝撃試験結果

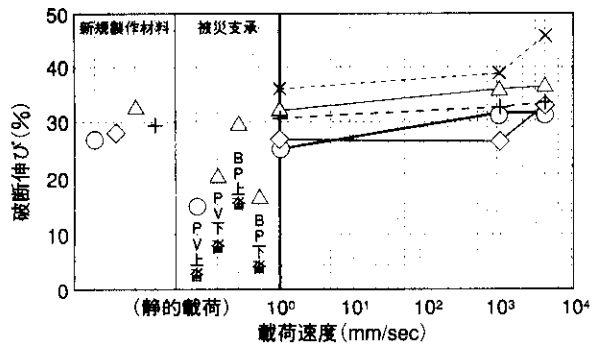
1) JIS規格にシャルピー衝撃値の規格があるの



(1) 上昇伏点



(2) 引張強度



(3) 破断伸び

図-5 引張試験結果

は、下沓に使用されているSCW480⁹⁾ (0℃, 27J)のみであるが、JIS規格値を下回っていた。

2) 新規製造鋼材については、SCW480以外の規格のない材質も含め0℃での結果は全て27J以上であった。

新規製造鋼材は、肉厚が100mm以下と薄いために熱処理過程の寸法効果が顕著に現れ、JIS規格値を満足できたものと考えられる。今後、今回のような大型支承を用いる場合、硬さ試験を行うなどして、支承本体の材料強度をより正確に検査する必要があると考えられる。

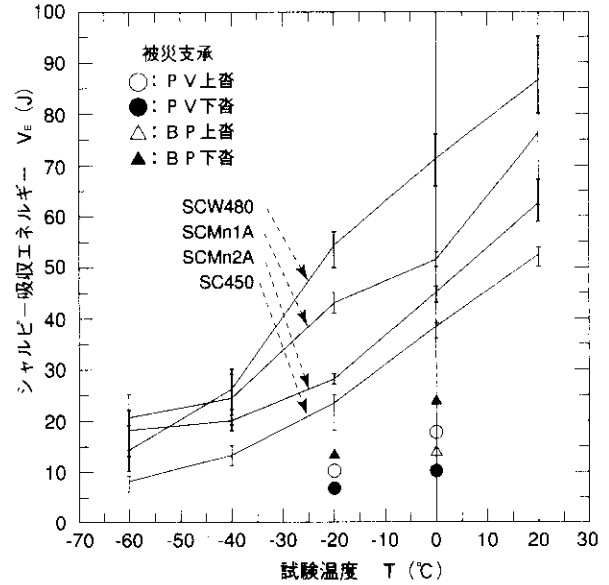


図-6 シャルピー衝撃吸収遷移曲線

3. 支承部の有限要素解析

支承部の被災分析結果から、橋軸方向地震力によると考えられる損傷事例が多かったため、材料強度試験においてサンプリングの対象としたPV支承とBP-A支承について、荷重平面モデルを用いて、鉛直一定荷重下で強制水平変位を負荷して有限要素解析を行った。なお、せん断キー部分については別途ソールプレートとせん断キー部分をモデル化した有限要素解析を行い、せん断キー部分の板厚を直径の15%の板厚にモデル化した。

3-1 PV支承

図-7に解析モデル(強制変位10mm負荷時)を示す。損傷事例が多かったセットボルト(強度区分: 10.9¹⁾)については塑性化を考慮した。結果をまとめると次のとおりである。

強制変位を負荷すると、せん断キーとピボット部に反力が生じ、この反力作用位置が偏心しているため、設計どおり上沓に回転モーメントが作用する。強制変位の増加に伴い、上沓回転モーメントも増加し、セットボルトに大きな引張力が発生する。セットボルトは設計荷重の約2.2倍の水平反力1.060tfで降伏にいたった。セットボルト降伏後、ソールプレートと上沓が離間し、水平反力1.240tf

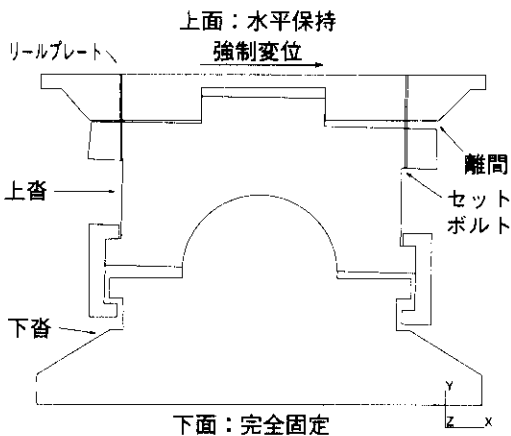


図-7 PV支承の解析モデル（強制変位10mm負荷時）

（強制変位10mm）で引張強さに達した。また、サンプリング支承において、破壊起点となったせん断キー角部には過大な応力が発生し、セットボルトの降伏後、水平反力1,180tfで降伏応力に達した。

3-2 BP-A支承

図-8に解析モデル（強制変位10mm負荷時）を示す。損傷事例の多かったセットボルト（強度区分：4.6¹⁾）については塑性化を考慮した。また、上沓ストッパーは、別途弾塑性解析を行い、その結果得られた水平反力と変形量の関係からばね定数を2種類（弾性体と仮定した”ばね定数①”，塑性変形量を考慮した”ばね定数②”）想定し、上下沓を結ぶ弾性ばねにモデル化した。結果をまとめると次のとおりである。

強制変位を負荷すると、せん断キーと上沓ストッパーに反力が生じる。BP-A支承の場合、反力作用位置の偏心量がPV支承に比べ小さいが、上沓に回転モーメントが発生する。ばね定数②の場合、設計荷重の約1.8倍の水平反力800tfでセットボルトが降伏したが、実際は水平反力約600tfで上沓ストッパーが先行して降伏すると考えられる。ばね定数①の場合は、水平反力約900tfでセットボルトが降伏した。したがって、上沓ストッパーの強度が高ければ、セットボルトが設計水平力の2倍程度で降伏するといえる。一方、せん断キー角部の応力は、セットボルト降伏後に発生するがPV支承に比べ小さ

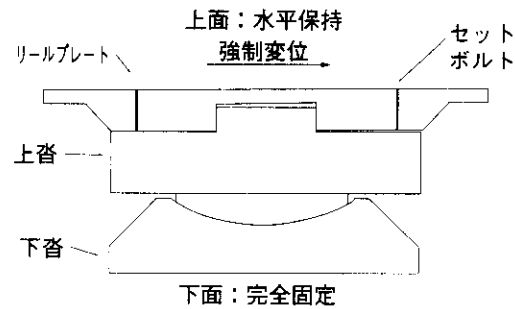


図-8 BP-A支承の解析モデル（強制変位10mm負荷時）

く、破壊に結びつく可能性は低いと推定される。

4. 支承破壊メカニズムの推定

前記までの被災状況分析結果、支承材料の強度分析結果、有限要素解析およびここでは省略するが、別途実施した模型支承の2軸載荷試験結果を基に、PV支承とBP-A支承の破壊形態別にメカニズムの推定を試みた。

4-1 PV支承の破壊メカニズム

PV支承の破壊形態としては、図-9に示す3種類が考えられる（いずれの破壊パターンも発見されている）。以下では、その破壊メカニズムについて述べる。（1）セットボルトの破断（→ピボットフランジの変形、リングの変形と割れ）

セットボルトの強度は、他の部位に比べて相対的に低いので、上部構造に過大な橋軸方向慣性力が作用すると、セットボルトに引張力が生じて塑性変形し、ついには引張破断したと考えられる。特に大きな慣性力が作用した支承位置では、セットボルトの破断後に、ピボットフランジおよびリングが接触して変形、割れなどの損傷が発生したと考えられる。

（2）上部構造腹板の局部座屈

上部構造の強度が他の部位より相対的に低い場合、セットボルトの破断前に主桁の腹板が局部座

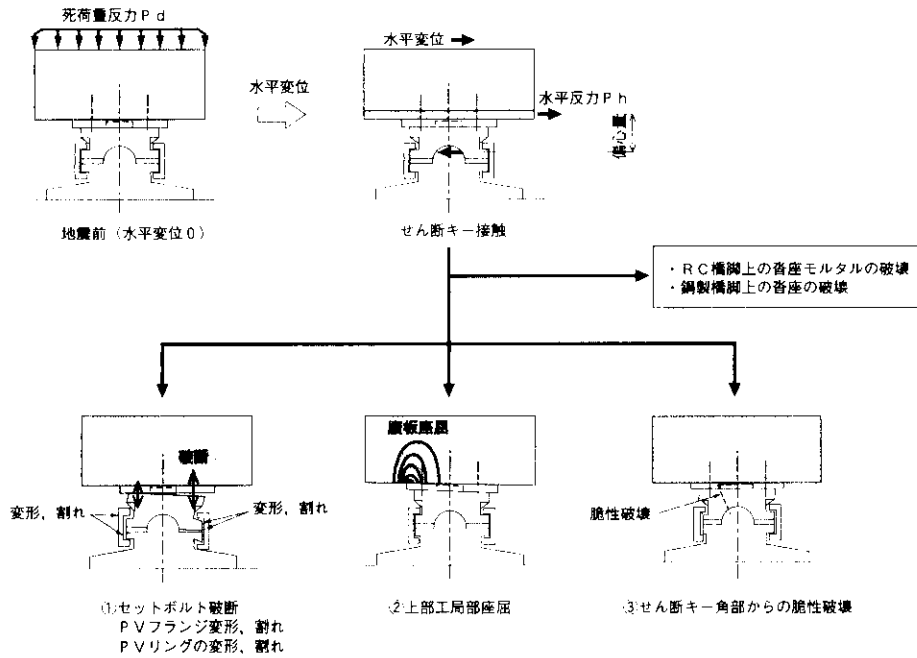


図-9 橋軸方向変位に対するPV支承の破壊形態の推定

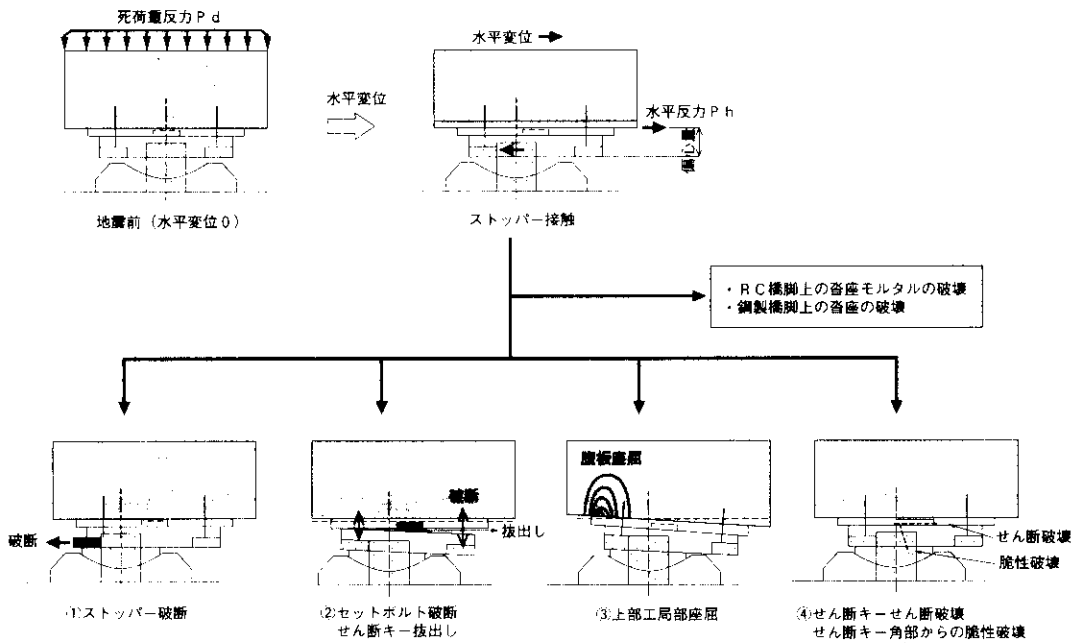


図-10 橋軸方向変位に対するBP-A支承の破壊形態の推定

屈を起こしたと考えられる。道路橋示方書・第V編⁵⁾(平成2年2月)では、支承高さの高い場合、支承前後端部に補強リブを設けるよう規定されているので、この損傷事例はほとんどなかった。

(3) セン断キー角部の損傷

せん断キー角部の強度が他の部位より相対的に

低い場合に、せん断キー回りの損傷が発生したと考えられる。この場合、一般には、設計で予想するとおりせん断キーがせん断破壊するが、せん断キー角部に、①切欠きなどの応力集中源、②使用鑄鋼の低じん性値および③高作用応力があった場合に、せん断キー角部から脆性破壊する可能性が

あると考えられる。せん断キー角部の曲率半径を大きくするなどの対策を施せば、このような破壊は防止できると考えられる。

4-2 BP-A 支承の破壊メカニズム

BP-A 支承の破壊形態としては、図-10に示す4種類が考えられる（いずれの破壊パターンも発見されている）。以下では、その破壊メカニズムについて述べる。

(1) 上沓ストッパーの破壊

上沓ストッパーの強度が他の部位より相対的に低い場合、設計で期待するとおり、上沓ストッパーが曲げとせん断が混在した破壊形態となる。実際の損傷パターンとしては、設計条件どおりのこの破壊パターンが最も多かった。

(2) セットボルトの破壊、またはせん断キーからの抜け出し

セットボルトの強度が他の部位に比べて相対的に低い場合、上部構造と上沓の間で離間が生じる。すなわち、セットボルトに引張力が生じ、セットボルトは塑性変形後、ついには破断する。ただし、セットボルトの破断伸びはせん断キーの高さよりも大きいので、セットボルトの引張破断に先行してせん断キーがはずれる可能性がある。

(3) 上部構造腹板の局部座屈

上部構造の強度が他の部位より相対的に低い場合、主桁腹板が局部座屈を起こす可能性が指摘される。今後は、支承高の低い支承においても、支承前後端に補強リブが必要であると考えられる。

(4) せん断キーのせん断破壊

せん断キーの強度が他の部位より相対的に低い場合、せん断キー角部から破壊する。実際の破壊パターンとしては、せん断キーのせん断破壊が見られた。

なお、上記は、橋軸方向水平変位に対するものであるが、橋軸直角方向についても基本的には同様なことがいえる。ただし、橋軸直角方向には強度が高いサイドブロックがあるので、セットボルトが破断して上部構造がせん断キーからはずれたり、上部構造の重心位置と支承位置の高さの差が大きかったため、上部構造の下部がめくれあがるような破壊形態が生じたと推定される。

あとがき

以上、5号湾岸線の支承部の被災状況を分析するとともに、支承材料の強度試験、支承の有限要素解析および模型支承の2軸載荷試験を実施した。結果を以下にまとめる。

- 1) 支承種別に係わらずセットボルトの損傷が最も多かった。次いで多かった損傷は、PVR 支承のローラーの脱落、PV 支承のピボットリング・フランジの変形、BP-A 支承の上沓ストッパーの損傷であった。
- 2) 被災支承の内部から切出した試験片の引張強度試験結果は一部JIS規格値を満足しないものがあった。一方、新規製造鋳鋼材はJIS規格値を満足した。これは、熱処理過程の寸法効果が顕著に現れたためと考えられる。今後、大型鋳鋼製支承を用いる場合、注意する必要があると考えられる。
- 3) PV 支承の破壊形態は、セットボルトの破断、上部構造腹板の局部座屈およびせん断キー角部の損傷の3種類に大別され、いずれの損傷形態となるかは、構成各部の相対的な強度に依存する。せん断キー角部からの破壊を防ぐためには、角部の曲率半径を拡大することが望ましい。
- 4) BP-A 支承の破壊形態は、上沓ストッパーの破壊、セットボルトの破断、上部構造腹板の局部座屈およびせん断キーのせん断破壊の4種類に大別され、いずれの損傷形態となるかは、構成各部の相対的な強度に依存する。これらは橋軸方向の破壊形態であるが、橋軸直角方向についても基本的に同様のことがいえる。

参考文献

- 1) JIS B 1051, 鋼製ボルト, 小ねじの機械的性質.
- 2) JIS G 5102, 溶接構造用鋳鋼品.
- 3) JIS G 5101, 炭素鋼鋳造品.
- 4) JIS G 5111, 構造用高張力炭素鋼および低合金鋳鋼品.
- 5) (社) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, V耐震設計編, 1990.2.