

地震による支承部の被災事例の分析

植田 健介¹・運上 茂樹²・星隈 順一³・堺 淳一⁴・岡田 太賀雄⁵

¹独立行政法人土木研究所構造物メンテナンス研究センター 交流研究員
（〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6）

²正会員 工博 国土交通省国土技術総合対策研究所危機管理技術センター 地震災害研究官
（〒305-0804 茨城県つくば市旭1）

³正会員 博（工） 独立行政法人土木研究所構造物メンテナンス研究センター 上席研究員
（〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6）

⁴正会員 博（工） 独立行政法人土木研究所構造物メンテナンス研究センター 主任研究員
（〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6）

⁵正会員 修（工） 独立行政法人土木研究所構造物メンテナンス研究センター 研究員
（〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6）

1. はじめに

兵庫県南部地震において支承部の破壊が上部構造の落下など甚大な損傷につながった橋もあったことから、平成8年の道路橋示方書¹⁾の改訂では、レベル2地震動により生じる地震力に対して性能を確保するタイプBの支承部が規定され、その中でも免震支承や地震時水平力分散支承が一般的となってきた。

現在、支承部の設計は、レベル2地震動による地震力に対して各部材に生じる応力度等が、許容値を超過しないことを橋軸方向と橋軸直角方向に別々に照査している。しかし、支承部に想定以上の地震力が作用した場合、あるいは、想定とは異なる状態や方向に地震力が作用した場合には、最終的にどの部材要素が弱点となって、どのような破壊モードで損傷するかは明確ではない。今後、支承部の設計の合理化を目指すためには、こうした破壊モードを明確にし、それを適切にコントロールする設計法を確立することが必要である。

そこで、本研究では、こうした検討の第一ステップとして、近年の地震によって、タイプBのゴム支承を採用した橋梁の支承部が損傷した事例を対象にその被災調査分析を行った。本文は、その結果をまとめたものである。

2. 地震により支承部が損傷した橋梁の概要

図-1は、検討対象とした橋梁の概要を示したものである。本橋は、橋長約98m（支間長39.3m+57.3m、A1橋台およびP1橋脚90°、A2橋台斜角75°）の2径間連続非合成鋼少数鈹桁橋²⁾で、現行の道路橋示方書³⁾に準拠して設計されていた。下部構造はT式橋台および張出し式橋脚で、A1橋台は深礎杭、P1橋脚は大口径深礎杭、A2橋台は直接基礎で支持されており、地盤種別はI種地盤である。支点条件は、橋軸方向にはゴム支承による弾性支持、直角方向には支承部に設置されたサイドブロックによる固定支持となっている。

図-2に、損傷した支承部の構造を示す。ベースプレートにボルト接合された下査の上にゴム支承本体およびサイドブロックがボルトで固定され、積層ゴムと積層ゴム取付けボルトで接合された上査と上部構造が桁取付けボルトで固定される構造となっている。積層ゴムの上下には、上側せん断キーが上査から上部構造側のソールプレートまで貫通するかたちで、また、下側せん断キーが下査との間にそれぞれ設置されている。

図-3は、こうした構造特性をもとに支承を構成する部材要素間の力の伝達を推定したものである。なお、ここでは力の伝達において主となる経路を示している。上部構造に作用する慣性力は、橋軸方向については、上側せん断キーから積層ゴムに伝達さ

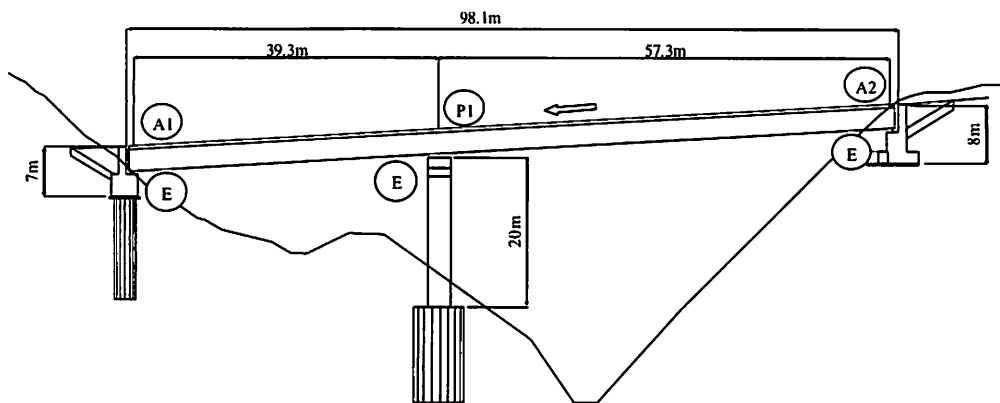


図-1 橋梁概要図

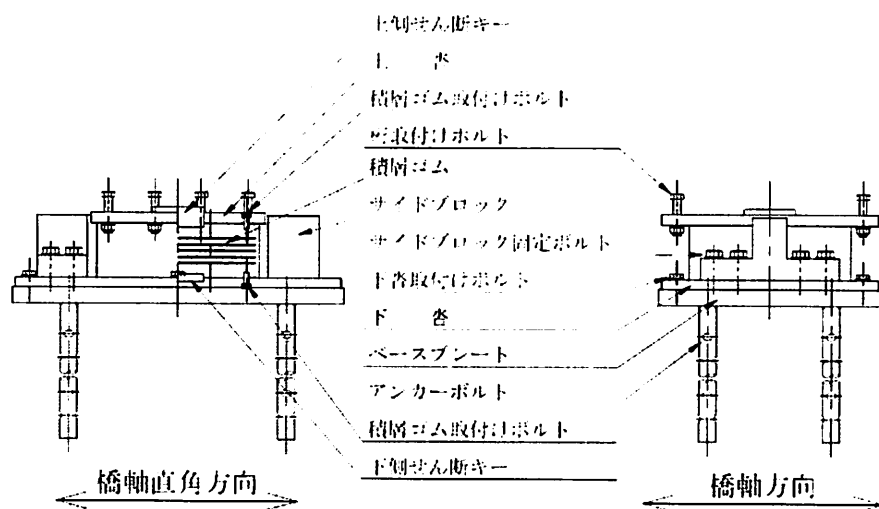


図-2 支承部の構造

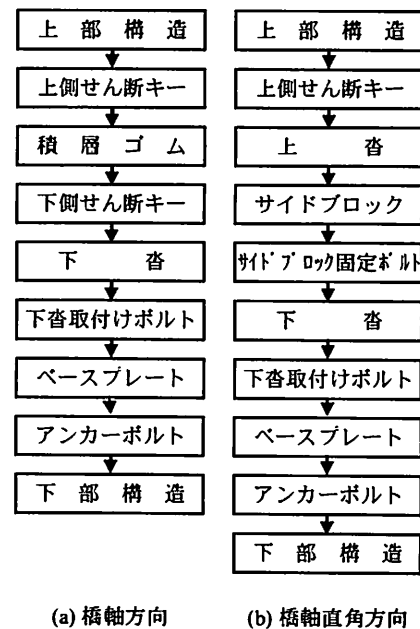


図-3 支承部を構成する部材要素間における力の伝達

れる経路と、桁取付けボルトから上杓を通じて上側せん断キーおよび積層ゴム取付けボルトの両者から積層ゴムに伝達される経路が考えられる。なお、実際には、遊間の小さい上側せん断キーが主として力の伝達に寄与すると推定される。次に、積層ゴムからは、下側せん断キーと積層ゴム取付けボルトより下杓に伝達されるが、ここでも主な力の伝達は下側せん断キーによると考えられる。下杓に伝達された力は、下杓取付けボルトでベースプレートへ伝えられ、アンカーボルトから下部構造へと伝達される。

一方、橋軸直角方向においては、桁取付けボルトおよびせん断キーから上杓を通じてサイドブロックに伝えられ、サイドブロック固定ボルトから下杓を介して下杓取付けボルトでベースプレートに伝わり、アンカーボルトから下部構造へと伝達される。ここでも上杓へは、上側せん断キーによる伝達が主となるものと思われる。

3. 損傷状況

(1) 橋梁全体

本橋梁の被災状況を写真-1～写真-6 に示す。地震により A1, A2 両橋台が支間中央側に移動したと推測され、A1 橋台では、ジョイント部の段差が報告されている。支承部では、写真-2 に示すように下杓取付けボルトが損傷した。その結果、橋台パラペットと桁端部の接触が生じた。一方、A2 橋台ではパラペット基部の損傷、ジョイント部の段差および写真-6 に示すようにゴム支承がせん断変形したままの状態となっていた。また、A2 橋台付近では、地山の崩落も確認されており、A1, A2 両橋台は斜面上で支間中央側に変位したことが報告されていることから、両橋台には、沈下変位も生じたと推測される。

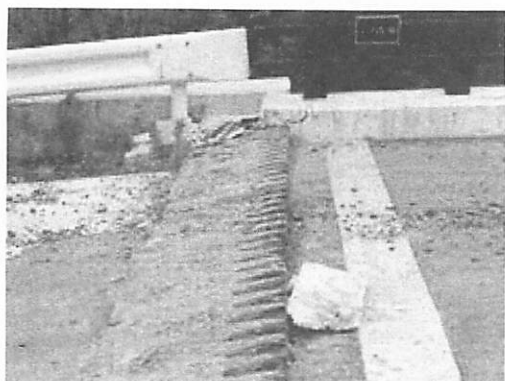


写真-1 A1 橋台のジョイント部の段差



写真-4 A2 橋台のジョイント部の段差

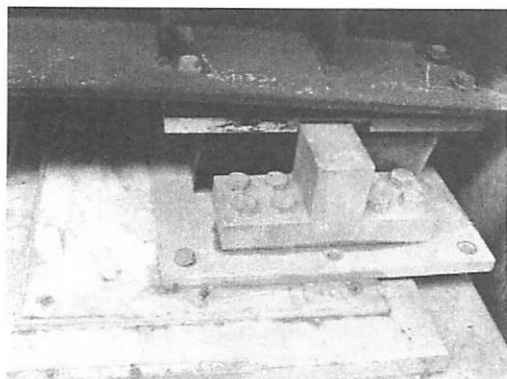


写真-2 A1 橋台の支承部の損傷

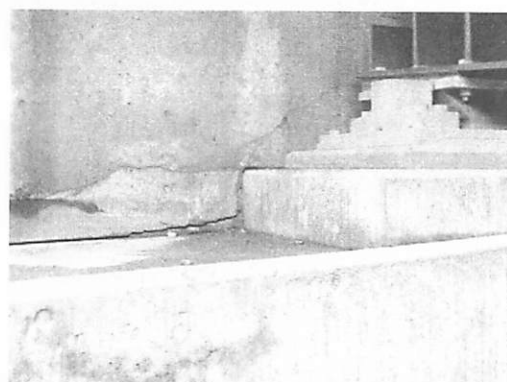


写真-5 A2 橋台のバラベツ基部の損傷

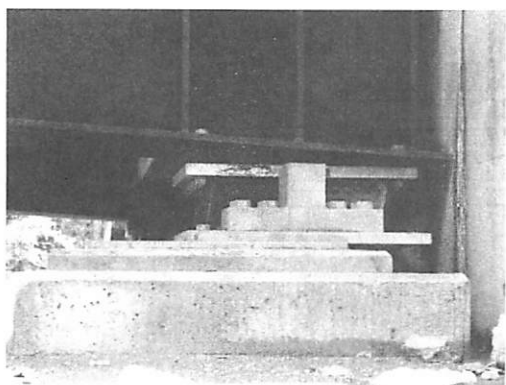


写真-3 A1 橋台のバラベツと主桁端部の接触

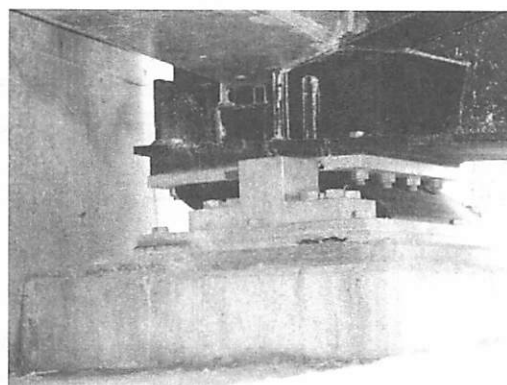


写真-6 A2 橋台のゴム支承のせん断変形

本研究では、下査取付けボルトが損傷した A1 橋台の支承部を検討対象とすることとした。

(2) A1 橋台支承部の損傷

A1 橋台における支承部の損傷状況を写真-2 および写真-7～写真-10 に、調査写真から確認できる支承部の状況を図-4 に示す。支承の下査と ベースプレートとを固定する下査取付けボルトが破断し、主桁とバラベツが接触した状態で止まっていた。また、下査より上部工側のゴム支承部分は、ベースプレートに対して取付け位置から橋軸方向には桁端部側に、橋軸直角方向には橋台前面から桁端部方向を見て左方向に変位して止まっていた。支承上査の側面に

は、サイドブロックと接触した痕が残っている。状況からわかる点をまとめると以下ようになる。

- a) 主桁とバラベツが接触しているが、バラベツの損傷はクラック程度であることから、支承の変形量は最大で桁遊間の 250mm 程度と考えられる。
- b) サイドブロックの接触痕が上査中心付近から支間中央側に向かってのみついていることから、ゴム支承の変形は地震による上部構造の応答変位による影響は小さく、主として橋台が支間中央方向に動いたことにより生じた桁端部への一方向の変形であったと考えられる。

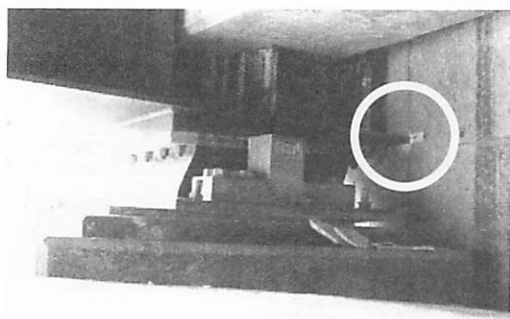


写真-7 G2 桁の桁端部のバラベットの衝突

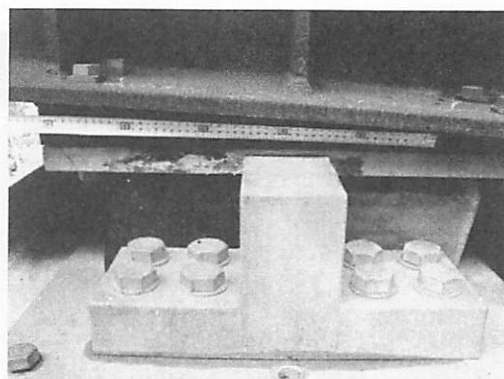


写真-9 G1 桁のサイドブロックの接触痕

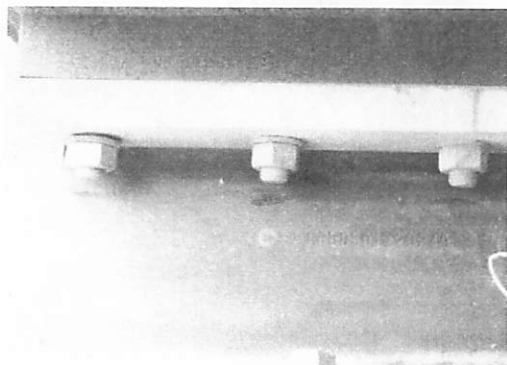


写真-8 G2 桁の桁取付けボルトとゴムの接触



写真-10 G1 桁の桁端部とバラベットの衝突

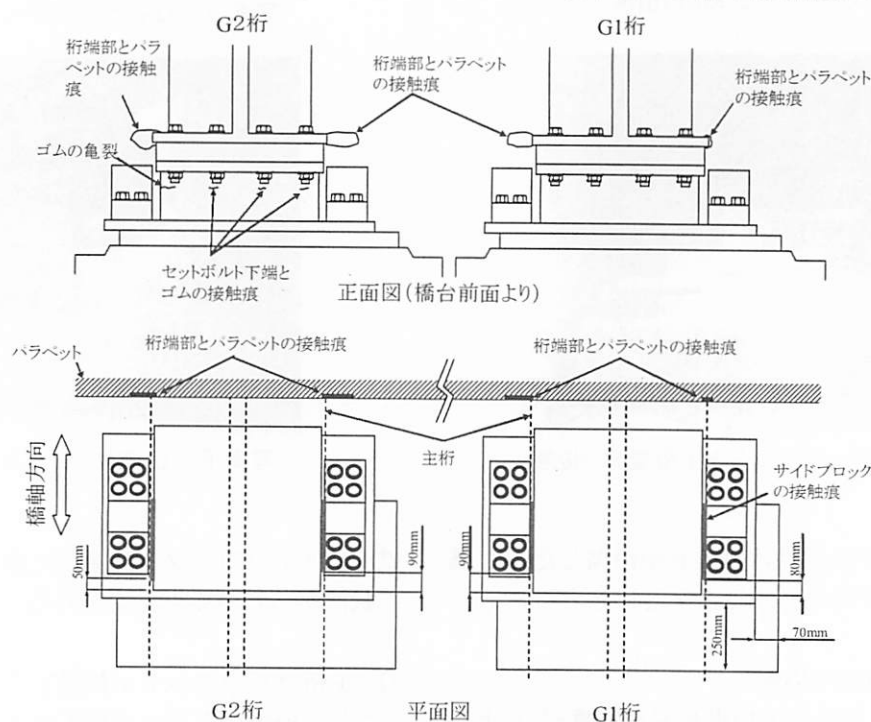


図-4 A1 橋台の支承部の損傷状況

c) G2 桁取付けボルトとゴムの接触痕が橋台前面から見て左側に若干ずれていることから、上鋼板（主桁）は下部構造に対して平面的に時計回りにねじれながらせん断変形したのではないかと推定される。このことは上鋼板の両側面にサイドブロックの接触痕がある事と、両側面の接触痕の長さに差がある事からも推定される。

d) サイドブロックと上巻の接触痕より推定されるゴムの変形量が 205mm～245mm であることから、破断した下巻取付けボルトは、桁とバラベットの接触する直前までは完全には破断していなかった（破断後はゴムが復元しようとするので接触痕が変形方向には付かない）と推定される。

表-1 水平力を単独に作用させた時の部材要素に生じる応力度と許容値に対する比率

部 材 要 素			橋 軸 方 向				橋 軸 直 角 方 向				
			桁取付け ボルト	せん断 キー	下査取付 けボルト	アンカー ボルト	桁取付け ボルト	せん断 キー	サイドロック 固定ボルト	下査取付 けボルト	アンカー ボルト
水 平 力			613 (250%せん断相当)				628 (0.89Rd相当)				
支圧	応力度	σ [N/mm ²]	—	336	—	—	—	344	—	—	—
	許容値	σ_a [N/mm ²]	—	442	—	—	—	442	—	—	—
	σ/σ_a	[%]	—	76	—	—	—	78	—	—	—
せん断	応力度	τ [N/mm ²]	227	17	227	90	233	17	146	233	92
	許容値	τ_a [N/mm ²]	340	170	340	136	340	170	340	340	136
	τ/τ_a	[%]	67	10	67	66	69	10	43	69	68

表-2 鉛直方向作用力の影響

鉛直方向作用力 R			橋 軸 方 向			橋 軸 直 角 方 向		
			706 (死荷重相当)	-212 (-0.3Rd)	-500 (ゴムの許容 引張相当)	706 (死荷重相当)	-212 (-0.3Rd)	-500 (ゴムの許容 引張相当)
変 形 量	δ	[mm]	255			0		
水 平 力	Hs	[kN]	613			628		
ボルトのせん断応力度	τ	[N/mm ²]	227			232		
ボルトの許容せん断応力度	τ_a	[N/mm ²]	340					
ボルトの引張応力度	σ_t	[N/mm ²]	20	263	376	0	236	319
ボルトの許容引張応力度	σ_{ta}	[N/mm ²]	612					
ボルトの合成応力度	$(\tau/\tau_a)^2 + (\sigma_t/\sigma_{ta})^2$		0.44	0.63	0.82	0.47	0.61	0.74
許 容 合 成 応 力 度			1.2					

4. 支承部損傷の分析

ここでは、支承部を構成する部材の耐力差等から破壊モードを推定するために、支承を構成する各部材要素に作用する応力度等を算出し、実際に生じた損傷例との比較を行った。なお、ここに示した照査結果は概観からの被災調査結果に基づく概算であり、詳細には設計図等を確認した上で検討する必要がある。

まず、支承部に橋軸方向および橋軸直角方向に、それぞれ単独に水平力のみを作用させ、力を伝達する各部材要素に発生する応力度と許容値に対する比率の算出を行った。支承部に作用する水平力として、橋軸方向は、積層ゴムの許容せん断ひずみである250%に相当する255mmの変形時の水平力を想定し、橋軸直角方向は、橋台部の支承部設計地震力として一般的に用いられる許容塑性率を3とした場合のI種地盤におけるピーク値である0.89Rd相当の水平力を想定した。その結果を表-1に示す。ここで、許容値については、道路橋示方書の規定に従い割増係数1.7を考慮し、許容せん断応力度340N/mm²、許容支圧応力度442N/mm²を用いている。これによれば各部材要素の応力度は、許容値に対して橋軸方向で66%~76%、橋軸直角方向で68%~78%となっている。損傷した下査取付けボルトのせん断応力度は、橋軸方向227N/mm²、橋軸直角方向233N/mm²となっており、許容値340N/mm²に対して余裕がある結果となった。

次に、鉛直方向の作用力の影響を分析した。ここ

では、上記検討と同じ水平力をそれぞれ別々に作用させた状態で、鉛直方向の力として死荷重を考慮するケースと、上向きに力が作用した状態を考慮するケースを対象として破断した下査取付けボルトに生じるせん断応力度、引張応力度および合成応力度を算出した。ここで、上向きに力が作用するケースとしては、上向き地震力の下限值である-0.3Rdおよび積層ゴムの許容引張力に相当する力を考慮した。その結果を表-2に示す。なお、許容引張応力度は前述と同様に割増係数1.7を考慮し、612N/mm²を用い、許容合成応力度は、一般的な値である1.2とした。これによると、積層ゴムの許容引張力を考慮した場合でも合成応力度は橋軸方向0.82、橋軸直角方向0.74であり、許容値である1.2を超えない結果となる。

これらの結果より、橋軸方向および橋軸直角方向それぞれ単独に想定した地震力を積層ゴムの許容引張力と共に作用させても、下査取付けボルトの破断には至らないことが推定される。

下査取付けボルトは、前述したように、積層ゴムが250%程度までせん断変形した後に破断したと推測されたが、図-4によれば、支承本体は取り付け位置から橋軸方向だけでなく、橋軸直角方向にもずれて止まっている。このことから支承部には、設計とは異なり橋軸方向にせん断変形による力と同時に、橋軸直角方向にも大きな水平力が作用し、下査取付けボルトの破断が生じた可能性が推定される。

そこで、橋軸方向に250%せん断変形した状態から徐々に橋軸直角方向に水平力を増加させて、水平

表-3 部材要素の許容値超過時水平力と力の方向

	桁取付けボルト	せん断キー		サイドブロック 固定ボルト	下査取付けボルト	アンカーボルト
		支圧	せん断			
橋軸方向水平力 (250%相当) [kN]				613		
橋軸直角方向水平力 [kN]	679	525	6100	1460	679	698
合成水平力 [kN]	915	807	6130	1583	915	929
合成力角度 [度]	47.9	40.6	84.3	67.2	47.9	48.7

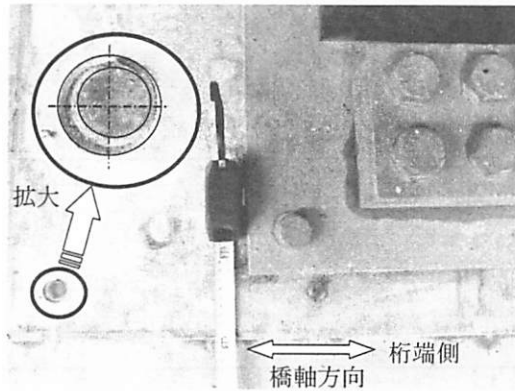


写真-11 下査取付けボルト破断面

力を伝達している各取付け部材が許容値に達する橋軸直角方向の水平力を算出することとした。また、その時の橋軸方向及び橋軸直角方向水平力の合成力が、橋軸方向に対してなす角度を求め、被災状況との比較を行った。その結果を表-3に示す。ただし、各応力度は、各部材要素が水平力を単独で負担したと想定して算出している。これによると上側せん断キーの支圧応力度が最初に許容値を超過し、次に桁取付けボルトと下査取付けボルトのせん断応力度が許容値を超過すると考えられる。ただし、支圧応力度の超過では即座に破断に至らないことが考えられ、また、前述したように上部構造から上査への水平力は、主として上側せん断キーにより伝達されるため、桁取付けボルトは破断しないことが考えられる。よって、次に許容値に達する下査取付けボルトで損傷することが推定される。下査取付けボルトが許容値を超過したときの合成力の角度は47.9度となっている。写真-11に示す破断したボルトの破断面を見ると、破断面が右斜め上方向に引張られており、定性的には損傷形態と一致していると考えられる。

ただし、前述したように両橋台は移動するとともに沈下しており、このためP1橋脚を支点として損傷を受けたA1橋台側が沈下に伴うアップリフト力を受けた可能性も考えられる。P1橋脚からの支間長が短く支承形状も小さいA1橋台の方が耐力的

に低いためA1橋台の取り付けボルトのみが破断した可能性も考えられるが、この辺りについては詳細な情報をもとに更なる分析が必要と思われる。

5. まとめ

近年の地震により損傷を受けたタイプBの支承部について被災調査分析を行った。本検討により得られた知見は以下のとおりである。

- (1) 支承部の取付け部材は、積層ゴムの許容値の250%せん断ひずみ相当の水平力を橋軸方向に、また、許容塑性率を3とした場合に相当する水平力を橋軸直角方向にそれぞれに作用させた場合、橋軸方向で66%~76%、橋軸直角方向で68%~78%の応力度レベルであり、損傷した下査取付けボルトは、積層ゴムの許容引張力を合わせて考慮しても許容値を超過しないことが推定された。
- (2) 支承部に、橋軸方向に250%せん断変形相当の力と、橋軸直角方向に525kNの力が同時に作用した場合、下査取付けボルトが破断する可能性があり、破断方向など実際の被害と定性的に一致する。
- (3) 本橋梁では、両橋台が沈下するという現象も同時に生じているので、沈下に伴うアップリフト力の影響も考えられるが、これについてはさらに詳細な情報をもとに検討する必要がある。

参考文献

- (1) (社)日本道路協会：「道路橋示方書・同解説V 耐震設計編」1996.12
- (2) 国土交通省国土技術政策総合研究所、独立行政法人土木研究所、独立行政法人建築研究所：「平成20年(2008年)岩手・宮城内陸地震被害調査報告」pp154-155, 2008.12
- (3) (社)日本道路協会：「道路橋示方書・同解説V 耐震設計編」2002.3