

地震により損傷した鉛プラグ入り積層ゴム支承の 特性評価に関する実験的研究

篠原 聖二¹・星隈 順一²

¹正会員 (独)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つくば市南原1-6)
E-mail: shinohara@pwri.go.jp

²正会員 (独)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つくば市南原1-6)

本研究では、地震による損傷や経年的な影響に伴う材料特性の変化がゴム支承の力学的特性に与える影響などを評価するために、東北地方太平洋沖地震によりき裂損傷が発生した鉛プラグ入り積層ゴム支承を用いて、支承の外観調査、力学的特性の試験、切断による内部調査、切り出したゴム試験片を用いた材料特性の評価を行った。撤去支承を対象とした有効設計変位におけるせん断試験の結果、出荷時と比べて剛性は大きくなり、減衰能が低下していることが確認された。これは、ゴム材料の硬化や下鋼板とゴム層の境界部に生じたき裂が要因であると考えられる。また、設計限界変位に対する正負交番繰返しせん断試験の結果、支承によって、安定した履歴ループを示したケースと、1サイクル目の載荷において設計限界変位に相当するせん断ひずみ250%に至る前に破断したケースの双方が確認された。

Key Words : the 2011 Great East Japan Earthquake, lead rubber bearing, dynamic characteristics, material characteristics, experimental study

1. はじめに

平成7年兵庫県南部地震における道路橋の被災経験を踏まえ、当時の建設省より通達された「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に関する仕様¹⁾」において、ゴム支承を積極的に用いることが望ましいと記載されたこと、また、平成8年には、それまでの研究成果としてとりまとめられていた免震設計マニュアル(案)²⁾が、新たに道路橋示方書³⁾に取り入れられたことを背景として、それ以降、ゴム支承が広く普及するようになった。

一方、平成23年東北地方太平洋沖地震では、平成8年道路橋示方書に基づいてレベル2地震動に対して設計や照査がなされたゴム支承に破断やき裂等の損傷が生じた。仙台東部道路の東部高架橋では、地震時水平力分散型ゴム支承18基が破断した。また、仙台北部道路の利府高架橋では、3月11日の本震時に地震時水平力分散型ゴム支承3基が破断し、その他5基にき裂が生じた。さらに4月7日の余震で、8基が破断し、その他9基が損傷を受けた⁴⁾。東水戸道路の新那珂川大橋では、地震時水平力分散型ゴム支承9基にき裂が発生した。また、国道6号バイパスの旭高架橋においても、鉛プラグ入り積層ゴム支承4基にき裂が発生した。

以上のように、地震によるゴム支承の損傷が発生している中で、今後、ゴム支承の維持管理を行っていくにあたっては、その損傷の発生原因や損傷メカニズム(進展過程)、地震による損傷や経年的な劣化に伴う材料特性の変化がゴム支承の力学的特性に与える影響などを明らかにしておく必要が生じている。そのためには地震により損傷したゴム支承や長期間供用下にあったゴム支承の力学的特性や材料特性の経年的な変化に関するデータを数多く蓄積していく必要がある⁶⁾。

本研究では、東北地方太平洋沖地震により鉛プラグ入り積層ゴム支承にき裂が発生した旭高架橋から損傷したゴム支承を取り出し、地震による損傷や経年的な劣化に伴う材料特性の変化がゴム支承の力学的特性に与える影響などを評価するために、取り出した支承の外観調査、力学的特性の評価、切断による内部調査、切り出したゴム試験片を用いた材料特性の評価を行った。

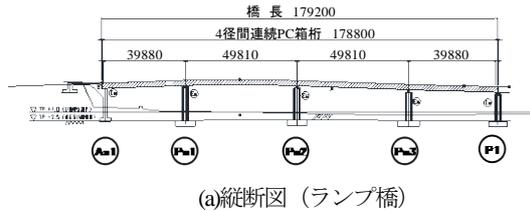
2. 旭高架橋の概要と被災状況

(1) 旭高架橋の概要

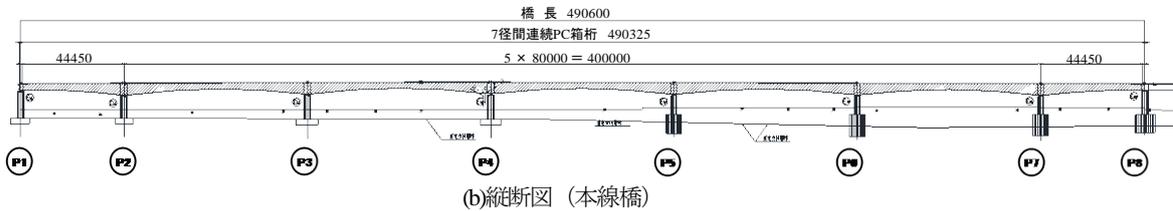
旭高架橋の一般図を図-1に、橋梁諸元を表-1に示す。

表-1 橋梁諸元

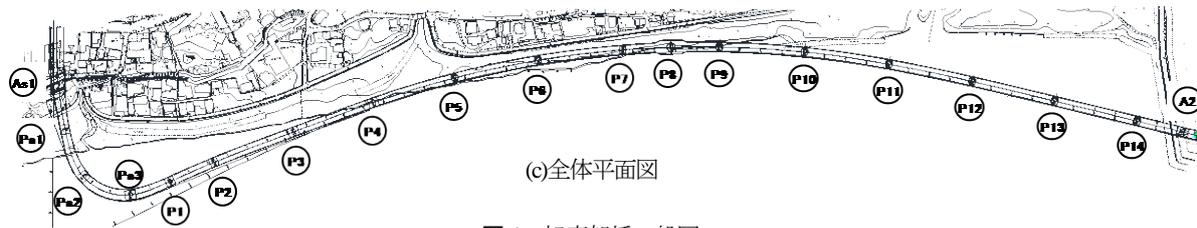
道路規格	第3種第1級(設計速度:暫定時60km/h,完成時80km/h)
橋長	本線:981.2m,ランプ:179.2m
有効幅員	本線:8.25m,ランプ8.0~12.0m
平面線形	本線:R=∞~R=1200~R=∞~A=220~R=900~A=450~∞ ランプ:R=∞~A=45~R=50~A=45~R=∞
上部構造形式	本線:7径間連続PC箱桁×2連 ランプ:4径間連続PC箱桁
下部構造形式	RC橋脚(小判型),ラーメン橋台(A _{s1}),逆T式橋台(A ₂)
基礎構造形式	直接基礎(A _{s1} ~P ₄),鋼管矢板基礎(P ₅ ~P ₁₄),杭基礎(A ₂)
適用基準	平成8年道路橋示方書



(a)縦断面図(ランプ橋)



(b)縦断面図(本線橋)



(c)全体平面図

図-1 旭高架橋一般図

旭高架橋は茨城県日立市の国道6号バイパスにかかる橋長981.2m,幅員8.250m(本線)の18径間の橋(PC7径間連続箱桁×2連(本線部)+PC4径間連続箱桁(ランプ橋))である。架橋位置は発先海岸,宮田浜海岸にあり,海上橋梁となるため,耐久性の観点から厳しい環境にあると考えられる。下部構造は,躯体がRC小判型橋脚,ラーメン式橋台,逆T式橋台,基礎は直接基礎(A_{s1}橋台~P₄橋脚),鋼管矢板基礎(P₅~P₁₄橋脚),杭基礎(A₂橋台)となっている。支承は鉛プラグ入り積層ゴム支承が用いられている。適用基準は平成8年道路橋示方書であり,竣工年は2002年から2006年であった。

(2) 旭高架橋の被災状況

ゴム支承の被災状況を図-2に示す。As₁橋台上には,1支承線上に3基の円形のゴム支承が設置されており,そのうち海側のG1支承に長さ41cmにわたる水平方向のき裂が生じていた。

P₁橋脚はかけ違い部であり,Pa₃橋脚側には円形のゴム支承が2基,P₂橋脚側には矩形のゴム支承が2基それぞれ設置されている。Pa₃橋脚側の円形のゴム支承には損傷は確認されなかった。P₂橋脚側の矩形のゴム支承には,ゴム支承本体と下鋼板との境界部の始点側にき裂,およびサイドブロックの傾斜が確認された。

P₈橋脚もかけ違い部であり,P₇橋脚側,P₉橋脚側,それぞれに矩形のゴム支承が2基設置されている。P₇橋脚側支承線のG1支承には,ゴム支承本体と下鋼板との境界部の始点側,終点側の両側にき裂が発生した。

P₉橋脚側支承線のG1支承,G2支承では,取付ボルトの折損に伴うサイドブロックの損傷が確認された。

A₂橋台上には,1支承線上に2基の矩形のゴム支承が設置されており,両支承ともに橋軸直角方向(海側)に変形し,海側のサイドブロックに接触しており,ゴム支承表面の被覆ゴムに剥がれが確認された。山側面においても,サイドブロックに接触した痕跡が確認された。

3. 試験計画

(1) 供試体諸元

供試体諸元を表-2に,供試体寸法を図-3に示す。地震により損傷を受けたとみられるAs₁橋台上の支承3基(以下,As₁-G1,As₁-G2,As₁-G3と称す),P₁橋脚上のP₂側の支承2基(以下,P₁-G1,P₁-G2と称す),P₈橋脚上のP₇側の支承2基(以下,P₈-G1,P₈-G2と称す)の計7基を実橋から取り出し,試験による評価を行った。また,取り出した支承と各種特性を比較するために経年的な影響を受けていない供試体としてAs₁橋台上の支承(以下,As₁-Newと称す),P₁橋脚上のP₂側の支承(以下,P₁-Newと称す),P₈橋脚上のP₇側の支承(以下,P₈-Newと称す)を新たに製作し,撤去支承と同様に評価を行う。なお,As₁-Newではゴム支承の側面被覆ゴムを除く平面寸法が撤去支承のφ700からφ740に40mm大きくなっている。

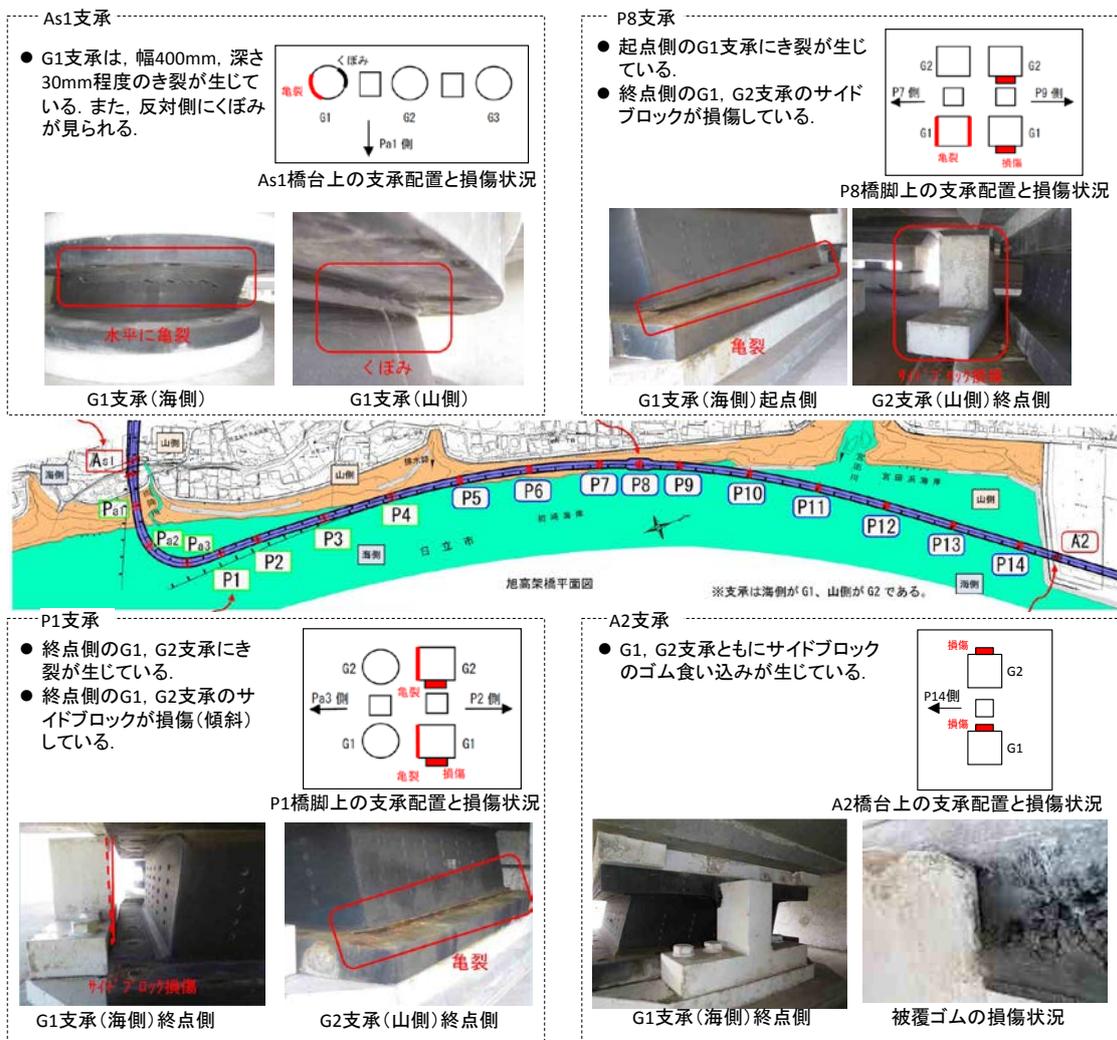


図-2 鉛プラグ入り積層ゴム支承の被害状況

(2) 力学的特性の評価

試験計画を表-3に示す。力学的特性の評価のための各試験の目的と試験内容を以下に示す。

a) 特性値(等価剛性、等価減衰定数)の変化

撤去支承に対する等価剛性、等価減衰定数の計測結果から、出荷前と撤去後の計測値を評価し、地震による特性値の変化について検証するために、出荷時の品質管理と同様の条件で、水平方向の正負交番繰返し载荷試験を実施し、等価剛性、等価減衰定数を評価する。

レベル2地震動に対する設計上の許容変位に相当するせん断ひずみ250%の0.7倍となるせん断ひずみ175%(有効設計変位)を11回繰返し与える。対象は大きなき裂が確認されたAs1-G1を除く全ての供試体を対象とした。

なお、特性値の変化には、地震による影響に加え、供用後約7年間の経年的な材料特性の変化による要因も含まれていると考えられる。

b) 供用期間中に発生する地震による作用に対する安定性

の評価

地震応答の継続時間中に安定して機能することを検証するために、レベル2地震動に対する設計上の供用変位に相当するせん断ひずみ250%を正負繰返しにより6回与える。対象は、撤去支承は、As1-G2、P1-G1、P8-G2、新規支承はAs1-New、P1-New、P8-Newとした。

c) 水平せん断力によって支承部の機能が失われる状態の評価

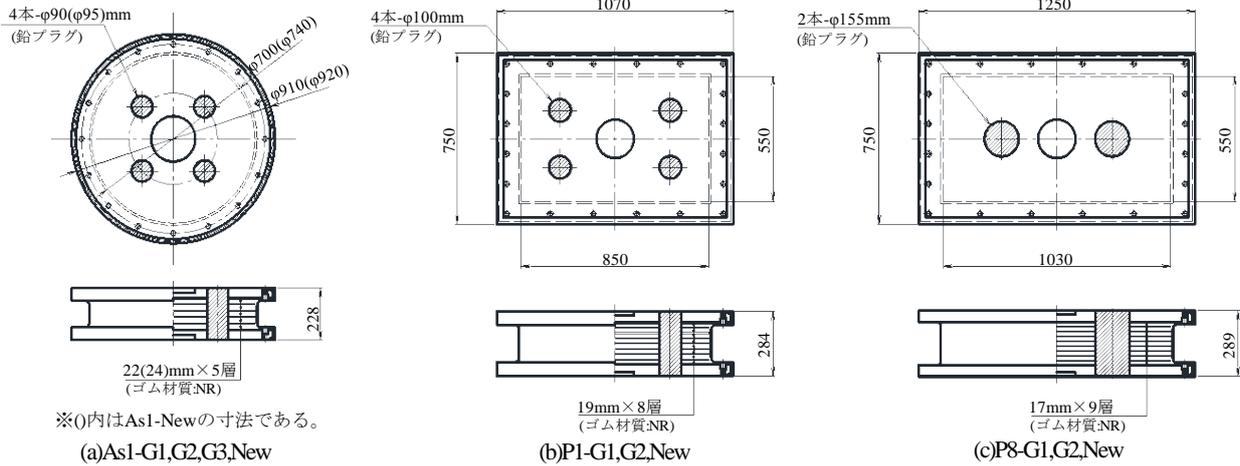
撤去支承が有する水平耐荷力を確認し、終局限界状態に対する安全余裕度を評価するために、水平荷重が急激に低下するまで水平変位を単調载荷により与える。

d) 引張荷重による損傷の有無

As1橋台のG1支承については、曲線橋の端支点であることから、地震時に大きな引張力が生じたことにより、ゴム支承にき裂が生じた可能性が考えられる。そこで、引張剛性の計測結果から、地震によって降伏に至るような過大な引張力を経験したか評価するために、平成16年道路橋支承便覧⑨に記載の許容引張応力度の1/2に相当する上向き力を与え、荷重-変位関係を計測する。対

表-2 供試体諸元

供試体名	平面タイプ □or○	ゴム本体辺長		本体径 D (mm)	せん断 弾性係数 G (N/mm ²)	ゴム1層厚 t (mm/層)	ゴム層数 n (層)	ゴム総厚 Σt (mm)	鉛プラグ 径 d (mm)	鉛プラグ 本数 (mm)	一次 形状係数 S1	二次 形状係数 S2	ゴム部 断面積 Ar (mm ²)	鉛部 断面積 Ap (mm ²)	ゴム全体 断面積 As (mm ²)
		橋軸 A (mm)	橋軸直角 B (mm)												
As1-G1	○	-	-	700	1.0	22	5	110	90	4	7.95	6.36	359398	25447	384845
As1-G2	○	-	-	700	1.0	22	5	110	90	4	7.95	6.36	359398	25447	384845
As1-G3	○	-	-	700	1.0	22	5	110	90	4	7.95	6.36	359398	25447	384845
As1-New	○	-	-	740	1.0	24	5	120	95	4	7.71	6.17	401731	28353	430084
P1-G1	□	550	850	-	1.0	19	8	152	100	4	8.79	3.62	436084	31416	467500
P1-G2	□	550	850	-	1.0	19	8	152	100	4	8.79	3.62	436084	31416	467500
P1-New	□	550	850	-	1.0	19	8	152	100	4	8.79	3.62	436084	31416	467500
P8-G1	□	550	1030	-	1.0	17	9	153	155	2	10.55	3.59	528762	37738	566500
P8-G2	□	550	1030	-	1.0	17	9	153	155	2	10.55	3.59	528762	37738	566500
P8-New	□	550	1030	-	1.0	17	9	153	155	2	10.55	3.59	528762	37738	566500



※()内はAs1-Newの寸法である。

(a)As1-G1,G2,G3,New

(b)P1-G1,G2,New

(c)P8-G1,G2,New

図-3 供試体寸法

表-3 試験計画

項目	細目	規格	撤去支承						新規支承				
			As1		P1		P8		As1	P1	P8		
			G1	G2	G3	G1	G2	G1	G2	As1	P1	P8	
力学的特性 試験	a 特性値の評価	有効設計変位 (せん断ひずみ175%)×11回	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
		設計鉛直反力		●	●	●	●	●	●	●	●	●	
	b 供用期間中に発生する地震による作用に対する安定性の評価	設計限界変位 (せん断ひずみ250%)×6回		●		●			●	●	●	●	
	c 水平せん断力によって支承部の機能が失われる状態の評価	破断変位 (破断するまで単調載荷)		●		●			●				
	d 引張荷重による損傷の有無の評価	許容引張応力度の1/2		●	●						●		
	e 鉛直引張力によって支承部の機能が失われる状態の評価	降伏応力度			●								
f 引張力が作用した状態における、供用期間中に発生する地震による作用に対する安定性の評価	許容引張応力度の1/2を載荷した状態で設計限界変位 (せん断ひずみ250%)×6回									●			
材料特性 試験	a 引張試験	JIS K 6251	●				●	●					
	b せん断変形試験	JIS K 6254	●				●	●					
	c デューローメータ硬さ試験	JIS K 6253	●				●	●					
	d 接着剥離試験	JIS K 6256	●				●	●					
	e 老化防止剤残量試験	JIS K 0123	●				●	●					
	f 溶存酸素量	—	●				●	●					
	g 蛍光X線分析及びX線回折分析	—	●				●	●					
観察調査	a 外観観察	—	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
	b 切断面観察	—	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	

象は、引張による損傷の可能性がある As1 橋台上の支承のうち、外観上損傷のみられない G2, G3 支承とする。また、撤去支承と荷重-変位関係を比較するために、As1 新規支承でも同じ試験を行う。

e) 鉛直引張力によって支承部の機能が失われる状態の評価

鉛直引張力によって支承部の機能が失われる状態を評

価するために、荷重-変位関係において、降伏域に達するまで上向き力を単調載荷により与える。対象は、曲線橋の端支点の支承であり、引張力の影響を受けた可能性がある As1 橋台上の G3 支承とする。

f) 引張力が作用した状態における、供用期間中に発生する地震による作用に対する安定性の評価

引張力が作用した状態で、安定した力学的特性を有し

ているか確認するために、許容引張応力度相当の鉛直引張力を与えた状態で、設計限界状態に相当する水平変位を正負交番载荷により与え、荷重-変位関係や外観の状態を確認する。対象を新規支承の As1-New を対象とする。

(3) 材料特性の評価

撤去支承の材料特性を評価するために、ゴム支承から試験片を切り出し、以下に示す試験を行った。

- a) 引張試験
- b) せん断変形試験
- c) デュロメータ硬さ試験
- d) 接着剥離試験
- e) 老化防止剤残量試験
- f) 溶存酸素量試験
- g) 蛍光 X 線分析及び X 線回折分析

(4) 観察調査

ゴム支承の損傷状況を評価するために、鉛プラグ入り積層ゴム支承を切断し、支承の切断面および鉛プラグの調査を行った。

3. 試験結果

(1) 力学的特性の評価

a) 特性値の変化（等価剛性，等価減衰定数，圧縮たわみ量）

As1-G2, P1-G1, P8-G1 の有効設計変位（せん断ひずみ 175%）における水平荷重とせん断ひずみの関係を図-4 に、等価剛性の変化を図-5 に、等価減衰定数の変化を図-6 に示す。また、各支承の出荷時及び新たに製作した新規支承 As1-New, P1-New, P8-New の水平荷重と水平変位の関係をあわせて示す。

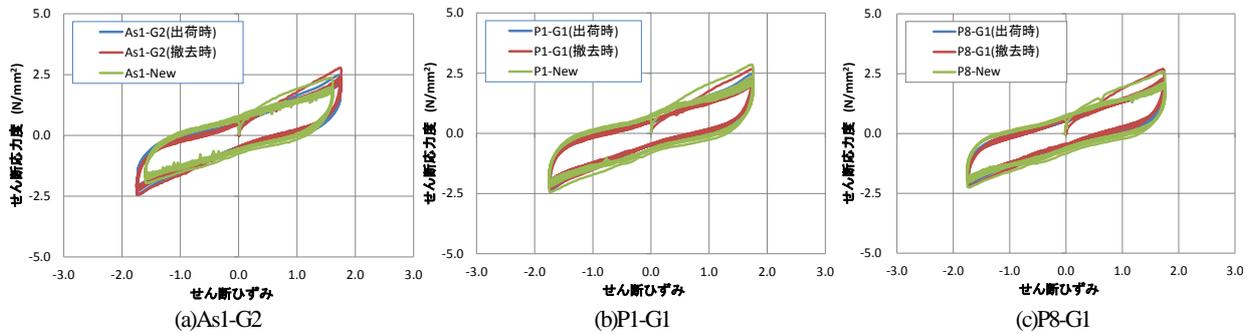


図-4 有効設計変位におけるせん断応力度とせん断ひずみの関係

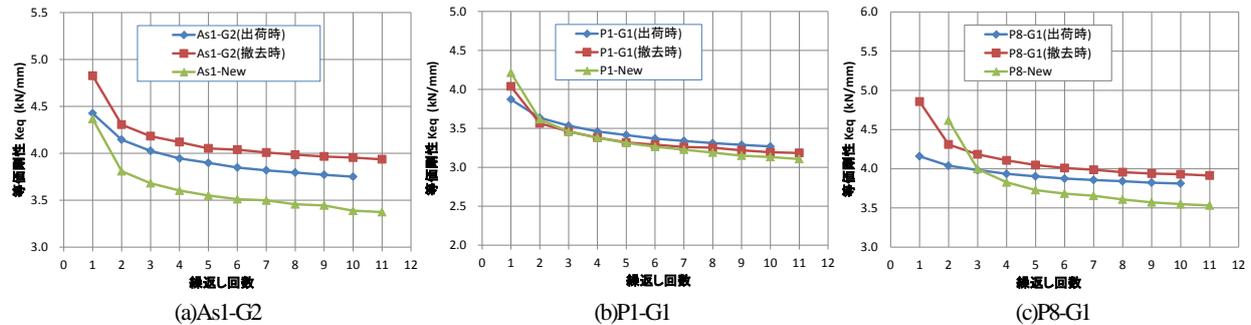


図-5 有効設計変位における等価剛性の変化

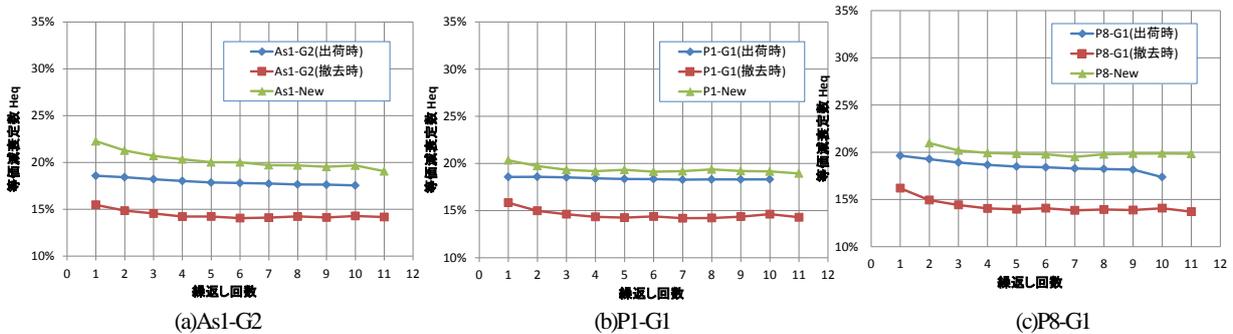


図-6 有効設計変位における等価減衰定数の変化

等価剛性については、As1-G2 と P8-G1 において、出荷時よりも本試験時の方が大きくなる傾向にあった。一方、P1-G1 では、出荷時から大きな変化はなかった。

等価減衰定数については、いずれの支承も出荷時よりも本試験時の方が小さくなる傾向にあった。したがって、出荷時よりも減衰能が低下していると考えられる。

P1-G1 支承のせん断ひずみ175%を与えた時の状況を写真-1に示す。き裂はゴム本体内部に進行しており、下鋼板が露出し、さびが浮いている状況を確認できる。このため撤去支承では、水平荷重とせん断ひずみの関係における履歴ループの面積が小さくなったものと考えられる。

b) 供用期間中に発生する地震による作用に対する安定性の評価

As1-G2, P1-G1, P8-G2, As1-New, P1-New, P8-



写真-1 有効設計変位時のせん断変形の状況 (P1-G1)

New を対象に、レベル2地震時の許容ひずみに相当する水平変位を正負交番荷重により与えた。水平荷重と水平変位の関係を図-7に、As1-G2の等価剛性の変化を図-8に、As1-G2の等価減衰定数の変化を図-9に示す。As1-G2, As1-Newについては、ともに安定した履歴を示した。As1-G2の方が剛性が大きくなっていることがわかる。

P1-G1については、1サイクル目の正方向の加振の途中、せん断ひずみ216%で、上鋼板と内部鋼板の間のゴム層で破断が発生し、設計限界変位に相当するせん断ひずみ250%に至らずに試験を終了した。P1-Newについては、安定した履歴を示した。

P8-G2についても、1サイクル目の正方向の加振の途中、せん断ひずみ236%で、上鋼板と内部鋼板の間のゴム層で破断が発生し、設計限界変位に相当するせん断ひずみ250%に至らずに試験を終了した。P8-Newについては、安定した履歴を示した。

c) 水平せん断力によって支承部の機能が失われる状態の評価

水平せん断力によって支承部の機能が失われる状態の評価するために、せん断ひずみ250%試験で破断しなかったAs1-G2支承を対象に水平変位を単調荷重によって与えた。As1-G2の水平荷重とせん断ひずみの関係を図-10に示す。As1-G2は水平荷重2264kN、せん断ひずみ276%において、写真-2に示すように上鋼板と内部鋼板の間のゴム部で破断した。なお、破断時の水平荷重は

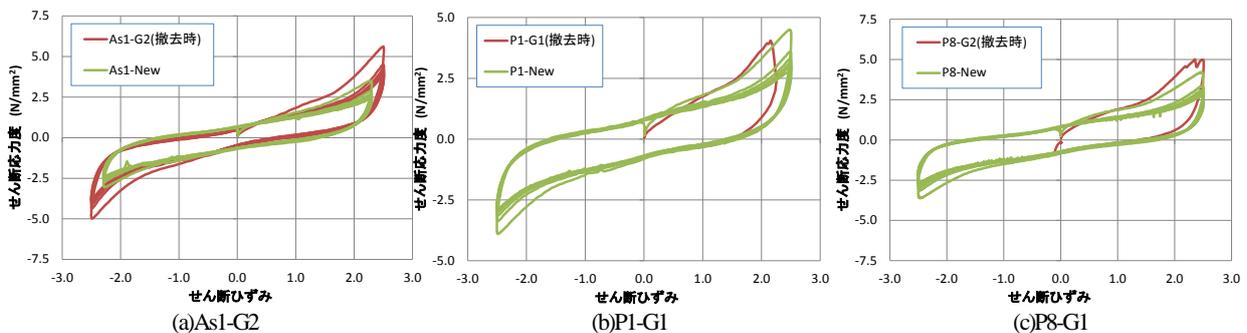


図-7 設計限界変位におけるせん断応力度とせん断ひずみの関係

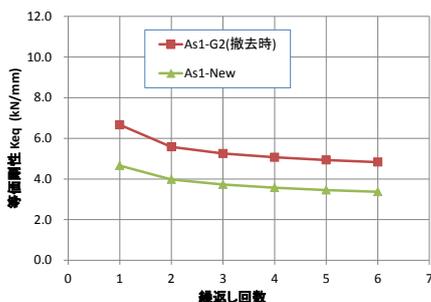


図-8 設計限界変位における等価剛性の変化(As1-G2)

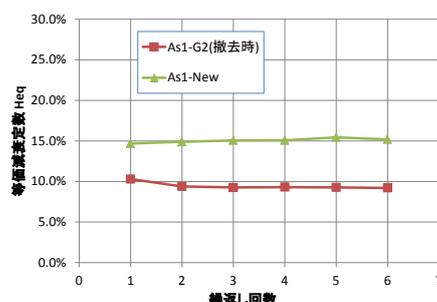


図-9 設計限界変位における等価減衰定数の変化(As1-G2)

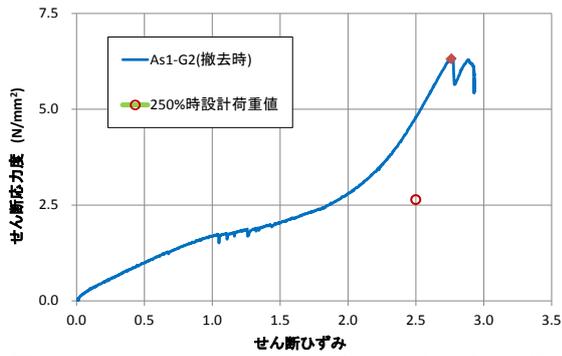


図-10 単調載荷における水平荷重とせん断ひずみの関係



写真-2 破断直後の状況 (As1-G2)

設計上のせん断ひずみ 250%時の水平荷重を 2 倍以上、上回るものである。

d) 引張荷重による損傷の有無

ゴム支承の許容引張応力度の 1/2 に相当する引張荷重を与えた時の引張剛性の差異によって、内部鋼板と加硫ゴムの剥離などの内部の損傷の有無が評価できないか検討するために、曲線橋であるランプ橋の端支点にあった As1-G2, As1-G3, As1-New を用いて鉛直引張試験を行った。鉛直荷重と引張変形量の関係を図-11 に示す。

図-11 より、引張剛性は As1-New と比べて、As1-G2 では小さく、As1-G3 では大きくなった。新規支承より引張剛性が大きくなった As1-G3 では、ゴム材料の特性に変化により引張剛性が増加した可能性がある。また、新規支承より引張剛性が小さくなった As1-G2 では、内部鋼板と加硫ゴムの剥離など何らかの変状が生じている可能性があると考えられる。

e) 鉛直引張力によって支承部の機能が失われる状態の評価

鉛直引張力によって支承部の機能が失われる状態を評価するために、As1-G3 を対象に降伏引張応力度相当の鉛直引張荷重を与え、鉛直荷重と鉛直変位の関係性を評価した。

鉛直荷重と鉛直変位の関係を図-12 に示す。道路橋支承便覧に示されている許容引張応力度 2.0N/mm^2 に相当

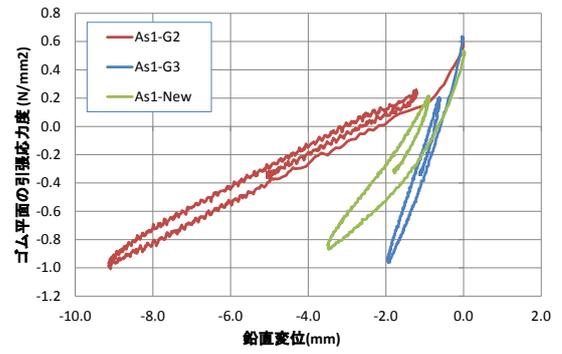


図-11 引張応力度と鉛直変位の関係 (許容引張応力度の 1/2 載荷)

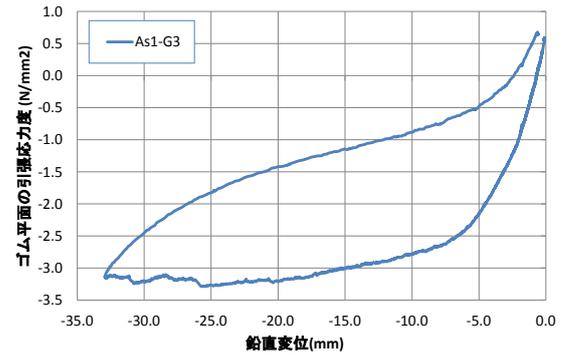


図-12 引張応力度と鉛直変位の関係 (終局に至るまで載荷)

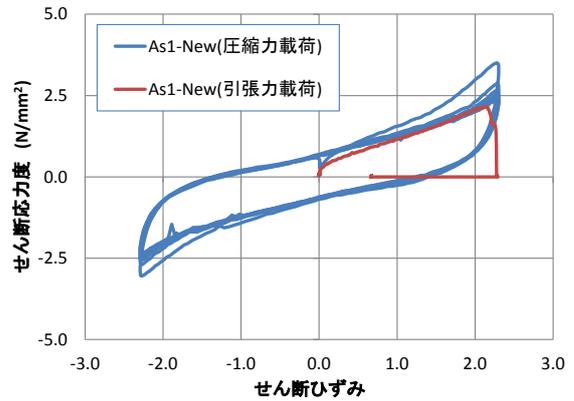


図-13 圧縮力載荷時と引張力載荷時の水平荷重とせん断ひずみの関係

する鉛直荷重 700kN では、まだ降伏には至っておらず、鉛直荷重 900kN(引張応力度 2.5N/mm^2)程度で降伏に至ったことがわかる。

f) 引張力が作用した状態における、供用期間中に発生する地震による作用に対する安定性の評価

引張力が作用した状態で、安定した力学的特性を有しているか確認するために、As1-New を対象に許容引張応力度相当の鉛直引張力を与えた状態で、設計限界状態に相当する水平変位を正負交番載荷により与え、水平荷重と水平変位の関係や外観の状態を確認する。

設計死荷重相当の圧縮力載荷時と許容引張応力度に相

当する引張力載荷時の水平荷重とせん断ひずみの関係を図-13に示す。正負交番載荷の1回目の正方向の加振途中に、せん断ひずみ236%で破断に至った。As1-Newは設計死荷重相当の圧縮応力を載荷した状態では、せん断ひずみ250%の6回繰返し載荷を行うことができたが、許容引張応力度相当の鉛直引張力が作用した状態では、せん断ひずみ250%に至らず破断する結果となった。

(2)材料特性の評価

ゴムや鉛の材料特性の変化を評価するために、ゴム支承を切断・解体し、試験片を取り出した上で各種材料試験を行った。各支承の試験片の取り出し位置を図-14に示す。材料特性の評価はAs1-G1, P1-G2, P8-G1を対象に行ったが、ここではAs1-G1の試験結果のみを示す。

a)引張試験

JIS K 6251に基づき、ダンベル状3号形の試験片を用いて、引張試験を行った。各支承の引張強さ及び切断伸びと表面からの距離の関係を図-15に示す。

引張強さについては、すべての支承において規格値15N/mm²以上を満足したが、破断時伸びについては規格値550%を満足するものは無かった。これは参考文献5)に示される仙台東部道路、仙台北部道路で供用されていた支承の試験結果と同様の傾向である。表面からの距離との関係では、表面近くにおいて引張強さ、破断伸びがやや低下する傾向が示された。

b)せん断変形試験

JIS K 6254に基づき、短冊1号形の試験片を用いて、25%静的せん断弾性率を算出した。各支承のせん断弾性率と表面からの距離の関係を図-16に示す。せん断弾性率については、表面付近において、せん断弾性率が増加する傾向が示された。

c)デュロメータ硬さ試験

JIS K 6253に基づき、デュロメータ硬さを算出した。各支承のデュロメータ硬さと表面からの距離の関係を図-17に示す。デュロメータ硬さは表面付近において、やや硬化する傾向が示された。

d)接着剥離試験

JIS K 6256に基づき、写真-3に示す試験片を用いて、90度はく離試験を行った。はく離強さと表面からの距離の関係を図-18に示す。いずれの距離においても規格値7N/mmを上回るはく離強さを示した。

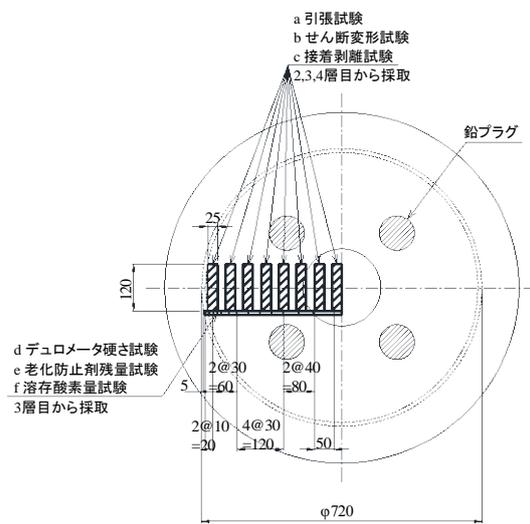


図-14 試験片取り出し位置図(As1-G1)



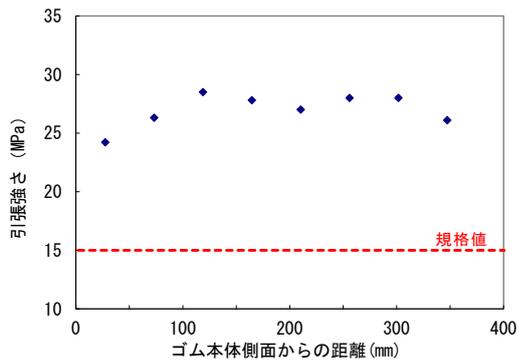
写真-3 90° はく離試験の試験片

e)老化防止剤残量試験

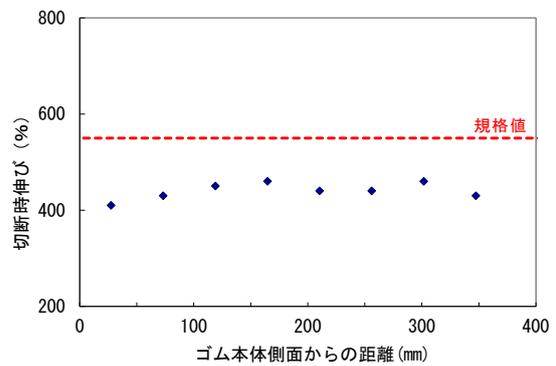
老化防止剤には、主にオゾン劣化防止剤としてゴムに配合されている6PPDと、主に耐熱老化防止剤としてゴムに配合されているTMDQの2種類がある。これらの老化防止剤を抽出するためにGC/MS(ガスクロマトフラフィー質量分析計)で定性試験を行い、GC(ガスクロマトグラフ)で定量試験を行った。各支承の6PPD及びTMDQの濃度と表面からの距離の関係を図-19に示す。6PPDについては、表面から30mm程度の範囲において、濃度が低下している。これは、表面付近の6PPDが外部に析出しているためと考えられる。TMDQについては、表面からの距離に関係なく一定の濃度を保っていることがわかる。

f)溶存酸素量試験

溶存酸素量を評価するためにマイクロオーダーで酸素量試験を行った。溶存酸素濃度と表面からの距離の関係を図-20に示す。表面から20mm程度の範囲において、溶存酸素濃度が増加している。これは表面付近の酸化劣化によるものと考えられる。



(a)引張強さ



(a)破断時伸び

図-15 引張強さと破断時伸び(As1-G1)

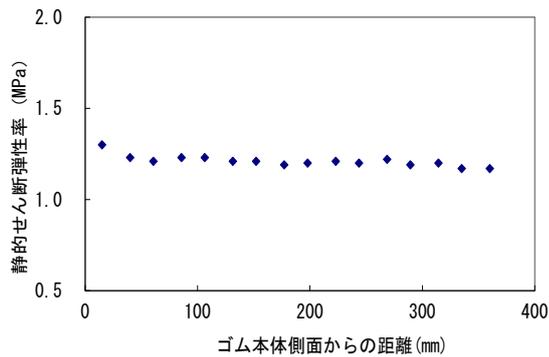


図-16 静的せん断弾性率(As1-G1)

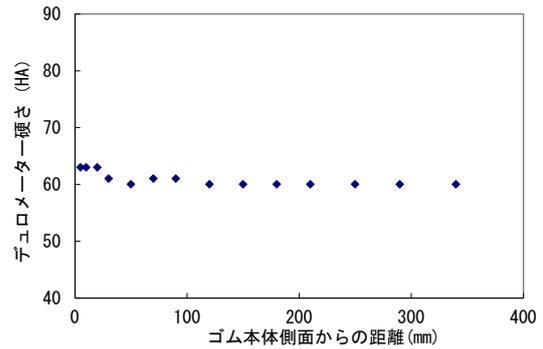


図-17 デュロメータ硬さ(As1-G1)

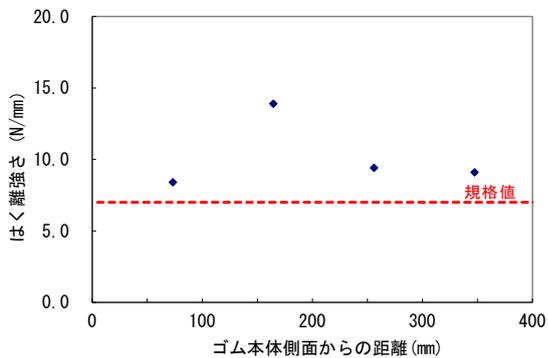


図-18 90度はく離強さ(As1-G1)

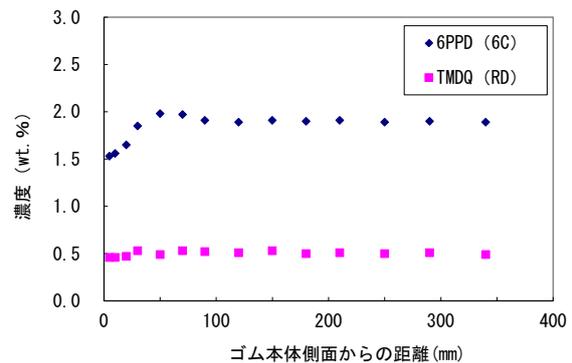


図-19 老化防止剤残量(As1-G1)

(3) 観察調査

ゴム支承の損傷状況を評価するために、鉛プラグ入り積層ゴム支承を切断し、切断面および鉛プラグの調査を行った。As1-G1の切断面を写真-4に、P1-G2の切断面を写真-5に、P8-G1の切断面を写真-6に示す。

地震により周囲41cmにわたりき裂が生じたAs1-G1支承は、表面に生じていたき裂は内部で内部鋼板とゴム層との境界に向かって屈曲して進展していたことがわかった。また、き裂が伸びていた内部鋼板とゴム層の間は一体化しておらず分離していた。

P1-G2支承の鉛プラグは茶褐色に変色している部分が見られ、上鋼板や下鋼板とゴム層の境界部で鉛塊の分離がみられた。茶褐色の物質を特定するために、蛍光 X

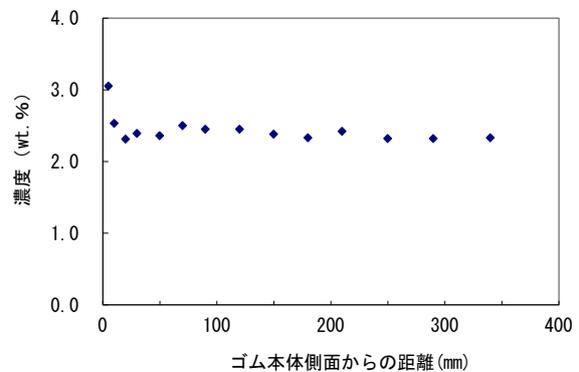
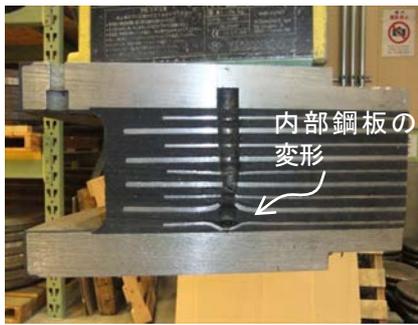


図-20 溶存酸素濃度分布(As1-G1)



(a) 位置決め孔周りの内部鋼板の変形



(b) き裂の進展方向



(c) き裂の破断面

写真4 AsI-G1の切断面



(a) 鉛プラグの外の変状



(b) 鉛プラグの切断面



(c) 鉛プラグの切断面

写真5 P1-G2の切断面



(a) 鉛プラグの切断面



(b) 支承の切断面



(c) 鉛プラグの切断面

写真6 P8-G1の切断面

線分析により鉛の構成元素を分析し、X線回折分析により鉛の元素を同定した。分析の結果、茶褐色部の主成分は酸化鉛であることが明らかになった。また、鉛プラグと拘束スプリングの間に空隙がみられた。

P8-G1 支承の鉛プラグは、鉛プラグに茶色の変色はみられなかったが、鉛プラグの上面や下面に鉛塊の分離がみられた。

5. 結論

本研究では、鉛プラグ入りゴム支承のき裂が発生した旭高架橋から損傷したゴム支承を取り出し、地震による損傷や経年的な劣化に伴う材料特性の変化がゴム支承の力学的特性に与える影響などを評価するために、取り出

した支承の外観調査、力学的特性の評価、切断による内部調査。切り出したゴム試験片を用いた材料特性の評価を行った。本研究で得られた主な知見を以下に示す。

- 1) 撤去支承を対象とした有効設計変位におけるせん断試験の結果、出荷時と比べて剛性は大きくなり、減衰能は低下していることが明らかになった。これは、ゴム材料の硬化や下鋼板とゴム層の境界部に生じたき裂が要因であると考えられる。
- 2) 撤去支承を対象とした設計限界変位における正負交番繰返しせん断試験の結果、AsI-G2 支承は安定した履歴ループを示したが、P1-G1、P8-G2 支承は、1 サイクル目の载荷において設計限界変位に相当するせん断ひずみ 250%に至る前に破断した。
- 3) 撤去支承と新規支承に許容引張応力度の 1/2 に相当する引張力を与えたところ、引張剛性は新規支承の

As1-New と比べて、撤去支承の As1-G2 では小さく、同じ撤去支承の As1-G3 では大きくなった。新規支承より引張剛性が大きくなった As1-G3 では、ゴム材料の特性に変化により引張剛性が増加した可能性がある。また、新規支承より引張剛性が小さくなった As1-G2 では、内部鋼板と加硫ゴムの剥離など何らかの変状が生じている可能性があると考えられる。

- 4) 新規支承の As1-New は設計死荷重相当の圧縮応力を載荷した状態では、せん断ひずみ 250%の 6 回繰返し載荷を行うことができたが、許容引張応力度相当の鉛直引張力が作用した状態では、せん断ひずみ 250%に至らない 236%で破断する結果となった。したがって、引張力が作用した状態では、ゴム支承のせん断変形能は低下する可能性があることが示された。
- 5) 地震により周囲 41cm にわたりき裂が生じた As1-G1 支承を切断解体した結果、表面に生じていたき裂は内部で内部鋼板とゴム層との境界に向かって屈曲していたことがわかった。また、き裂が伸びていた内部鋼板とゴム層は一体化しておらずはく離していた。
- 6) 撤去支承の一部の鉛プラグに茶褐色の物質が付着しており、蛍光 X 線分析および X 線回折分析の結果、これは酸化鉛であることが明らかとなった。対象橋の鉛プラグ入り積層ゴム支承は、上下面は完全にフランジにより密閉されていたが、隙間から水分が浸入し、鉛プラグを酸化させていたと考えられる。

謝辞

本研究は平成25年度から実施している(独)土木研究所、(株)高速道路総合技術研究所、首都高速道路(株)、阪神高速道路(株)、名古屋高速道路公社による「支承の長期耐久性に関する共同研究」の成果の一部である。また、本研究で用いた鉛プラグ入り積層ゴム支承は国土交通省

関東地方整備局常陸河川国道事務所の協力により提供して頂いた。ここに記して関係各位に謝意を表する。

参考文献

- 1) 建設省道路局：兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様，1995.2.
- 2) (財)土木研究センター：建設省道路橋の免震設計法マニュアル（案），1992.10.
- 3) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，1996.12.
- 4) 山田金喜，曾田信雄，木水隆夫，広瀬剛，名古屋和史，鈴木基行：東北地方太平洋沖地震により被災した東部高架橋のゴム支承に関する解析的検討，構造工学論文集，(公社)土木学会，Vol.59A，pp.527-539，2013.3.
- 5) 曾田信雄，山田金喜，木水隆夫，広瀬剛，鈴木基行：東北地方太平洋沖地震により破断した積層ゴム支承の性能試験，構造工学論文集，(公社)土木学会，Vol.59A，pp.516-526，2013.3.
- 6) 林訓裕，足立幸郎，甲元克明，八ツ元仁，五十嵐晃，党紀，東出知大：経年劣化した鉛プラグ入り積層ゴム支承の残存性能に関する実験的検証，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），(公社)土木学会，Vol. 70 No. 4，pp.1032-1042，2014.7.
- 7) 林訓裕，足立幸郎，五十嵐晃，党紀，濱野真彰，東出知大：積層ゴム支承の経年劣化損傷が残存性能に与える影響検討，第 17 回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp.197-202，2014.7.
- 8) (社)日本道路協会：道路橋支承便覧，2004.4.

EXPERIMENTAL EVALUATION OF PROPERTY OF LEAD RUBBER BEARING DAMAGED DUE TO EARTHQUAKE

Masatsugu SHINOHARA and Jun-ichi HOSHIKUMA

Laminated rubber bearings have been recommended to employ in bridges since the 1995 Kobe Earthquake, and the number of bridges designed with the laminated rubber bearings by a design earthquake (Level 2) has been increasing. It was observed during the 2011 Great East Japan Earthquake that some of those laminated rubber bearings in existing bridges suffered intensive damage including rupture and cracking. Because these laminated rubber bearings were uninstalled from the bridges for the replacement, authors conducted a series of tests for uninstalled bearings to examine the effect of the seismic damage or the aging on properties of the bearings or the material. Test results show that the stiffness of the uninstalled bearings with the damage was increased and the damping property was reduced. Stable hysteresis loop was observed in some rubber bearings, while premature rupture was observed in some rubber bearings at the shear strain of less than 250%.