

地震により残留変形が生じたゴム支承の残存性能に関する検討

高野 真¹・岡田 太賀雄²・大住 道生³

¹正会員 国立研究開発法人土木研究所 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 修(工) 国立研究開発法人土木研究所 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)

³正会員 修(工) 国立研究開発法人土木研究所 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)

1. はじめに

平成7年兵庫県南部地震以降，支承構造としてゴム支承が広く普及しており，ゴム支承のストックが増加している．そのため，ゴム支承の維持管理を適切に実施していく観点から，近年，長期間供用下にあったゴム支承の経年劣化に関する研究¹⁻³⁾や，地震により損傷したゴム支承の研究がなされている⁴⁻⁵⁾．一方でゴム支承を有する橋梁が大規模地震により被災し，ゴム支承に残留変形が生じた際，この残留変形がゴム支承の力学特性に及ぼす影響を検証した事例は少ない⁶⁾．このため，地震によりゴム支承に残留変形が生じた際の継続使用の可否についての判断が難しくなっている．本研究では，熊本地震で被災し，ゴム支承に残留変形が生じた後，約11ヶ月間経過した後，撤去されたゴム支承を用いて，その残存性能を確認するため，力学特性試験(水平せん断試験・鉛直力載荷試験)を実施し，残留変形がゴム支承のせん断ばね定数及び圧縮ばね定数に与える影響について検討を行った結果を報告する．

2. 検討橋梁の概要と支承の諸元

(1) 橋梁概況

本研究で対象とする地震時水平力分散ゴム支承で支持された橋梁の諸元を表-1に示す．平成10年12月竣工の谷部を渡河する橋長128m，5主桁，3径間連続曲線鋼桁橋であり，支承は円形の地震時水平力分散ゴム支承が用いられている．竣工後17年経過後，熊本地震において被災した．

表-1 橋梁諸元

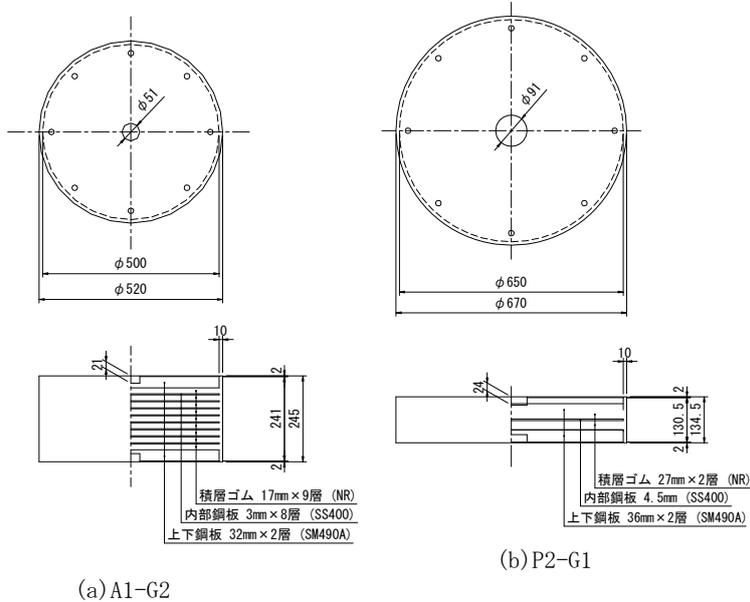
道路規格	第3種第2級
橋長	128.0m
支間長	L=38.900m+48.800m+38.900m
有効幅員	8.00m(車道)+3.50m(歩道)
平面線形	R=250m(A=100m)
上部構造形式	3径間連続曲線鋼桁橋
下部構造形式	橋台:逆T式橋台 橋脚:張出式橋脚
基礎構造形式	A1:直接基礎 P1, P2, A2深礎杭基礎
適用基準	平成8年道路橋示方書 平成3年道路橋支便覧

(2) 支承諸元

表-2に対象橋梁に使用されていた支承の諸元を示す．このうち本検討では，製品検査結果の残るA1橋台のG2主桁を支持する支承(以下，A1-G2支承)及びP2橋脚のG1主桁を支持する支承(以下，P2-G1支承)を対象とする．供試体の外形寸法を図-1に，現地状況を写真-1に示す．A1-G2支承はφ520mmの円形支承，せん断弾性係数は0.8N/mm²，内部の構成は単層厚さ17mmの9層，32mmの上下鋼板，ゴム単層間の内部鋼板は3mmの8層，P2-G1支承はφ670mmの円形支承，せん断弾性係数は1.2N/mm²，内部の構成は単層厚さ27mmの2層，36mmの上下鋼板，ゴム単層間の内部鋼板は4.5mmの8層の積層により構成され，A1-G2支承，P2-G1支承共に，ゴム側面は10mmの被覆ゴム，上鋼板の上面及び，下鋼板の下面を厚さ2mmの被覆ゴムにより覆われている．ゴムの種類は天然ゴム(NR)である．また内部鋼板の材質はSS400，上下鋼板はSM490Aが使用されている．二次形状係数はA1-G2が3.27，P2-G1が12.04である．二次形状係数は地震時の鉛直支持機能に対する安定性を示す

表-2 支承諸元

支承線	ゴム本体 平面寸法 φ (mm)	ゴム本体 全高 T	ゴム材質	せん断弾性 係数 G (N/mm ²)	ゴム1層 t (mm)	ゴム層数 n (層)	ゴム層厚 Σt (mm)	一次 形状係数 S1	二次 形状係数 S2	ゴム部 有効面積 A0 (N/mm ²)	せん断ばね 定数 Ks (kN/mm)	圧縮ばね定数 Kv (KN/mm)
A1, A2	520	245	NR	0.8	17	9	153	7.35	3.27	196,350	1.027	277
P1	670	166	NR	1.2	27	3	81	6.02	8.02	331,831	4.916	894
P2	670	134.5	NR	1.2	27	2	54	6.02	12.04	331,831	7.374	1,340



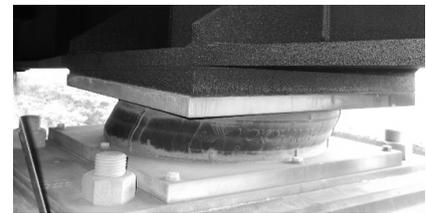
(a) A1-G2

(b) P2-G1

図-1 供試体寸法



(a) A1-G2 支承被害状況



(b) P2-G1 支承被害状況

写真-1 供試体支承の被害状況

指標であり、P2-G1 支承は A1-G2 支承に比べ、幅広で安定した鉛直支持機能を有することがわかる。せん断ばね定数は A1-G2 支承が 1.027kN/mm、P2-G1 支承が 7.374kN/mm、圧縮ばね定数は A1-G2 支承が 277kN/mm、P2-G1 支承が 1,340kN/mm である。なお、上記の圧縮ばね定数は平成3年道路橋支承便⁷⁾により算出し、二次形状係数は平成14年道路橋支承便⁸⁾に基づき算出している。

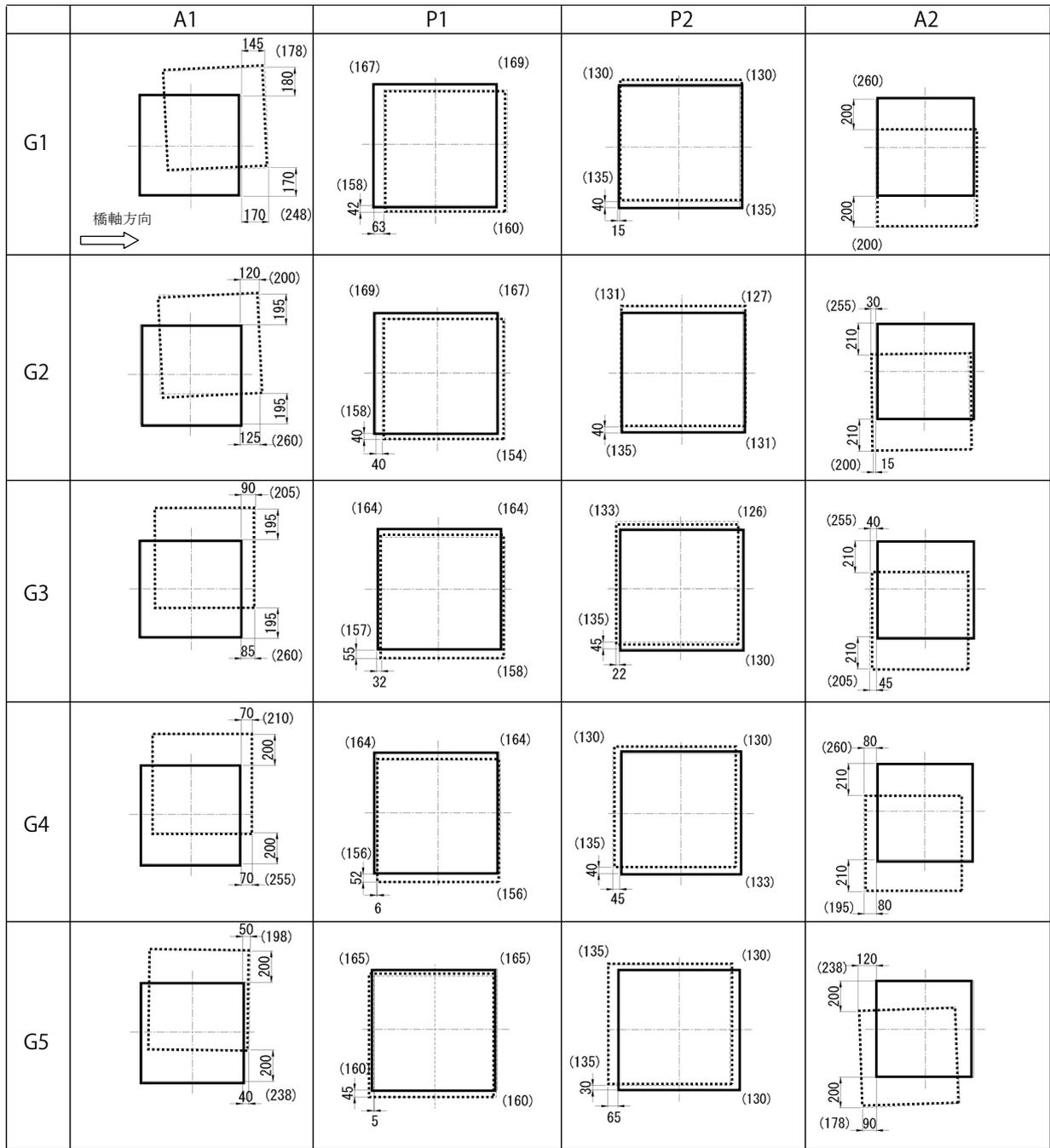
3. 支承部の残留変形

図-2に対象橋梁全てのゴム支承の残留変形を示す。変形量の計測は被災後約3ヶ月経過時点の現地計測結果である。計測位置は上沓及び下沓の形状が同一であることから、図-2(b)に示す上沓下面角部と下沓上面角部を現地にて計測することにより行い、橋軸方向、橋軸直角方向、鉛直方向それぞれの離隔寸法を計測している。各橋台、橋脚ごとの支承部における、水平方向の残留変形の傾向を以下に示す。橋軸方向の残留変形は、全ての支承で支間中央方向へ変形している。橋軸直角方向の残留変形は A1 橋台 P2 橋脚では起点側から見て上部構造が左側へ動く

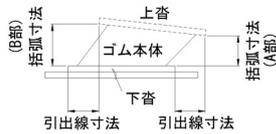
表-3 各支点の残留せん断ひずみ

支点		残留変形	せん断ひずみ	
		(mm)	(%)	
A1	G1	206	135	> 70
	G2	212	139	> 70
	G3	215	141	> 70
	G4	232	152	> 70
	G5	231	151	> 70
P1	G1	45	56	< 70
	G2	52	64	< 70
	G3	64	79	> 70
	G4	57	70	> 70
	G5	76	94	> 70
P2	G1	72	133	> 70
	G2	60	111	> 70
	G3	50	93	> 70
	G4	40	74	> 70
	G5	43	80	> 70
A2	G1	233	152	> 70
	G2	225	147	> 70
	G3	215	141	> 70
	G4	212	139	> 70
	G5	200	131	> 70

方向に変形し、P1 橋脚、A2 橋台では起点側から見て上部構造が右側へ動く方向に変形している。一方、鉛直方向の残留変形に着目すると、図-2(b)に示す上沓の突出側である A 部の離隔寸法が上沓の引込側である B 部の離隔寸法より小さくなる傾向が図-2(a)により確認できる。A 部側が圧縮力を受け、B 部側



(a) 各支承部の残留変形



(b) 計測位置

注1) 破線は上沓，実線は下沓を示す。
 注2) 引出寸法の計測位置は図-2(b)に示すの変位の実測値
 注3) 括弧内寸法は図-2(b)に示す離隔の実測値

図-2 ゴム支承の残留変形

が引張力を受けているものと想定される。表-3に残留変形及び残留変形をゴム層厚 Σt で除した各支点的残留せん断ひずみを示す。ここでの残留変形は図-2に示す橋軸方向、橋軸直角方向の変位の二乗和の最大値により算出している。せん断ひずみの参考値として、常時におけるせん断ひずみの許容値70%

と比較すると、多くの支承で70%以上のせん断ひずみが生じていることがわかる。なお、供試体の残留変形は、A1-G2支承が212mm、P2-G1支承が72mmと大きく異なる一方で、せん断ひずみはA1-G2支承が139%、P2-G1支承が133%と差異がない。

4. 供試体支承の外観状況

供試体ゴム支承を現地から撤去時に応力解放した後、約2ヶ月経過した後の外観状況を以下に示す。

写真-2にA1-G2の外観状況を示す。現地で212mmあった残留変形が9mmに減少していた。**写真-3**にA1-G2ゴム支承の表面に残る膨らみの状況を示す。この膨らみの位置は残留変形の生じた方向に合致し、圧縮側のゴム下部のみに生じていた。その他に目立った損傷等は見られなかった。

次に**写真-4**にP2-G1の外観状況を示す。現地で72mmあった残留変形が5mmに減少していた。**写真-5**にP2-G1支承のゴム表面に残る膨らみの状況を示す。A1-G2支承同様に、膨らみの位置は残留変形の生じた方向に合致し、圧縮側のゴム下部のみに生じていた。一部に撤去作業時にできた被覆ゴムの損傷が見られたがその他に目立った損傷等は見られなかった。

表-4に製品検査時及び上記供試体支承の外形寸法を、**図-3**に測定位置を示す。A1-G2支承のゴム厚さが1mm程度増加している。

5. 力学特性試験の概要

力学特性試験の目的と試験内容及び評価方法を以下に示す。ここでの試験方法は製品出荷時に行われた製品検査方法に従い行うこととした。なお、特性値の変化には残留変形による影響に加え、地震による影響、供用開始後から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。

(1) 水平せん断試験の方法と評価

水平方向の正負交番繰り返し载荷試験を実施する。試験条件を**表-5**に示す。試験方法は鉛直反力として死荷重反力を载荷した状態でせん断ひずみ±150%のせん断ひずみを3回与え、3回目のせん断ばね定数を評価値とする。なお、本試験の加振方向は製品検査時同様に橋軸方向加振により行う。

(2) 鉛直力载荷試験の方法と評価

鉛直方向の繰り返し载荷試験を実施する。試験条件を**表-6**に示す。試験方法は初期荷重0kNから最大反力までの载荷を3回行い、3回目の圧縮変位量を評価値とし、計算値以上の圧縮変位が生じることを確認する。



写真-2 A1-G1の外観



写真-3 A1-G2のゴム表面の膨らみ



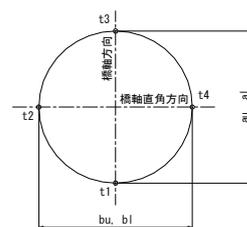
写真-4 P2-G1の外観



写真-5 P2-G1のゴム表面の膨らみ

表-4 製品検査時及び試験時の外形寸法

支承		(mm)							
		au	bu	al	bl	t1	t2	t3	t4
A1-G2	検査時	520.0	520.0	520.0	520.0	245.6	245.5	245.7	245.6
	試験時	520.0	520.0	520.0	520.0	246.6	246.8	247.1	246.8
P2-G1	検査時	670.0	670.0	670.0	670.0	134.5	134.5	134.5	134.5
	試験時	670.0	670.0	670.0	670.0	134.4	134.5	134.5	134.8



au ; 橋軸方向製品寸法 (上面)
al ; 橋軸方向製品寸法 (下面)
bu ; 橋軸直角方向寸法 (上面)
bl ; 橋軸直角方向寸法 (下面)
t1~t4 ; 厚さ

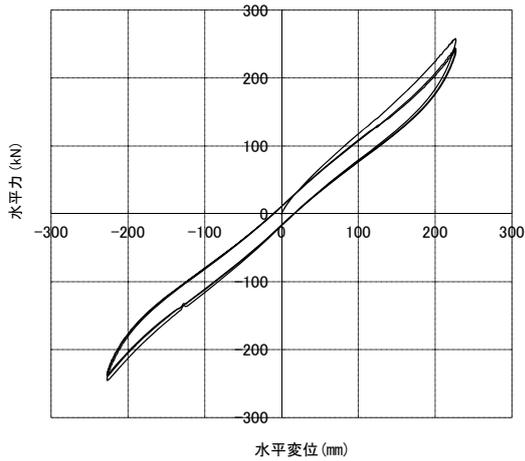
図-3 外形寸法測定位置

表-5 水平せん断試験の試験条件

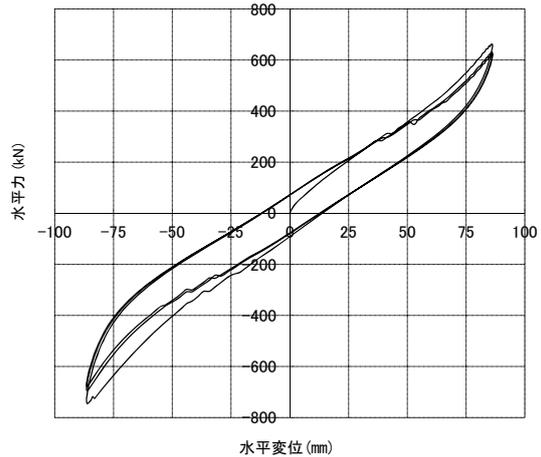
供試体名	鉛直荷重(面圧)	水平ひずみ(変位量)
A1-G2	514kN(2.6N/mm ²)	±150%(±230mm)
P2-G1	1651kN(5.0N/mm ²)	±150%(±81mm)

表-6 鉛直力载荷試験の試験条件

供試体名	载荷荷重(面圧)
A1-G2	0~880kN(4.5N/mm ²)
P2-G1	0~2372kN(7.1N/mm ²)

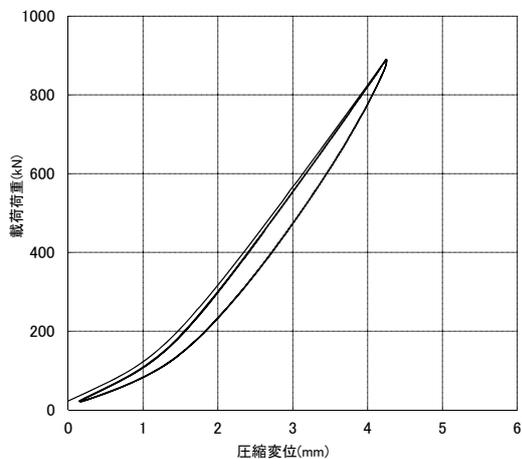


(a) A1-G2 支承

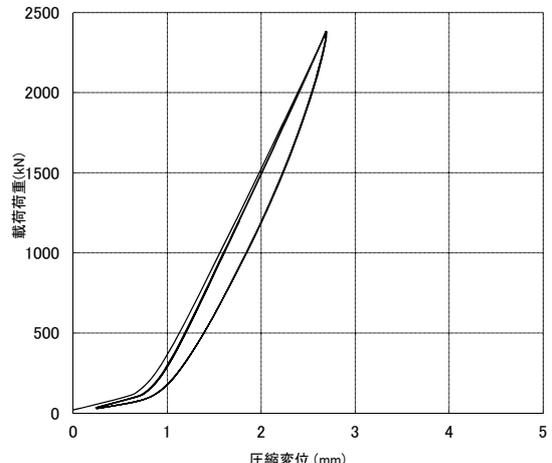


(b) P2-G1 支承

図-4 供試体支承の履歴曲線
(水平変位-水平力関係)



(a) A1-G2 支承



(b) P2-G1 支承

図-5 供試体支承の履歴曲線
(圧縮変位-載荷荷重関係)

6. 試験結果

(1) 水平せん断試験の結果

図-4に本試験により得られた履歴曲線を示す。製品検査当時の履歴曲線データが得られなかったため比較はできないが、3回の載荷によるばらつきは少なく、安定した履歴を示している。表-7に本試験で得られたせん断ばね定数の値、製品検査時の値、設計値、及び本試験で得られたせん断ばね定数と製品検査時、設計値との比率を示す。水平せん断試験の結果から、A1-G2支承のせん断ばね定数は製品検査時と比べ変化がなく、設計値と比べ1.9%上回っていた。P2-G1支承のせん断ばね定数は製品検査時と比べ3.0%増加、設計値と比べ1.4%上回っていた。

(2) 鉛直力載荷試験の結果

図-5に本試験により得られた履歴曲線を示す。製

表-7 水平せん断試験の結果

供試体名	せん断ばね定数(kN/mm)			試験結果との比率(%)	
	試験結果	製品検査時	設計値	対製品検査時	対設計値
A1-G2	1.05	1.05	1.03	0.0	+1.9
P2-G1	7.47	7.25	7.37	+3.0	+1.4

品検査当時の履歴曲線のデータが得られなかったため比較はできないが、3回の載荷によるばらつきは少なく、安定した履歴を示している。表-8に鉛直力載荷試験により得られた圧縮変位及び製品検査時の圧縮変位の比較を示す。A1-G2の圧縮変位は製品検査時と比べ0.9mm(26.5%)増加、P2-G1は0.5mm(22.7%)増加していた。圧縮変位の増加は圧縮ばね定数の低下を表すことから、供試体支承の圧縮ばね定数は低下しているものと考えられる。そこで圧縮応力度 1.5N/mm^2 から最大反力までの圧縮ばね定数を算定し、設計値との比較を行った結果を表-9に

表-8 鉛直力載荷試験の結果

供試体名	圧縮変位(mm)			試験結果との比率(%)
	試験結果	製品検査時	変位差	対製品検査時
A1-G2	4.3	3.4	0.9	+26.5
P2-G1	2.7	2.2	0.5	+22.7

表-9 圧縮ばね定数の比較

供試体名	圧縮ばね定数(kN/mm)		試験結果との比率(%)
	試験結果	設計値	対設計値
A1-G2	252	277	-9.0
P2-G1	1,241	1,340	-7.4

示す。本件での製品検査時の圧縮ばね定数は、品質管理項目ではないため、データがないことから、ここでは設計値との比較とした。その結果、A1-G2支承は9.0%、P2-G1支承は7.4%設計値より低い値を示した。なお圧縮ばね定数の計算値は平成3年道路橋支承便覧に基づき算出している。

7. まとめ

本研究では熊本地震により被災し、ゴム支承本体部に残留変形が生じた状態で、約11ヶ月経過した後、撤去されたゴム支承を用いて、その残存性能を確認するため、力学的特性試験を実施し、残留変形がゴム支承本体のせん断ばね定数及び圧縮ばね定数に与える影響を検討した。本研究の結果、供試体のゴム支承は、撤去による応力解放後、2ヶ月経過した段階で、残留変形が生じた方向の圧縮側ゴム下部に、膨らみが残っていたものの、製品検査時のせん断ばね定数と圧縮ばね定数に大きな変化が、生じていないことを確認した。

今後の課題として、ゴムに残った膨らみの原因解明と、検知方法につき考察する予定である。

謝辞：本研究の検証に用いたゴム支承は、国土交通

省九州地方整備局熊本河川国道事務所、熊本復興事務所により、設計値、検査結果は熊本県のご協力により提供して頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 井上崇雅, 青木康素, 星隈順一: 長期間共用されたパッド型ゴム支承の特性評価, 第19回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.413~418, 2016.
- 2) 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回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.197~202, 2014.
- 3) 大門大, 鈴木信勝, 山下章, 長谷川秀也: 既設ゴムダンパー(HDR-S)の劣化原因究明を目的とした材料試験, 第19回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.427~432, 2016.
- 4) 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.
- 5) 篠原聖二, 星隈順一: 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, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.71, No.4 (地震工学論文集第34巻), pp.1_587~1_599, 2016.
- 6) ゴム支承協会: 平成19年新潟中越沖地震を受けたゴム支承の調査報告書NO.1~NO.3, 2007.
<http://www.j-rba.com/php/gijutsu/index.php>
- 7) (社)日本道路協会: 道路橋支承便覧, 1991.
- 8) (社)日本道路協会: 道路橋支承便覧, 2004.