

ゴム支承の終局限界状態の評価に関する研究

篠原聖二¹・榎本武雄²・星隈順一³・岡田慎哉⁴・西弘明⁵・高橋良和⁶

¹正会員 修（工）（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 茨城県つくば市南原 1-6）

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 交流研究員（同上）

³正会員 博（工）（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（同上）

⁴正会員 博（工）（独）土木研究所 寒地土木研究所 寒地基礎技術研究グループ 主任研究員
（〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目 1 番 34 号）

⁵正会員 博（工）（独）土木研究所 寒地土木研究所 寒地基礎技術研究グループ 上席研究員（同上）

⁶正会員 博（工）京都大学准教授 工学研究科社会基盤工学専攻（〒615-8530 京都市西京区京都大学桂）

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、それまでに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²⁾が、新たに道路橋示方書³⁾に取り入れられたことにより、以降、ゴム支承が広く普及することとなった。

一方、2011 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^{4,5)}、仙台北部道路の利府高架橋^{4,5)}では、地震時水平力分散型ゴム支承の破断やき裂が、東水戸道路の新那珂川大橋では積層ゴム支承の破断が、国道 6 号線バイパスの旭高架橋⁶⁾では鉛プラグ入りゴム支承のき裂が確認されている。これらのゴム支承の損傷の要因については、伸縮装置を介した隣接桁からの過大な荷重伝達、ゴム本体の経年的な材料劣化、上部構造のクリープや乾燥収縮によりゴム支承に生じていた初期変位の影響などの可能性があると考えられている。このような要因が考えられる中、ゴム支承の品質管理の重要性も高まってきている。

このような背景のもと、平成 24 年道路橋示方書⁷⁾では、支承部は次に示す力学的特性が、使用される

条件を考慮した実験により明らかでなければならぬことが新たに規定された。

- ・支承部の機能が失われる状態が明らかであり、その状態に対する安全性が確保できること
- ・供用期間中に発生する地震による作用に対して安定して挙動すること

ここでいう実験とは、対象とするゴム支承の破壊までの力学的特性と地震時の繰り返し載荷に対する力学的特性を評価するために行う載荷実験であるが、実験結果により力学的特性を評価するための指標や閾値については研究データが十分ではないのが現状である。

また、鉛プラグ入りゴム支承や高減衰ゴム支承のような免震支承を用いた免震橋の設計では、橋の耐震性能が免震支承によるエネルギー吸収能に大きく依存しているため、使用する免震支承が有する力学的特性を適切に設計モデルに反映することが重要である。免震橋の動的解析に用いる免震支承の非線形履歴特性の設定方法は平成 16 年道路橋支承便覧⁸⁾（以下、H16 支承便覧）に示されているが、その後の調査研究や技術開発の進展によって、免震支承の力学的特性も変化してきていることを踏まえ、高橋ら⁹⁾は鉛プラグ入りゴム支承や高減衰ゴム支承の新たな設計モデルを提案している。ただし、この新たな設計モデルを構築するための試験データの供試体数は限られており、この設計モデルの一般的なゴム支承への適用性について検証しておく必要がある。

以上のような課題のもと、本研究ではゴム支承の

破壊までの力学的特性と地震時の繰り返し载荷に対する力学的特性を評価する手法を確立するための基礎データの蓄積を目的として、地震時水平力分散型ゴム支承 48 体、鉛プラグ入りゴム支承 34 体、高減衰ゴム支承 30 体を対象に、有効せん断ひずみ 175%、設計せん断ひずみ 250%、終局限界状態に相当するせん断ひずみ 300%の各せん断ひずみ水準における繰り返しせん断変形能試験や単調载荷による破断試験を行い、ゴム支承が有するせん断変形特性の整理及び分析を行った。

また、本研究で行った試験データをもとに、高橋ら⁹⁾が提案している鉛プラグ入りゴム支承及び高減衰ゴム支承の新たな設計モデルの適用性について実験値と設計値の比較を行った。

2. 試験条件

(1) 供試体諸元

供試体諸元について、地震水平力分散型ゴム支承 48 体を表-1 に、鉛プラグ入りゴム支承 34 体を表-2 に、高減衰ゴム支承 30 体を表-3 に示す。供試体はゴム支承を製造する国内の民間会社 9 社の製品である。供試体のせん断弾性係数は全て 1.2N/mm^2 とし、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は 250%とした。

(2) 载荷条件

载荷条件については、設計死荷重反力相当として圧縮応力度 6.0N/mm^2 となる鉛直荷重を载荷した状態で、正負交番繰返し変位、又は単調漸増変位を 8mm/sec 程度の比較的緩やかな速度で与えた。試験時の外気温は霽天気温度とした。

载荷ステップを表-4 に示す。ステップ 1 では、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）を正負繰返し与える。地震時水平力分散型ゴム支承については、繰返し回数は 3 回とし、3 回目の値で特性値を評価する。これは、H16 支承便覧の参考資料-14 より、3 回程度で履歴曲線が安定する傾向を示すことがわかっているためである。鉛プラグ入りゴム支承及び高減衰ゴム支承の免震支承については、繰返し回数を 11 回とし、2～11 回の 10 回の平均値で特性値を評価する。これは、ゴム支承は一般に、初期の载荷における水平力-水平変位関係が 2 回目以降の载荷における水平力-水平変位関係は大きく異なる特性を有しているためである。

ステップ 2 では、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許容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、2～6 回の 5 回の平均値で特性値を評価する。安定した挙動を評価する際の载荷繰返し回数を 5 回としたのは、様々な固有周期の振動系を対象とした地震応答解析による検討結果¹⁰⁾から、レベル 2 地震動に対する橋の応答では、最大振幅に対して 5 回程度の繰返し回数を考慮していれば安全側に評価できると考えられるためである。

ステップ 3 では、ゴム支承の破断や座屈などの損傷により鉛直方向及び水平方向の荷重伝達機能が失われる状態に対して適切な安全性が確保されていることを確認するために、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%に 1.2 倍の安全率を考慮したせん断ひずみ 300%（終局限界変位）に相当する変位を正負繰返しにより 2 回与え、ゴム支承の荷重伝達機能が失われないことを確認する。この状態はゴム支承本体の破断や座屈などの損傷により鉛直方向及び水平方向の荷重伝達機能が失われる直前の限界状態に相当する。

ステップ 4 では、ゴム支承の鉛直方向及び水平方向の荷重伝達機能が失われる状態を明らかにために、単調载荷により破断や座屈などの損傷が生じるまでせん断変位を与える。

3. 試験結果

(1) 地震時水平力分散型ゴム支承

地震時水平力分散型ゴム支承のせん断ひずみ 175%、250%、300%における水平力-水平変位の関係から、最大荷重と最大変位及び最小荷重と最小変位より求まる等価剛性を、H16 支承便覧に示されている等価剛性の算出式（以下、H16 式）で評価した結果を図-1 に示す。

せん断ひずみ 175%では、設計値に対して実測値が概ね $\pm 10\%$ の範囲内に入っていたが、250%、300%とせん断ひずみが大きくなるに従って、設計値に対して実測値が大きくなる結果となり、また、そのばらつきも大きくなっている。これは H16 式がせん断ひずみ 175%以上の領域において生じるハードニングの影響を考慮していないことによると考えられる。地震による作用に対して安定して挙動することを評価するために、設計限界変位（せん断ひずみ 250%）時の 1 回目の履歴における等価剛性に対する 5 回目の履歴における等価剛性の低減率、及び 2 回目の履歴における等価剛性に対する 6 回目の履歴における等価剛性の低減率を図-2 に示す。

表-1 地震時水平力分散型ゴム支承の供試体諸元

供試体 No.	平面形状		ゴム層厚			形状係数	
	橋軸	橋直	1層厚	層数	総厚	一次	二次
	mm	mm	mm	層	mm	—	—
R-1	240	240	11	5	55	5.455	4.364
R-2	240	240	7	5	35	8.571	6.857
R-3	240	240	7	8	56	8.571	4.286
R-4	240	240	7	10	70	8.571	3.429
R-5	240	240	11	5	55	5.455	4.364
R-6	240	240	7	5	35	8.571	6.857
R-7	240	240	7	8	56	8.571	4.286
R-8	240	240	7	10	70	8.571	3.429
R-9	240	240	11	5	55	5.455	4.364
R-10	240	240	7	5	35	8.571	6.857
R-11	240	240	7	8	56	8.571	4.286
R-12	240	240	7	10	70	8.571	3.429
R-13	240	240	11	5	55	5.450	4.360
R-14	240	240	7	5	35	8.580	8.860
R-15	240	240	7	8	56	8.580	4.290
R-16	240	240	7	10	70	8.580	3.430
R-17	240	240	7	5	35	8.571	6.857
R-18	240	240	7	8	56	8.571	4.286
R-19	240	240	7	10	70	8.571	3.429
R-20	240	240	10	3	30	6.000	8.000
R-21	240	240	10	3	30	6.000	8.000
R-22	240	240	10	4	40	6.000	6.000
R-23	240	240	10	4	40	6.000	6.000
R-24	240	240	10	7	70	6.000	3.429
R-25	240	240	10	7	70	6.000	3.429
R-26	240	240	10	8	80	6.000	3.000
R-27	240	240	10	8	80	6.000	3.000
R-28	240	240	10	9	90	6.000	2.667
R-29	240	240	10	9	90	6.000	2.667
R-30	240	240	10	10	100	6.000	2.400
R-31	240	240	11	5	55	5.455	4.364
R-32	240	240	7	5	35	8.571	6.857
R-33	240	240	7	8	56	8.571	4.286
R-34	240	240	7	10	70	8.571	3.429
R-35	240	240	11	5	55	5.455	4.364
R-36	240	240	7	5	35	8.571	6.857
R-37	240	240	7	8	56	8.571	4.286
R-38	240	240	7	10	70	8.571	3.429
R-39	240	240	10	4	40	6.000	6.000
R-40	240	240	10	6	60	6.000	4.000
R-41	240	240	10	8	80	6.000	3.000
R-42	240	240	10	10	100	6.000	2.400
R-43	240	240	7	5	35	12.000	8.000
R-44	240	240	11	5	55	12.000	4.000
R-45	400	400	16	6	96	11.111	4.040
R-46	400	400	18	5	90	5.556	4.444
R-47	400	400	12	5	60	8.333	6.667
R-48	600	600	18	5	90	8.333	6.667

表-4 載荷ステップ

載荷 STEP	変位	せん断 ひずみ	繰返し回数(回)	
			RB	LRB, HDR
1	有効設計変位 $0.7 \times d_a$	175%	3	11
2	設計限界変位 d_a	250%	6	6
3	終局限界変位 $1.2 \times d_a$	300%	2	2
4	破断変位	破断ひずみ	単調載荷 (破断するまで)	単調載荷 (破断するまで)

RB: 地震時水平力分散型ゴム支承
LRB: 鉛プラグ入りゴム支承
HDR: 高減衰ゴム支承

表-2 鉛プラグ入りゴム支承の供試体諸元

供試体 No.	平面形状		ゴム層厚			鉛プラグ				形状係数	
	橋軸	橋直	1層厚	層数	総厚	鉛径	本数	面積	面積比	一次	二次
	mm	mm	mm	層	mm	mm	本	Ap	$\kappa(Ap/Ae)$	—	—
L-1	240	240	11	5	55	34.5	4	3739	0.069	5.100	4.360
L-2	240	240	7	5	35	34.5	4	3739	0.069	8.010	6.860
L-3	240	240	7	5	35	34.5	4	3739	0.069	8.010	6.860
L-4	240	240	7	8	56	34.5	4	3739	0.069	8.010	4.290
L-5	240	240	7	8	56	34.5	4	3739	0.069	8.010	4.290
L-6	240	240	7	10	70	34.5	4	3739	0.069	8.010	3.430
L-7	240	240	7	10	70	34.5	4	3739	0.069	8.010	3.430
L-8	240	240	11	5	55	34.5	4	3739	0.069	5.100	4.364
L-9	240	240	11	5	55	34.5	4	3739	0.069	5.100	4.364
L-10	240	240	7	5	35	34.5	4	3739	0.069	8.015	6.857
L-11	240	240	7	5	35	34.5	4	3739	0.069	8.015	6.857
L-12	240	240	7	8	56	34.5	4	3739	0.069	8.015	4.286
L-13	240	240	7	8	56	34.5	4	3739	0.069	8.015	4.286
L-14	240	240	7	10	70	34.5	4	3739	0.069	8.015	3.429
L-15	240	240	7	10	70	34.5	4	3739	0.069	8.015	3.429
L-16	240	240	11	5	55	34.5	4	3739	0.069	5.100	4.364
L-17	240	240	11	5	55	34.5	4	3739	0.069	5.100	4.364
L-18	240	240	7	5	35	34.5	4	3739	0.069	8.015	6.857
L-19	240	240	7	5	35	34.5	4	3739	0.069	8.015	6.857
L-20	240	240	7	8	56	34.5	4	3739	0.069	8.015	4.286
L-21	240	240	7	8	56	34.5	4	3739	0.069	8.015	4.286
L-22	240	240	7	10	70	34.5	4	3739	0.069	8.015	3.429
L-23	240	240	7	10	70	34.5	4	3739	0.069	8.015	3.429
L-24	240	240	7	5	35	70	1	3848	0.072	8.000	6.860
L-25	240	240	11	5	55	70	1	3848	0.072	5.090	4.360
L-26	400	400	16	6	96	115	1	10387	0.069	5.840	4.170
L-27	400	400	11	6	66	115	1	10387	0.069	8.500	6.060
L-28	400	400	9	10	90	115	1	10387	0.069	10.390	4.440
L-29	400	400	18	5	90	57.5	4	10387	0.069	5.195	4.444
L-30	400	400	12	5	60	57.5	4	10387	0.069	7.792	6.667
L-31	600	600	17	5	85	85	4	22698	0.067	8.270	7.060
L-32	600	600	22	6	132	85	4	22698	0.067	6.390	4.550
L-33	600	600	14	10	140	85	4	22698	0.067	10.040	4.290
L-34	1000	1000	39	4	156	144	4	65144	0.070	5.993	6.410

表-3 高減衰ゴム支承の供試体諸元

供試体 No.	平面形状		ゴム層厚			形状係数	
	橋軸	橋直	1層厚	層数	総厚	一次	二次
	mm	mm	mm	層	mm	—	—
H-1	240	240	11	5	55	5.455	4.364
H-2	240	240	11	5	55	5.455	4.364
H-3	240	240	7	5	35	8.571	6.857
H-4	240	240	7	5	35	8.571	6.857
H-5	240	240	7	8	56	8.571	4.286
H-6	240	240	7	8	56	8.571	4.286
H-7	240	240	7	10	70	8.571	3.429
H-8	240	240	7	10	70	8.571	3.429
H-9	240	240	11	5	55	5.455	4.364
H-10	240	240	11	5	55	5.455	4.364
H-11	240	240	7	5	35	8.571	6.857
H-12	240	240	7	5	35	8.571	6.857
H-13	240	240	7	8	56	8.571	4.286
H-14	240	240	7	8	56	8.571	4.286
H-15	240	240	7	10	70	8.571	3.429
H-16	240	240	7	10	70	8.571	3.429
H-17	240	240	7	5	35	12.000	8.000
H-18	240	240	11	5	55	12.000	4.000
H-19	400	400	16	6	96	11.111	4.040
H-20	400	400	16	3	48	6.250	8.333
H-21	400	400	16	4	64	6.250	6.250
H-22	400	400	16	6	96	6.250	4.167
H-23	400	400	16	8	128	6.250	3.125
H-24	400	400	16	3	48	6.250	8.333
H-25	400	400	16	4	64	6.250	6.250
H-26	400	400	16	6	96	6.250	4.167
H-27	400	400	16	8	128	6.250	3.125
H-28	800	800	32	6	192	6.250	4.167
H-29	800	800	32	6	192	6.250	4.167
H-30	1000	1000	29	7	203	8.621	4.926

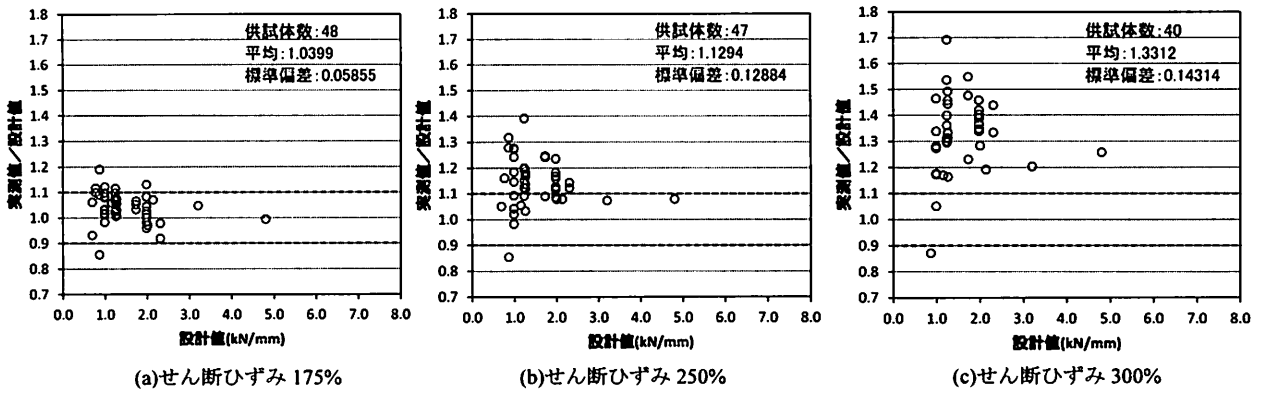


図-1 地震時水平力分散型ゴム支承における等価剛性の実測値と設計値（H16 式）の比較

1 回目の履歴における等価剛性に対する 5 回目の履歴の等価剛性の低減率をみると、30%以上低減している供試体がある。一般に、ゴム支承は初期の载荷における水平力-水平変位関係が 2 回目以降の载荷における水平力-水平変位関係と大きく異なる力学的特性を有している¹¹⁾。1 回目の履歴がこの初期载荷の影響を含んでいるため、5 回目の履歴における等価剛性の低減率が大きくなったものと考えられる。初期载荷の影響を含まない 2 回目の履歴における等価剛性に対する 6 回目の履歴における等価剛性の低減率では、二次形状係数 4 以上の範囲では最大でも 20%程度の低減率に収まる結果となった。

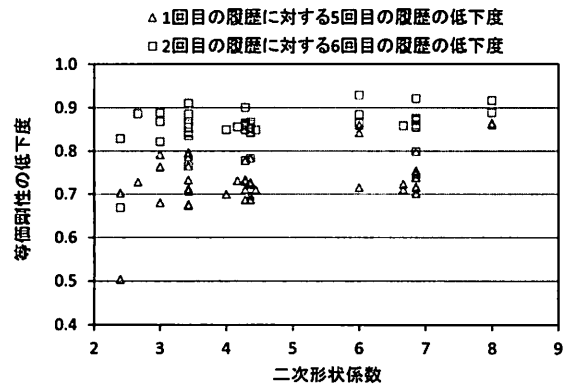


図-2 地震時水平力分散型ゴム支承における等価剛性の低下度

(2) 鉛プラグ入りゴム支承

・等価剛性の評価

鉛プラグ入りゴム支承のせん断ひずみ 175%、250%、300%における水平力-水平変位の関係から、最大荷重と最大変位及び最小荷重と最小変位より求める等価剛性を、H16 支承便覧に示されている等価剛性の算出式で評価した結果を図-3 に示す。

前述の地震時水平力分散型ゴム支承同様、せん断ひずみ 175%では、設計値に対して実測値が概ね±10%の範囲内に入っていたが、250%、300%とせん断ひずみが大きくなるに従って、設計値に対して実測値が大きくなる結果となり、また、そのばらつきも大きくなっている。これは H16 式がせん断ひずみ 175%以上の領域において生じるハードニングの影響を考慮していないことによると考えられる。

これに対して、同じ実測値を高橋ら⁹⁾が提案する等価剛性の算出式（以下、提案式）で評価した結果を図-4 に示す。250%、300%においても、H16 式と比較して、設計値に対して実測値が±10%に入る割合が多くなっていることがわかる。これは、提案式がせん断ひずみ 175%以上の領域において生じるハードニングの影響を適切に考慮していることによるものと考えられる。

供用期間中に発生する地震による作用に対して安定して挙動することを評価するために、設計限界変位（せん断ひずみ 250%）時の 1 回目の履歴における等価剛性に対する 5 回目の履歴の等価剛性の低減率、及び 2 回目の履歴における等価剛性に対する 6 回目の履歴における等価剛性の低減率を図-5 に示す。1 回目の履歴における等価剛性に対する 5 回目の履歴の等価剛性の低減率をみると、地震時水平力分散型ゴム支承同様、30%以上低減している供試体がある。これは 1 回目の履歴が初期载荷の影響を含んでいるため、5 回目の履歴における等価剛性の低減率が大きくなったものと考えられる。初期载荷の影響を含まない 2 回目の履歴における等価剛性に対する 6 回目の履歴における等価剛性の低減率では、最大でも 20%程度の低減率に収まる結果となった。

・減衰特性の評価

供用期間中に発生する地震による作用に対して安定して挙動することを評価するために、設計限界変位（せん断ひずみ 250%）時の 1 回目の履歴におけるエネルギー吸収量に対する 5 回目の履歴のエネルギー吸収量の低減率、及び 2 回目の履歴におけるエネルギー吸収量に対する 6 回目の履歴におけるエネルギー吸収量の低減率を図-6 に示す。

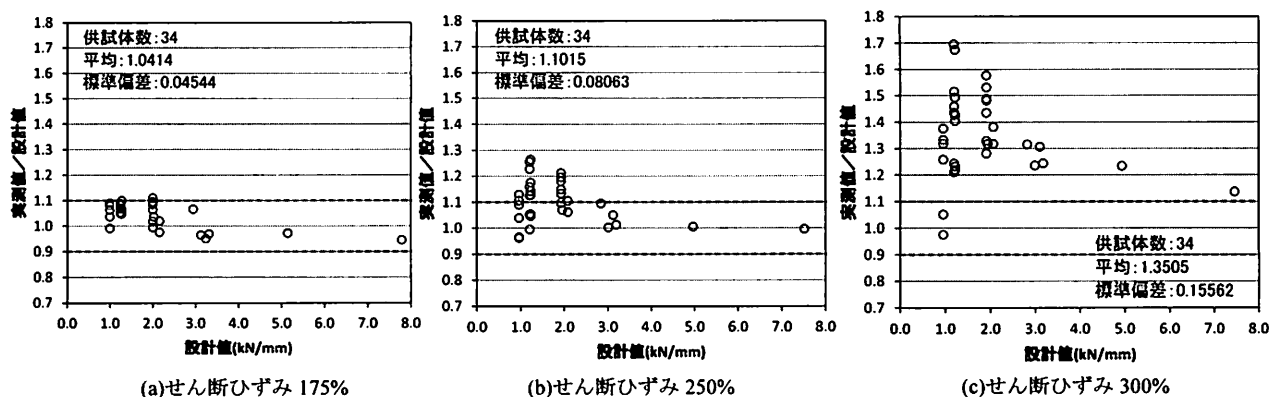


図-3 鉛プラグ入りゴム支承における等価剛性の実測値と設計値 (H16 式) の比較

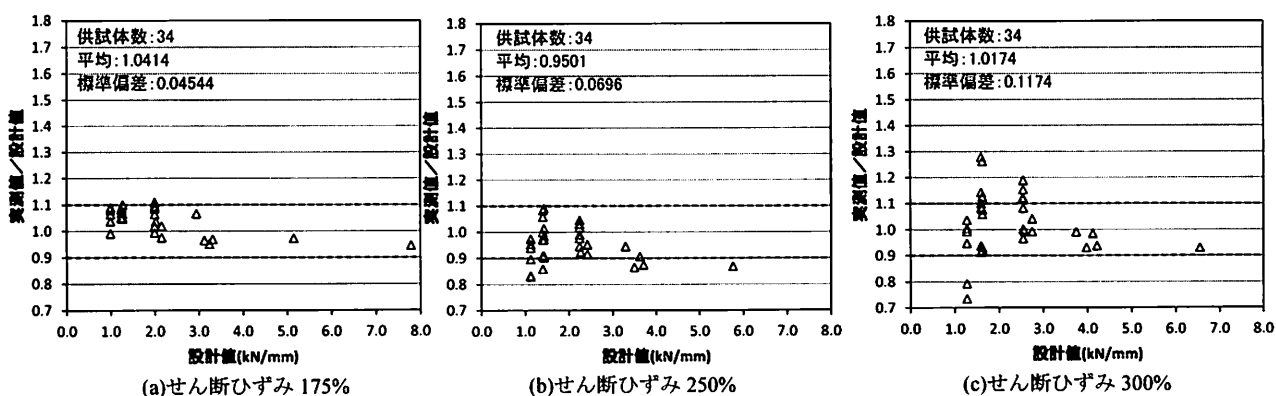


図-4 鉛プラグ入りゴム支承における等価剛性の実測値と設計値 (提案式) の比較

1 回目の履歴におけるエネルギー吸収量に対する 5 回目の履歴のエネルギー吸収量の低減率をみると、30%以上低減している供試体がある。

これは 1 回目の履歴が初期载荷の影響を含んでいるためエネルギー吸収量が大きくなり、5 回目の履歴におけるエネルギー吸収量の低減率が大きくなったものと考えられる。初期载荷の影響を含まない 2 回目の履歴におけるエネルギー吸収量に対する 6 回目の履歴におけるエネルギー吸収量の低減率では、形状係数が 4 未満の供試体で低減率が 20%を上回る供試体もあるが、形状係数 4 以上では、最大でも 20%程度の低減率に収まる結果となった。

(3) 高減衰ゴム支承

・等価剛性の評価

高減衰ゴム支承のせん断ひずみ 175%, 250%, 300%における水平力-水平変位の関係から、最大荷重と最大変位及び最小荷重と最小変位より求まる等価剛性を、文献 9)に示される提案式で評価した結果を図-7 に示す。

せん断ひずみ 175%では、設計値に対して実測値が概ね±10%の範囲内に入っていたが、せん断ひずみ 250%では、一部、+10%を超えるものが生じ、せん断ひずみ 300%では、ほとんどの供試体が+10%を

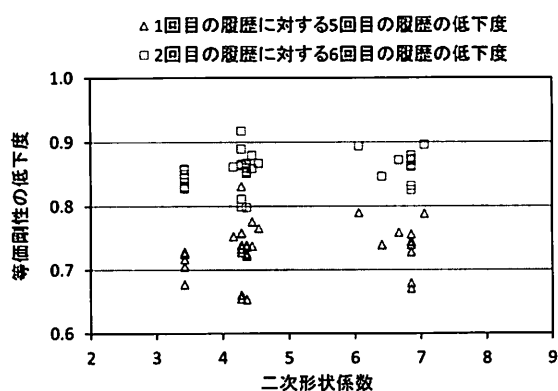


図-5 鉛プラグ入りゴム支承における等価剛性の低下度

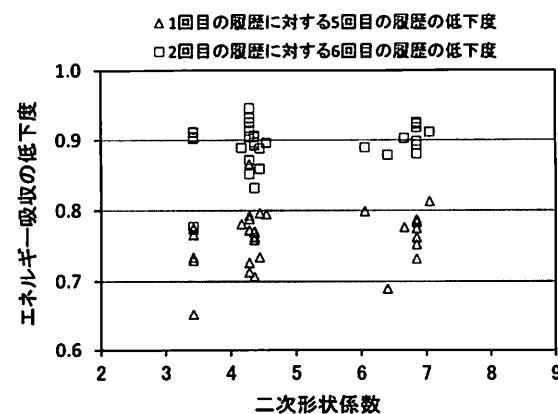


図-6 鉛プラグ入りゴム支承におけるエネルギー吸収の低下度

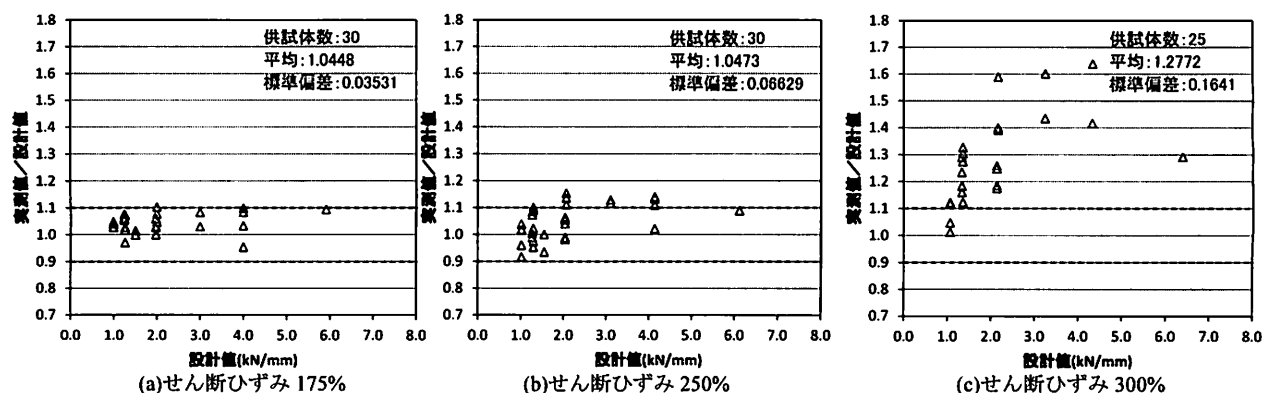


図-7 高減衰ゴム支承における等価剛性の実測値と設計値（提案式）の比較

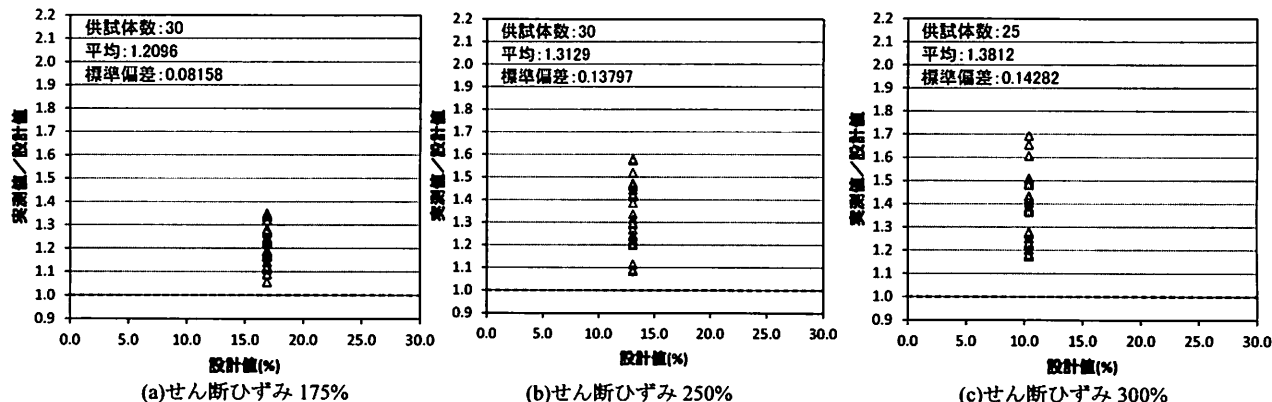


図-9 高減衰ゴム支承における等価減衰定数の実測値と設計値（提案式）の比較

超え、最大+60%を超えるものも生じた。高減衰ゴム支承ではせん断ひずみ 250%を超えると、よりハードニングの影響が大きくなることがわかる。したがって、提案式を適用することで、せん断ひずみ 175%で±10%の範囲内に入っていれば、250%までであれば概ね±10%以内に入ること示された。一方、せん断ひずみ 300%になると提案式でも適切に等価剛性を評価することは難しいといえる。

供用期間中に発生する地震による作用に対して安定して挙動することを評価するために、設計限界変位（せん断ひずみ 250%）時の 1 回目の履歴における等価剛性に対する 5 回目の履歴の等価剛性の低減率、及び 2 回目の履歴における等価剛性に対する 6 回目の履歴における等価剛性の低減率を図-8 に示す。1 回目の履歴における等価剛性に対する 5 回目の履歴の等価剛性の低減率をみると、40%程度低減している供試体がある。これは 1 回目の履歴が初期载荷の影響を含んでいるため、5 回目の履歴における等価剛性の低減率が大きくなったものと考えられる。初期载荷の影響を含まない 2 回目の履歴における等価剛性に対する 6 回目の履歴における等価剛性の低減率では、最大でも 30%程度の低減率に収まる結果となった。ただし、これは 20%程度に収まっていた鉛プラグ入りゴム支承よりも低減率が大きくなっている。

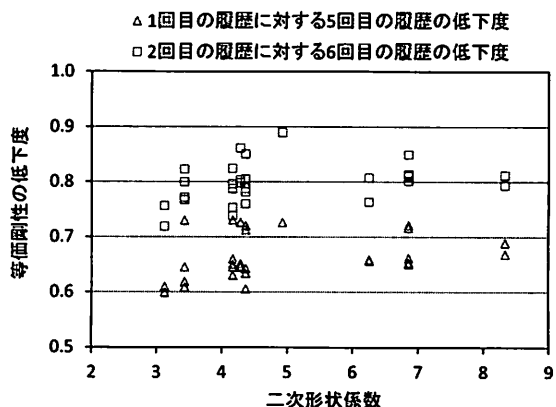


図-8 高減衰ゴム支承における等価剛性の低下度

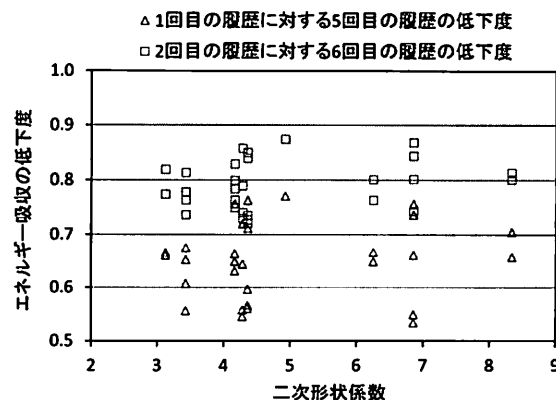


図-10 高減衰ゴム支承におけるエネルギー吸収の低下度

・減衰特性の評価

高減衰ゴム支承のせん断ひずみ 175%, 250%, 300%における水平力-水平変位の関係から、文献9)に示される提案式で評価した結果を図-9に示す。図-9より実測値が設計値を上回っており、提案式が実測値を安全側に評価しているといえる。

供用期間中に発生する地震による作用に対して安定して挙動することを評価するために、設計限界変位（せん断ひずみ 250%）時の1回目の履歴におけるエネルギー吸収量に対する5回目の履歴のエネルギー吸収量の低減率、及び2回目の履歴におけるエネルギー吸収量に対する6回目の履歴におけるエネルギー吸収量の低減率を図-10に示す。1回目の履歴におけるエネルギー吸収量に対する5回目の履歴のエネルギー吸収量の低減率をみると、40%以上低減している供試体がある。これは1回目の履歴が初期载荷の影響を含んでいるためエネルギー吸収量が大きくなり、5回目の履歴におけるエネルギー吸収量の低減率が大きくなったものと考えられる。初期载荷の影響を含まない2回目の履歴におけるエネルギー吸収量に対する6回目の履歴におけるエネルギー吸収量の低減率では、30%程度の低減率に収まる結果となった。ただし、これは二次形状係数4以上の条件において20%程度に収まっていた鉛プラグ入りゴム支承よりも低減率が大きくなっている。

(4) 破断ひずみ

表-4の载荷ステップ4において、単調载荷によって求めた破断ひずみと支承一辺の寸法の関係を図-11に、破断ひずみと二次形状係数の関係を図-12に示す。なお、図-11, 12には試験機の実験能力の制約により、破断させることができなかった供試体も含んでいる。図-11より、破断ひずみは160~450%程度まで広い範囲にばらついて分布していることがわかる。破断ひずみと寸法の関係については、本試験で用いた供試体諸元の範囲では、明確な傾向が認められなかった。また図-12より、破断ひずみと二次形状係数の関係については、二次形状係数が小さい場合は破断ひずみが小さくなる傾向があることがわかる。地震時水平力分散型ゴム支承、鉛プラグ入りゴム支承、高減衰ゴム支承、いずれの供試体も破断ひずみが300%に満たない供試体があったが、二次形状係数が4を超える供試体の範囲内でみると、破断ひずみが300%に満たない供試体が1体あった。

4. 結論

本研究では、ゴム支承の破壊までの力学的特性と

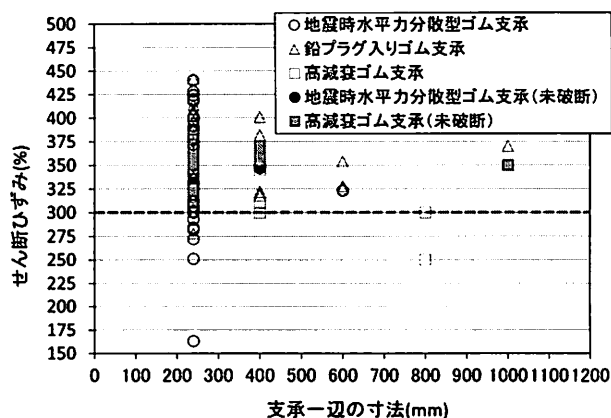


図-11 破断ひずみと支承一辺の寸法の関係

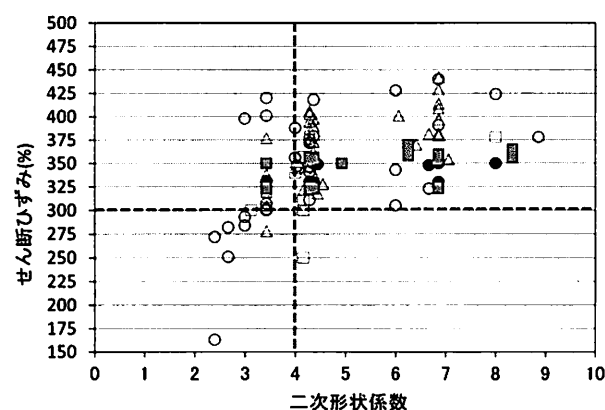


図-12 破断ひずみと二次形状係数の関係

地震時の繰り返し载荷に対する力学的特性を評価する手法を確立するための基礎データの蓄積を目的として、地震時水平力分散型ゴム支承 48 体、鉛プラグ入りゴム支承 34 体、高減衰ゴム支承 30 体を対象に、有効せん断ひずみ 175%, 設計せん断ひずみ 250%, 終局限界状態に相当するせん断ひずみ 300%の各せん断ひずみ水準における繰り返しせん断変形能試験や単調载荷による破断試験を行い、ゴム支承が有するせん断変形特性の整理及び分析を行った。

また、本研究で行った試験データをもとに、高橋ら⁹⁾が提案している鉛プラグ入りゴム支承及び高減衰ゴム支承の設計モデルの適用性について実験値と設計値の比較により検討を行った。以下に、得られた主な知見を示す。

- (1) 等価剛性については、地震時水平力分散型ゴム支承、鉛プラグ入りゴム支承、高減衰ゴム支承いずれも、せん断ひずみ 175%では、H16 式による設計値に対して実測値が概ね $\pm 10\%$ の範囲内に入っていたが、250%, 300%とせん断ひずみが大きくなるに従って、設計値に対して実測値が大きくなる結果となり、ばらつきも大きくなっている。これはゴム本体のハードニングの影響と考えられる。なお、鉛プラグ入りゴム支

承では、高橋らが提案する算出法を用いることで H16 支承便覧に示されている算出法を用いるより実際の力学的特性を適切に評価できていることが確認された。

- (2) 地震動による作用に対して安定して挙動することを評価するために、設計限界変位時（せん断ひずみ 250%）の 1 回目の履歴における等価剛性に対する 5 回目の履歴の等価剛性の低減率を評価すると、地震時水平力分散型ゴム支承及び鉛プラグ入りゴム支承で、30%以上低減している供試体があり、高減衰ゴム支承では 40%以上低減している供試体があった。これは 1 回目の履歴が初期載荷の影響を含んでいるため等価剛性が大きくなり、5 回目の履歴における等価剛性の低減率が大きくなったものと考えられるため、2 回目に対する 6 回目で評価したところ、地震時水平力分散型ゴム支承及び鉛プラグ入りゴム支承で 20%程度に、高減衰ゴム支承で 30%程度に収まる結果となった。
- (3) エネルギー吸収量についても、設計限界変位時（せん断ひずみ 250%）の 1 回目の履歴における等価剛性に対する 5 回目の履歴のエネルギー吸収量の低減率を評価すると、地震時水平力分散型ゴム支承及び鉛プラグ入りゴム支承で、30%以上低減している供試体があり、高減衰ゴム支承では 40%以上低減している供試体があった。これは、等価剛性の低減率同様、1 回目の履歴が初期載荷の影響を含んでいるためであり、2 回目に対する 6 回目で評価したところ、地震時水平力分散型ゴム支承及び鉛プラグ入りゴム支承で 20%程度に、高減衰ゴム支承で 30%程度に収まる結果となった。
- (4) 破断ひずみは 160～450%程度まで広い範囲にばらついて分布した。破断ひずみと寸法の関係については、本試験で用いた供試体諸元の範囲では、明確な傾向が認められなかった。また、破断ひずみと二次形状係数の関係については、二次形状係数が小さい場合は破断ひずみが小さくなる傾向が認められた。地震時水平力分散型ゴム支承、鉛プラグ入りゴム支承、高減衰ゴム支承、いずれの供試体も破断ひずみが 300%に満たない供試体があったが、二次形状係数が 4 を超える供試体の場合にも、破断ひずみが 300%に満たない供試体が 1 体あった。この要因については、今後詳細に分析していく予定である。

謝辞

本研究は 平成24年から2カ年にわたって行われた

(独)土木研究所、オイレス工業(株)、(株)川金コアテック、東海ゴム(株)、東京ファブリック工業(株)、ニッタ(株)、日本鑄造(株)、(株)ビービーエム、(株)ブリヂストン、横浜ゴム(株)による共同研究「ゴム支承の地震時の性能の検証方法に関する研究」の成果の一部である。また、本研究内容については、公益社団法人日本道路協会に設置された耐震設計小委員会道路橋支承便覧改訂ワーキングおよび同サブワーキングにおいて審議され、ワーキング委員より有益なご助言とご助力を頂いた。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，土木学会構造工学論文集，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，土木学会構造工学論文集，Vol.59A，pp.516-526，2013.3.
- 6) 国土交通省国土技術政策総合研究所，（独）土木研究所：平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震土木施設災害調査速報，国土技術政策総合研究所資料第 646 号／土木研究所資料 4202 号，2011.7.
- 7) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，2012.3.
- 8) (社)日本道路協会：道路橋支承便覧，2004.4.
- 9) 高橋良和，篠原聖二，星隈順一：免震支承の設計モデルの高度化，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，（印刷中），2014.7.
- 10) 横川英彰，星隈順一，堺淳一：入力地震動の特性と積層ゴム系支承の地震応答の繰り返し回数に関する研究，第 15 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.323-330，2012.7.
- 11) 高橋良和，鶴野禎史，朝倉康信，加藤亨二，山田博，兼子一宏：初期載荷状態の超高減衰ゴム支承を用いたハイブリッド地震応答実験，構造工学論文集，Vol.60A，pp.372-379，2014.3.