

免震支承の設計モデルの高度化

高橋良和¹・篠原聖二²・星隈順一³

¹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）

²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）

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）

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、これ以降、免震支承を用いた免震橋が広く普及することとなった。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構築方法は平成 16 年道路橋支承便覧⁴⁾（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。

本稿では、文献 5)で整理された H16 支承便覧に示されている鉛プラグ入りゴム支承と高減衰ゴム支承の設計モデルが構築された変遷をその根拠を踏まえ、その後の免震支承の技術開発の動向を踏まえ、近年新たに実施された試験データに基づき鉛プラグ入りゴム支承と高減衰ゴム支承の設計モデルを構築する。具体的には、鉛プラグ入りゴム支承については、せん断ひずみ依存性試験で得られた力学的特性を踏まえ、せん断ひずみが大きい領域におけるゴムのハードニングの影響、及び、ゴムの面積に対する鉛プラグの面積比が降伏時の水平力に与える影響を考慮できるようにする。また、高減衰ゴム支承については、技術開発によって減衰性能が向上した高減

衰ゴム支承を対象に、せん断ひずみ依存性試験で得られた力学的特性を踏まえ設計モデルを新たに構築する。

2. 鉛プラグ入りゴム支承の設計モデルの検討

鉛プラグ入りゴム支承について、近年新たに実施されたせん断ひずみ依存性試験で得られた力学的特性を踏まえ、せん断ひずみが大きい領域におけるゴムのハードニングの影響、および、ゴムの面積に対する鉛プラグの面積比が降伏時の水平力に与える影響を考慮できるようにするために設計モデルの検討を行った。

(1) せん断ひずみ依存性試験

鉛プラグ入りゴム支承の力学的特性を評価するために、圧縮せん断試験機に取り付けた試験体に、一定圧縮力を載荷した状態で複数の水準のせん断変位を与える。

(a) 供試体諸元

鉛プラグ入りゴム支承のせん断ひずみ依存性試験に用いた供試体の諸元を表-1 に示す。供試体は、JIS K 6411 に示される標準試験体のうち、せん断弾性係数 G_e が 0.8N/mm^2 と 1.0N/mm^2 のケースでは平面寸法 $400\text{mm} \times 400\text{mm}$ 、せん断弾性係数 G_e が 1.2N/mm^2 のケースでは平面寸法 $350\text{mm} \times 350\text{mm}$ のものとし、せん断弾性係数 G_e 毎に 4 体の試験を行った。

(b) 試験条件

せん断ひずみ依存性試験の試験条件を表-2 に示す。設計死荷重反力相当として圧縮応力度 6.0N/mm^2 となる鉛直荷重を載荷した状態で、正負

交番繰返し水平変位を 0.5Hz の振動数により与えた。
(c)試験結果

各せん断弾性係数 G_e の供試体における等価せん断弾性係数とせん断ひずみの関係を図-1 に示す。いずれのせん断弾性係数 G_e の供試体も、せん断ひずみが 70%程度までの小さい領域では、大きな等価せん断弾性係数を示し、その後は各せん断弾性係数 G_e 程度に収束する傾向を示している。

ここで示す等価せん断弾性係数 $G(\gamma)$ のひずみ依存性は、鉛プラグ入りゴム支承のゴム本体のひずみ依存分と鉛プラグのひずみ依存分を含むものであり、ゴムのひずみ依存分を抽出し、ゴム本体のハードニングを評価するために、等価せん断弾性係数 $G(\gamma)$ から式(29)の第 2 項を差し引いた $c_r(\gamma)G_e$ を図-2 に示す。各せん断弾性係数 G_e の供試体における $c_r(\gamma)G_e$ はせん断ひずみ 175%程度までは G_e と同程度の一定の値を示し、せん断ひずみ 175%を超えると、 $c_r(\gamma)G_e$ が徐々に大きくなっている。この増加分を鉛プラグ入りゴム支承に用いるゴムのひずみ依存係数 $c_r(\gamma)$ で評価するものとする。

各せん断弾性係数 G_e の供試体における等価減衰定数とせん断ひずみの関係を図-3 に示す。いずれ

のせん断弾性係数 G_e の供試体も、せん断ひずみが大きくなるにつれて、等価減衰定数が低下していることがわかる。

(2) ゴムの面積 A_g に対する鉛プラグの面積 A_p の比が降伏時の水平力 Q_p に与える影響検討

鉛プラグ入りゴム支承のゴムの面積 A_g に対する

表-1 供試体諸元

せん断弾性係数 G_e	0.8 N/mm ²	1.0 N/mm ²	1.2 N/mm ²
平面寸法	□400mm	□400mm	□350mm
供試体数	4	4	4
ゴム厚・層数	9mm×6層=54mm	9mm×6層=54mm	8mm×6層=48mm
鉛プラグ径・本数	φ57.5-4本	φ57.5-4本	φ50-4本
鉛プラグ面積比 κ	6.94%	6.94%	6.85%
一次形状係数	10.39	10.39	10.236
二次形状係数	7.407	7.407	7.292

表-2 せん断ひずみ依存性試験の実施条件

圧縮応力度	6.0 N/mm ²
せん断ひずみ	±50%, ±100%, ±175%, ±200%, ±250%, ±275%

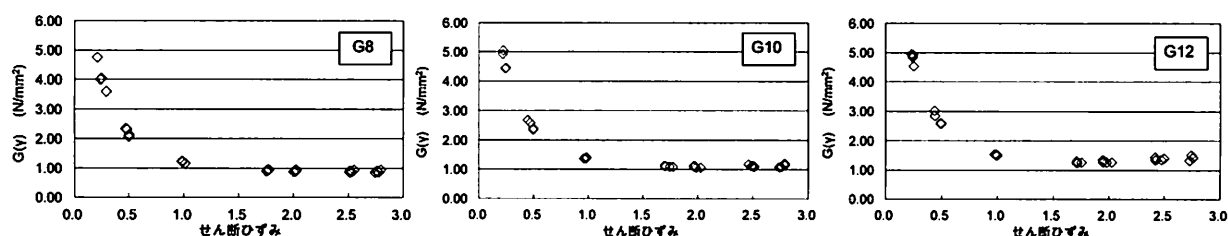


図-1 等価せん断弾性係数 $G(\gamma)$ とせん断ひずみの関係

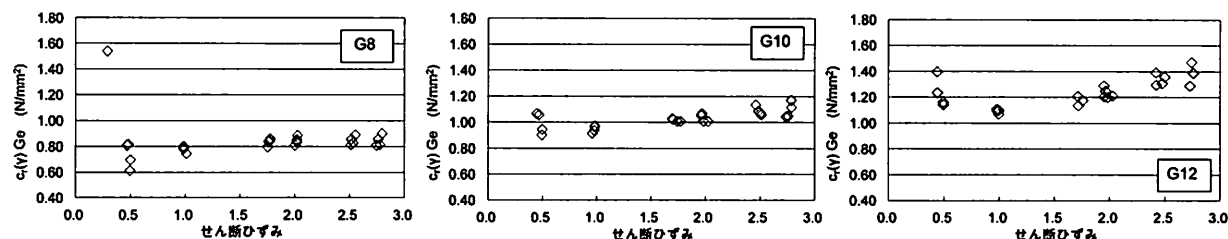


図-2 等価せん断弾性係数 $G(\gamma)$ から式(29)の第 2 項を差し引いた $c_r(\gamma)G_e$

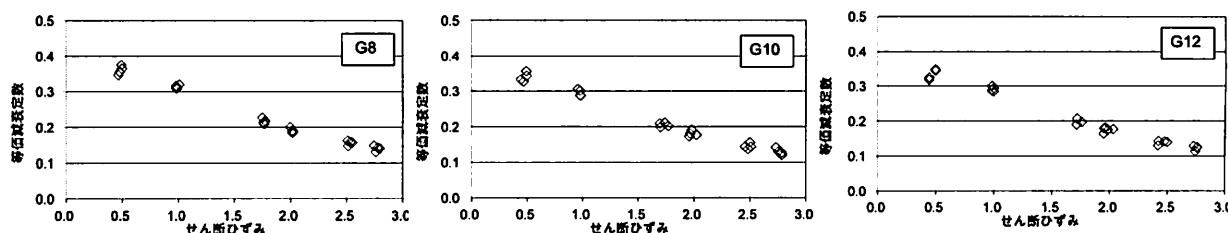


図-3 等価減衰定数とせん断ひずみの関係

鉛プラグの面積 A_p の比 κ が降伏時の水平力 Q_d に与える影響を評価するために、近年に出荷された製品に対する品質管理試験のデータを整理した。

(a)試験条件

近年に出荷された鉛プラグ入りゴム支承 1502 体の品質管理試験のデータを整理した。鉛プラグ入りゴム支承のゴムの面積 A_e に対する鉛プラグの面積比 κ は H16 支承便覧に示される 3～10%の一般的な範囲内のものを対象とした。

(b)試験結果

実験で得られた降伏時の水平力 Q_d' を式 (1) により算出された降伏時の水平力 Q_d で除して無次元化した値とゴムの面積 A_e に対する鉛プラグの面積比 κ の関係を図-4 に示す。

$$Q_d = q_0(\gamma_e) A_p \tag{1}$$

ここに、

$q_0(\gamma_e)$: 降伏荷重の算定に用いる鉛プラグのせん断応力度で、式(11)により算出する。

A_p : 鉛プラグの面積 (mm²)

図-4 より、ゴムの面積 A_e に対する鉛プラグの面積比 κ が大きくなると、実験で得られた降伏時の水平力 Q_d' を式(1)により算出された降伏時の水平力 Q_d で除して無次元化した値は低下する傾向があることがわかる。

これは、鉛プラグの面積を大きくしても、降伏時の水平力は比例的に大きくはならないことを示している。そこで、実験で得られた降伏時の水平力 Q_d' を式(1)により算出された降伏時の水平力 Q_d で除して無次元化した値とゴムの面積 A_e に対する鉛プラグの面積比 κ の関係をもとに、回帰式を算出し、鉛プラグ入りゴム支承のゴムの面積 A_e に対する鉛プラグの面積 A_p の比 κ が降伏時の水平力 Q_d に与える影響を考慮するための鉛プラグのせん断応力補正係数 α の算出式(2)を求めた。

$$\alpha = 0.616 \kappa^{-0.179} \tag{2}$$

ここに、

α : 鉛プラグのせん断応力補正係数

κ : ゴムの面積 A_e に対する鉛プラグの面積比

(3)設計モデル

(1)せん断ひずみ依存性試験、および(2)ゴムの面積 A_e に対する鉛プラグの面積 A_p の比が降伏時の水平力 Q_d に与える影響検討の結果を踏まえ、鉛プラグ入りゴム支承の等価剛性、等価減衰定数、および非

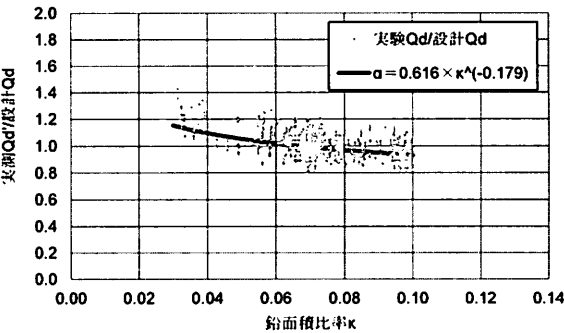


図-4 降伏時の水平力 Q_d と鉛面積比 κ の関係

線形履歴特性の設計モデルを構築する。

(a)等価剛性

H16 支承便覧に示されている鉛プラグ入りゴム支承の等価せん断弾性係数 $G(\gamma)$ の設計式をもとに、式(4)に示すように鉛プラグ入りゴム支承のひずみ依存係数 $c_r(\gamma)$ を新たに導入し、これをせん断弾性係数 G_e に乗じることでせん断ひずみ 175%以上の領域におけるハードニングの影響を考慮した。鉛プラグ入りゴム支承のひずみ依存係数 $c_r(\gamma)$ は、図-5 に示すように、(1)せん断ひずみ依存性試験から得られた各せん断ひずみ水準におけるせん断弾性係数 $G(\gamma)$ を G_e で割り戻した値にフィッティングするように決定した。鉛プラグ入りゴム支承のひずみ依存係数 $c_r(\gamma)$ を表-3 に示す。なお、式(4)の第 2 項については、H16 支承便覧に示されていた鉛プラグ入りゴム支承の等価せん断弾性係数を算出する式の第 2 項を変更せず踏襲している。等価剛性の設計式を以下に示す。

$$K_B = \frac{G(\gamma) A_e}{\Sigma t_e} \tag{3}$$

ここに、

K_B : 免震支承の等価剛性 (N/mm)

A_e : ゴム支承本体の側面被覆ゴムを除く面積 (mm²)

Σt_e : 総ゴム厚 (mm)

$G(\gamma)$: 等価せん断弾性係数 (N/mm²)

$$G(\gamma) = c_r(\gamma) G_e + q(\gamma) \frac{\kappa}{\gamma} \tag{4}$$

$c_r(\gamma)$: 鉛プラグ入りゴム支承に用いるゴムのひずみ依存係数

$$c_r(\gamma) = a_0 + a_1 \gamma + a_2 \gamma^2 \tag{5}$$

係数 a_i は表-3 に示す。

G_e : ゴムのせん断弾性係数 (N/mm²)

$q(\gamma)$: 等価せん断弾性係数の算定に用いる鉛プラグのせん断応力度 (N/mm²)

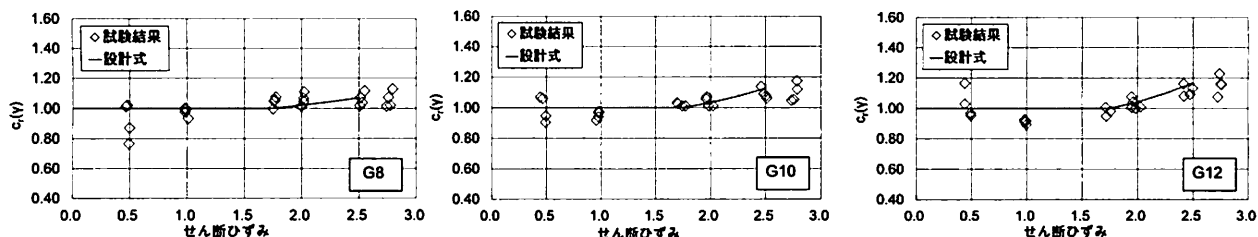


図-5 鉛プラグ入りゴム支承に用いるゴムのひずみ依存係数 $c_r(\gamma)$ の実験値と設計値の比較

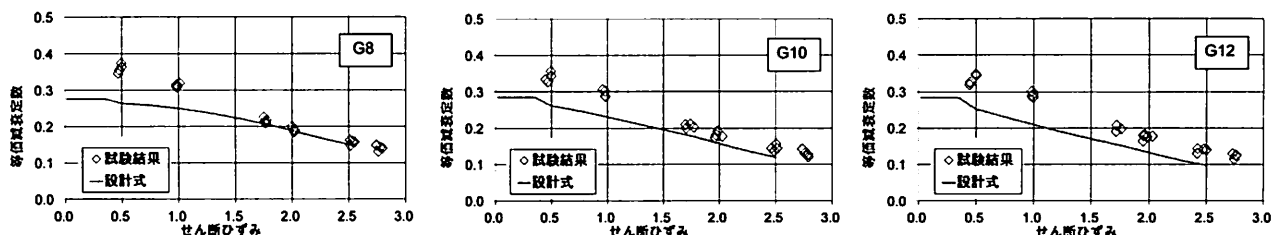


図-6 鉛プラグ入りゴム支承における等価減衰定数の実験値と設計値の比較

$$q(\gamma) = b_0 + b_1 \gamma + b_2 \gamma^2 + b_3 \gamma^3 \quad (6)$$

係数 b_i は表-4 に示す。

$$\kappa = A_p / A_e \quad (7)$$

κ : ゴムの面積 A_e に対する鉛プラグの面積の比

A_p : 鉛プラグの面積 (mm^2)

γ : 設計せん断ひずみ。ただし、地震時の静的照査の場合は有効せん断ひずみ γ_e 、動的照査の場合は設計せん断ひずみ γ を用いる。有効せん断ひずみ γ_e は式(8)による。

$$\gamma_e = c_B \gamma \quad (8)$$

c_B : 慣性力の時間的な非定常性を表わす係数で 0.7 とする。

(b) 等価減衰定数

等価減衰定数については H16 支承便覧の算出式を踏襲した上で、ゴムの面積 A_e に対する鉛プラグの面積比 κ が降伏時の水平力 Q_d に与える影響を考慮するために、(2) ゴムの面積 A_e に対する鉛プラグの面積 A_p の比が降伏時の水平力 Q_d に与える影響検討の結果を踏まえ、鉛プラグのせん断応力度補正係数 α を導入する。等価減衰定数 h_B の算出式を式(9)に示す。(1) せん断ひずみ依存性試験で得られた各せん断ひずみ水準における等価減衰定数を式(9)で算出した等価減衰定数 h_B で評価した結果を図-6 に示す。式(9)で算出した等価減衰定数 h_B は試験より得られた等価減衰定数を安全側に評価していることがわかる。

表-3 鉛プラグ入りゴム支承の $c_r(\gamma)$ 算定に用いる係数

適用条件		a_0	a_1	a_2
$\gamma \leq 1.75$	各 G 共通	1.000	—	—
$1.75 < \gamma \leq 2.50$	G8	0.905	0.028	0.015
	G10	1.046	-0.161	0.077
	G12	1.049	-0.203	0.100

表-4 鉛プラグ入りゴム支承の $q(\gamma)$ 算定に用いる係数 (N/mm^2)

適用条件	b_0	b_1	b_2	b_3
常時	$\gamma \leq 0.10$	—	23.395	—
	$0.10 < \gamma \leq 0.70$	3.2462	-11.6	27.891
地震時	$\gamma \leq 0.35$	—	29.7	—
	$0.35 < \gamma \leq 0.50$	10.395	—	—
	$0.50 < \gamma \leq 2.00$	15.9814	-12.5604	2.7752
	$2.00 < \gamma$	1.9614	—	—

表-5 鉛プラグ入りゴム支承の $q_0(\gamma_e)$ 算定に用いる係数 (N/mm^2)

適用条件	c_0	c_1
$\gamma \leq 0.35$	—	23.82
$\gamma > 0.35$	8.337	—

$$h_B = \frac{2Q_d \left(u + \frac{Q_d}{K_2 - K_1} \right)}{\pi u (Q_d + u K_2)} \quad (9)$$

ここに、

h_B : 等価減衰定数

u : 設計変位 (mm) ($= \Sigma t_e \gamma_e$)

Q_d : 降伏時の水平力 (N)

$$Q_d = \alpha q_0(\gamma_e) A_p \quad (10)$$

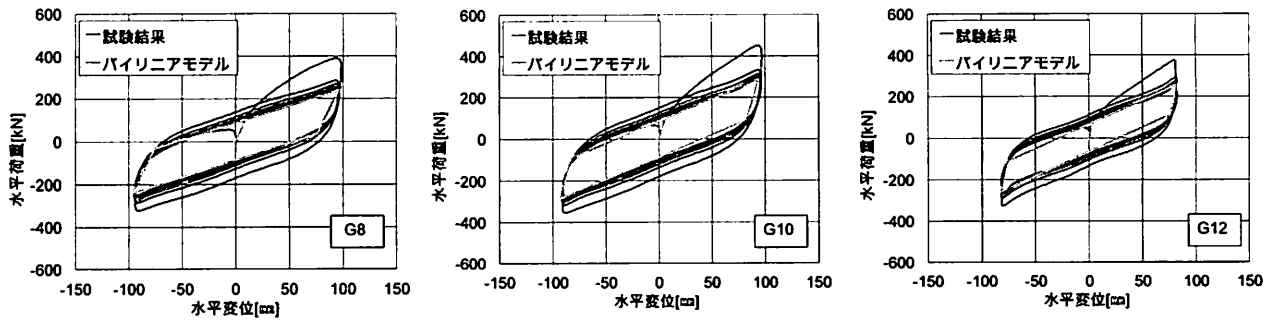


図-7 実履歴曲線とバイリニアモデルの比較（せん断ひずみ 175%）

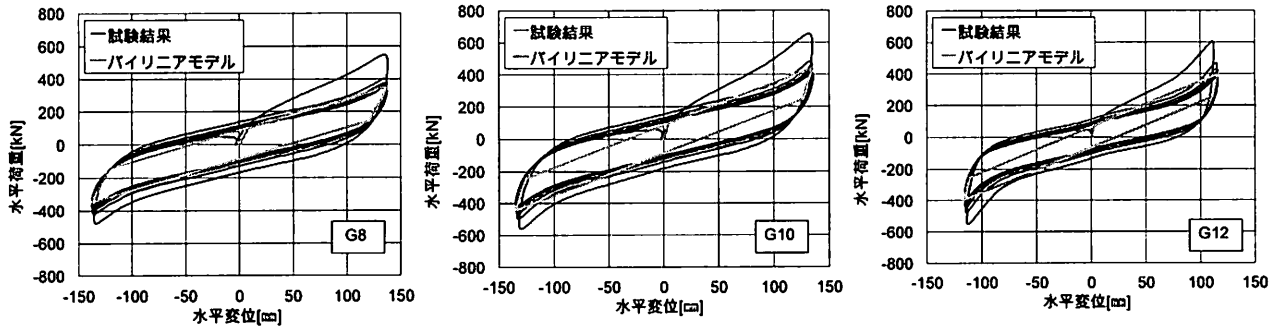


図-8 実履歴曲線とバイリニアモデルの比較（せん断ひずみ 250%）

α ：鉛プラグのせん断応力補正係数 で式(2)による。

$q_0(\gamma_e)$ ：降伏荷重の算定に用いる鉛プラグのせん断応力度(N/mm²)

$$q_0(\gamma_e) = c_0 + c_1 \gamma_e \quad (11)$$

係数 c_i は、表-5 に示す。

K_1 ：一次剛性 (N/mm)

$$K_1 = 6.5 K_2 \quad (12)$$

K_2 ：二次剛性 (N/mm)

$$K_2 = \frac{F - Q_d}{u} \quad (13)$$

F ：せん断ひずみ γ における水平力 (N)

静的照査の場合は有効せん断ひずみ γ_e ，動的照査の場合は，設計せん断ひずみ γ を用いる。

$$F = c_r(\gamma) G_c A_c \gamma + A_p q(\gamma) \quad (14)$$

(c)非線形履歴特性のモデル化

鉛プラグ入りゴム支承の非線形履歴特性のモデル化に用いる一次剛性(K_1)，二次剛性(K_2)は，式(12～14)より算出する。また，一次剛性(K_1)，二次剛性(K_2)を算出する時に使用する変位(u)およびせん断ひずみ(γ)は，それぞれ c_B を乗じない設計変位，設計せん断にひずみとする。

図-7，8 に，せん断ひずみ 175%および 250%における試験結果の履歴と設計式によるバイリニアモデルとの比較例を示す。平成 24 年道路橋示方書 V⁰15.3 において，ゴム支承本体は一定振幅の载荷を

繰り返すことにより水平力が徐々に低下する特性を示すので，5 回目の载荷における水平力－水平変位関係の履歴特性を表すように設定するのがよいとされている。これは，このようにモデル化すれば，一般に支承の応答変位を大きめに評価するためである。

図-7，8 より，いずれのケースにおいても，設計式によるバイリニアモデルが，5 回目の载荷における水平荷重－水平変位関係の履歴特性を適切に表していることがわかる。

4. 高減衰ゴム支承の設計モデルの検討

高減衰ゴム支承については，H16 支承便覧に示されていた高減衰ゴム支承の減衰特性を上回る特性を有する高減衰ゴム支承が開発され，既に広く普及している。そこで，現在，一般的に用いられている高減衰ゴム支承を対象とし，せん断ひずみ依存性試験で得られた力学的特性を踏まえ，高減衰ゴム支承の設計モデルの検討を行う。

(1)せん断ひずみ依存性試験

各せん断ひずみに応じた力学的特性を求めるために，圧縮せん断試験機に取り付けた試験体に，一定圧縮力を载荷した状態で複数の水準のせん断変位を与える。

(a)供試体

試験に用いた供試体の諸元を表-6 に示す。

(b)試験条件

せん断ひずみ依存性試験の試験条件を表-7 に示

す。設計死荷重相当として圧縮応力度 6.0N/mm^2 となる鉛直荷重を載荷した状態で、正負の繰返し水平変位を与えた。特性値は、せん断ひずみ $\pm 175\%$ までは 10 回の平均値を用い、せん断ひずみ $\pm 250\%$ 以上では 5 回目の値を用いた。

(c)試験結果

各せん断弾性係数 G_e の供試体における等価せん断弾性係数とせん断ひずみの関係を図-9 に示す。いずれのせん断弾性係数 G_e の供試体も、せん断ひずみが 100%程度までの小さい領域では、大きな等価せん断弾性係数を示し、その後は各せん断弾性係数 G_e 程度に収束する傾向を示している。

各せん断弾性係数 G_e の供試体における等価減衰定数とせん断ひずみの関係を図-10 に示す。いずれのせん断弾性係数 G_e の供試体も、せん断ひずみが大きくなるにつれて、等価減衰定数が低下していることがわかる。

(2)設計モデル

(1)せん断ひずみ依存性試験の結果を踏まえ、高減衰ゴム支承の等価剛性、等価減衰定数、および非線形履歴特性の設計モデルを構築する。

(a)等価剛性

H16 支承便覧に示されていた高減衰ゴム支承の等価せん断係数 $G(\gamma)$ の設計式をもとに、式(16)に示すように、高減衰ゴム支承に用いるゴムのひずみ依存係数 $c_h(\gamma)$ を新たに導入し、これをせん断弾性係数 G_e に乗じることで、高減衰ゴム支承のひずみ依存性

を考慮した。ゴムのひずみ依存係数 $c_h(\gamma)$ は、図-9 に示すように、(1)せん断ひずみ依存性試験から得られた各せん断ひずみ水準におけるせん断弾性係数 $G(\gamma)$ から G_e で割り戻した値の平均値となるように決定した。高減衰ゴム支承のひずみ依存係数 $c_h(\gamma)$ を表-8 に示す。等価剛性の設計式を式(15)に示す。

$$K_B = \frac{G(\gamma) A_e}{\Sigma t_e} \tag{15}$$

ここに、

K_B ：免震支承の等価剛性 (N/mm)

A_e ：ゴム支承本体の側面被覆ゴムを除く面積 (mm²)

Σt_e ：総ゴム厚(mm)

$G(\gamma)$ ：等価せん断弾性係数(N/mm²)

表-6 供試体諸元

せん断弾性係数 G_e	0.8N/mm ² , 1.0N/mm ² , 1.2N/mm ²				
平面寸法	□250mm	□400mm	□400mm	□600mm	□1000mm
供試体数	2	1	2	1	1
ゴム厚・層数	6mm×6層 =36mm	10mm×5層 =50mm	9mm×6層 =54mm	14mm×5層 =70mm	25mm×5層 =125mm
一次形状係数	10.417	10.000	11.111	10.714	10.000
二次形状係数	6.944	8.000	7.407	8.571	8.000

表-7 せん断ひずみ依存性試験の実施条件

圧縮応力度	6.0N/mm ²
せん断ひずみ	$\pm 25, \pm 50, \pm 75, \pm 100, \pm 125, \pm 150, \pm 175, \pm 200, \pm 250, \pm 300\%$

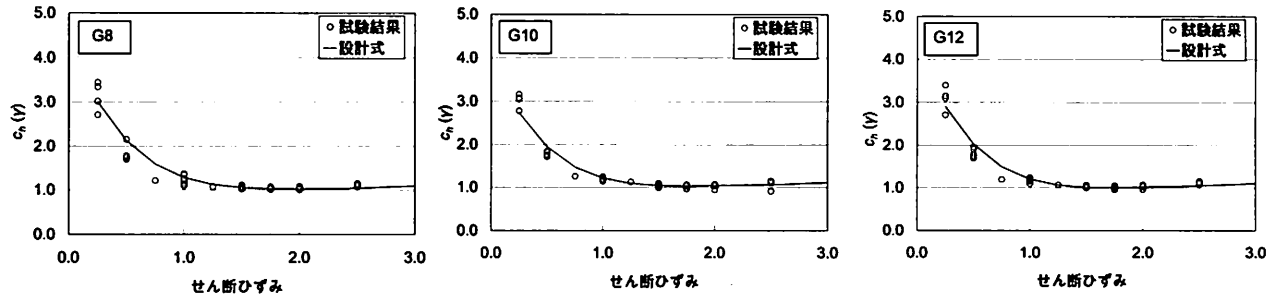


図-9 高減衰ゴム支承に用いるゴムのひずみ依存係数 $c_h(\gamma)$ とせん断ひずみの関係

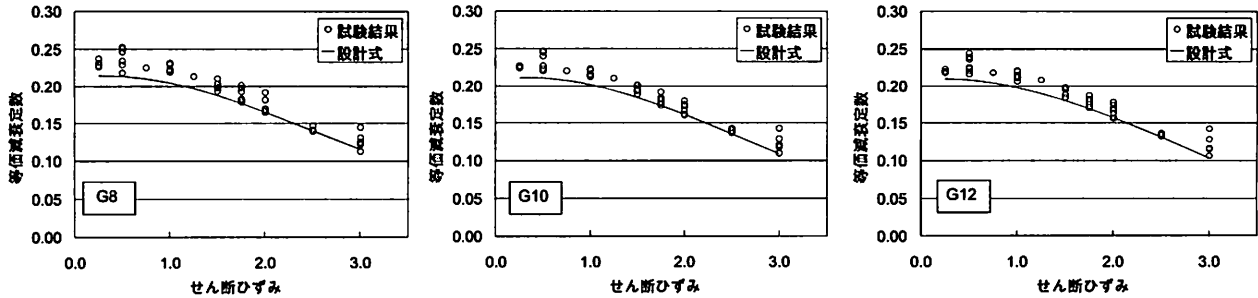


図-10 高減衰ゴム支承の等価減衰定数 $h_B(\gamma)$ とせん断ひずみの関係

$$G(\gamma) = c_h(\gamma) G_e \quad (16)$$

ここに、

$c_h(\gamma)$: 高減衰ゴム支承に用いるゴムのひずみ依存係数

$$c_h(\gamma) = a_0 + a_1 \gamma + a_2 \gamma^2 + a_3 \gamma^3 + a_4 \gamma^4 + a_5 \gamma^5 \quad (17)$$

係数 a_i を表-8 に示す。

G_e : ゴムのせん断弾性係数(N/mm²)

γ : 設計せん断ひずみ。ただし、地震時の静的照査の場合は有効せん断ひずみ γ_e 、動的照査の場合は設計せん断ひずみ γ を用いる。有効せん断ひずみ γ_e は式(18)による

$$\gamma_e = c_B \gamma \quad (18)$$

c_B : 慣性力の時間的な非定常性を表わす係数で 0.7 とする。

(b)等価減衰定数

高減衰ゴム支承の等価減衰定数の設計式は、H16 支承便覧の算出式を踏襲した上で、図-10 に示すように、(1)せん断ひずみ依存性試験から得られた各せん断ひずみ水準における等価減衰定数の下限値を下回るよう決定した。高減衰ゴム支承の等価減衰定数 $h_B(\gamma_e)$ 算定に用いる係数を表-9 に示す。等価減衰定数 $h_B(\gamma_e)$ は式(19)により算出する。

$$h_B(\gamma_e) = b_0 + b_1 \gamma_e + b_2 \gamma_e^2 + b_3 \gamma_e^3 \quad (19)$$

ここに、

$h_B(\gamma_e)$: 等価減衰定数
係数 b_i を表-9 に示す。

(c)非線形履歴特性のモデル化

等価せん断弾性係数及び等価減衰定数の設計式より求まる履歴面積とバイリニアモデル(非線形履歴モデル)の面積が等価となる条件で、実履歴曲線とバイリニアモデルの形が整合するように、一次剛性(K_1)に関するせん断弾性係数及び二次剛性(K_2)に関するせん断弾性係数を決定した。設計式を以下に示す。

$$K_1 = \frac{G_1(\gamma) A_e}{\Sigma t_e} \quad (20)$$

$$K_2 = \frac{G_2(\gamma) A_e}{\Sigma t_e} \quad (21)$$

$$G_1(\gamma) = c_{h1}(\gamma) G_e \quad (22)$$

$$G_2(\gamma) = c_{h2}(\gamma) G_e \quad (23)$$

ここに、

K_1 : 一次剛性(N/mm)

K_2 : 二次剛性(N/mm)

表-8 高減衰ゴム支承の $c_h(\gamma)$ 算定に用いる係数

種別	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
G8	4.346	-6.500	4.991	-1.866	0.3358	-0.02255
G10	3.961	-5.980	4.740	-1.813	0.3320	-0.02267
G12	4.273	-6.643	5.189	-1.943	0.3468	-0.02302

表-9 高減衰ゴム支承の $h_B(\gamma_e)$ 算定に用いる係数

種別	b_0	b_1	b_2	b_3
G8	0.2120	0.01670	-0.02740	0.003700
G10	0.2091	0.01611	-0.02704	0.003519
G12	0.2086	0.01067	-0.02430	0.003025

表-10 高減衰ゴム支承の $c_{h1}(\gamma)$ 算定に用いる係数

種別	c_0	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5
G8	29.49	-44.74	35.33	-13.56	2.563	-0.1863
G10	27.08	-41.40	33.58	-13.05	2.478	-0.1800
G12	29.28	-45.69	36.26	-13.70	2.516	-0.1762

表-11 高減衰ゴム支承の $c_{h2}(\gamma)$ 算定に用いる係数

種別	d_0	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5
G8	2.808	-4.259	3.365	-1.291	0.2439	-0.01775
G10	2.581	-3.944	3.200	-1.244	0.2360	-0.01710
G12	2.788	-4.351	3.453	-1.304	0.2393	-0.01675

$G_1(\gamma)$: 一次剛性に関するせん断弾性係数(N/mm²)

$c_{h1}(\gamma)$: 一次剛性に関する等価せん断弾性係数のひずみ依存係数

$$c_{h1}(\gamma) = c_0 + c_1 \gamma + c_2 \gamma^2 + c_3 \gamma^3 + c_4 \gamma^4 + c_5 \gamma^5 \quad (24)$$

$G_2(\gamma)$: 二次剛性に関するせん断弾性係数(N/mm²)

$c_{h2}(\gamma)$: 二次剛性に関する等価せん断弾性係数のひずみ依存係数

$$c_{h2}(\gamma) = d_0 + d_1 \gamma + d_2 \gamma^2 + d_3 \gamma^3 + d_4 \gamma^4 + d_5 \gamma^5 \quad (25)$$

γ : バイリニアモデルの骨格曲線におけるゴムの最大ひずみ

係数 c_i を表-10 に、係数 d_i を表-11 に示す。

また、バイリニアモデルの骨格曲線においてのせん断ひずみが零の場合のせん断応力度及び降伏応力度は次式により求まる。

$$\tau_d(\gamma) = \gamma (G(\gamma) - G_2(\gamma)) \quad (26)$$

$$\tau_y(\gamma) = \frac{G_1(\gamma)}{G_1(\gamma) - G_2(\gamma)} \tau_d(\gamma) \quad (27)$$

ここに、

$\tau_d(\gamma)$: バイリニアモデルの骨格曲線においてのせん断ひずみが零の場合のせん断応力度(N/mm²)

$\tau_y(\gamma)$: 降伏応力度(N/mm²)

γ : バイリニアモデルの骨格曲線におけるゴムの最大ひずみ

図-11, 12 にせん断ひずみ 175%と 250%におけ

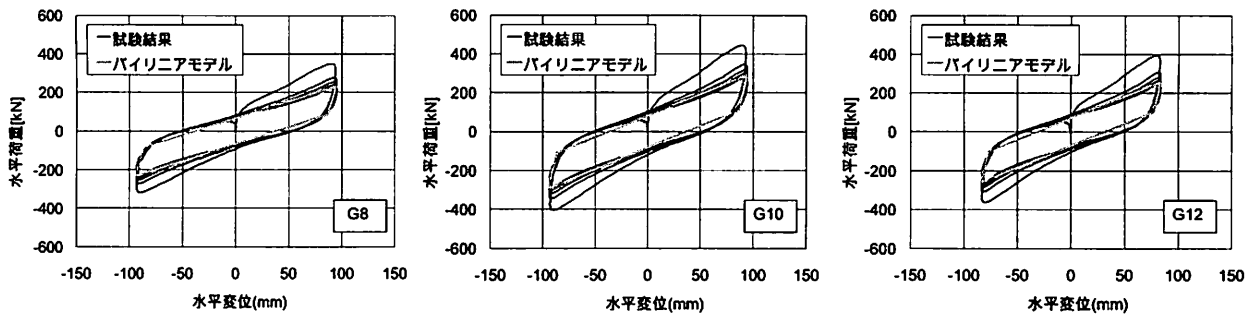


図-11 実履歴曲線とバイリニアモデルの比較（せん断ひずみ 175%）

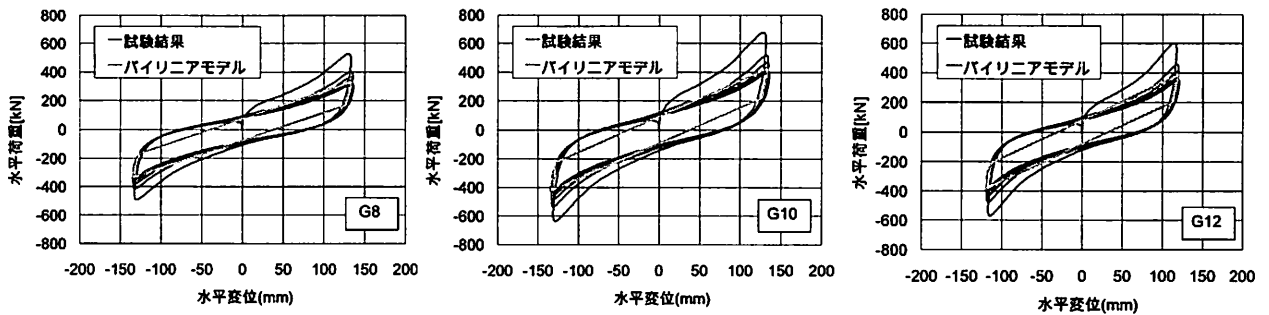


図-12 実履歴曲線とバイリニアモデルの比較（せん断ひずみ 250%）

る実履歴曲線とバイリニアモデルの比較例を示す。

図-11, 12 より, いずれのケースにおいても, 設計式によるバイリニアモデルが, 5 回目の载荷における水平荷重—水平変位関係の履歴特性を適切に表していることがわかる。

5. 結論

本稿では, 文献 5) に示される鉛プラグ入りゴム支承と高減衰ゴム支承の設計モデルの変遷とその根拠, ならびにその後の免震支承の技術開発の動向を踏まえ, 近年新たに実施された試験データに基づき鉛プラグ入りゴム支承と高減衰ゴム支承の設計モデルを構築した。以下に, 得られた主な知見を示す。

- (1) 鉛プラグ入りゴム支承のせん断ひずみ依存性試験の結果より, 175%以上の大きなせん断ひずみ領域におけるゴム本体のハードニングの影響を明らかにした上で, ゴムのひずみ依存係数 $c_h(\gamma)$ を導入することで, この影響を設計モデルに考慮できるようにした。
- (2) 近年に出荷された鉛プラグ入りゴム支承に対する品質管理試験のデータより, 鉛プラグの面積を大きくしても, 降伏時の水平力は比例的に大きくはならないことを明らかにし, 鉛プラグのせん断応力補正係数 α を導入することで, その影響を設計モデルに考慮できるようにした。
- (3) 現在, 一般的に用いられている高減衰ゴム支承

を対象としたせん断ひずみ依存性試験から得られた力学的特性を踏まえ, 高減衰ゴム支承のゴムのひずみ依存係数 $c_h(\gamma)$ を導入した新たな設計モデルを構築した。

謝辞

本検討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の活動の一環として行われた。ここに記してワーキング委員及びサブワーキング委員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) (社)日本道路協会：道路橋支承便覧, 2004.4.
- 5) 高橋良和, 篠原聖二, 星隈順一：免震支承の設計モデルの変遷, 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.
- 6) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 2012.3.