

地震時水平力分散ゴム支承の 圧縮特性に関する評価モデルの検討

姫野岳彦¹・運上茂樹²

¹正会員 独立行政法人土木研究所 耐震研究グループ 交流研究員（〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6）

²正会員 工博 独立行政法人土木研究所 耐震研究グループ 上席研究員（同上）

1. はじめに

道路橋に用いられる支承形式は、兵庫県南部地震以降、地震時に発生する慣性力の分散あるいは低減を目的として、鋼製支承からゴム支承へと移行が進んでおり、今後もその採用実績の増加が見込まれている。このため、ゴム支承の力学的特性に関しては既に数多くの研究がなされており、特に地震時慣性力が作用した際のせん断変形性能などについては適切に評価することが可能となっている。

一方、近年では、多径間連続橋の積極的な採用などによる支点反力の増加に伴い、ゴム支承形状が大型化する傾向にあり、また、パッド型と呼ばれる積層構成が比較的少ない簡易型ゴム支承から、より多層構造としたゴム支承へとその適用範囲の拡大が急速に広まりつつある。これらの影響を受けて、特にゴム支承の圧縮特性について考えると、従来の設計式と実製品における特性値との間に有意な差が認められるようになってきている。

このような問題に対して道路橋支承便覧¹⁾では、現在進められている改訂作業の中で、この圧縮特性についても設計式の見直しが行われる予定となっている²⁾。しかしながら、ここでの検討では過去の実験データをもとにゴム支承の縦弾性係数を実験回帰によって評価した経験的なモデルとして表現されているため、その理論的な背景や力学的な考察などについては改めて整理を行う必要があると考えられる。

また、地震時におけるゴム支承の変形状態を考えると、圧縮・せん断・回転の3つの変形要素が同時に作用する³⁾ことになるため、これらの影響を適切に求める必要があるが、有限要素法による解析結果⁴⁾などによれば、従来の設計式による評価法ではその精度が

十分ではないことなどが指摘されている。したがって、ゴム支承の圧縮特性に関するモデル化の手法について詳細な検討を行い、このとき生じるひずみ量をより正確に把握することは重要な課題であると考えられる。

よって本研究では、多層構造を有するゴム支承の圧縮特性に着目し、圧縮たわみ量および圧縮によって生じる局部せん断ひずみ量の算出方法について、その理論式を解くことにより、評価モデルの違いによる特性値への影響やその推定精度などに関する検討を行う。

2. 圧縮たわみ量の評価モデル

(1) モデルの分類

ゴム支承の圧縮特性に関しては表-1に示すような研究例がみられる。それぞれゴムの変形状態について、いくつかの仮定を設定して理論を展開しているものが多いが、その中で、材料の体積圧縮性を表す体積弾性係数 E_b について整理すると、

表-1 ギュム支承の圧縮特性に関する既往の研究例

研究例	手法	備考
服部・武井 ⁵⁾	非圧縮性を仮定 (近似解)	防振ゴムに関する研究 → 道路橋支承便覧 ¹⁾
Rejcha ⁶⁾	非圧縮性を仮定 (理論解)	橋梁用ゴム支承に関する研究 → 道路橋支承便覧 ¹⁾
Lindley ⁷⁾	圧縮性を考慮 (近似解)	建築用ゴム支承で採用
Kelly ⁸⁾	非圧縮・圧縮性の両方のモデル (理論解)	ゴム支承全般に関する研究
道路橋支承便覧の改訂 ²⁾	実験回帰式	橋梁用ゴム支承で採用予定

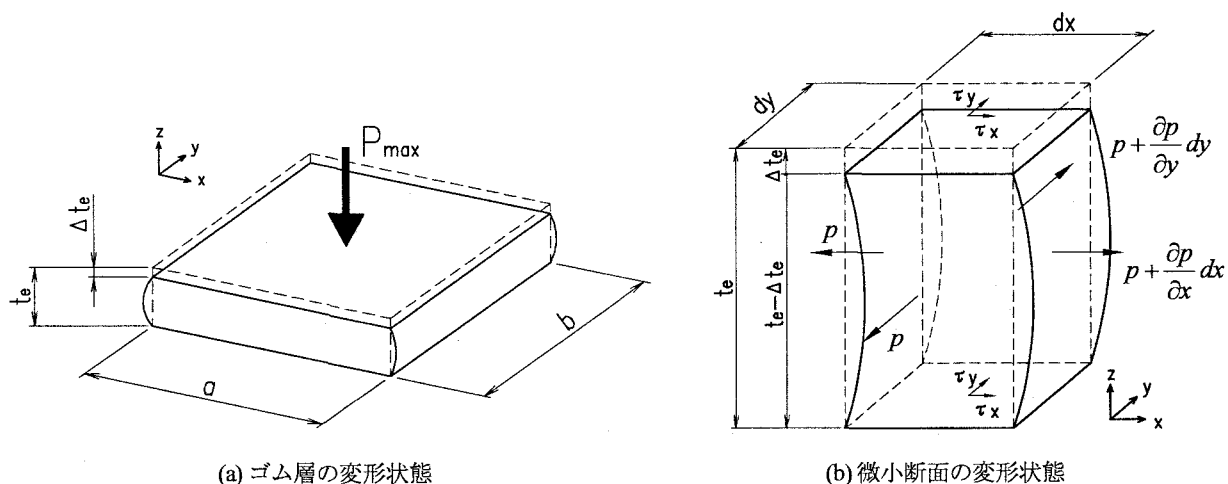


図-1 ゴムの圧縮変形

a) ゴム自体は圧縮してもその体積的には全く変化が生じない、完全な非圧縮性を有する材料であると仮定したモデル

(ポアソン比 $\nu = 0.5$, 体積弾性係数 $E_b = \infty$)

b) ゴム自体にも圧縮によって微小ながら体積変化が生じることを考慮し、ゴムが有している体積圧縮性を評価したモデル

(ポアソン比 $\nu \approx 0.5$, 体積弾性係数 $E_b \neq \infty$)

の2つに分類することができる。

ゴムのポアソン比は極めて 0.5 に近く (0.4999 前後)、一般には非圧縮性を有している材料とみなして評価することが多い。ゴム支承の場合における従来の設計手法では、橋梁用では非圧縮性を仮定したモデル (上記 a) を、建築用では圧縮性を考慮したモデル (上記 b) を採用している^{1), 9)}。このような違いは、橋梁用のゴム支承には回転吸収性能が要求されることから建築用に比べてゴム1層の厚みが厚くなり、形状係数 S が比較的小さい範囲で主に使用されることが要因と考えることができる。つまり、圧縮たわみ量の評価に用いるゴム支承の縦弾性係数 E_c は、 S が小さい範囲の場合、ゴムの圧縮変形量は主に側面への膨出変形として生じ、形状から求まる見かけの弾性係数 E_{ap} が支配的となり、ゴム自体の体積弾性係数 E_b に起因する体積圧縮率はほとんど寄与しないが、一方で、建築用ゴム支承のように S が大きく、積層構造によるゴム体の拘束効果が高くなる場合では、 E_{ap} だけではなく、ゴム自体の E_b による体積圧縮率についても無視できない影響を与える状態になるためである。

本文では、先に述べたように橋梁用ゴム支承においても、より広範囲にわたる形状に対して性能評価を行う必要があることから、 E_b の影響を考慮に入れたモデルを用いることが重要であると考え、この点に着目して検討を行う。

(2) 非圧縮性を仮定したモデル

まず、橋梁用ゴム支承に対して従来より用いられている非圧縮性を仮定したモデルについて考える。これには表-1 に示したように服部・武井⁵⁾、Rejcha⁹⁾、Kelly⁸⁾などの研究があるが、特に Rejcha, Kelly はゴムの変形状態に関する基礎方程式を誘導している。それによると図-1 のような $a \times b$ の矩形断面を有するゴム層に対して上下面が水平方向 (x, y 方向) に拘束された状態で鉛直方向 (z 方向) に変形を受ける場合を想定し、また、ゴム側面には拘束がなく自由に変形できるものと考え、このときの基礎方程式は、

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} = -\frac{12G \times \Delta t_e}{t_e^3} \quad (1)$$

により与えられる。ここで、 p : ゴム体の任意の断面に生じる応力、 G : セン断弾性係数、 Δt_e : 圧縮たわみ量、 t_e : 変形前のゴム厚である。なお、この誘導に際しては以下の3つの仮定が設けられている。

1) ゴム側面には放物線上の変形が生じる。

2) ゴムに発生する応力 p は静水圧的等方性を有し、上記の放物線上では等値である。

$$p_x + p_y + p_z = p \quad (2)$$

3) ゴムは非圧縮性を有する。

$$\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = 0 \quad (3)$$

また、Rejcha は矩形断面のゴム支承に対して式(1)を解き p の一般解を求めており、Fourier 級数 C_p を用いて、

$$p(x, y) = C_p \times \frac{a^2 G \times \Delta t_e}{t_e^3} \quad (4)$$

となることを示している。

これらのことから、ゴム支承の縦弾性係数 E_c を誘導するため、式(4)による微小断面の応力 p をゴム支承断面全体 (面積 $A = ab$) に対して積分し、このときの平均応力度 f を求めると、

$$f = \frac{P_{max}}{A} = \frac{1}{A} \int_A p(x, y) dA = \frac{G}{C_t} \times \frac{a^2}{t_e^2} \varepsilon_c = E_c \varepsilon_c \quad (5)$$

となる。ここで、 ε_c は圧縮たわみ量 Δt_e によって生じる圧縮ひずみ量である。よって、 E_c^i を非圧縮性 (incompressibility) を仮定した場合の縦弾性係数とし、形状係数 S および算出係数 C を用いて整理すると、

$$E_c^i = \frac{4}{C_t} \left(\frac{a}{b} + 1 \right)^2 \times S^2 G = C \times S^2 G \quad (6)$$

$$C_t = \frac{\pi^4}{96 \sum_{m=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{m^4} \left(1 - \frac{2}{m\pi} \frac{a}{b} \tanh \frac{m\pi b}{2a} \right)}$$

と表現することができる。式(6)の算出係数 C は G の Fourier 級数を含んでいるため、パラメータとなるゴムの辺長比 a/b に対して解を求めると図-2を得ることができる。この図から正方形断面 ($a/b=1$) あるいは1辺 (b) が非常に大きい帯状断面 ($a/b \rightarrow 0$) に着目すると、

$$\text{正方形} : E_c^i = 6.73 \times S^2 G \quad (7)$$

$$\text{帯状} : E_c^i = 4.0 \times S^2 G \quad (8)$$

となる理論式が求まり、これは Kelly が示している解と同じ結果である。

一方で、橋梁用ゴム支承の設計式としては従来から服部・武井式が採用されており¹⁾、縦弾性係数を見かけの弾性係数 E_{ap} で表現して、

$$\text{矩形} : E_c^i = E_{ap} = (3 + 6.58 S^2) G \quad (9)$$

$$\text{帯状} : E_c^i = E_{ap} = (4 + 3.29 S^2) G \quad (10)$$

としている。この服部・武井式は微小弾性ひずみ理論に基づいてエネルギーの釣り合い方程式を解いた近似式であるが、理論式から求まる式(7)、(8)との差はほとんどなく、特に正方形断面における $S < 40$ の範囲ではその差は2%程度と非常に小さい。ただし、式(6)の理論式では図-2に示したようにゴムの辺長比が異なることにより算出係数 C が変化するが、式(9)、(10)を用いた道路橋支承便覧の設計法ではそれぞれの断面形状によって一定値の係数を採用しており、また、矩形と帯状の設計上の境界をゴムの辺長比で $a/b < 0.5$ 、 $a/b > 2$ と規定している。このような手法に対して、ゴム形状が変化することによる弾性係数への影響度を求めた結果を図-3に示す。この図から S が大きくなるにつれて、多少の誤差が確認できるが、全体的には非圧縮性を仮定した理論式と道路橋支承便覧による設計手法とは比較的良く一致していることが分かる。

(3) 圧縮性を考慮したモデル

次にゴムの体積弾性係数 E_b に起因する体積圧縮性を考慮したモデルについて検討を行う。

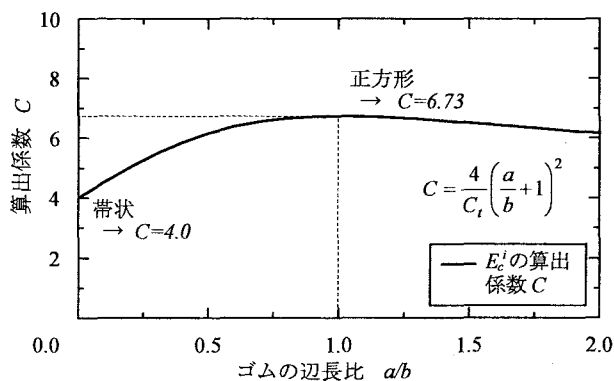


図-2 非圧縮性を仮定した理論式の算出係数 C

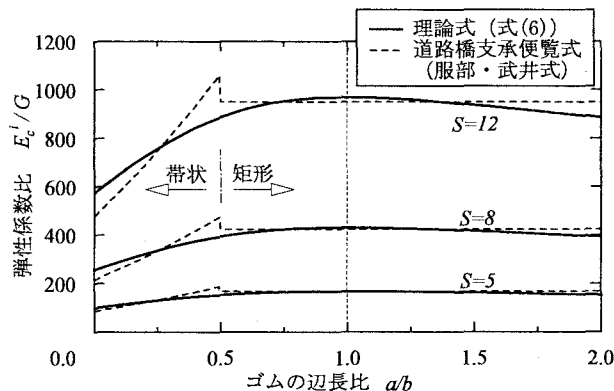


図-3 非圧縮性の理論式と道路橋支承便覧式の比較

Kelly は非圧縮性を仮定したモデルから圧縮性を考慮したモデルへと拡張させており、非圧縮性を表現した式(3)を、

$$\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = -\frac{p}{E_b} \quad (11)$$

と置き換え、その結果、式(1)の基礎方程式は、

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} - \frac{12p}{t_e^2} \frac{G}{E_b} = -\frac{12G \times \Delta t_e}{t_e^3} \quad (12)$$

となることを示している。これを正方形断面に対して解くと、

$$p(x, y) = E_b \varepsilon_c \left\{ 1 - \frac{\cosh \lambda (x - a/2)}{\cosh \lambda a/2} - C_f \right\} \quad (13)$$

$$C_f = \sum_{m=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{4\lambda^2}{m\pi \alpha_m^2} \frac{\cosh \alpha_m y}{\cosh \alpha_m a/2} \sin m\pi x/a$$

となり、この p の一般解から先と同様に縦弾性係数 E_c を誘導すると、

$$E_c^b = E_b \left(1 - \frac{1}{\beta} \tanh \beta - \frac{8}{\pi^2} \sum_{m=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{\beta^2}{m^2 \beta_m^2} \frac{1}{\beta_m} \tanh \beta_m \right) \quad (14)$$

を得ることができる。ここで、 E_c^b は体積圧縮性 (bulk compressibility) を考慮したときの縦弾性係数であり、また、 β および β_m (λ および α_m) は、

$$\beta = \frac{\lambda a}{2} = \left(\frac{48G}{E_b} \right)^{\frac{1}{2}} \times S, \quad \beta_m = \frac{\alpha_m a}{2} = \left(\beta^2 + \frac{m^2 \pi^2}{4} \right)^{\frac{1}{2}}$$

として、 S を含む関数で与えられる。

一方、Lindley⁷⁾は見かけの弾性係数 E_{ap} と体積弾性係数 E_b との直列モデルにより評価しており、これは、ゴムの材料特性による補正係数を用いた近似解として下式のように表される。

$$E_c^b = \frac{1}{\frac{1}{E_{ap}} + \frac{1}{E_b}} = \frac{1}{\frac{1}{E_0(1+2\kappa S^2)} + \frac{1}{E_b}} \quad (15)$$

ここで、 E_0 ：ゴム材料の弾性係数、 κ ：ゴムの硬度による補正係数である。

さらに、道路橋支保便覧の改訂による設計式²⁾に着目すると、実験データの分布から実験回帰式として、

$$E_c^e = \alpha \beta \times SG = 35 \times SG \quad (16)$$

が示されている。ここで、 E_c^e は実験式 (empirical formula) として求めた縦弾性係数であり、また、 α 、 β についてはゴム支承の種類、平面形状による係数で、矩形の積層ゴム支承の場合では $\alpha \beta = 35$ とされている。

以上、圧縮性を考慮したモデル E_c^b として式(14)、(15)の2種類および実験値を表現したモデル E_c^e として式(16)による算出方法を示したが、ここで、これらの評価式の特性を把握するため、各係数値を表-2 のように設定¹⁰⁾して試算を行った結果を図-4 に示す。

なお、同図には先の非圧縮性を仮定したモデル E_c^i

(式(7)、式(9)) による算出結果もあわせて示している。この図から形状係数 S が5程度までは、どの評価式もほぼ同じ特性を示しているが、 S が大きくなるにつれて E_c^i と E_c^b との間には大きな差が生じていることが分かる。力学的にみても積層構成をより多層とし、ゴムの拘束効果を向上させて E_c の増大をはかっても材料のもつ体積弾性係数値以上まで硬くすることはできないため、 E_c^i は S が大きい場合では不合理な数値を与えていることになる。一方、 E_c^b は E_b の数値に漸近する傾向を示しており、実際の圧縮特性に近い状態を表現しているものと考えられる。また、実験回帰式 E_c^e について着目すると、圧縮性を考慮したモデルの特性値と比較的良好一致を示している。このことから、 E_c^e は体積弾性係数 E_b の影響を考慮に入れたモデルであると捉えることができ、また同時に、橋梁用ゴム支承においても $S > 5$ となる場合には、ゴム材料の体積圧縮性を考慮した評価モデルを採用する必要があると判断できる。なお、式(16)の実験式は $5 < S < 11$ の供試体における実験データを対象として作成されているが、この範囲を超えても $S = 20$ 程度までは理論式との整合性が良いことが確認できる。

表-2 ゴムの材料特性

項目	係数値
せん断弾性係数 G (MPa)	1.06
ゴム材料の弾性係数 E_0 (MPa)	4.45
ゴムの硬度による補正係数 κ	0.57
体積弾性係数 E_b (MPa)	1150

<凡例>

非圧縮性を仮定
 — 式(7)-理論式
 --- 式(9)-近似式
 圧縮性を考慮
 — 式(14)-理論式
 --- 式(15)-近似式
 実験回帰式
 — 式(16)-実験式

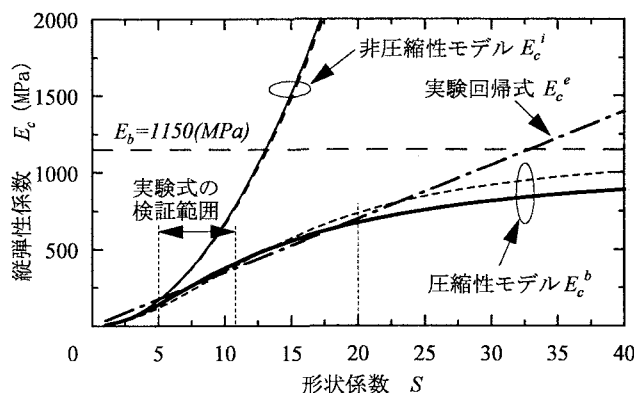


図-4 各評価モデルによる E_c の特性値

3. 局部せん断ひずみの評価モデル

(1) 圧縮による局部せん断ひずみの定義

橋梁用ゴム支承の設計では E_c により求まる圧縮たわみ量 Δt_e に関する照査に加え、 Δt_e によって生じる積層端部の局所的なひずみを圧縮による局部せん断ひずみ (γ_c) として評価している。これは、図-5 に示したように圧縮変形によりゴムが側面へ膨出するときの変形量 h_x を用いて、

$$\gamma_c = \frac{2h_x}{t_e'/2} = \frac{4h_x}{t_e'} \quad (17)$$

として定義されるものである。

この γ_c を求める方法として Kelly は、 $\text{div } \tau = 0$ 、 $\tau = G\gamma$ の関係などから、

$$\gamma_c = \frac{1}{G} \tau_{\max} = \frac{1}{G} \int_{t_e} \frac{\partial}{\partial x} p(x, y) dz \quad (18)$$

により与えられることを示しており、これは先に誘導した p の一般解を用いて解くことができる。

(2) 非圧縮性を仮定したモデル

道路橋支保便覧では Rejcha のモデルを用いて γ_c の算出式を示しており、ここで、 γ_c^i ：非圧縮性を仮定した場合の局部せん断ひずみの評価式、 $P_{\max}$ ：ゴム支承に作用する鉛直荷重、 E_c^s ： γ_c を求める際に用いる縦弾性係数の評価モデル、 K_c ：算出係数とすると、

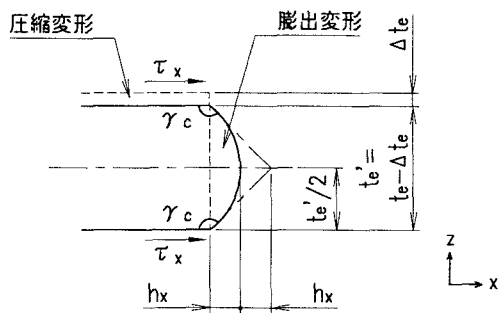


図-5 圧縮による局部せん断ひずみ γ_c

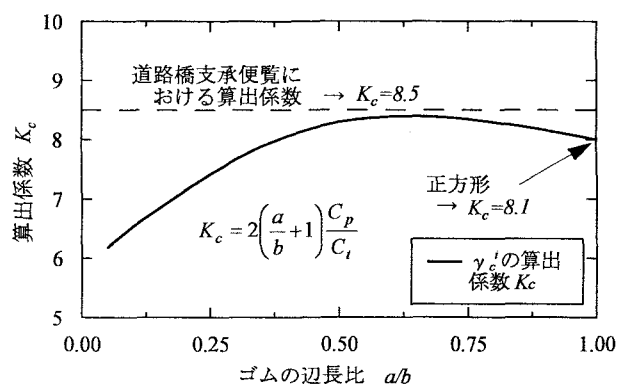


図-6 γ_c^i の算出係数 K_c

表-3 評価式の組み合わせ

case	評価式: $\gamma_c(E_c^s)$	関数: γ_c	変数: E_c^s	備考
A	$\gamma_c^i(E_c^i)$	非圧縮性: 式(19) (Rejcha, Kelly)	非圧縮性: 式(9) (服部・武井)	両者とも非圧縮性を仮定したモデル → 従来の設計手法 (道路橋支承便覧式)
B	$\gamma_c^i(E_c^b)$	非圧縮性: 式(19) (Rejcha, Kelly)	圧縮性: 式(15) (Lindley)	E_c^s の評価を Lindley 式としたモデル
C	$\gamma_c^i(E_c^e)$	非圧縮性: 式(19) (Rejcha, Kelly)	圧縮性: 式(16) (実験式)	E_c^s の評価を実験式としたモデル
D	$\gamma_c^b(E_c^b)$	圧縮性: 式(21) (Kelly)	圧縮性: 式(14) (Kelly)	圧縮性を考慮した解析上の理論式

$$\gamma_c^i = K_c S \varepsilon_c = K_c S \frac{P_{max}}{A \times E_c^s} \quad (19)$$

$$K_c = 2 \left(\frac{a}{b} + 1 \right) \frac{C_p}{C_t}$$

と表現できる。さらに K_c における C_p , C_t の Fourier 級数を辺長比 a/b に対して解くと図-6 のようになり、この結果から計算上の煩雑さを避け、かつ安全側の配慮として設計式では $K_c=8.5$ の一定値を採用している。

一方、Kelly が示している式(18)による解法を行うと、正方形断面の境界条件を設定すれば、

$$\gamma_c^i = 12 S \varepsilon_c \left(1 - \sum_{m=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{8}{m^2 \pi^2} \frac{1}{\cosh m \pi / 2} \right) = 8.1 S \varepsilon_c \quad (20)$$

となり、これは図-6 による正方形断面の係数から、式(19)と同じ結果であることが確認できる。

(3) 圧縮性を考慮したモデル

圧縮性を考慮した場合の γ_c の評価式 (γ_c^b) についても式(18)に p の一般解 (式(13)) を代入して求めると、

$$\gamma_c^b = K_b S \varepsilon_c = K_b S \frac{P_{max}}{A \times E_c^s} \quad (21)$$

$$K_b = 12 \left(\frac{1}{\beta} \tanh \beta - \sum_{m=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{2}{\beta_m^2} \frac{1}{\cosh \beta_m} \right)$$

を得ることができる。

先に縦弾性係数 E_c の検討結果からゴム支承の圧縮特性としては体積弾性係数 E_b を評価する必要性があ

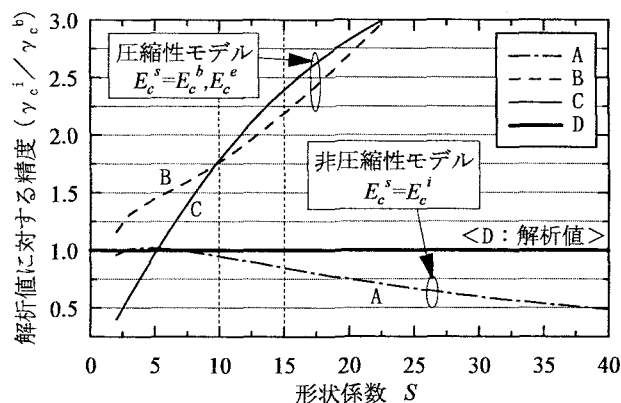


図-7 各評価モデルの推定精度

ることが明らかとなっているため、 γ_c を求める場合にもその圧縮性を考慮したモデルを用いる必要がある。よって、式(21)による γ_c^b の評価式を用いて、このときの E_c^s のモデルを式(14)の E_c^b とした手法が解析上の理論式として、もっとも精緻な解を与えるものと考えられる。

(4) 評価式の推定精度

ここで求めた解析値 γ_c^b には、双曲線関数や Fourier 級数による係数が含まれており、しかも、そのパラメータには S の項が存在しているため、その解法は多少煩雑となる。一方、従来から設計に用いられてきた γ_c^i による評価式の場合では、その係数 K_c に Fourier 級数などが含まれてはいるが、これはゴムの辺長比 a/b のみで求まり、また、この解は図-6 として既に得

られている。したがって、設計実務的な観点からすると γ_c を求める際には、解析値となる γ_c^b よりも容易に計算が可能な γ_c^i の方が適していると考えられる。そこで、 γ_c^i の評価式を採用し、このときに組み合わせる E_c^s のモデルを変数にとることによって、 γ_c^b を推定する手法について以下に検討を行う。

ここでは、各モデルの組み合わせケースとして、表-3 に示した $\gamma_c(E_c^s)$ により表現される関数モデルを対象とした。これらの結果を解析値 $\gamma_c^b(E_c^b)$ により基準化して整理したものを図-7 に示す。この図から、非圧縮性のモデル(case A)は解析値(case D)に対して γ_c を過小評価する傾向にあるが、 $S<10$ 程度であればその差はほとんどなく 10%以下の誤差に収まっている。一方、 E_c^s に圧縮性を考慮したモデルを使用したケース(case B,C)では γ_c を安全側に評価することにはなるが、 $S=15$ 程度では 2 倍以上の値を示し、その精度は著しく低いことが確認できる。このような結果が得られた理由としては、図-5 に示したように γ_c は圧縮たわみ量 Δ_{te} によりゴムが側面に膨出する変形量 h_x によって生じるが、 E_b の影響による変形状態の場合ではゴムに体積圧縮が起きているために、その圧縮変形分がそのまま側面のゴムの膨出変形にはつながらず、 h_x の増加にはあまり寄与しない状態になるためと考えられる。つまり、 γ_c に対しては E_c^s のみに圧縮性モデルを用いると実際には変形していない h_x を過度に見込んでしまうために過大評価につながり、一方、非圧縮性を仮定したモデルでは、上記の理由から γ_c の算出では解析値にある程度近い値を示すが、この場合でもその変形量を適切には求めていないため、傾向としては過小評価となる。ここで、この $\gamma_c^i(E_c^i)$ の評価式を用いたときの解析値の推定精度としては、 $S>15$ となると誤差が 20%以上となり、 γ_c をかなり小さめに評価して危険側となるため、このような場合には注意が必要である。

なお、ここでは詳細は示していないが、円形もしくは帯状断面を有するゴム支承の場合においても同様に解析を行った結果、本検討における矩形断面の特性とほぼ同じような傾向を示すことが確認されている。

4. まとめ

本研究では、ゴム支承の圧縮特性に関して、ゴム材料自体の体積圧縮性に着目した検討を行った結果、以下のような知見が得られた。

- 1) ゴムの体積圧縮性を考慮することにより、ゴム支承の圧縮特性の評価には大きな差が生じることが確認された。
- 2) 実験回帰による設計式はゴムの体積圧縮性を考慮したモデルと $S<20$ の範囲において良い一致を示しており、このことから橋梁用ゴム支承においても体積圧縮性を考慮した評価モデルを採用することが必要であると判断できる。
- 3) 圧縮による局部せん断ひずみについて、ゴムの体積圧縮性を考慮した解析上の理論式を誘導した。

今回の解析結果からゴム支承の圧縮特性を評価するためには体積弾性係数を考慮する必要があることが明らかとなったが、一方で、この数値は非常に大きな値(1000~2000MPa 程度)をとることから、これを正確に求めることは一般に困難であるとされている。本研究では、橋梁用ゴム支承に対する実験回帰式から推定した結果、1000MPa 程度の数値が得られたことから、文献等を参考として係数の設定を行ったが、今後、体積弾性係数の適切な算定法およびその影響度などについて詳細な検討を進めていく必要があると考えている。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋支承便覧，1991.7
- 2) 支承便覧分科会 紫桃孝一郎，岩立次郎：技術情報 道路橋支承便覧の改訂について，道路，pp.45-47，2003.4
- 3) 姫野岳彦，運上茂樹：橋脚の塑性化によって生じるゴム支承の回転変形に関する一考察，第 6 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，Vol.6，pp.407-410，2003.1
- 4) 松田泰治，大塚久哲，中島崇之，矢葺宣：FEMを用いた積層ゴムの力学特性に与える形状パラメータの影響評価に関する研究，構造工学論文集，Vol.47A，pp.895-904，2001
- 5) 日本鉄道車輛工業会：改訂新版 防振ゴム，現代工学社，1975.8
- 6) Rejcha, C : Design of Elastomer bearings, Journal of the Prestressed concrete institute, Vol.9, No.5, pp.62-78, 1964.10
- 7) Lindley, P.B. : Load-compression relationships of rubber units, Journal of Strain Analysis, I(3), pp.190-195, 1966
- 8) Kelly, J.M. : Earthquake-Resistant Design with Rubber, Springer-Verlag, pp.69-87, 1997
- 9) 日本建築学会：免震構造設計指針，1989.9
- 10) Freakley, P.K. and Payne, A.R. : Theory and Practice of Engineering with Rubber, Applied Science Publishers Ltd, 1978