

高減衰積層ゴムに対する Kikuchi-Aiken モデルの対応に関する補足資料

Kikuchi-Aiken モデル¹⁾は、藤田ら²⁾の提案した免震用高減衰積層ゴムの復元力特性モデル (Rate モデル) に対し、積層ゴムのハードニング領域についても精度よく実験結果を再現するために、Kikuchi ら¹⁾によって改良されたモデルです。

SS21/DynamicPRO, SS21/SuperDynamicPRO では、(株)ブリヂストン製高減衰積層ゴム (ゴムのせん断弾性係数 $G=0.6$ および 0.4MPa)³⁾の Kikuchi-Aiken モデルに必要なパラメータが自動的に設定され、効率よくかつ高精度に免震構造の地震応答解析を行うことができます。また上記以外の高減衰積層ゴムについても適切なモデルパラメータを直接指定することで同様の解析を行うことができます。

本資料では、(株)ブリヂストン製高減衰積層ゴムに Kikuchi-Aiken モデルを適用した解析例を紹介し、ます (使用プログラム：SS21/DynamicPRO)。

■ Kikuchi-Aiken モデルの概要とモデルパラメータ

Kikuchi-Aiken モデルについては、文献^(例えば 14)に詳しく説明されていますが、ここでは簡潔にまとめられている文献⁵⁾の内容をもとにその概要を示します。

スケルトンカーブにおける変位 X と復元力 F を次式で表します。

$$F = (G_{eq} A / T_r) X \quad (1)$$

ここに、 G_{eq} はせん断ひずみの関数で表されるゴムの等価せん断弾性率、 A は積層ゴムの断面積、 T_r はゴムの総厚です。履歴ループは次式のように F_1 と F_2 の和とします。

$$F = F_1 + F_2 \quad (2)$$

ここに、 F_1 , F_2 は次式で表します。

$$\begin{cases} F_1 = (1/2)(1-u)F_m \{x + \text{sgn}(X)|x|^n\} \\ \dot{X} > 0: F_2 = uF_m \{1 - 2e^{-a(1+x)} + b(1+x)e^{-c(1+x)}\} \\ \dot{X} < 0: F_2 = -uF_m \{1 - 2e^{-a(1-x)} + b(1-x)e^{-c(1-x)}\} \end{cases} \quad (3a,b,c)$$

ここに、 u , x は次式で、 n は実験値から同定されたハードニング特性係数です。

$$u = F_u / F_m, \quad x = X / X_m \quad (4a,b)$$

X_m, F_m はスケルトンカーブからの除荷時の変位と荷重を表し、 n, a, b, c は履歴ループの形状を規定するパラメータで、 a, b, c は次式で表される q との関係式より求めます。

$$q = \pi h_{eq} / 2 \quad (5)$$

h_{eq} は等価粘性減衰定数、 F_u は荷重切片を表し、 n, h_{eq}, u は G_{eq} と同様にせん断ひずみの関数で表されます。地震応答解析では、Masing 則を適用しランダムな変位の変化に対する復元力を規定します。

Kikuchi-Aiken モデルに必要なパラメータは以下となり、プログラムでは指定されたゴムのせん断弾性係数に応じたパラメータ値⁶⁾が自動的に設定されます。

表 1 必要なモデルパラメータ

・等価せん断剛性 G_{eq} の歪み依存特性を規定するパラメータ	これらは一般に歪みに関する多次数式や指数式で表される
・等価粘性減衰定数 H_{eq} の歪み依存特性を規定するパラメータ	
・降伏荷重特性値 u の歪み依存特性を規定するパラメータ	
・ハードニング特性係数 n の歪み依存特性を規定するパラメータ	
・ a と $b(=0.0)$ の評価を分ける歪み γ とパラメータ a , およびパラメータ c	

■ ブリヂストーン製高減衰積層ゴムの Kikuchi-Aiken モデル入力方法

Kikuchi-Aiken モデルを用いるには SS21/DynamicPRO にオプション機能『曲線型履歴オプション』が必要です。『MRB (ブリヂストーン) -Kikuchi-Aiken モデル』を選択し、モデルの入力画面でゴム層総厚、ゴム有効断面積、ゴム種 (せん断弾性係数) および G_{eq} , H_{eq} , u に対する変動係数を入力します (下図参照)。

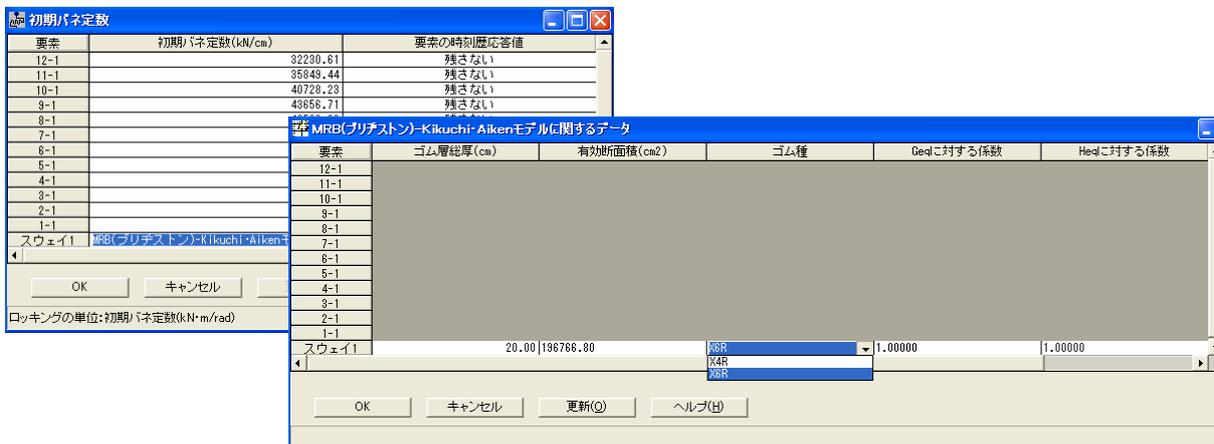


図1 Kikuchi-Aiken モデル入力画面 (SS21/DynamicPRO)

■ 解析例, および修正バイリニアモデルと Kikuchi-Aiken モデルの比較

鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説⁸⁾に記載の設計例 (12階建て) を上部構造とし、高減衰積層ゴムを1層下部に配置した基礎免震構造の解析例を示します。ただし本建物モデルは耐震構造として設計されており、そのまま免震構造に用いるのは非現実的ですが、部材の詳細が掲載されていることと本資料の目的を勘案してそのまま用いることとしました。上部構造のモデルや復元力特性データは元の文献および弊社 Web 資料【12階建て RC 造建物】⁹⁾を参照ください。下図に基準階伏図, X3 軸組図を示します。

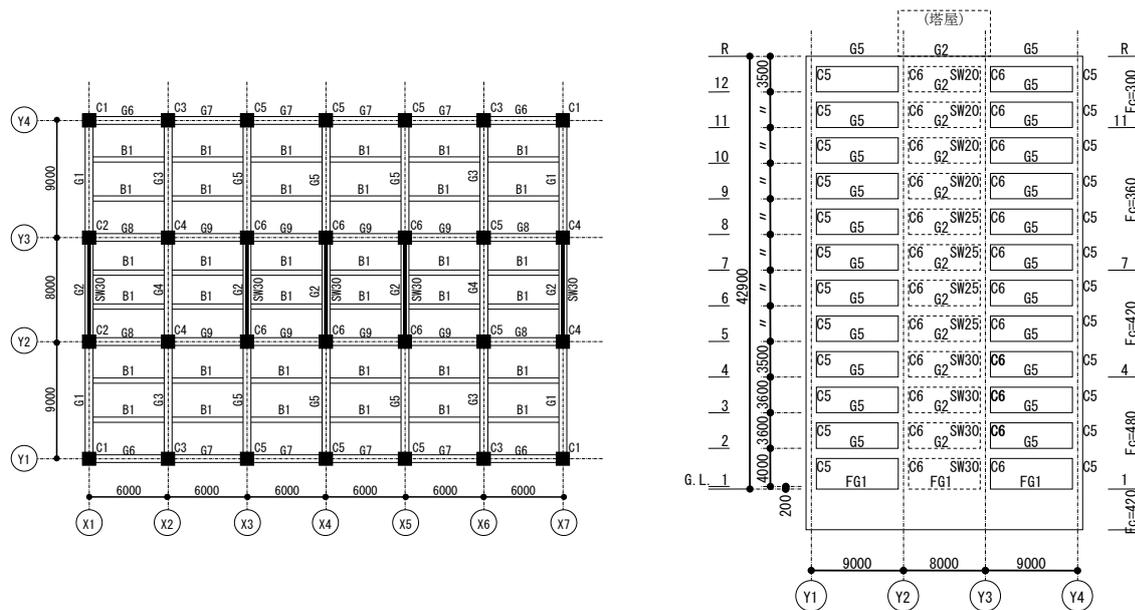


図2 解析例の上部構造 (基準階伏図と X3 軸組図)⁸⁾

高減衰積層ゴムはブリヂストン製とし，せん断弾性係数 $G=0.6$ または $G=0.4\text{MPa}$ （いずれもゴム層総厚 200mm タイプ）を用いた場合の 2 ケースを解析します。また積層ゴムの歪み依存性以外による特性の変動は無視（基準値に対し変動係数=1.0）します。それぞれの配置図を以下に示します。

Y4	090X6R	090X6R	090X6R	090X6R	090X6R	090X6R	090X6R	型式 長期荷重(kN) 長期面圧(MPa)
	4578.9	5466.7	5702.1	5745.7	5702.1	5466.7	4578.9	
	7.2	8.6	9.0	9.0	9.0	8.6	7.2	
Y3	090X6R	090X6R	110X6R	110X6R	110X6R	090X6R	090X6R	
	8050.7	7481.1	10742.3	10750.9	10742.3	7481.1	8050.7	
	12.7	11.8	11.3	11.3	11.3	11.8	12.7	
Y2	090X6R	090X6R	110X6R	110X6R	110X6R	090X6R	090X6R	
	8050.7	7481.1	10742.3	10750.9	10742.3	7481.1	8050.7	
	12.7	11.8	11.3	11.3	11.3	11.8	12.7	
Y1	090X6R	090X6R	090X6R	090X6R	090X6R	090X6R	090X6R	
	4578.9	5466.7	5702.1	5745.7	5702.1	5466.7	4578.9	
	7.2	8.6	9.0	9.0	9.0	8.6	7.2	
	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	

図 3 高減衰積層ゴムの配置【 $G=0.6\text{MPa}$ 】

Y4	120X4R	120X4R	120X4R	120X4R	120X4R	120X4R	120X4R	型式 長期荷重(kN) 長期面圧(MPa)
	4578.9	5466.7	5702.1	5745.7	5702.1	5466.7	4578.9	
	4.1	4.8	5.1	5.1	5.1	4.8	4.1	
Y3	120X4R	120X4R	120X4R	120X4R	120X4R	120X4R	120X4R	
	8050.7	7481.1	10742.3	10750.9	10742.3	7481.1	8050.7	
	7.1	6.6	9.5	9.5	9.5	6.6	7.1	
Y2	120X4R	120X4R	120X4R	120X4R	120X4R	120X4R	120X4R	
	8050.7	7481.1	10742.3	10750.9	10742.3	7481.1	8050.7	
	7.1	6.6	9.5	9.5	9.5	6.6	7.1	
Y1	120X4R	120X4R	120X4R	120X4R	120X4R	120X4R	120X4R	
	4578.9	5466.7	5702.1	5745.7	5702.1	5466.7	4578.9	
	4.1	4.8	5.1	5.1	5.1	4.8	4.1	
	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	

図 4 高減衰積層ゴムの配置【 $G=0.4\text{MPa}$ 】

次表に地震応答解析条件を示します。

表 2 地震応答解析条件

置換振動系	免震層下部を固定とした 13 質点等価せん断型モデル (12 階+免震層)
内部粘性減衰定数と減衰条件	上部構造の内部粘性減衰定数は上部構造による 1 次固有周期に対し 0.02 とし，高次は振動数に比例。免震層の内部粘性減衰は無視した減衰マトリックスは瞬間剛性に比例させた
入力地震波	BCJL2 ¹⁰⁾ (元波)，解析時間 (積分) 間隔は 1/200(s)

以下に，X 方向に対する応答結果として，加速度，変位，層せん断力係数の最大値と免震層の履歴ループを示します。また修正 Bi-Linear モデルを用いた結果と比較します。

表 3 最大応答値【G=0.6MPa, X方向】

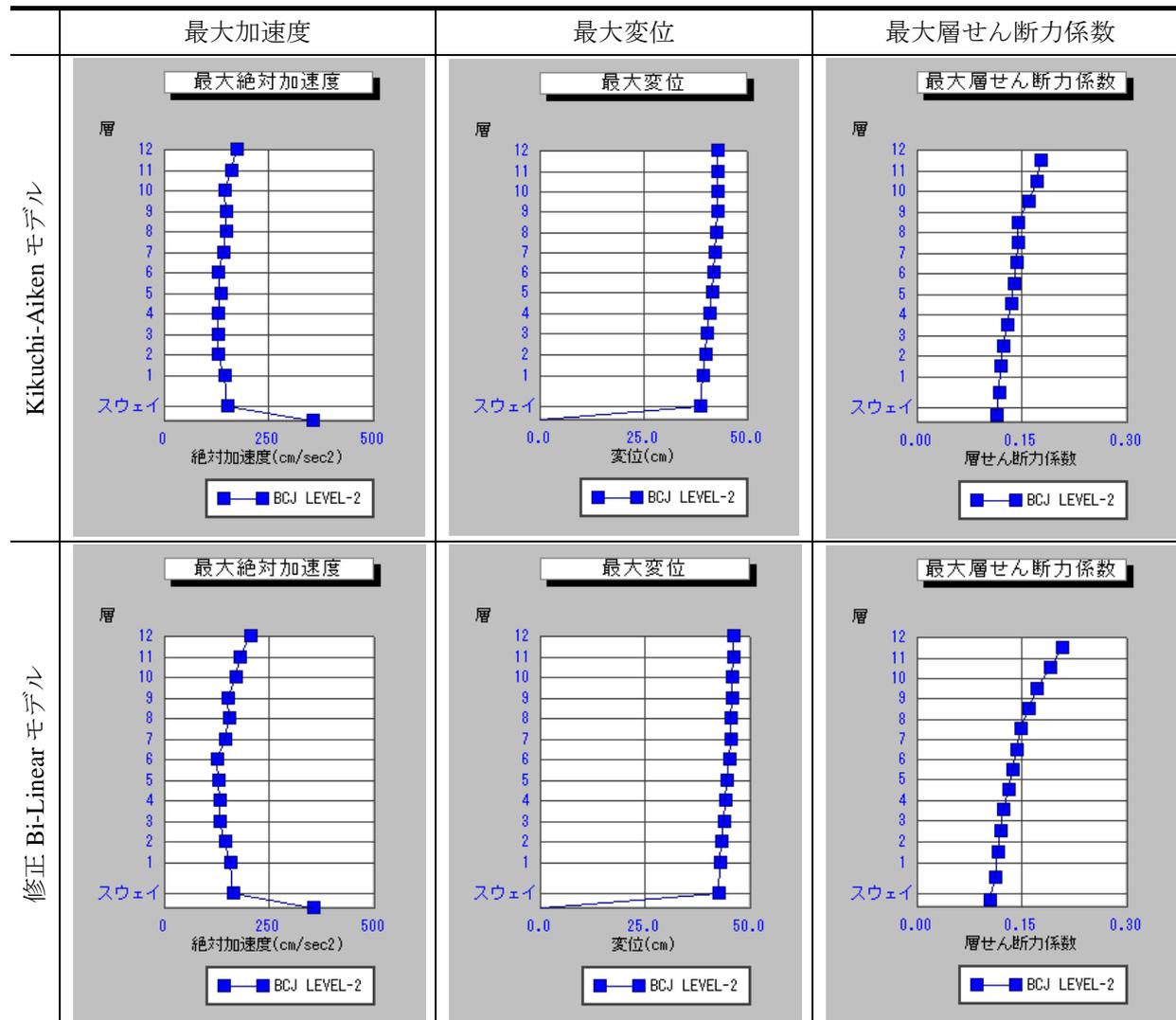


表 4 免震層応答履歴ループ【G=0.6MPa, X方向】

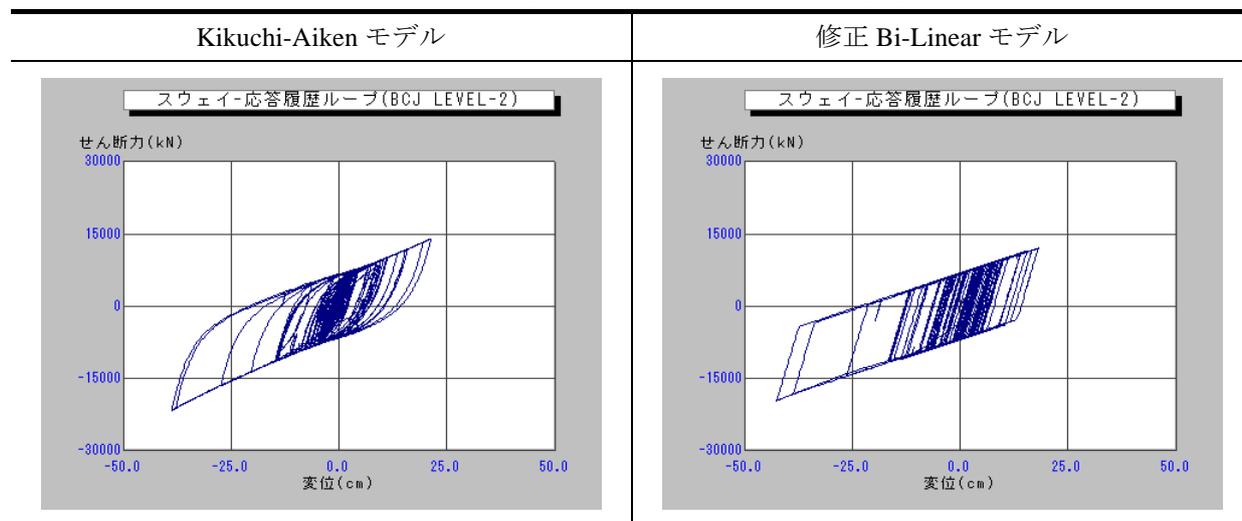


表 5 最大応答値【G=0.4MPa, X 方向】

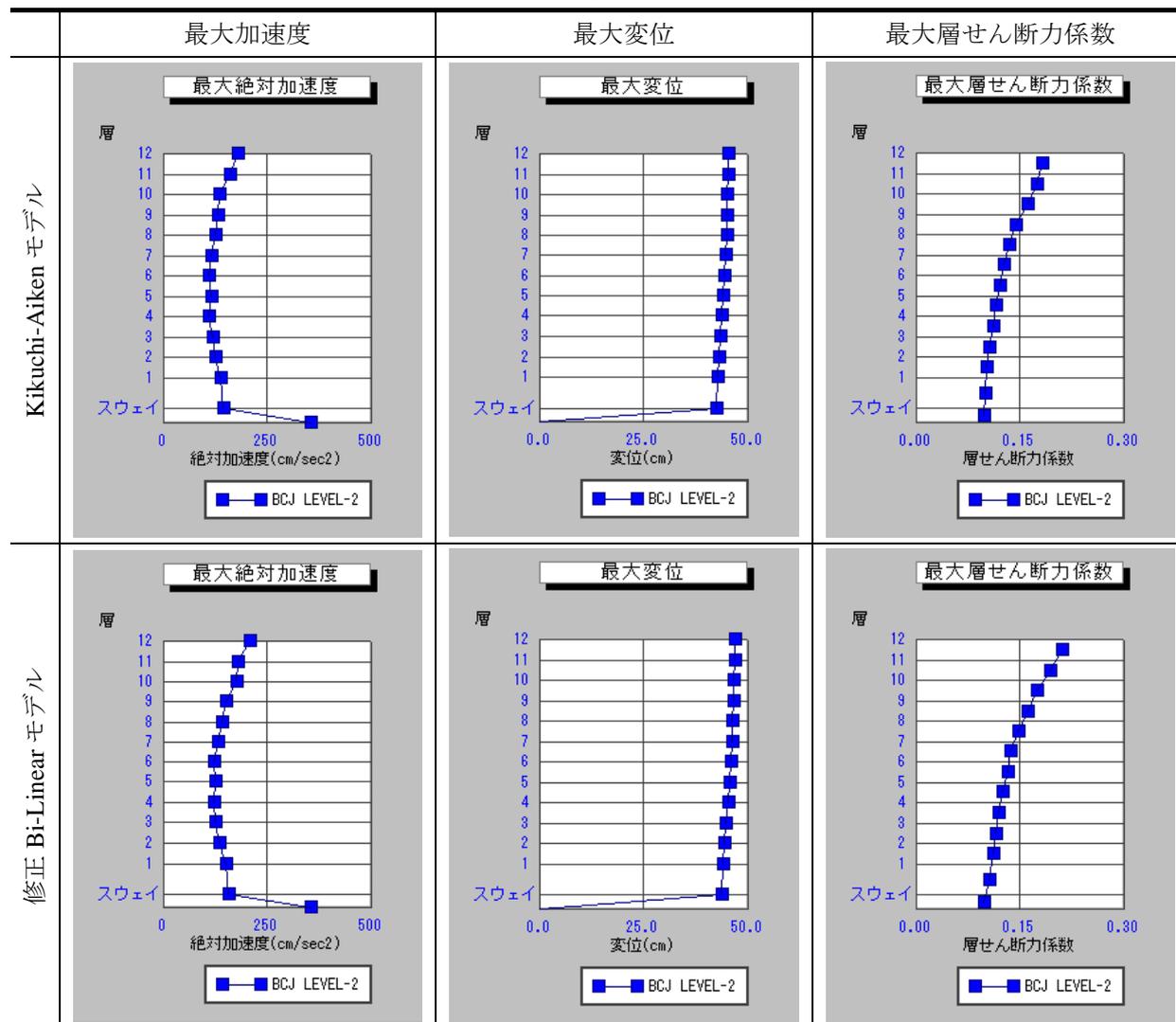
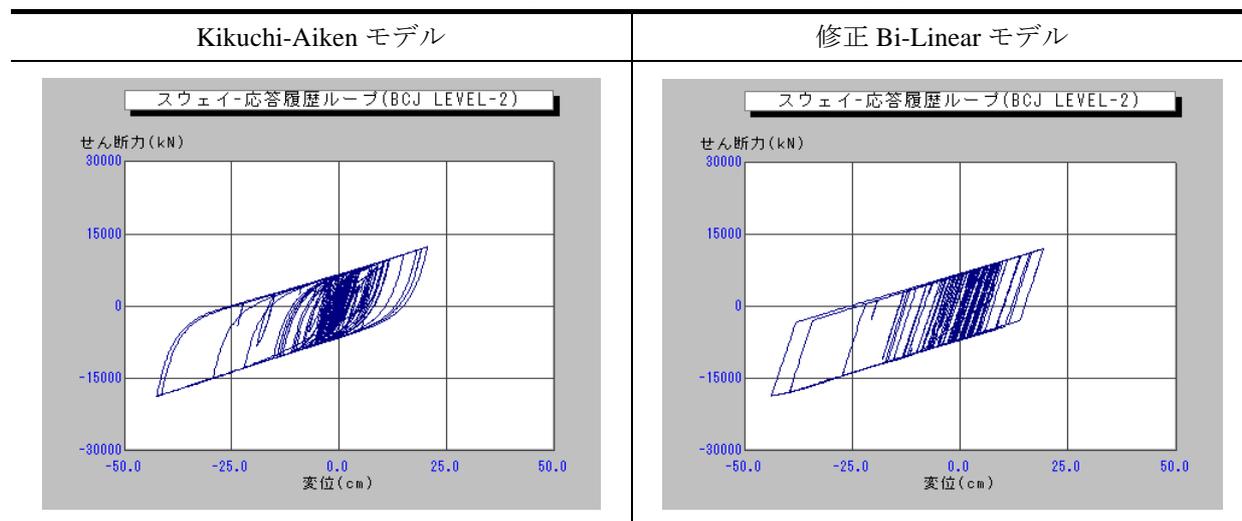


表 6 免震層応答履歴ループ【G=0.4MPa, X 方向】



■まとめ

Kikuchi-Aiken モデルおよび修正 Bi-Linear モデルは，ともに積層ゴムの試験結果から同定されたパラメータを用いているため，ハードニングが生じない範囲において免震層の応答が大きく異なることはないと考えられます。本例でもほぼ同程度の応答結果となりました。ただし上部構造においては，履歴ループが曲線型（Kikuchi-Aiken モデル）と折れ線型（修正 Bi-Linear モデル）の違いによると思われる応答への影響が少し見られます。すなわち，復元力特性を曲線型とすることで上部構造の高次モードの励起が抑制¹¹⁾され，本例でも加速度やせん断力応答が上層部でやや有利な結果となりました。

一方，今回の入力地震動レベルでは積層ゴムの最大歪みは約 200%と，ハードニングによる影響がほとんど現れませんでした。さらに大きく変位応答するような場合では，ハードニングの影響が考慮できる Kikuchi-Aiken モデルを採用することで，より合理的な地震応答解析を行うことができます。

謝辞

Kikuchi-Aiken モデルの SS21 シリーズ地震応答解析プログラムへの導入に際しまして，菊地優教授（北海道大学），室田伸夫氏（㈱ブリヂストン），竹内貞光氏（同），加藤秀章氏（同）の皆様からご指導とご協力をいただきました。特に菊地優教授には数値検証のご協力をいただきました。ここに記し謝辞を申し上げます。

参考文献

- 1) M.Kikuchi, I.D.Aiken : An analytical hysteresis model for elastomeric seismic isolation bearings, EESD, Vol.26, 215-231, 1997
- 2) 藤田隆史，鈴木重信，藤田聡：建物免震用の高減衰積層ゴムに関する研究（第1報，履歴復元力の基本特性と解析モデル），日本機械学会論文集（C編）56巻523号，1990.3
- 3) ブリヂストン：高減衰系ゴム系積層ゴム（X0.6 シリーズ，X0.4 シリーズ）技術資料，https://www.bridgestone.co.jp/service/data_download/dp/ar_cad/download/page:2
- 4) 菊地優，北村佳久，井上圭一，上田正生：履歴減衰型免震部材の復元力モデルに関する研究，日本建築学会構造系論文集 第565号，2003.3
- 5) 積層ゴムの復元力モデルに関する研究，MENSHEIN No.10，日本免震構造協会，1995.11
- 6) 菊地優，石井建，加藤秀章：大変形・高軸力下における高減衰積層ゴムの力学挙動に予測に関する研究，日本建築学会構造工学論文集 Vol.56B，2010.3
- 7) 加藤秀章，菊地優，石井建，鶴原正樹：低弾性高減衰積層ゴムの大変形挙動解析モデルに関する研究，日本建築学会学術講演梗概集（北海道），2013.8
- 8) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説，丸善，2001.9
- 9) ユニオンシステム：『SS21/DynamicPRO』を用いた地震応答解析の入力データと解析結果【12階建てRC造建物】，<http://www.unions.co.jp/dps/dynamic/files/23.pdf>
- 10) 建設省建築研究所，日本建築センター：設計用入力地震動作成手法技術指針（案），1992.3
- 11) 日本建築学会：免震構造設計指針，丸善，2001.9

(2014/01/22 山崎久雄)