

部材座屈が生じるブレース材に対する 復元力特性モデルの提案

株式会社クレアテック 服部 孝生

1. はじめに

近年、既設道路橋の耐震性向上策の一つとして、制震デバイスが多く採用されているが、その前提である既設橋の耐震性能評価について、十分な解析精度を得ることは容易ではない。例えば下図のような上路式アーチ橋では、対傾構・下横構はレベル 1 地震荷重や風荷重への抵抗は期待できるが、細長比が大きいため、レベル 2 地震動では部材座屈が避けられず、それを全体系の非線形動的解析で考慮するには、以下に挙げる 2 種類の対処法が必要となる。

(1) 複合非線形動的解析

(2) 材料非線形性のみを考慮とした解析とし、履歴タイプを図-2 のような圧縮側の耐力を低下させた非対称バイリニア型、逆行型、あるいは引張専用要素を採用。

上記(1)で、座屈を再現するには、残留応力・初期たわみを考慮する必要があり、高度かつ煩雑な計算技術を要し実務的ではなく、一方(2)では圧縮側の正確な耐力評価が期待できない問題がある。

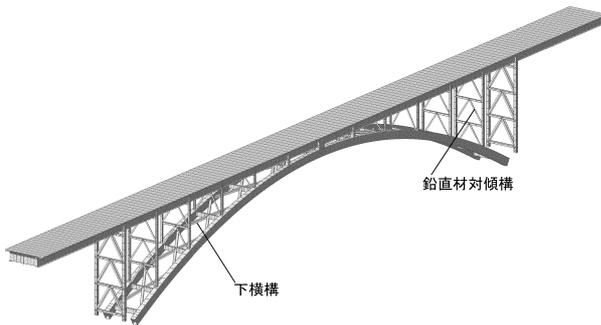


図-1 上路式アーチ橋モデル

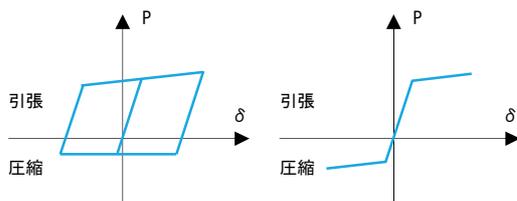


図-2 履歴特性(非対称バイリニア型、逆行型)

そこで、建築分野で提案されたものの、道路、鉄道

分野では使用実績がほとんど無い修正若林モデルの採用を提案する。図-3 にモデルの概要を示す。本モデルは繰返し載荷に伴う座屈耐力の低下が考慮できる構成則で、ユーザーは初期座屈耐力、細長比等の設定で座屈時の復元力特性が再現可能となる。

	若林モデル	修正若林モデル
座屈耐力	繰返し座屈耐力	初期座屈耐力 (鋼構造設計規準)
座屈耐力低下	考慮しない	考慮する
圧縮耐力曲線	$n_c = \frac{1}{\sqrt{p1 \cdot \zeta_c + p2}}$	$n/n_0 = \frac{1}{\sqrt{\zeta_c - pm}}$
引張側耐力曲線	$n_t = \frac{1}{\sqrt{(p3 \cdot \zeta_t + 1)^3}}$	同左
圧縮側耐力曲線 移動則	$\frac{x_b}{x_{b0}} = \frac{y}{y_0}$	同左
引張側耐力曲線 移動則	$x_a = \ln(q1 \cdot \zeta_a + 1) - q2 \cdot s$	同左
弾性除荷域	$q3 = 0.3\sqrt{n_E} + 0.24$	同左

$p1, p2, p3, q1, q2, q3, pm: n_E$ で決定される定数

ここで、 ζ_c : 圧縮側無次元ひずみ

$$n_E = \frac{\pi^2 \cdot E}{\lambda^2 \cdot \sigma_y} : \text{無次元 Euler 座屈応力度 ただし、} n_E \leq 10$$

λ : 細長比、 σ_y : 降伏応力度

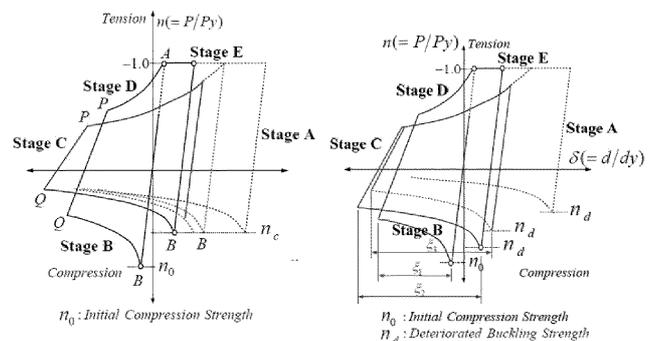
初期座屈耐力

$$\lambda \leq \Lambda \quad n_0 = 1 - 0.4 \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2$$

・ $\lambda = 80$ では、 $n_0 = 0.90$
・ $\lambda = 100$ では、 $n_0 = 0.71$

ここで、 $\Lambda = \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E}{0.6 \cdot \sigma_y}}$: 限界細長比

$E=2.0 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$, $\sigma_y=235 \text{ N/mm}^2$ では、 $\Lambda=118$



【若林モデル】

【修正若林モデル】

図-3 修正若林モデルの概要¹⁾²⁾

2. 解析モデル

下図に示す架構モデルの既存ブレースを軸降伏ダンパーに交換した制震対策前後に対し計算を実行した。柱、梁は線形梁要素、既存ブレースは復元力特性に修正若林モデルを用いた非線形バネ要素とした。なお、既存ブレースの諸元は京大防災研究所で実施された図-5、表-1、2に示す試験体³⁾の物性値を使用するものとし、細長比 65, 104 の 2 種類を対象とした。入力加速度は図-6 に示す道路橋示方書の規定波⁴⁾とし、使用ソフトウェアはmidasCivilとした。

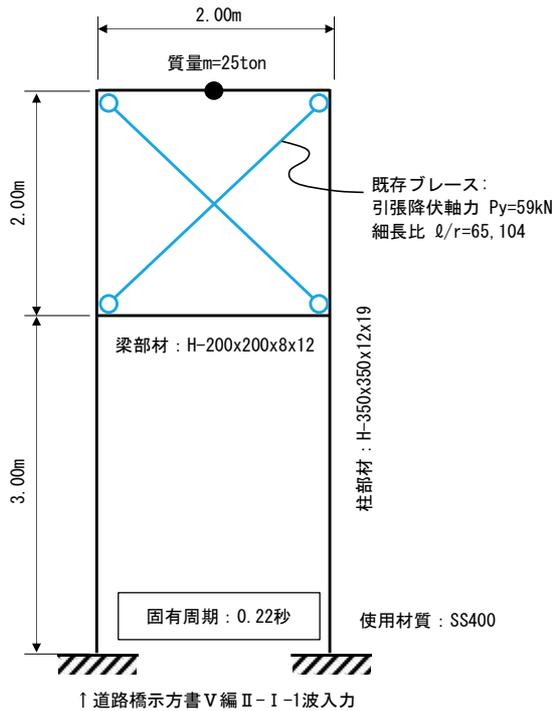


図-4 解析モデル

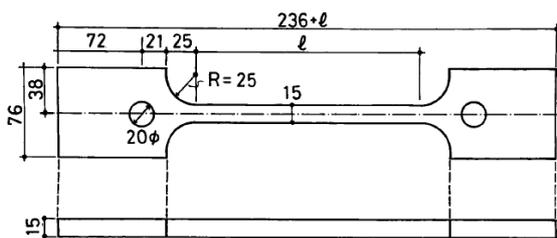


図-5 試験体形状³⁾

表-1 試験体データ³⁾

Specimen name	Length (cm)	Width (mm)	Depth (mm)	Slenderness ratio	Buckling Load (t)
RRC-60	27.99	14.99	15.03	64.51	5.94
RRC-100	45.32	15.01	15.06	104.26	3.60

表-2 試験体 材料物性³⁾

Young's modulus	$2.18 \times 10^3 \text{ t/cm}^2$
Yield Stress	2.55 t/cm^2
Ultimate strength	4.35 t/cm^2
Strain-hardening strain	1.3%
Extensibility	31.8%

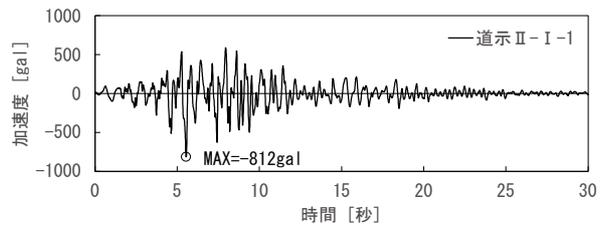


図-6 入力加速度波形⁴⁾

さらに既存ブレースを軸降伏型鋼材ダンパー（以降、BRB=Buckling-Restrained Brace と略記）に交換したケースを計算することで既存ブレースと BRB のそれぞれのエネルギー吸収量の比較を試みた。BRB の初期剛性は既存ブレースと同一とし、レベル 1 地震動まで弾性域内に留まるように降伏軸力を設定した。降伏比は 1/50 とした。

3. 解析結果

3.1 既存ブレースの応答

図-7 に細長比 64 ケースの既存ブレースの応答履歴図、それに対応する試験体 (RRC60) の結果を図-8 に示す。図-9 に細長比 105 ケースの既存ブレースの応答履歴図、それに対応する試験体 (RRC100) の結果を図-10 に示す。

いずれのケースも解析による履歴応答が、試験結果の荷重-変位関係と圧縮耐力の変化、除載荷時の曲線ともに再現性が高いことがわかる。

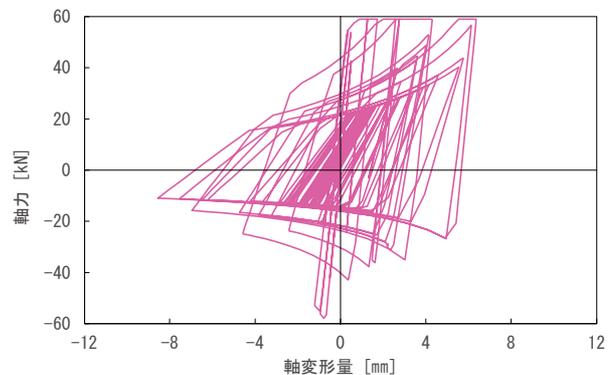


図-7 既存ブレース (l/r=65) の応答履歴

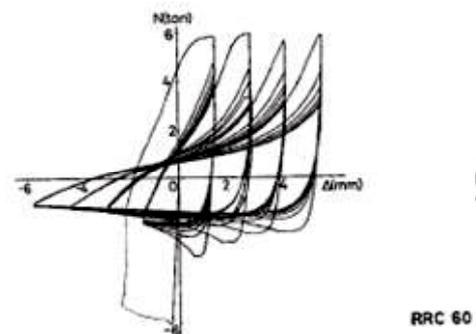


図-8 試験体 (RRC60) の荷重-変位関係

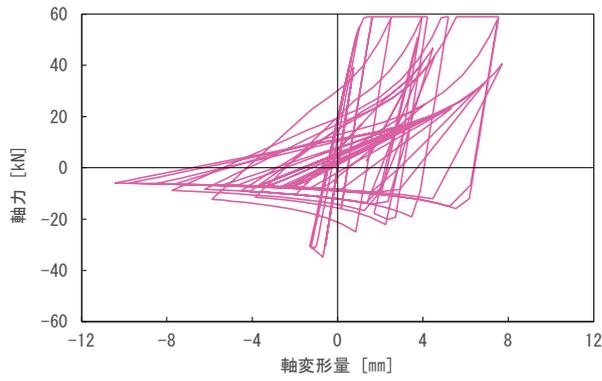


図-9 既存ブレース ($l/r=104$) の応答履歴

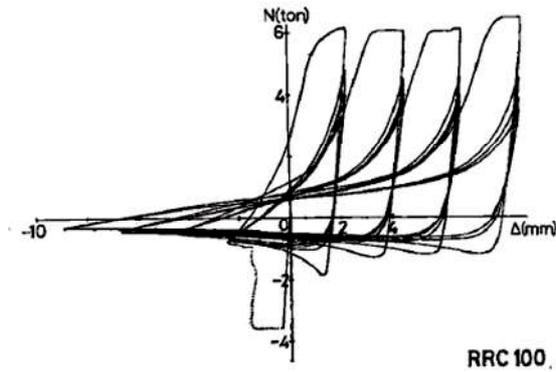


図-10 試験体 (RRC100) の荷重-変位関係

3.2 制震対策の効果

細長比 65 のモデルについて、図-11, 12 に変位時刻歴、図-13, 14 に加速度時刻歴、図 15, 16 に累積エネルギーを示す。それぞれ既存ブレースと BRB のケースを並べて掲載した。

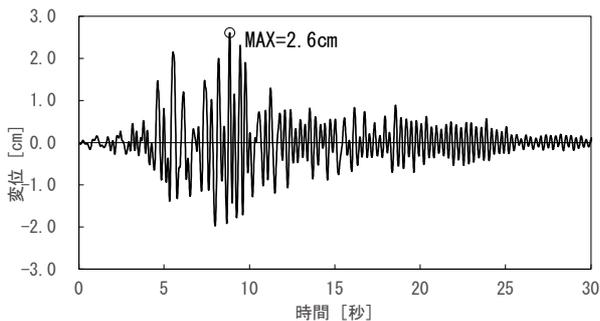


図-11 天端水平変位 ($l/r=65$, 既存ブレース)

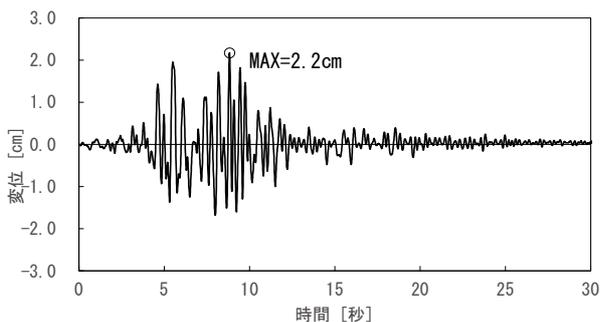


図-12 天端水平変位 ($l/r=65$, BRB)

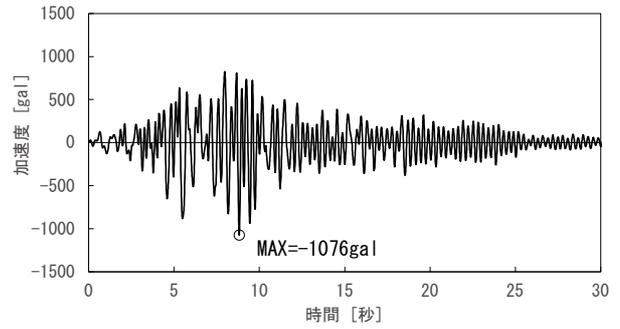


図-13 天端水平加速度 ($l/r=65$, 既存ブレース)

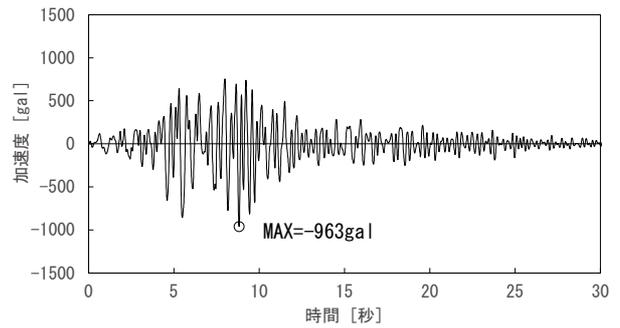


図-14 天端水平加速度 ($l/r=65$, BRB)

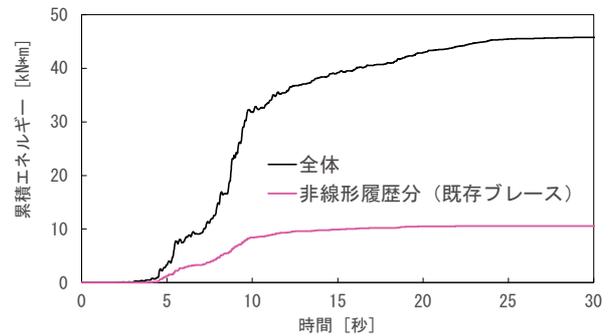


図-15 累積エネルギー ($l/r=65$, 既存ブレース)

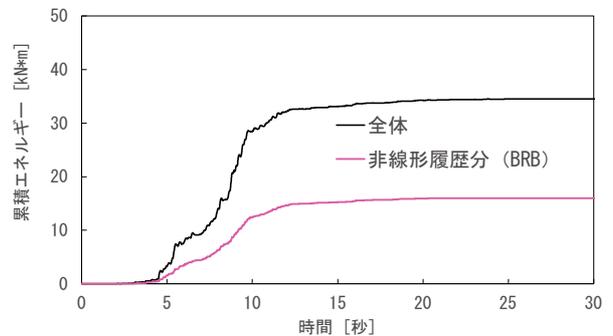


図-16 累積エネルギー ($l/r=65$, BRB)

細長比 65 のモデルで、既存ブレースを BRB へ交換した効果は、変位で 15%減少、加速度で 11%減少、履歴吸収エネルギーで 34%増加であった。

次に細長比 104 のモデルについて、図-17, 18 に変位時刻歴、図-19, 20 に加速度時刻歴、図 21, 22 に累積エネルギーを示す。それぞれ既存ブレースと BRB のケースを並べて掲載した。

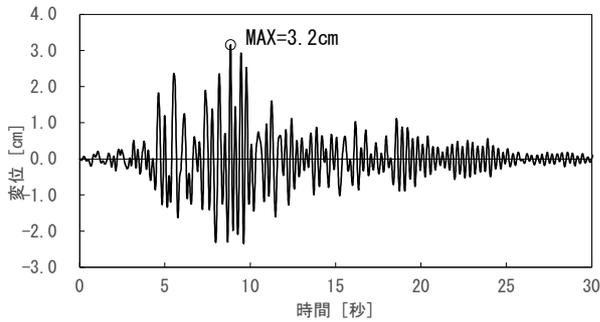


図-17 天端水平変位 ($l/r=104$, 既存ブレース)

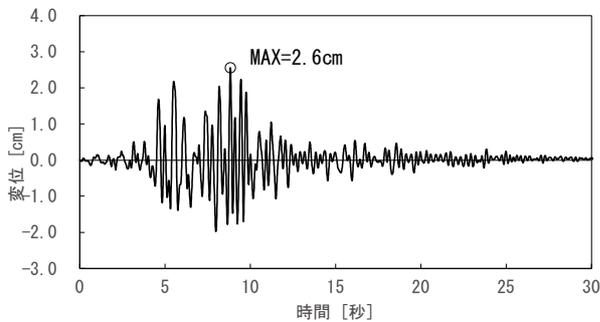


図-18 天端水平変位 ($l/r=104$, BRB)

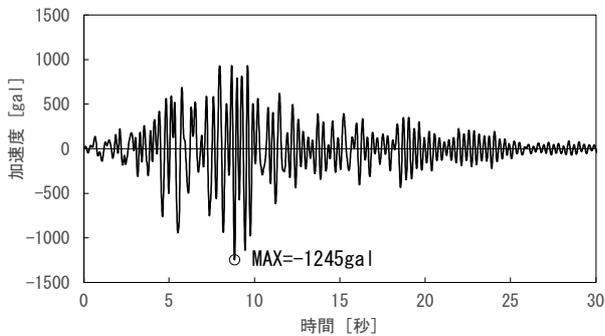


図-19 天端水平加速度 ($l/r=104$, 既存ブレース)

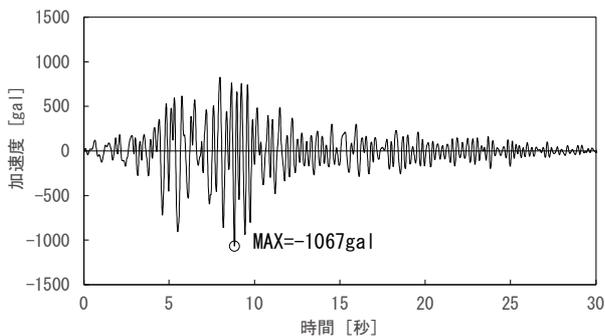


図-20 天端水平加速度 ($l/r=104$, BRB)

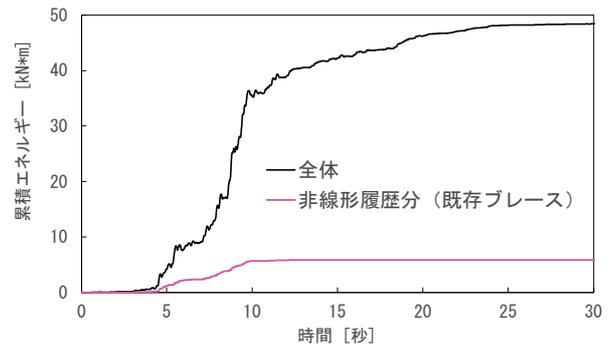


図-21 累積エネルギー ($l/r=104$, 既存ブレース)

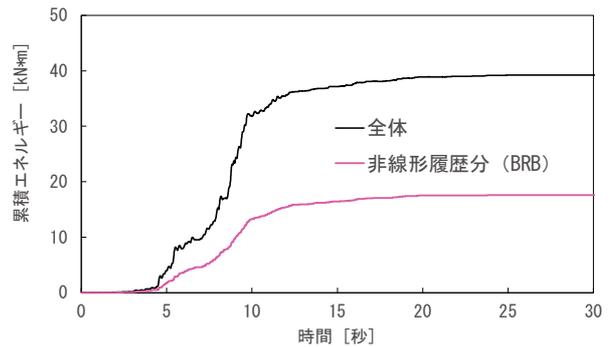


図-22 累積エネルギー ($l/r=104$, BRB)

細長比 104 のモデルで、既存ブレースを BRB へ交換した効果は、変位で 19%減少, 加速度で 14%減少, 履歴吸収エネルギーで 300%増加であった。細長比 65 のケースと比して、履歴吸収エネルギーによる効果は大きくなるものの、変位, 加速度に対する抑制効果は 2 割足らずであった。

次に、柱部材の最大断面力について、図-23, 24 にそれぞれ細長比 64, 104 の結果を掲載する。前述の変位, 加速度と同じく、細長比 104 の方が細長比 64 と比して、BRB の効果が確認できるものの、最大で 2 割程度であった。

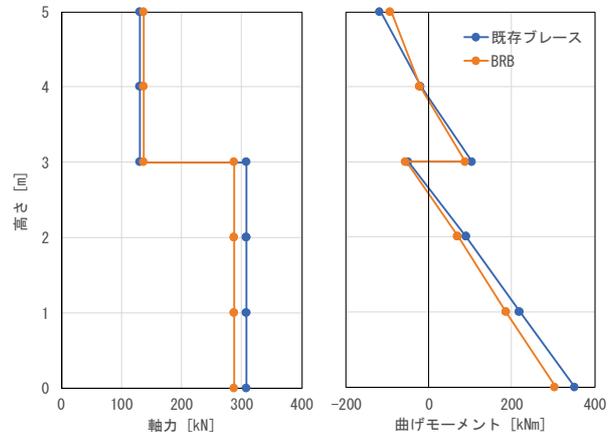


図-23 柱部材の断面力 ($l/r=65$ ケース)

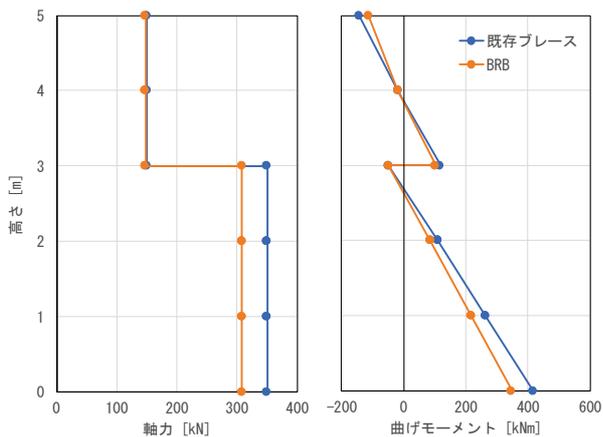


図-24 柱部材の断面力 ($l/r=104$ ケース)

図-25, 26 に BRB の応答履歴図を示す。細長比 65 の方が 2 次剛性が大きいのは、BRB の初期剛性を既存ブレースと同じにしたため、参照した試験体 RRC60 の方が RRC100 より部材長が短く軸剛性が大きいことが原因である。

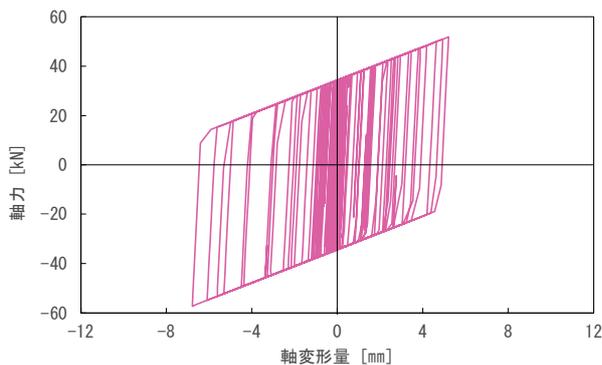


図-25 BRB の応答履歴 ($l/r=65$ ケース)

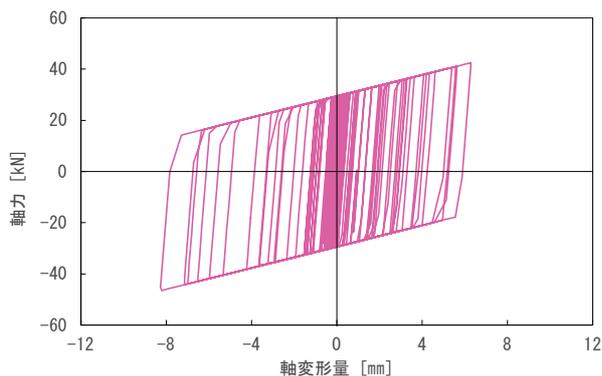


図-26 BRB の応答履歴 ($l/r=104$ ケース)

4. おわりに

本報では、道路・鉄道分野で使用実績のほとんど無い修正若林モデルを、座屈部材の復元力特性に考慮した動的解析を実施し、その履歴吸収エネルギーを把握するとともに、近年、導入実績の著しい制震

デバイスの効果について確認した。

まず、修正若林モデルは座屈後の剛性変化が急で負勾配も有することから解の安定性に懸念があったが、今回の簡単な架構モデルでは特に問題なく、全ステップ（積分時間間隔 1/1000 秒）で収束解が得られた。また、既往の京大防災研での繰返し載荷試験の荷重変位関係との再現性も良好であった。今回、計算ソフトウェアに midasCivil を使用したが、修正若林モデルは道路橋の汎用骨組解析で実績の多い DYN2E, SoilPlus, TDAPIII, RESP-D にも実装されており、今後は座屈の懸念のある部材の復元力特性として修正若林モデルを積極的に使用していきたい。

一方、圧縮側の耐力が期待できない細長比の大きい既存ブレースに対し、BRB は座屈せず安定した履歴ループを描くことから、耐震性向上が期待されるが、座屈による耐力低下を模擬した修正若林モデルを考慮した動的解析を実施したところ、既存ブレースの履歴吸収エネルギーが適切に考慮され、同部材を BRB へ交換した効果は最大で 20%程度の応答抑制であることがわかった。レベル 2 地震動の荷重で座屈が生じる場合、BRB への交換ありきではなく、既往構造物の保有している耐震性能を正確かつ合理的に評価し、効果的な耐震補強の方策を慎重に検討する姿勢が求められる。

参考文献

- 1) 竹内徹, 近藤佑樹, 他 2 名: 局部座屈を伴う組立材ブレースの座屈後履歴性状および累積変形性能, 日本建築学会構造系論文集, vol77, 2012.11
- 2) SoilPlus 理論マニュアル, 2019.4
- 3) 若林實, 野中泰二郎, 他 3 名: 繰返し軸方向力を受ける部材の挙動に関する実験, その 1, 京都大学防災研究所年報, No.16B, 1973.4
- 4) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V耐震設計編, 2017.12