

# ノックオフ部材とすべり支承からなる 支承構造のモデル化手法に関する検討

中西泰之<sup>1</sup>, 金田貴洋<sup>2</sup>, 松村政秀<sup>3</sup>

Yasuyuki Nakanishi, Takahiro Kanata, Masahide Matsumura

1 正会員, 株式会社ニュージェック, 道路グループ橋梁チーム (〒531-0074 大阪市北区本庄東 2-3-20)

E-mail: nakanishiys@newjec.co.jp

2 正会員 大成建設株式会社 東京本社土木部 (〒163-0606 東京都新宿区西新宿一丁目 25 番 1 号)

E-mail: knttkh00@pub.taisei.co.jp

3 正会員 大阪市立大学大学院准教授, 工学研究科都市系専攻 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138)

E-mail: m\_matsumura@brdg.civil.eng.osaka-cu.ac.jp

地震時に上・下部工の縁を完全に遮断することにより, 下部工・支承構造の慣性力が低下することを期待できる。ただし, 常時・中小地震時には復元力を有する必要があり, 強地震時には移動制限を開放するトリガー機構, および大変形時における変位制限機構が必要となる。本研究では, すべり支承を活用した支承, ノックオフ部材, および変位制限機構を配した新しい支承形式を提案する。支承構造にノックオフ部材や変位制限装置を備える場合, ノックオフ部材の破断や変位制限装置の衝突により, 振動系が大きく変化する。これらの縮小模型を対象に小型振動台を用いた実験を行い, 提案する支承構造の設計手法確立のために必要な動的応答特性データを蓄積した。また, 振動台実験に対して, 再現解析を行い振動系が大きく変化する場合の解析モデル化の手法について検討を行った。

**Keywords:** Sliding bearing, Shaking table test, Trigger, Dynamic response analysis

## 1. はじめに

近年, 免震ゴム支承や, 機能分離支承による橋梁は, 固有周期が比較的長くなる周期依存性を有しているため, 軟弱地盤や長周期地震などに対して共振しやすくなると考えられる。

一方, すべり支承を用いて上部構造と下部構造の縁を完全にきることができれば, 強地震時に下部構造へ伝達される地震時慣性力が低下し, 下部構造・支承構造のコスト削減が期待できる。強地震時のみ必要とされるこのようなすべり支承の機能は, 常時・中小地震時には上部構造と下部構造との間に復元力を有する必要があり, 強地震時には移動制限を確実に開放する機構および落橋に至るような大変形時における変位制限機構が必要となる。

そこで著者らは, 支承部の機能として, すべり支承を活用した支承形式, およびこれにトリガー部材としてノックオフ部材を配し, 常時や中小地震時には固定, 強地震時には可動化を図り, 強地震時のみにすべり支承による免震を期待する損傷制御法(固定から滑り支承に振動系を移行するシステム)を提案している<sup>1),2)</sup>。

このように, 支承構造にノックオフ部材や変位制限装置を備える場合, ノックオフ部材の破断や変位制限装置の衝突により, 橋梁の振動系が大きく変化する。これらの縮小模型を対象に小型振動台を用い

た実験を行い, 提案する支承構造の設計手法確立のために必要な動的応答特性データを蓄積する。

また, 提案する支承構造では, 大変形時に変位制限装置と橋桁の間に衝突が生じる。橋桁に関する衝突の解析モデル化の手法としては, 接触バネによる手法<sup>3),4),5)</sup>のほか, 衝突時のエネルギー損失を表現する手法として落石シュミレーション(DEM)に用いられる剛体転倒モデルを FEM に展開した手法などが提案されている<sup>6)</sup>。本検討では, より簡便かつ実用的な観点から, 衝突時のエネルギー損失を表現するため, 変位制限装置の特性をバネ-ダッシュポットにてモデル化した動的解析を行い, 実験結果と比較することにより再現性を検討するとともに, 変位制限装置の適切な解析モデル化の手法について検討する。さらに, 提案する支承構造について再現解析を行い, ノックオフ部材の適切な解析モデル化の手法について検討する。

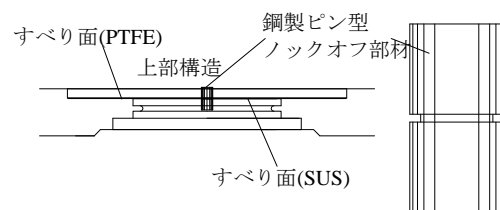


図-1 ノックオフ部材

## 2. ノックオフ部材の特性と設計式

これまで、図-1 に示す、鋼製の円柱に円形断面のスリットを加工により、作用力の方向依存性を解消した示す鋼製ピン型ノックオフ部材<sup>7),8)</sup>が提案されている。同形状であれば破断荷重のばらつきが小さいことと、スリット部の形状から破断荷重を求める設計式(1a),(1b)を提示されている。

供試体は、2種類の磨き材から製作した。ノックオフ部材に用いた鋼材の引張試験結果を表-1に示す。

$$P_u'' = \tau_u \cdot A \quad (1a)$$

$$\tau_u = (0.747 - 1.22 \times 10^{-4} \times \sigma_u) \times \sigma_u \quad (1b)$$

ここに、 $A$ ：スリット部の断面積(mm<sup>2</sup>)、 $\sigma_u$ ：鋼材の引張強さ(N/mm<sup>2</sup>)、 $\tau_u$ ：せん断強度(N/mm<sup>2</sup>)

表-1 材料試験結果

項目 試験体	$d$ (mm)	$A$ (mm <sup>2</sup> )	$E$ (N/mm <sup>2</sup> )	降伏点 $\sigma_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	引張強さ $\sigma_u$ (N/mm <sup>2</sup> )
A	10.07	79.6	$2.07 \times 10^5$	712.6	745.9
B	10.05	79.3	$2.07 \times 10^5$	701.9	744.2

表-2 ノックオフ部材の要素試験ケースと試験結果

供試体名	引張 供試体	スリット径 $d$ (mm)	スリット高 $h$ (mm)	$h/d$	設計荷重 $P_u''$ (kN)	破断荷重 $P_u$ (kN)	$P_u/P_u''$
S0308-1	A	3.48	0.78	0.22	4.65	4.50	0.97
S0308-2	A	3.53	0.79	0.22	4.78	4.55	0.95
S0308-3	A	3.52	0.77	0.22	4.76	4.55	0.96
S0308-4	B	3.47	0.81	0.23	4.59	4.95	1.08
S0316	B	3.48	1.58	0.45	4.61	4.35	0.94
S0408	B	4.28	0.79	0.18	6.98	7.25	1.04
S4316	B	4.29	1.57	0.37	7.01	6.70	0.96

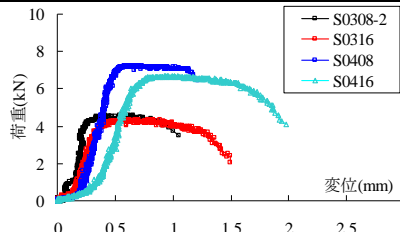


図-2 ノックオフ部材の荷重変位関係の一例

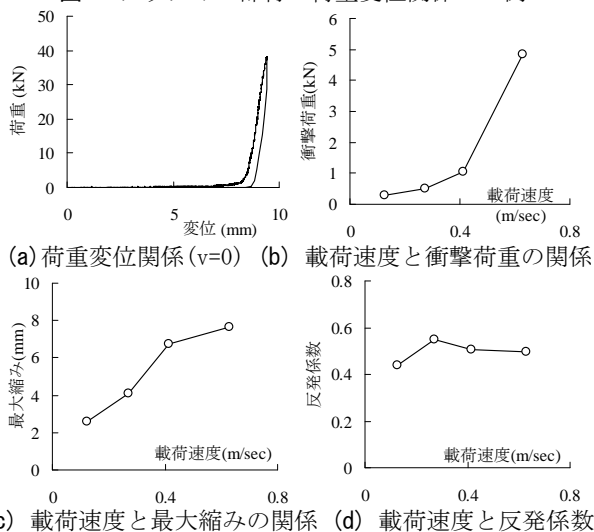


図-3 緩衝材の衝突実験結果

振動台実験に用いるノックオフ部材の破断特性を調べるために、静的なせん断破断実験を行った。振動台実験には、直径 16mm の鋼製ピンに、スリット径  $d$ 、スリット高さ  $h$  の円形断面のスリットを施したノックオフ部材を用いる。ノックオフ部材は振動台の設置上の制約から、 $d=3.5\text{mm}$  および  $4.3\text{mm}$ 、 $h=0.8\text{mm}$  および  $1.6\text{mm}$  の供試体を対象とした。

スリット径  $d=3.5\text{mm}$  の供試体は、振動台実験に使用する模型のおもり重量に L1 設計水平震度  $k_h=0.3$  を乗じた荷重で破断するように設計した。スリット径  $4.3\text{mm}$  の供試体は、破断荷重が  $d=3.5\text{mm}$  の供試体の 1.5 倍となるよう設計した供試体である。スリット高さは、加工できる最小寸法である  $h=0.8\text{mm}$ 、1.5 倍寸法に相当する  $h=1.6\text{mm}$  の供試体を作成した。スリット径  $3.5\text{mm}$ 、スリット高さ  $8\text{mm}$  の供試体については破断荷重のバラツキを確認するために 4 体の供試体を作成し実験を行った。

表-2 にノックオフ部材の要素試験ケースおよび試験結果を、図-2 に各供試体の荷重変位関係の一例を示す。

図-2 および表-2 より、スリット径  $d$  が大きくなると破断荷重が大きくなり、スリット径  $d$  対してスリット高さ  $h$  が大きくなると破断荷重が小さくなり最大荷重後の伸びが大きくなる傾向が認められる。次に、供試体間のバラツキに着目し  $d=3.5\text{mm}$ 、 $h=0.8\text{mm}$  の供試体の実験結果を確認すると、いずれの供試体においても破断荷重はほぼ同じ値を示し、製作等による荷重のバラツキは小さいことが確認できる。また、破断荷重  $P_u$  を設計荷重  $P_u''$  で除した破断荷重制御率  $P_u/P_u''$  を確認すると、すべての供試体で概ね 1 に近い値を示し、本検討に用いる供試体に対して、(1a)、(1b)により破断荷重を算定できることが確認できた。

## 3. 変位制限装置の特性

振動台実験に用いる変位制限装置には、衝撃の緩衝効果を期待して緩衝材を設置する。緩衝材は、製作性の観点から、片側 60 体、 $20\text{mm} \times 20\text{mm} \times 20\text{mm}$ 、硬度 20 度の熱硬化性ポリエーテルウレタンエラストマーを用いた。ここでは、緩衝材の衝突実験および緩衝材を配置した変位制限装置の 1 方向荷重試験を実施し、振動台実験に用いる変位制限装置の特性について確認した。

### (1) 緩衝材の衝突実験

振動台実験に用いる、緩衝材の要素特性、速度依存性、反発特性を把握するために、緩衝材に鋼材を

衝突させる衝突試験を行った。 荷重速度を 0 ~ 0.6 m/sec の間で変化させ、各パラメータと荷重速度の関係について確認した。

図-3(a) に荷重速度 0m/sec における緩衝材の緩衝材の荷重-変位関係を示す。 緩衝材の全高 20mm の約 40% 程度になると、ハードニングが生じ、急激に剛性が大きくなり非線形性を示す。

図-3(b) ~ (d) に荷重速度と緩衝材に生じる衝撃荷重、最大縮み、反発係数の関係を示す。 図-2(b) および(c) に示すとおり、荷重速度が大きくなるにつれ、緩衝材に生じる衝撃荷重および最大縮みは大きくなる傾向が認められる。 図-3(d) に示すとおり、反発係数については、本実験においては荷重速度に依存性は低く、平均で  $e=0.499$  を示した。

## (2) 変位制限装置の履歴特性

ここでは、振動台実験に用いる変位制限装置の履歴特性を確認する。 図-4 に示す試験方法にて、緩衝材 60 個を設置した変位制限装置に対して、1 方向に一定速度を作用させ、変位制限装置の履歴特性について確認した。

図-5 および表-3 に変位制限装置の 1 方向荷重試験結果を示す。 変位制限装置は、緩衝材厚さの約 40% に相当する圧縮変形を受けると非線形性を示す。

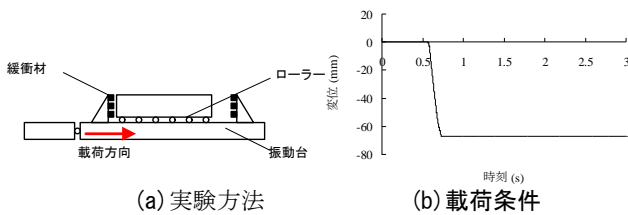


図-4 一方向荷重試験 試験方法

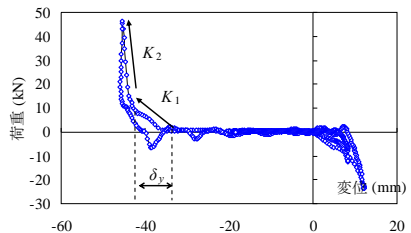


図-5 1 方向荷重試験結果 変位制限装置の荷重-変位関係

表-3 変位制限装置の履歴特性 表-4 すべり支承の履歴特性

初期剛性 $K_1$ (N/mm)	2次剛性 $K_2$ (N/mm)	降伏変位 $\delta_y$ (mm)	初期剛性 $K_1$ (N/mm)	2次剛性 $K_2$ (N/mm)	降伏荷重 $P_1$ (N)
1,600	18,100	8.68	107	1.32	179

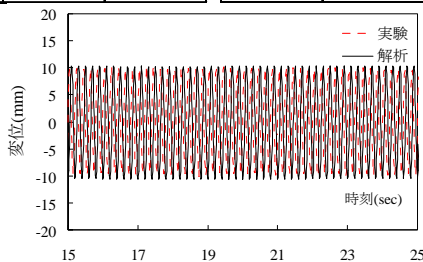


図-6 すべり支承の要素試験 解析と実験値の比較

## 4. すべり支承の特性

振動台実験に用いるすべり支承の履歴特性を把握するために、後述する振動台の実験装置を用いて、おもりおよびすべり支承を配置して、要素実験を実施した。 入力波形は振幅  $\pm 10$  mm の正弦波とした。 加振する正弦波の周波数域は、周波数域は道路橋示方書地震波のスペクトルのピークの周波数域(0.2 ~ 1.5 Hz)に設定し、相似則に基づき、0.5 ~ 5.0 Hz の間で設定した。

すべり支承の履歴特性は、おもりと振動台との相対変位が定常状態の 10 周期分の荷重変位関係より最小二乗法で求め、表-4 に示す通り設定した。 また、実験値と解析値を比較することにより、設定したすべり支承の履歴特性の妥当性の確認を行った。 図-6 に実験と解析の比較を示す。 図-6 より実験結果と解析結果とが、良好に一致しており、設定したすべり支承の履歴特性の妥当性が確認できた。

## 5. ノックオフ部材とすべり支承からなる支承構造の振動台実験

### (1) 実験模型、計測項目および荷重条件

図-7 に示す橋梁を対象に、提案する支承構造であるノックオフ部材・すべり支承・変位制限装置を設置することを想定した。

実験には、想定する橋梁を表-5 に示す相似則により、 $S=1/10$  により縮小した供試体を用いる。 図-8 に実験装置を示す。 上部工を模したおもりの重量は 8.57 kN であり、おもりはすべり支承を模したローラーによって支持される。 おもりの中央部にはノックオフ部材を設置するため直径 16 mm の孔をあけ、振動台に設置している。

おもりの両側には、変位制限装置を模した山型鋼を振動台に固定しており、山型鋼には衝突時の衝撃力の低減を目的として緩衝材を設置している。

なお、慣性力は、おもりと振動台に取り付けた加速度の差である相対的な加速度におもりの重量を乗じて算出した。

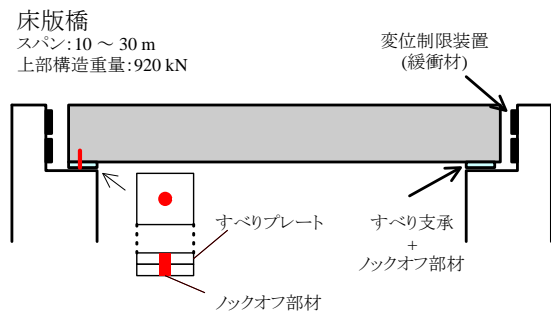


図-7 想定した対象橋梁

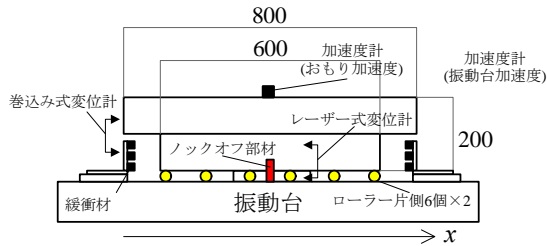


図-8 ノックオフ部材とすべり支承からなる支承構造の振動台実験 実験装置

表-5 適用した相似則

物理量	長さ	時間	重量	パネ定数	加速度
相似比	$S^{-1}$	$S^{-1/2}$	$S^{-2}$	$S^{-1}$	1

### (2) 実験ケース

ケース FREE は、おもりをすべり支承により支持させたケースである。ケース FIX はすべり支承およびスリットを有さない鋼製ピンを挿入し、おもりの変位を拘束した実験ケースである。ノックオフ部材を設置したケースは、数字 8 桁にて呼称しており、すべり支承、ノックオフ部材、変位制限装置を配置し、強地震時に固定から可動へと振動系が変化することを期待した実験ケースである。表-6 に実験ケースおよび実験結果を示す。

ノックオフ部材の形状は、スリット径  $d=3.5\text{mm}$  および  $d=4.3\text{mm}$ 、スリット高さ  $h=0.8\text{mm}$  および  $1.6\text{mm}$  の供試体を対象とした。また、振動台実験に用いる変位制限装置には、緩衝材を設置しており、おもりと緩衝材の遊間は、 $15\text{mm}$  および  $45\text{mm}$  と設定した。

振動台には、レベル 2 地震動の標準波形として道路橋示方書<sup>9)</sup>に示されている平成 7 年兵庫県南部地震ポートアイランド内地盤上 EW 成分波 (II-III-3 地震動) および平成 23 年東北地方太平洋沖地震土浦出張所構内地盤上 EW 成分波 (I-III-3 地震動) の、時間軸を 31.6% ( $S=10$ ) に縮小した加速度波形を入力する。

### (3) 振動台実験の結果

図-9 にケース FIX, FREE, ノックオフ部材を配したケースの荷重-変位関係とその時刻歴応答の一例を表-6 に振動台実験でのノックオフ部材の破断時刻  $t$ 、および変位制限装置に生じるの最大衝突荷重  $P_{\max}$  を示す。

ノックオフ部材を配した供試体では、いずれの条件においても地震の初期段階には、ノックオフ部材によりおもりの移動が制限され、FIX に近い挙動を示す。ノックオフ部材の破断後には FREE に近い挙動を示し、変形が大きくなると変位制限装置への衝突が生じている。すべり支承にノックオフ部材を配することにより、提案する支承構造の固定から滑り状態に振動系を移行する現象が再現できた。

図-10 および表-6 にノックオフ部材の破断荷重の大小による振動性状の違いを示す。ノックオフ部材の破断荷重により、ノックオフ部材が破断するタイミングが 1 秒程度異なることが確認できる。ノックオフ部材が破断した後は、すべり状態となるため、周期に対する依存性が低く、概ね同様の振動性状を示した。また、変位制限装置への衝突荷重は、遊間量が等しい場合、最大で 2 割程度の差異が生じている。

次に、変位制限装置の遊間量に着目すると、遊間量の大きい  $u=45\text{mm}$  の実験ケースが遊間量の小さい  $u=15\text{mm}$  のケースと比べ、衝突荷重が約 2 割から 6 割程度大きくなっている。遊間量が大きいことにより、変位制限装置への衝突速度が速くなるためであると推察される。

表-6 振動台実験 実験ケースおよび実験結果

供試体名	地震動	実験ケース				実験結果		
		変位制限遊間量 $u$ (mm)	スリット径 $d$ (mm)	スリット高さ $h$ (mm)	破断荷重 $P_u$ (kN)	ノックオフ時刻 $t$ (s)	最大衝突荷重 $P_{\max}$ (kN)	
FIX	II-III-3	-	-	-	-	-	-29.81	
FREE 15		-	-	-	-	-	11.24	
350815		15	3.47	0.82	4.59	1.501	-16.37	
430815		4.32	0.82	7.11	1.618	-17.45		
431615		4.25	1.57	6.88	1.588	-17.62		
free 45		-	-	-	-	-	29.72	
350845		45	3.52	0.82	4.72	1.497	25.95	
351645		3.49	1.57	4.64	1.604	25.27		
430845		4.25	0.82	6.88	1.609	21.32		
431645		4.29	1.58	7.01	1.584	24.41		
FIX		I-III-3	-	-	-	-	-	10.39
FREE 15			-	-	-	-	-	-18.98
351615	15		3.48	1.56	4.61	28.512	-18.74	
431615	4.24		1.55	6.85	26.228	-20.56		

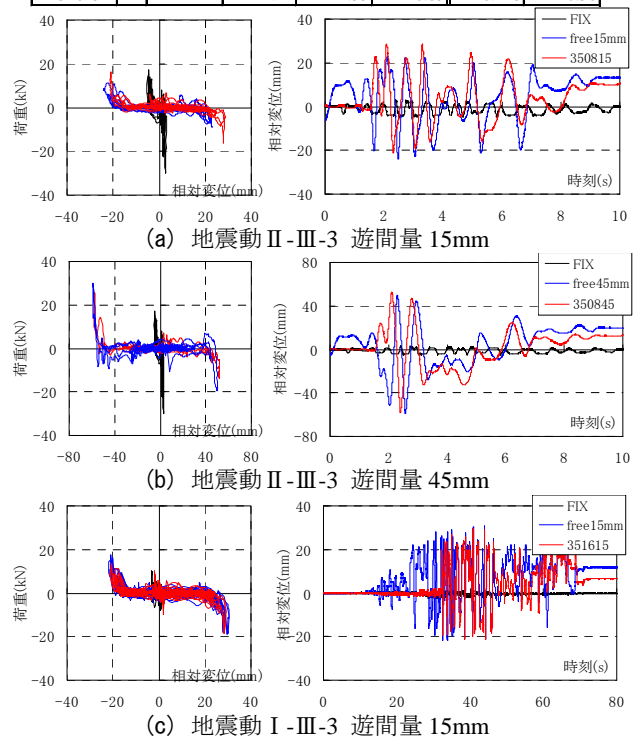


図-9 FIX, FREE, ノックオフ部材を配した場合の振動性状の差異

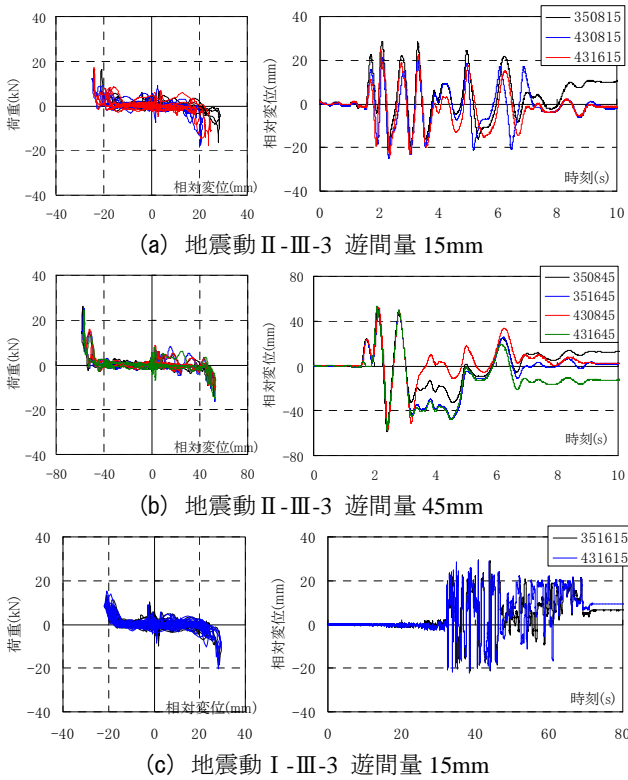


図-10 ノックオフ部材を配したケースの振動性状

## 6. ノックオフ部材・すべり支承を活用した支承構造のモデル化に関する検討

振動台実験で用いた供試体を対象に、簡易にモデル化可能な一質点ばね-マス-ダッシュポットにモデル化し、再現解析を行う。実験と解析結果を比較することにより、各部材を適切に解析モデル化する手法について検討を行う。再現解析には、EPASS/USSP<sup>10)</sup>を用いる。

### (1) 変位制限装置の解析モデル化手法

実験ケース FREE 15mm および FREE45mm(TYPE II-III-3)を対象に再現解析を行い、変位制限装置の適切なモデル化手法について検討を行う。

本検討では簡便に衝突時のエネルギー損失を表現するため、剛体すべりや、回転によるエネルギー損失は微小であると判断し、変位制限装置は反発係数より算定される粘性減衰 $C$ を考慮したバネ-ダッシュポットにてモデル化した。粘性減衰 $C$ は式(2a) (2b)より算定している

$$C = 2\gamma\sqrt{m \cdot K} \quad (2a)$$

$$\gamma = -\frac{\ln(e)}{\sqrt{\pi^2 + \ln(e)^2}} \quad (2b)$$

ここに、 $K$ :バネ定数(N・mm)、 $m$ :質量(=0.874N・s<sup>2</sup>/mm)、 $e$ :反発係数=0.499

また、変位制限装置の履歴特性は変位制限装置の1方向载荷試験より設定し、緩衝材の圧縮剛性にてモデル化した"初期剛性型"、緩衝材のハードニング後の剛性にてモデル化した"衝突剛性型"、履歴関係をバイリニア型の骨格曲線にてモデル化したバイリニア型の3通りを対象とし、各解析モデルの妥当性について検討を行った。このとき、粘性減衰 $C$ は式(2a)に示したとおり、バネの剛性に比例する。バイリニア型については、初期剛性より算定された粘性減衰にてダッシュポットにてモデル化した解析モデルを"バイリニア 1"、衝突剛性よりモデル化した"バイリニア 2"と設定している。変位制限装置のモデル化および解析ケースを表-7に示す。すべり支承については、要素試験に基づき表-4に示すとおりモデル化を行った。

表-7 変位制限装置のモデル化および解析ケース

解析ケース	遊間量 $u$ (mm)	初期剛性 $K_1$ (N/mm)	2次剛性 $K_2$ (N/mm)	降伏変位 $\delta_y$ (mm)	粘性減衰 $C$ (N・s/mm)	
FREE15mm	初期剛性型	+20.00	-20.00	1,600	—	16.157
	衝突剛性型	+28.68	-28.68	18,100	—	54.344
	バイリニア1	+20.00	-20.00	1,600	18,100	8.68
	バイリニア2	+20.00	-20.00	1,600	18,100	8.68
FREE45mm	初期剛性型	+41.32	-50.32	1,600	—	16.157
	衝突剛性型	+50.00	-59.00	18,100	—	54.344
	バイリニア1	+41.32	-50.32	1,600	18,100	8.68
	バイリニア2	+41.32	-50.32	1,600	18,100	8.68

表-8 変位制限装置のモデル化による衝突荷重の差異

(a) FREE15mm			(b) FREE45mm		
解析ケース	$P_{max}$ (kN)	誤差 (%)	解析ケース	$P_{max}$ (kN)	誤差 (%)
実験結果	11.240	-	実験結果	29.716	-
初期剛性型	10.710	-4.7	初期剛性型	21.153	-28.8
衝突剛性型	48.472	331.2	衝突剛性型	67.734	127.9
バイリニア1	10.710	-4.7	バイリニア1	58.665	97.4
バイリニア2	-7.032	-37.4	バイリニア2	-11.847	-60.1

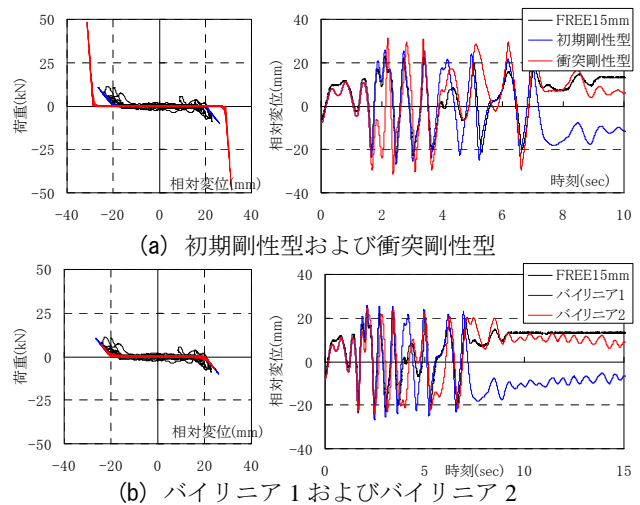


図-11 FREE15mm 変位制限装置のモデル化の違いによる応答性状の差異

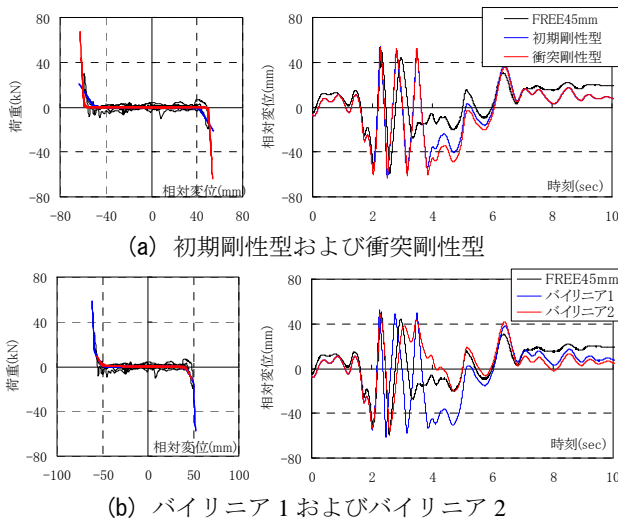


図-12 FREE45mm 変位制限装置のモデル化の違いによる応答性状の違い

表-8 に各解析ケースの最大衝突荷重  $P_{max}$  を、図-11 および図-12 に各解析ケースの荷重-変位関係および変位の時刻歴応答を示す。

FREE15mm のケースは、実験の結果、緩衝材の圧縮変形量は 4.15mm と変位制限装置の移動量が小さく、ゴムのハードニングが生じていないことから、"初期剛性型"および初期剛性から粘性減衰を設定した"バイリニア 1"の解析ケースにおいて最大衝突荷重、応答変位が良好に一致していることが確認できる。一方で、"衝突剛性型"のケースについては、応答変位については概ね一致したものの、衝突時の荷重を過大に評価している。また、衝突剛性から粘性減衰を設定した"バイリニア 2"の解析ケースでは、衝突時の荷重を過小に評価している傾向がある。

FREE45mm のケースは、実験の結果、緩衝材の圧縮変形量は 9.03mm と変位制限装置の移動量が大きく、緩衝材には厚さの約 45%に相当する変形が生じている。初期剛性型において最大衝突荷重、応答変位が概ね一致していることが確認できる。一方で、衝突剛性型および初期剛性から粘性減衰を設定した"バイリニア 1"については、応答変位については概ね一致したものの、衝突時の荷重を過大に評価している。"バイリニア 2"では、衝突時の荷重を過小に評価している傾向がある。

以上から、今回の 2 ケースの実験に対しては、おもりと変位制限装置の衝突現象に対して反発係数より算定される粘性減衰  $C$  によるダッシュポット、初期剛性型の剛性を有するバネ要素にてモデル化することにより比較的精度よく衝突現象を再現できることがわかった。

## (2) ノックオフ部材のモデル化手法の検討

実験ケース 350815 および 350845(TYPE II-III-3)を対象に再現解析を行い、ノックオフ部材の適切なモデル化手法について検討を行う。

ノックオフ部材のばね剛性は、スリット径が 3.5 mm、スリット高さが 0.8 mm の供試体、4 体の剛性の平均値を元にモデル化し、表-9 および図-13 のように設定する。ここでは、ノックオフ部材の設置時に生じる遊間  $u$ 、ノックオフ部材の骨格曲線のモデル化が再現性に及ぼす影響を検討している。最大荷重までの骨格曲線モデル化した"バイリニア"、"破断変位までの骨格曲線をモデル化した"トリリニア"、トリリニアモデルに加え遊間量をモデル化した"遊間ありトリリニア"の計 3 ケースの解析を行い、各解析モデルの妥当性について検討を行った。すべり支承については、要素試験に基づき表-4 に示すとおり、変位制限装置については前項で述べた初期剛性型とし表-10 に示すとおりモデル化を行った。

表-11 に各解析ケースのノックオフ部材の破断時刻および変位制限装置の最大衝突荷重を、図-14 および図-15 に各解析ケースの荷重-変位関係および変位の時刻歴応答を示す。

表-11、図-14 および図-15 に示すとおり、ノックオフ部材のモデル化の違いにより、ノックオフ部材の破断時刻が異なることが確認できる。より精緻にモデル化した"遊間ありトリリニア"の解析ケースがノックオフ時刻について適切に再現できた。その他の解析ケースについては、ノックオフ時刻が異なり変位制限装置への衝突荷重を過小に評価する傾向があることが確認できた。

以上から、本検討ケースにおいては、ノックオフ部材は、履歴特性をより精緻にモデル化した"遊間ありトリリニア"にてモデル化することにより、解析精度の向上が期待できることがわかった。

表-9 ノックオフ部材のモデル化および解析ケース

解析ケース	遊間量 $u$ (mm)	降伏変位 $\delta_y$ (mm)	初期剛性 $K_1$ (N/mm)	最大荷重 変位 $\delta_u$ (mm)	2次剛性 $K_2$ (N/mm)	破断変位 $\delta_p$ (mm)	3次剛性 $K_3$ (N/mm)
バイリニア	—	0.182	21,900	0.431	9,600	—	—
トリリニア	—	0.182	21,900	0.431	9,600	1.10	0.10
遊間ありトリリニア	0.95	0.182	21,900	0.431	9,600	1.10	0.10

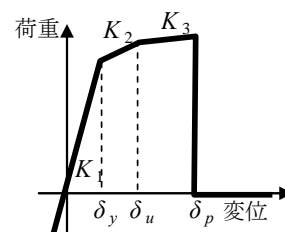


図-13 ノックオフ部材のモデル化(トリリニア型)

表-10 変位制限装置のモデル化

		遊間量 $u$ (mm)		初期剛性 $K_1$ (N/mm)	粘性減衰 $C$ (N·s/mm)
350815	初期剛性型	+49.00	-53.00	1,600	16.157
350845	初期剛性型	+21.00	-17.00	1,600	16.157

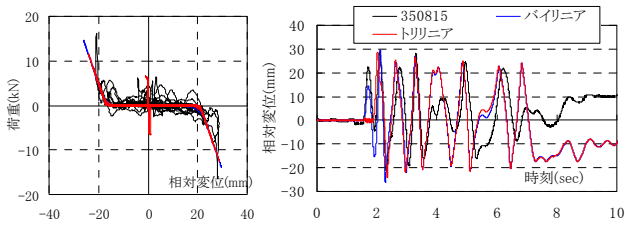
表-11 ノックオフ部材のモデル化による衝突荷重の差異

(a) 350815

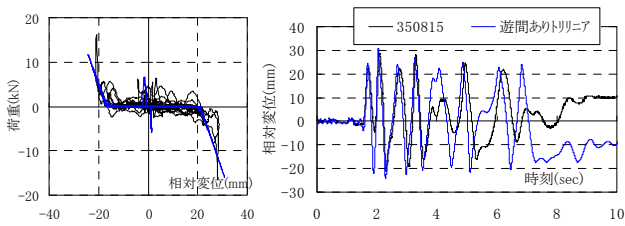
解析ケース	ノックオフ部材 破断時刻		変位制限装置 最大衝突荷重	
	$t$ (s)	誤差(%)	$P_{max}$ (kN)	誤差(%)
実験結果	1.497	-	16.37	-
バイリニア	1.482	-1.0	14.46	-11.7
トリリニア	1.885	25.9	12.43	-24.1
遊間ありトリリニア	1.504	0.5	15.71	-4.0

(b) 350845

解析ケース	ノックオフ部材 破断時刻		変位制限装置 最大衝突荷重	
	$t$ (s)	誤差(%)	$P_{max}$ (kN)	誤差(%)
実験結果	1.501	-	25.95	-
バイリニア	1.589	5.9	-6.40	-75.3
トリリニア	1.912	27.4	18.86	-27.3
遊間ありトリリニア	1.491	-0.7	19.65	-24.3

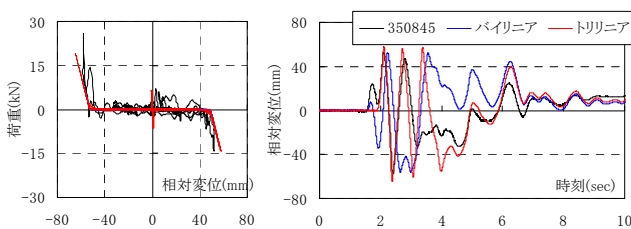


(a) バイリニアおよびトリリニア

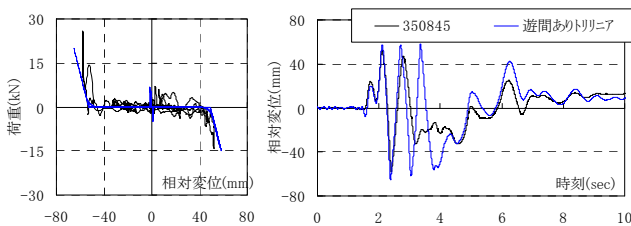


(b) 遊間ありトリリニア

図-14 350815 ノックオフ部材のモデル化の違いによる応答性状の差異



(a) バイリニアおよびトリリニア



(b) 遊間ありトリリニア

図-15 350845 ノックオフ部材のモデル化の違いによる応答性状の差異

## 7. 結論

提案するノックオフ部材・すべり支承を活用した支承構造を構成する各要素の特性を把握するために、要素試験を実施した。また、ノックオフ部材を有するすべり支承の動的挙動を振動台実験により確認し、その再現解析により各部材の解析モデル化の方法について検討した。

本研究で得られた結果は以下に示す。

- 1) すべり支承にノックオフ部材を配することにより、提案する固定から滑りへ振動系を移行する現象が再現できる。
- 2) 振動台実験の結果、ノックオフ部材の破断荷重の違いにより、変位制限装置への最大衝突荷重に2割程度の差異が生じる。
- 3) 振動台実験の結果、変位制限装置と重りの設置遊間量の違いにより、最大衝突荷重に最大で6割程度の差異が生じる。提案する支承形状を設計するに当たっては、橋桁と変位制限装置の間に適切な遊間量を設ける必要がある。
- 4) 再現解析の結果、変位制限装置とおもりの衝突現象に対して反発係数より算定される粘性減衰  $C$  によるダッシュポット、緩衝材の初期剛性から算定される剛性を有するバネ要素にてモデル化することにより、簡便にかつ比較的精度よく衝突現象を再現できる。
- 5) 変位制限装置とおもりの衝突現象を、簡易的にバネ-ダッシュポットにてモデル化する場合、粘性減衰を算定する際の剛性の取り方により、衝突力を過小に評価する可能性があるため、粘性減衰を算定する際には留意が必要である。
- 6) 再現解析の結果、ノックオフ部材は、設置遊間等を含め、履歴特性をより精緻にモデル化することにより、解析精度の向上が期待できる。

なお、今回の提案した解析のモデル化手法については、縮小模型の実験結果より得られた知見である。また、製作性より供試体の材質についても限定されたものを使用している。今後、相似則の適用性や供試体の材質などについて検討する必要がある。

## 参考文献

- 1) 松村政秀, 坂井田実, 吉田雅彦, 北田俊行, 森田征樹, 浅田直宏: 免震桁橋用ノックオフ型サイドブロックの提案, 鋼構造論文集, 第15巻, 第59号, 日本鋼構造協会, pp.45-56, 2008.9

- 2) 松村政秀, 中西泰之, 金田貴洋, 山口隆司, 低摩擦型すべり支承にノックオフ部材を組み込んだ支承構造の地震応答解析, 第 15 回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.385-388, 土木学会地震工学委員会, 2012.7
- 3) 川島一彦, 庄司学: 衝突緩衝用落橋防止システムによる桁間衝突の影響の低減効果, 土木学会論文集, No. 612/I-46, pp. 129-142, 1999.
- 4) 川島一彦: 動的解析における衝突のモデル化に関する一考察, 土木学会論文報告集, No. 308, pp. 123-126, 1981.
- 5) 渡邊学歩, 川島一彦: 衝突ばねを用いた棒の衝突の数値計算, 土木学会論文集, No. 675/I-55, pp. 125-139, 2001
- 6) 阿部雅人, 藤野陽三, 吉田純司, 朱平, 柳野和也: 地震時における橋桁の衝突現象のモデル化と実験的検証, 土木学会論文集 No.759, pp191-197, 土木学会 2004
- 7) 金田貴洋, 松村政秀, 中西泰之, 山口隆司: スリット加工を施した鋼製ピンのせん断破断実験, 土木学会 第 69 回年次学術講演会 I -065, 2014
- 8) 松村政秀, 石原和之: 軸部にスリットを設けた M12 高力ボルトの引張およびせん断破断実験, 構造工学論文集, Vol.58A, pp.83-91, 2012.3
- 9) (社)日本道路協会, 道路橋示方書・同解説, 耐震設計編, 2014.3.
- 10) T. Kitada, M. Matsumura, Y. R. An and T. Yamano: Advanced Static/Dynamic, Elasto-Plastic and Finite Displacement Analysis of Steel and Composite Spatial Structures, International symposium on advances in steel and composite structures 2005, pp.58-81, Hong Kong, 2005. 12.

## CONSIDERATION ON MODELING METHOD OF BEARING CONSISTING OF KNOCK OFF MEMBER AND SLIDING PLATE

Yasuyuki NAKANISHI, Takahiro KANATA AND Masahide MATSUMURA

Sliding bearing provides less seismic force delivered to substructure and is effective for ensuring the seismic safety of bridge structures. For more rational and effective use of sliding bearing, the authors consider a damage controlling method by the combination use of sliding bearing, knock off member and displacement restrainers as bridge bearing. In this paper, modeling method using spring element of the proposed bearing for dynamic response analysis is verified through comparison between experimental and analytical results.