# フレームモデルによる ブロック型倒壊方向制御構造の挙動評価

小野寺 周1・豊岡 亮洋2・山田 聖治3・室野 剛隆4

1正会員	修士(工学)	(公財)鉄道総合技術研究所 (〒185-8540東京都国	鉄道地震工学研究センター 分寺市光町 2-8-38)	地震応答制御研究室							
E-mail: onodera.meguru.58@rtri.or.jp											
2正会員	博士(工学)	<ul> <li>(公財)鉄道総合技術研究所</li> <li>(〒185-8540 東京都国</li> <li>E-mail: toyooka.akil</li> </ul>	鉄道地震工学研究センター 分寺市光町 2-8-38) hiro.58@rtri.or.jp	地震応答制御研究室							
3正会員	博士(工学)	<ul> <li>(公財)鉄道総合技術研究所</li> <li>(〒185-8540 東京都国</li> <li>E-mail: yamada.se</li> </ul>	鉄道地震工学研究センター 分寺市光町 2-8-38) iji.17@rtri.or.jp	地震応答制御研究室							
<sup>4</sup> 正会員 博士(工学)(公財)鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)											
E-mail: murono.voshitaka.51@rtri.or.jp											

危機耐性を向上させる構造形式として提案した倒壊方向制御構造の実用化に向けては、倒壊方向制御デ バイスや地震動特性が構造物の応答特性に及ぼす影響を評価することが重要であり、そのためには倒壊状 態までの動的挙動を追跡可能な解析手法を構築する必要がある。そこで本研究では、既往のブロック型倒 壊方向制御構造の加振実験を対象として、2次元フレームモデルを構築して動的挙動に関する基礎的な検 討を行った。その結果、フレームモデルによってもブロック型倒壊方向制御構造模型の非対称な動的挙動 を評価できることが示された。また、転倒モーメントと部材の曲げ耐力に着目することで、簡易的に倒壊 状態を判定できる可能性を示した。

Key Words: collapse direction control device, dynamic analysis, frame model

## 1. はじめに

鉄道構造物においては、設計での想定を超える地震動 に対しても構造物が落橋等の破滅的な被害に至らないよ うな構造計画および構造形式とし、危機耐性<sup>11</sup>を高める ことが既に設計標準<sup>20</sup>の中に盛り込まれている.こうし た危機耐性を向上させる具体的な構造形式の一つとして、 これまでに倒壊方向制御構造<sup>3</sup>を提案している.

倒壊方向制御構造とは、図-1 に示すように、特定方 向への変形を拘束する倒壊方向制御デバイス(以下、デ バイスと呼ぶ)を取り付けることによって、構造物の挙 動に非対称性を与え、倒壊方向を人為的に制御するもの である.これによって、構造物の倒壊に起因して生じ得 る人的被害の回避や地震後における作業ヤードの確保等、 安全性および復旧性を向上できる.倒壊方向の制御を実 現するデバイスとして、これまでに柱基部にブロックを



設置するブロック型,柱をワイヤーで拘束するワイヤー 型の有効性が実験的に確認されており<sup>4</sup>,これらは新 設・既設によらず適用が可能であると考えられる.また, ブロック型デバイスを用いた構造の耐力や変形性能,動

重錘・スラブ



図-2 倒壊方向制御構造の実験4の様子

表一	1 実験 % での加振条件
加振試番※	加振条件
S-1	正弦波 2Hz-500gal
S-2	正弦波 2Hz-750gal
S-3	正弦波 2Hz-750gal
S-4	正弦波 2Hz-1000gal
S-5	正弦波 2Hz-1500gal
S-6	正弦波 1Hz-750gal

※各試番の前にホワイトノイズ加振を実施



図-3 実験 % での模型天端の加速度 – 変位関係

的挙動に関して,静的載荷試験や数値解析による検討<sup>か</sup> が行われている.

ただし、構造物が倒壊に至る現象は複雑であり、デバ イスの諸元や地震動の特性は構造物の応答に大きな影響 を及ぼす.そのため、実用化に向けて検討を深度化させ るためには、倒壊に至るまでの挙動を評価可能な解析法 を構築しておく必要がある.

そこで本研究では、鉄道構造物の耐震設計で一般的に 用いられるフレームモデルにより、既往の振動台実験<sup>4</sup> を対象とした倒壊方向制御構造の動的挙動を評価する.



(a) 試番 S-2(正弦波 2Hz・750gal)



(b) 試番 S-6(正弦波 1Hz・750gal) 図-4 実験 <sup>4</sup>における模型の損傷状況

#### 2. 解析モデルの構築

## (1) 検討対象とする加振実験の概要

既往の振動台実験 <sup>4</sup>では,図-2 のように倒壊方向が 左(L)側もしくは右(R)側となるようにブロック型デバイ スを設置した高架橋模型 2 体に対して,正弦波による 同時加振を実施した.その結果,2 体の模型がそれぞれ 意図した方向に倒壊することを確認している.本研究 ではこの振動台実験のうち,L側に倒壊が生じた模型の 挙動を対象として検討を進めることとする.

実験結果として、加振条件を表-1 に示し、L 側に倒 壊した模型の天端での応答加速度-応答変位関係の履 歴を図-3 に示す.実験では同一模型に対して、正弦波 による段階加振(試番 S-1~S-6)と各試番前のホワイト ノイズ加振を実施している.図-3 に示すように、模型 の応答履歴は試番の進行に伴って著しく異なっているこ とが分かる.また、実験時の模型挙動として、初めてデ バイスと柱が接触した試番 S-2、倒壊が生じた試番 S-6 の様子を図-4 に示す.図-4 に示すように、模型は柱部 材端部において明確な塑性ヒンジが発生し、最終的に端 部の鉄筋が破断することにより倒壊した.

## (2) モデル化方針

本検討では梁ばね要素から成る2次元のフレームモデルを構築して動的挙動を評価する.ここで、本来は実験



での条件と同様に,あるモデルに対して表-1 の加振条 件で連続的に応答解析を行い,損傷の累積を評価するこ とが望ましい.しかし,図-3 に示すように各試番での 耐力低下が著しく,すべての試験ケースの挙動を単一の モデルで表現することは困難である.また,本検討では, 柱とデバイスの接触により生じる動的挙動の非対称性を 表現することを主目的としている.したがって,各試番 開始前の剛性や非線形特性をそれぞれ同定し,個別のモ デルによる応答解析を実施することで,模型が倒壊する 直前までの動的挙動を試番毎に表現することとした.

図-5 に解析モデルの構築概要を示す.実験で明確な 塑性ヒンジが生じた柱部材端部に回転ばね要素を設け, 柱部材は剛体とすることで模型の挙動を表現した(図-5(a).試番毎に構築する解析モデルは,回転ばね要素 の非線形特性のみが異なるものとなる.

## (3) 柱とデバイスの接触挙動の表現(図-5(b))

柱とデバイスの接触挙動については、ギャップを設け た弾性の接触ばねで表現した.実験においては、柱の損 傷が一定程度進展してからデバイスが接触するように、 柱とデバイスの間には 4mm の遊間が設けられている. 本検討においても同様に、4mm のギャップを設けるこ とで遊間を表現した.接触時剛性は予備解析に基づき初 期剛性の 500 倍(50kN/m)とした.

## (4) 減衰の設定(図-5(c))

まず,最初の試番 S-1前のホワイトノイズ加振の結果 から振動台~模型天端の変位の伝達関数を算定した.こ れに1自由度系の理論伝達関数をフィッティングさせる ことで減衰定数を同定した.同定した減衰定数は4%で ある.この値を用いて,柱部材端部の回転ばね要素のみ に対して要素別剛性比例型減衰を設定した.なお,減衰 は各試番の解析モデルに対して共通して与えた.

#### (5) 柱の非線形特性の設定(図-5(c), (d))

各試番前のホワイトノイズ加振の結果より, 試番ごと に初期の模型の固有振動数を同定した. そこから算定さ れた剛性を回転ばね要素の初期剛性としてそれぞれ設定 した.

続いて、正弦波加振から得られた模型天端の応答加速 度-応答変位関係の履歴および模型寸法より、柱部材端 部のモーメントー回転角( $M-\theta$ )関係の履歴を算定し た.そして、柱とデバイスの接触が生じない変形方向で の $M-\theta$ 関係の履歴を包絡するように折れ点を決定し、 正負対称な骨格曲線を設定した.なお、加振中の部材の 耐力低下を表現するために、履歴特性として野上ら<sup>8</sup>の



図-6 実験結果と解析結果の比較

剛性低下モデルを適用した.耐力低下を表現する剛性低 下係数 x は実験と解析の履歴が一致するように定めた.

#### 3. 応答解析による倒壊方向制御構造の挙動評価

#### (1) 構築モデルによる実験挙動の再現

2章で構築した各解析モデルによって、実験の非対称 な動的挙動が再現できるか確認する.そこで各モデルに 対して、試番ごとの入力波形を用いた個別の時刻歴応答 解析を実施した.入力波形は表-1に示す正弦波であり、 正負対称的な波形である.なお、実験で倒壊が生じた L 側とは、本解析での応答変位の負側に対応する.

解析条件として、数値積分法は Newmark  $\beta$  法( $\beta$ =1/4)とした.時間刻みは接触挙動を取り扱うために 0.0001s とした.なお、実験では各試番の加振終了時における残留変位が小さいため、各解析ケースの初期変位はいずれも0とし、前の試番で生じた残留変位は引き継いでいない.

試番 S-1~S-6における実験,解析での模型天端の応答 加速度および応答変位の時刻歴波形を図−6に示す.図− 6上段にはデバイスとの接触力の時刻歴を示している. 柱とデバイスに設けた遊間が 0mm となった際に接触力 が生じることとなる.また,各試番での応答の最大値を 表−2に示す.

まず, 試番 S-1 について, 図-6(a)に示すように, 実験 と解析の応答は概ね一致している.実験では, この試番 で柱とデバイスは接触していない. 解析でも接触力は生 じておらず, 柱とデバイスの接触が生じていないことが 分かる.

次の試番 S-2 についても、実験と解析の応答は概ね-致している.また、図-6(b)上段に示すように、解析では 柱とデバイスの接触が生じていることが分かる.実験で もこの試番で初めて柱とデバイスの接触が生じているこ とを確認している.その結果、実験では接触に伴って応 答加速度がより増大し、応答変位の増加が抑制されてい る.その結果、正側および負側の最大応答加速度はそれ

試番	ケース	最大応答加速度(gal)			最大応答変位(mm)			
		正(R)側	負(L)側	非対称性 <sup>*1</sup> (正側/負側)	正(R)側	負(L)側	非対称性 <sup>*1</sup> (負側/正側)	
S-1	実験	966	-742	1.30	16	-9	0.56	
	解析	705	-697	1.01	12	-10	0.83	
S-2	実験	1242	-1089	1.11	83	-90	1.08	
	解析	1359	-1110	1.22	85	-115	1.35	
S-3	実験	597	-498	1.20	67	-83	1.24	
	解析	613	-479	1.28	69	-103	1.49	
S-4	実験	609	-370	1.65	74	-101	1.36	
	解析	518	-405	1.28	67	-91	1.36	
S-5	実験	540	-321	1.68	88	-134	1.52	
	解析	562	-308	1.82	79	-184	2.33	
S-6	実験	360**2	—	—	76 <sup>%2</sup>	—	—	
	解析	420	-182	2.31	80	-357	4.46	

表-2 最大応答値および正負の非対称性

※2 正(R)側のみ、オーバーレンジが生じる前の時刻までの最大値で整理している

ぞれ 1242gal および-1089gal,最大応答変位は 83mm および-90mm となり,最大応答に非対称性が生じている.解析では正負の最大応答加速度は 1359gal および-1110gal, 最大応答変位は 85mm および-115mm となり,実験と同様の非対称性が再現できている.

以降の試番 S-3~S-6 についても, 試番 S-2 と同様に, 解析結果は実験と同様の非対称な挙動を再現できている. また, 表-2 に示すように,実験と解析のいずれも, 試 番の進行に伴って柱とデバイスの接触による正負の応答 の非対称性が大きくなっていることが分かる.

以上より,構築したフレームモデルによって倒壊方向 制御構造模型の非対称な挙動を表現できることが示され た.なお,試番 S-6 について,実験では時刻 5.3s 付近で 加速度の測定値が急変し,変位の測定値もレンジをオー バーしている.よって,この時点で模型が倒壊したと判 断できる.一方,解析では加振終了まで計算が安定して おり,本モデルでは当然ながら直接的に倒壊状態を表現 することはできない.後述する4章において,本モデル で倒壊状態を判定する方法について検討する.

## (2) デバイスの有無による挙動の比較

デバイスの設置による挙動の変化を解析的に確認する ために、デバイスの有無による応答を比較する.そこで、 前節で実施した解析の他に、構築したモデルから接触ば ねの要素を取り除いたケースでの解析も実施した.両ケ ースの試番 S-1~S-6における模型天端の応答加速度一応 答変位関係の履歴を図-7 に示す.図中には履歴の包絡 線を太字で示している.

図-7 に示すように、デバイスが無いケースでは概ね 正負対称な挙動となっている.これは、入力波形および 構造が対称的であることから明らかである. 一方, デバ イスがあるケースでは、柱とデバイスとの接触が生じる 試番 S-2 以降において,前述したように正側への変形時 に応答加速度が増加している. この時の最大応答加速度 を両ケースで比較すると、デバイスがある場合、初めて 接触が生じた試番 S-2 では 23%,実験で倒壊が生じた試 番 S-6 では 139%大きくなっている. すなわち, デバイ スの効果として、接触側では2割以上、構造全体として 見かけの耐力上昇が生じていると言える.その結果とし て、デバイスがあるケースの正側の最大応答変位は、デ バイスが無いケースと比較して各試番で1割~6割程度 低減している.一方,負側(倒壊方向)の応答に着目す ると、デバイスがある場合はデバイスが無い場合よりも 最大応答変位が増加する傾向となった. 試番 S-2 では 1.2倍, 最後の試番 S-6 では 2 倍程度, 倒壊方向への応答 が増加しており、倒壊を誘導した方向への損傷の進展が 確認された.

## 4. 数値解析による倒壊状態の判定

3章では、構築したフレームモデルによって実験の非 対称な挙動を表現できることを示した.ただし、本モデ ルでは倒壊状態を直接的に評価することはできない.そ こで、実験で模型の倒壊が生じた試番 S-6(正弦波 IHz・750gal)を対象として、倒壊状態の評価方法につ いて検討する.数値解析的に倒壊状態を判定する一方法 として、曲げ耐力と転倒モーメントに着目した.すなわ ち、応答変位による転倒モーメントが柱部材の曲げ耐力 を上回った場合に倒壊状態に至ると仮定した.上記方法



図-8 構築したモデルによる倒壊判定結果

による倒壊状態の判定結果として、S-6 に対する実験と 解析の時刻歴応答変位を図-8 に示す. 図中には倒壊判 定となる変位(207mm)を補助線で示している.

まず,実験での倒壊状態への到達時刻について,測定 値がレンジをオーバーした時刻 5.3sにおいて倒壊が発生 したとする.一方,解析では,4.5s付近で初めて転倒モ ーメントが曲げ耐力を上回って倒壊状態と判定されてい る(×印).この時の模型の変形方向は実験と同じ負 (L)側であり,また,実験で倒壊が生じた時刻とも概ね 一致している.このことから,鉄道構造物の設計で一般 的に用いられるフレームモデルによっても,上記の判定 方法を組み合わせることで,構造物が倒壊に至るまでの 挙動を追跡し,倒壊状態を判定できる可能性を示した.

## 5. おわりに

本研究では、既往のブロック型倒壊方向制御構造の振動台実験に基づき、フレームモデルを用いた応答解析に よって動的挙動の評価を行った.本研究で得られた知見 を以下にまとめる.

- 実験結果から推定した正負対称な回転ばね要素(M - θ関係)と柱-デバイスの接触を表現する接触ば ね要素によって、実験で確認された模型の正負非対 称な挙動を再現できることを示した。
- 2) デバイスがある場合,接触時に構造全体で見かけの 耐力上昇が生じる.デバイスが無い場合と比較する と,最大応答加速度が2割程度以上増加し,最大応 答変位が1割程度以上低下する.

3) 構築したモデルにおいて、変形により生じる転倒モ ーメントと曲げ耐力を比較した倒壊判定方法により、 解析で判定される倒壊方向および倒壊の発生時刻は 実験と概ね一致し、フレームモデルにおいても倒壊 状態を判定できる可能性を示した。

ただし、本研究では実験模型を対象としており、モデ ル化に際して設定した非線形特性等は模型特有のもので あることに留意する必要がある.今後は、一般的な鉄道 構造物を対象とした倒壊方向制御構造についてもフレー ムモデルによる評価が可能か確認し、入力地震動の特性 と応答の非対称性の関係について検討していく.なお、 本研究の一部は、国土交通省の鉄道技術開発費補助金を 受けて実施した.

#### 参考文献

- 室野剛隆:巨大地震に備える-耐震設計と危機耐性, 土木学会誌, Vol. 100, No. 7, pp. 24-27, 2015
- 国土交通省鉄道局監修 (公財)鉄道総合技術研究 所編:鉄道構造物等設計標準・同解説(耐震設計), 丸善出版,2012
- 3) 齊藤正人,室野剛隆,本山紘希:地震時における構 造物の倒壊に対する危機耐性機構の一考察,土木学

会第 70 回年次学術講演会講演概要集, I-144, pp. 287-288, 2015

- 4) 豊岡亮洋,室野剛隆,齊藤正人:危機耐性を向上させる倒壊方向制御構造の振動台実験,第 20 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.49-56,2017
- 5) 豊岡亮洋, 室野剛隆, 小野寺周, 布川博一: ブロッ ク型倒壊方向制御構造に耐力評価のための静的載荷 試験, 土木学会第 73 回年次学術講演会概要集, 2018.
- 6) 布川博一,豊岡亮洋,小野寺周,山田聖治,室野剛 隆:ブロック型倒壊方向制御構造の耐荷機構に関す る解析検討,土木学会第73回年次学術講演会概要 集,2018.
- 7) 小野寺周,日野篤志,室野剛隆:ラーメン高架橋における倒壊方向制御機構の有効性に関する基礎的検討,土木学会第72回年次学術講演会講演概要集, 2017
- 野上雄太,室野剛隆,佐藤勉:繰返しによる耐力低下を考慮した RC 部材の履歴モデルの開発,鉄道総研報告, Vol. 22, No. 3, pp. 17-22, 2008

## EVALUATION OF DYNAMIC BEHAVIOR OF A RAILWAY VIADUCT EQUIPPED COLLAPSE DIRECTION CONTROL DIVICE BY FRAME MODEL

## Meguru ONODERA, Akihiro TOYOOKA, Seiji YAMADA and Yoshitaka MURONO

It is important to evaluate the effect of the collapse direction control device and the characteristics of ground motion on the response of the structure equipped that device. It is necessary to construct an analysis method that can trace the dynamic behavior up to collapse state. In this study, two dimensional frame model was constructed and reproducible analysis was carried out. As a result, it was shown that the asymmetric dynamic behavior of the structure equipped the collapse direction control device can be evaluated by the frame model. In addition, the method that can easily determine the collapse state was shown.