

地震応答解析における断層変位の入力方法に関する検討

(国研) 土木研究所 正会員 ○横澤直人 河原井耕介 中尾尚史 大住道生

1. はじめに

平成 29 年に改定された道路橋示方書（以下「道示」という。）V 編¹⁾において、断層変位は耐荷性能の照査のための設計状況としては位置付けられていない。一方、断層変位に対して致命的な被害に至りにくい構造とする等の対策を講じるためには、地震動及び断層変位が作用する場合における橋の応答や発生する断面力を検討することが重要となる。しかしながら、現在のところ、断層変位の影響を考慮した橋の地震応答解析手法は確立されていない。

そこで、本稿では、2016 年熊本地震で被災した扇の坂橋を対象に、地震応答解析における断層変位の入力方法について検討した結果を報告する。

表-1 扇の坂橋の諸元

橋長	128.0m
適用基準	平成 8 年道示
上部工形式	鋼 3 径間連続非合成鈹桁橋
下部工形式	逆 T 式橋台 張出し式橋脚
支承形式	水平力分散ゴム支承 端支点到ジョイントプロテクター設置
基礎形式	直接基礎(A1) 深礎基礎(A2,P1,P2)
落橋防止構造	落橋防止ケーブル 変位制限構造

2. 対象橋梁及び解析モデル

本検討では、扇の坂橋を 3 次元骨組みモデルで作成した。扇の坂橋の諸元を表-1 に、解析モデルの模式図を図-1 に示す。解析モデルで使用した材料強度は、いずれも扇の坂橋の当初設計資料における設計基準強度を使用した。

上部構造について、床版は、部材の応力ひずみ関係及び 2 軸曲げの影響を評価可能なファイバー要素を使用した。また、1 次～3 次振動モードが考慮できるように、各桁の要素数は 1 支間当たり 10 程度とし、横桁配置に合わせて分割した。主桁及び横桁は全断面有効剛性とした線形はり要素を使用してモデル化した。

支承は 1 基ずつモデル化することとし、橋軸方向及び橋軸直角方向のみ線形ばねでモデル化した。支点条件は、全ての橋台、橋脚に関して、水平方向は弾性（線形）、鉛直方向は固定、回転方向は自由とした。支承ゴムの破断ひずみは 300% として設定した。

橋台に設置されていたジョイントプロテクターのモデル化には、

遊間を考慮した非線形ばね要素を使用し、支承の橋軸直角方向の線形ばね要素と並列にモデル化した。落橋防止構造は、遊間及びケーブルの降伏を考慮した非線形ばね要素でモデル化し、ケーブルは降伏耐力で破断するものとした。

下部構造のうち、橋台は線形はり要素で、橋脚は道示 V 編¹⁾で規定されるトリリニア型の非線形はり要素でモデル化し、降伏曲率等は道示 V 編¹⁾に基づいて求めた。基礎は、基礎及び地盤間の抵抗を表現する線形集約ばねとしてモデル化し、ばね剛性は道示 V 編¹⁾に基づいて算出した。

3. 入力地震動・断層変位

本検討で使用する地震動は、西原村小森における 2016 年熊本地震本震時の観測結果から、サイト特性置換手法²⁾によって推定された加速度波形を使用した。本研究では非線形静的解析及び非線形動的解析を行い、このうち地震動による動的解析は、直接積分法を用い、減衰モデルにはレイリー減衰を使用した。断層変位については、地震後の測量結果から得られた下部構造の移動量（水平方向：1.1m～1.8m、鉛直方向：500mm～700mm、橋軸直角方向の傾斜：30mm～50mm）⁴⁾を解析モデルのフーチング底面に強制変位として入力することとした。

キーワード 耐震設計, 動的解析, 断層変位, 熊本地震, 扇の坂橋

連絡先 〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6 (国研) 土木研究所構造物メンテナンス研究センター TEL:029-879-6773

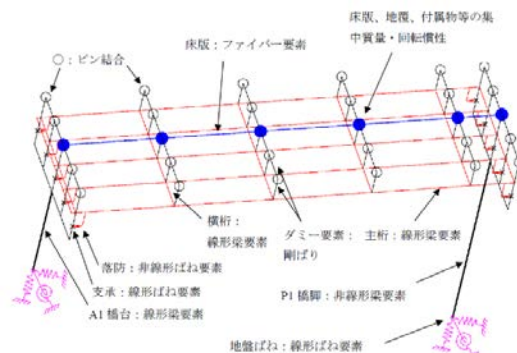


図-1 解析モデルの模式図

4. 検討ケースと解析結果の評価方法

表-2に本検討で対象としたケースを示す。解析モデルは同一とし、入力条件のみを変化させた。地震動又は断層変位の一方のみを作用させた2ケースのほか、断層変位を入力するタイミングを変化させた4ケースで解析を実行した。なお、Case1では静的解析、Case2~Case6では動的解析を行った。解析結果と実際に確認された損傷³⁾との比較は、表-3に示す評価項目に基づいて行った。



5. 解析結果

解析結果を地震後の損傷と比較した結果を表-4に示す。地震動又は断層変位の一方のみを作用させたCase1, Case2では、解析結果が損傷を過小評価している箇所が多数見受けられる。また、断層変位を地震動の作用前及び作用後に入力したCase3, Case4でも過小評価している箇所が見られており、地震動及び断層変位を個別に作用させる方法では、損傷を過小評価する恐れがある。一方、加速度のピーク時に断層変位を作用させたCase5, Case6では、全体として損傷を過大評価する傾向がある。また、Case6はCase5と比較して損傷の再現性が高い。

以上の検討結果から、地震動及び断層変位を考慮した地震応答解析において、地震動の前後に断層変位を入力した場合は危険側の評価となり、地震動の加速度のピーク時に断層変位を入力した場合には安全側の評価となることが確認された。

表-4 解析結果

ケース	対象	主桁		支承			ジョイントプロテクター		落橋防止ケーブル		橋脚		フィンガージョイント	
		実損傷	解析	実損傷	解析		実損傷	解析	実損傷	解析	実損傷	解析	実損傷	解析
					橋軸方向	直角方向								
Case1	A1橋台	変形	×(損傷なし)	残留変位	×(変位過小)	○	脱落(3か所・両側)	△	損傷なし	○	-	-	横ずれ	×(ずれなし)
	P1橋脚	損傷なし	○	残留変位	×(変位過小)	○	-	-	-	-	ひび割れ	○	-	-
	P2橋脚	損傷なし	○	残留変位	△	○	-	-	-	-	ひび割れ	○	-	-
Case2	A1橋台	変形	×(損傷なし)	残留変位	×(変位過小)	×(変位過小)	脱落(3か所・両側)	○	損傷なし	○	-	-	横ずれ	×(ずれなし)
	P1橋脚	損傷なし	○	残留変位	×(変位過小)	×(変位過小)	-	-	-	-	ひび割れ	○	-	-
	P2橋脚	損傷なし	○	残留変位	×(変位過小)	×(変位過小)	-	-	-	-	ひび割れ	○	-	-
Case3	A1橋台	変形	○	残留変位	×(変位過小)	○	脱落(3か所・両側)	△	損傷なし	○	-	-	横ずれ	○
	P1橋脚	損傷なし	△	残留変位	○	○	-	-	-	-	ひび割れ	△	-	-
	P2橋脚	損傷なし	△	残留変位	×(変位過小)	○	-	-	-	-	ひび割れ	△	-	-
Case4	A1橋台	変形	○	残留変位	○	○	脱落(3か所・両側)	○	損傷なし	○	-	-	横ずれ	×(ずれなし)
	P1橋脚	損傷なし	○	残留変位	△	○	-	-	-	-	ひび割れ	○	-	-
	P2橋脚	損傷なし	○	残留変位	×(変位過小)	○	-	-	-	-	ひび割れ	○	-	-
Case5	A1橋台	変形	○	残留変位	×(変位過大)	×(変位過大)	脱落(3か所・両側)	○	損傷なし	×(損傷)	-	-	横ずれ	○
	P1橋脚	損傷なし	×(変形)	残留変位	×(変位過大)	×(変位過大)	-	-	-	-	ひび割れ	×(終局)	-	-
	P2橋脚	損傷なし	×(変形)	残留変位	×(変位過大)	×(変位過大)	-	-	-	-	ひび割れ	×(終局)	-	-
Case6	A1橋台	変形	○	残留変位	×(変位過大)	×(変位過大)	脱落(3か所・両側)	△	損傷なし	○	-	-	横ずれ	○
	P1橋脚	損傷なし	×(変形)	残留変位	×(変位過小)	△	-	-	-	-	ひび割れ	×(終局)	-	-
	P2橋脚	損傷なし	×(変形)	残留変位	×(変位過小)	△	-	-	-	-	ひび割れ	×(終局)	-	-
	A2橋台	変形	○	残留変位	○	○	脱落(全て・片側)	△	損傷なし	×(損傷)	-	-	横ずれ	○

注1)  は過小評価を、 は過大評価を表す 注2) 「△」は部分的に損傷を再現していることを表す

6. まとめ

断層変位を考慮した地震時応答解析において、地震動及び断層変位を個別に作用させた場合では応答を過小評価し、地震加速度のピーク時に断層変位を作用させた場合では応答を過大評価することが明らかになった。今後は、断層変位を作用させるタイミングについてさらなる検討を行うとともに、断層変位の作用する時間(断層変位の作動速度)に関する検討を行い、断層変位を考慮した地震応答解析手法の高度化を目指す。

謝辞

本検討で使用した地震動波形は気象庁から公開された熊本県震度計波形データを基に作成され、国土交通省九州地方整備局熊本河川国道事務所から提供を受けたものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，2017. 2) Y. Hata, A. Nozu, K. Ichii：A Practical Method to Estimate Strong Ground Motions after an Earthquake, Based on Site Amplification and Phase Characteristics, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.101, No.2, pp.688-700, 2011. 3) 平成28年(2016年)熊本地震土木施設被害調査報告，国土技術政策総合研究所資料 No.967/土木研究所資料 No.4359, 2017. 4) 大住道生，星隈順一：熊本地震により被害を受けた道路橋の損傷痕に基づく要因分析，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，2017.