

## 地震発生時における RC 橋脚の破壊確率の検討

中央大学 学生会員

○西山 実結

中央大学 正会員

佐藤 尚次

## 1. はじめに

地震の影響による構造物への被害は人命被害につながるため、設計段階において耐震性能は必ず考慮されなければならない。日本のように地震の発生頻度が比較的高い国においては尚更慎重な耐震設計が欠かせないと言える。そこで本研究では道路橋の RC 橋脚に地震荷重が作用したときの耐震設計を行うと同時に、現在の耐震設計法に基づいた曲げ耐力とせん断耐力の関係性が、コストを考えた場合に果たして適切なものかについて検討することとする。

耐震設計上の常識としてせん断破壊が曲げ破壊に先行することがあってはならないとされている。このことは、信頼性設計の見地からすれば前者に対する信頼性指標が後者に比べて十分に大きいものになっていることを意味する。地震力による作用効果としてせん断と曲げには強い相関性があるため信頼性指標の大小はそのまま先行性の結論に結び付く。他方、どの程度信頼性指標に差をつけるべきかの議論は十分になされてはならず、場合によってはせん断補強のコストがオーバースペックになっている可能性も否定しきれないものがある。本研究はこの点についての問題提起を目的とする。

## 2. 研究手法

本研究では、対象とする構造物に作用する地震力の算出、橋脚躯体の断面の設定を行う。そこから耐震設計を行っていき、限界状態設計法から曲げ耐力とせん断耐力を求める。ここで求められた設計条件をもとに対象断面の安全性指標 $\beta$ を求めていく。

現在の安全性照査では、曲げ破壊先行型の RC 橋脚において、曲げ耐力に達する時のせん断力を上回るせん断耐力を RC 橋脚に与え、曲げ破壊に対してのみ安全性検討を行えばよいとなっているが、この場合曲げ破壊先行型の橋脚の破壊確率は、橋脚のもつせん断耐力の大きさの影響を全く受けないものとしている。このようなせん断破壊しないためのせん断耐力に特化した断面決定や支配的な破壊モードに対してのみの安全性照査ではなく、よりコスト面を含め合理的な設計になるような方法はないか、主鉄筋量を変更することによって検討をしていく。

本研究では、対象構造物を矩形断面からなる鉄筋コンクリート単柱橋脚とし、この橋脚を 1 質点系の力学モデルに置き換え信頼性設計を行う。また本研究で対象とした橋脚は「道路橋の耐震設計に関する資料」<sup>1)</sup>に記載されている 5 径間連続鋼 I 桁橋をもとに決定した。橋脚の条件を表-1 に、本研究で使用する鉄筋とコンクリートの部材条件を表-2 にそれぞれ示す。また主鉄筋、帯鉄筋、中間帯鉄筋の規格は

表-1 橋脚条件

上部工荷重 $W$ [MN]	7.0
断面幅 $B$ [m]	5.0
断面高さ $D$ [m]	2.2
橋脚高さ $L$ [m]	10

表-2 部材条件

コンクリートのヤング率 $E_c$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$2.5 \times 10^4$
コンクリートの圧縮強度 $f_c$ [N/mm <sup>2</sup> ]	24
鉄筋のヤング率 $E_s$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$2.0 \times 10^5$
鉄筋の降伏強度 $f_{sy}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	345

表-3.1 主鉄筋

径	本数[本]	配置間隔 [mm]
D29	108	120

表-3.2 帯鉄筋

径	有効長 [mm]	高さ間隔 [mm]
D13	952	150

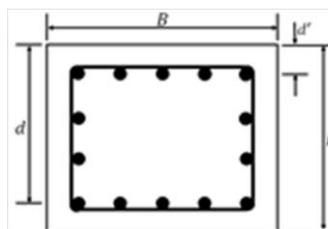


図-1 対象構造物の断面寸法

SD345 とする。図-1 は対象構造物の断面の寸法を簡易的に表したもので、表-3.1、表-3.2 は修正震度法を用いて矩形断面を設計した結果である。この結果を軸に研究を進めていく。また、対象とする地震動は道路橋示方書<sup>2)</sup>よりレベル 2 地震動のタイプ I、地盤種別は I 種地盤とし、本研究では東京都新宿区のものを用いることとする。

## 3. 限界状態設計法

耐震設計では、常時の荷重や地震時などの荷重について複数の限界状態を設定することが合理的である。今回設計を行うにあたり考慮する限界状態を曲げ破壊およびせん断破壊による終局限界状態として進めていく。設定した橋脚高さや鉄筋、コンクリートの条件を用いて地震力を算出し、対象とする橋脚断面における曲げ耐力 $M_u$ と発生する曲げモーメント $M_i$ 、およびせん断耐力 $V_u$ と発生するせん断力 $V_i$ を求める。ここで算出した $M_u$ 、 $M_i$ 、 $V_u$ 、 $V_i$ を山崎ら<sup>3)</sup>の提案した橋脚の限界状態式より、式(1)、式(2)に代入し、 $g_m(x) < 0$ 、 $g_v(x) < 0$ となる場合を曲げ破壊、せん断破壊したとみなすこととする。

キーワード 修正震度法 限界状態設計法 変動係数 信頼性指標

連絡先 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 TEL 03-3817-1816 FAX 03-3817-1803

$$g_m(x) = \alpha_1 M_u - M_i \quad (1)$$

$$g_v(x) = \alpha_2 V_u - V_i \quad (2)$$

ここで、 $g_m(x)$ は曲げに対する限界状態関数、 $g_v(x)$ はせん断に対する限界状態関数であり、 $\alpha_1, \alpha_2$ は耐力算定式のもつばらつきを考慮する補正係数である。またこれらの値は同文献<sup>3)</sup>より平均値を1、変動係数を0.1とした。

#### 4. 各基本定数に対する不確定性の考慮

信頼性指標 $\beta$ を算出するにあたり、 $g(x)$ の標準偏差を求める必要がある。その際に作用側の地震力と、耐力側のコンクリートや鉄筋の基本変数の不確定性を考慮する必要があり、これを確率変数として表現する。作用に関しての不確定性を考慮する基本変数は地震荷重とする。また耐力側の材料に関して考慮する基本係数は文献<sup>4)</sup>より表-4に示す。

##### 4.1 作用側の不確定性

本研究では地震力の算出にあたり、防災科学技術研究所、強震観測網<sup>5)</sup>(K-NET/KiK-net)より東京都新宿区(N35.71, E139.69)の過去25年間の地震動データを抽出した。この時抽出した25年間の年最大加速度を、「活断層を考慮した地震危険度解析と最適信頼性への応用」<sup>6)</sup>より算出された式(式(3))から加速度応答スペクトルに変換した。この式は神田ら<sup>6)</sup>が提案する対象地域の基盤最大加速度 $\alpha_c[a]$ と構造物の加速度応答スペクトル値 $S_1(T)$ の関係式である。それを確率密度関数に表したものが図-2である。この確率密度関数の作成にあたり、分布系は先行研究<sup>7)</sup>より対数正規分布に適合することが分かっている。

$$\alpha_c = 19.44\alpha_c^{0.6523}[a] \quad (3)$$

ここで $\alpha_c$ は加速度応答スペクトル、 $\alpha$ は基盤最大加速度である。

##### 4.2 耐力側の不確定性

材料の不確定性が耐力に与える影響をモンテカルロシミュレーションにより検討する。モンテカルロシミュレーションとは、乱数を発生させて事象を確率的にシミュレーションする手法である。今回、変動係数は表-4の通りとし、これらの材料強度は正規分布に従うものとする。10000個の正規乱数を発生させて耐力の確率密度関数を求め、曲げ、せん断耐力それぞれの限界状態関数を算出していく。

#### 5. 解析結果

以上の解析方法を用いて算出した信頼性指標 $\beta$ を表-5に示す。従来の設計によって算出された $\beta$ を赤字で示した。表からもわかるように、一般的には構造物の曲げ破壊が先行するように設計を行い、特に橋脚の支配的な限界状態は曲げ耐力に対する限界状態であることが分かっているため、従来の設計でも十分に満たしているといえる。今回ケース1、ケース2で中間帯鉄筋の有効長を変更させて解析を行った。せん断に対する信頼性指標がケース2のほうが小さいが、それでも十分に満足できる値が算出された。

表-4 不確定性を考慮する基本変数

	変動係数
コンクリートの圧縮強度	0.15
鉄筋の降伏強度	0.08

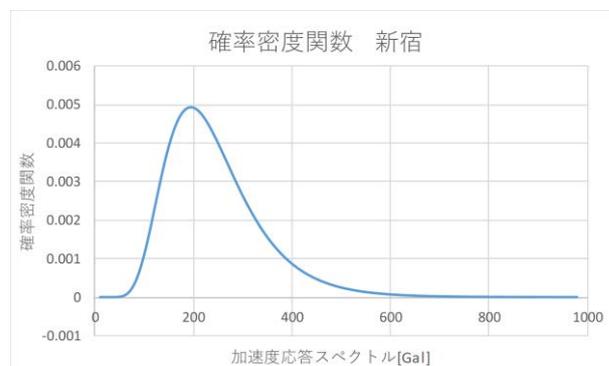


図-2 加速度応答スペクトルの確率密度関数

表-5 解析結果

主鉄筋	ケース1			ケース2		
	中間帯鉄筋有効長[mm]	曲げ $\beta$	せん断 $\beta$	中間帯鉄筋有効長[mm]	曲げ $\beta$	せん断 $\beta$
D29×108本	952	3.08	3.72	1586	3.08	3.38
D25×108本	952	3.07	3.88	1586	3.07	3.49
D29×88本	952	2.99	3.84	1586	2.99	3.43
D25×88本	952	2.95	3.77	1586	2.95	3.41
D29×98本	952	3.11	3.73	1586	3.11	3.42
D25×98本	952	3.05	3.82	1586	3.05	3.37
D29×79本	952	2.99	3.82	1586	2.99	3.39
D25×79本	952	2.96	3.80	1586	2.96	3.39

#### 6. おわりに

せん断耐力をコスト面を考慮して安全率を下げることはできないか検討を始めた。算出した結果を見て、従来の設計からせん断耐力に影響を与える帯鉄筋を大幅に減少させても十分な安全性が見込めることが分かった。今回変化させた条件が鉄筋のみであったため、この解析結果が適切な結果となっているかは定かではない。今後は、今回同様目標信頼性を満たしつつ、変化させる条件を増やしてコストを抑えた最適断面を求めていく。

#### 参考文献・出典

- 1) 道路橋の耐震設計に関する資料，日本道路協会，平成9年3月
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編，2017.11
- 3) 信頼性理論に基づく橋梁システムの地震時安全性評価法に関する研究，1999，山崎康紀，松中亮治，秋山充良，鈴木基行
- 4) 構造物信頼性設計法の基礎，鈴木基行，森北出版，2008年
- 5) 防災科学技術研究所[強震観測網(K-NET)]  
<http://www.kyoshin.bosli.go.jp/kyoshin/>
- 6) 活断層を考慮した地震危険度解析と最適信頼性への応用，第10回日本地震工学シンポジウム，pp145-160，佐藤一郎，平川倫生，神田順
- 7) 市丸 智大，ISO2394に基づくRC橋脚の耐震信頼性設計，第45回土木学会関東支部，2018,3