

# 熊本地震による橋梁倒壊要因の統計分析

熊本大学 学生会員〇山元康暉

熊本大学 正会員 藤見俊夫

## 1. 研究背景と目的

平成 28 年に熊本地震が発生した。「平成 28 年熊本地震 熊本市震災記録誌」<sup>1)</sup>の「平成 28 年熊本地震の被災状況について」によると熊本地震は、観測史上初めて同一地域において震度 7 の地震がわずか 28 時間の間に 2 度発生した。本研究では、熊本地震により熊本県と大分県に位置する橋梁がどのような要因によって倒壊損傷したのかを統計的に検証することを目的とする。データはプレストレス・コンクリート建設業協会（以下「PC 建協という」）と日本橋梁建設協会（以下「橋建協という」）で取りまとめられた橋梁調査・点検データをもとに分析を行う。本研究では、実際の地震で生ずる橋梁倒壊や破損の要因を明らかにするため、数値シミュレーションとは異なった視点からの知見を得られることが期待される。

## 2. 研究手法

### 2. 1. 橋梁データ

橋梁の調査・点検データは、PC 建協の 309 個、橋建協が 492 個の合計 801 個である。これらのシートの調査項目は完全には一致しないので、本研究では両者で共通する項目を分析に用いる。

### 2. 2. 説明変数と目的変数の紹介

調査・点検データ記載事項の中で「架設年次」、「橋長」、「幅員」、「構造形式」、「路線名」を説明変数とした。「構造形式」は、コンクリート床版橋、コンクリート桁橋、コンクリート箱桁、鋼鉄桁橋、鋼箱桁橋、アーチ橋、トラス橋、ラーメン橋、吊り橋、斜張橋の 10 種類に区分した。「架設年次」は、道路橋の規格・規準類の変遷について書かれた論文である「劣化予測の観点からみた我が国の道路橋の規格・規準類の変遷」<sup>2)</sup>内の道路橋の設計基準の変遷を参考に区分した。具体的には、1919 年から 1925 年、1926 年から 1972 年、1973 年から 1979 年、1980 年以降の 4 種類に区分した。「路線

名」は、点検表に記載されていても歩道橋なども含まれているため道路橋だけをデータとして入れ、その他は除外した。そして、そのデータを、国道と国道以外に分類した。

さらに本分析では、調査・点検データの記載事項だけではなく、橋梁の位置における「熊本地震本震の震度」、「微地形区分」、「地盤変位」を追加した。

「微地形区分」とは地形を分類したものである。この地形区分を、山地、山麓地、火山地、火山山麓地を「山地」として、丘陵、火山性丘陵、岩盤台地、砂礫質台地、ローム台地、砂丘を「丘、台地」として、谷底低地、扇状地、自然堤防、後背湿地、旧河道、三角洲・海岸低地、砂洲・砂礫洲、砂洲・砂丘間低地を「低地」として、干拓地、埋立地を「人工地形」として定義した。また、礫・岩礁、河原、河道、湖沼に関しては「その他」とするが該当がなかったため除外する。

「地盤変位」は、地理院地図上で各橋梁座標から一番近い電子基準点の変位の向きに対する橋梁の向きに関して調べる。変位の向きは、橋軸方向、橋軸垂直方向、斜め方向の 3 種類とした。

最後に、目的変数の紹介をする。共通する調査・点検データ記載事項の中で橋梁全体について共通する項目である「走行性」と「耐荷性」を目的変数とした。

### 2. 3. 分析モデル

「走行安全性」、「耐荷性」に関しては、順序プロビットモデルを用いる。順序プロビットモデル式については以下に示す。

$$\begin{aligned}
 y_i &= 0 \quad \text{if } z_i < \mu_0 \\
 y_i &= 1 \quad \text{if } \mu_0 \leq z_i < \mu_1 \\
 &\vdots \\
 y_i &= d-1 \quad \text{if } \mu_{d-2} \leq z_i < \mu_{d-1} \\
 y_i &= d \quad \text{if } \mu_{d-1} \leq z_i
 \end{aligned}$$

$$z_i = \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \cdots + \beta_k x_{ik} + \varepsilon_i$$

$z_i$ は橋梁*i*の潜在的な被害評価式、 $\mu_0, \mu_1, \cdots, \mu_{d-1}$ は被害カテゴリーの閾値パラメータ、 $x_{i1}, \cdots, x_{ik}$ は説明変数、 $\beta_1, \cdots, \beta_k$ は説明変数の影響度パラメータ、 $\varepsilon_i$ は標準正規分布に従う誤差値。今回は、走行安全性に関する被害判定は $d = 2$ 、耐荷性に関しては $d = 4$ で分析する。

3. 分析結果

これまで紹介した説明変数と目的変数を順序プロビットモデルで分析した結果を表1に示す。

耐荷性は10%水準で考えたとき、架設年次(1919-1925)、橋長、鋼鈑桁橋、斜張橋、山地、斜め方向の地盤変位が有意となっている。そして、1%水準で考えたとき震度7、震度6強、震度6弱、丘・台地が有意となっている。

走行性は10%有意で考えたとき、架設年次(1973-1979)、コンクリート桁橋が有意となっている。そして、1%水準で考えたとき震度7、震度6強、震度6弱、山地、人工地形が有意となっている。なお、コン

表 1 耐荷性と走行性を目的変数とした分析

| 説明変数  |                                | 目的変数   |        |        |        |
|-------|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|
|       |                                | 耐荷性    |        | 走行性    |        |
|       |                                | 推定値    | p値     | 推定値    | p値     |
| 基礎情報  | 架設年次(1919-1925)                | 2.101  | 0.067  | -3.664 | 0.980  |
|       | 架設年次(1926-1972)                | 0.429  | 0.105  | 0.275  | 0.311  |
|       | 架設年次(1973-1979)<br>(1980-を基準)  | 0.261  | 0.411  | 0.479  | 0.075  |
|       | 橋長(m)                          | 0.002  | 0.048  | 0.001  | 0.543  |
|       | 幅員(m)                          | -0.004 | 0.754  | 0.012  | 0.230  |
| 震度    | 震度7=1,それ以外=0                   | 2.413  | 0.004  | 2.804  | 0.002  |
|       | 震度6強=1,それ以外=0                  | 1.251  | <0.001 | 1.939  | <0.001 |
|       | 震度6弱=1,それ以外=0<br>(震度5強以下が基準)   | 0.926  | 0.002  | 1.075  | 0.002  |
|       |                                |        |        |        |        |
| 構造形式  | コンクリート桁橋=1,それ以外=0              | 0.233  | 0.422  | -0.529 | 0.027  |
|       | コンクリート箱桁橋=1,それ以外=0             | 0.283  | 0.703  | -0.431 | 0.542  |
|       | 鋼鈑桁橋=1,それ以外=0                  | 0.625  | 0.079  | -0.055 | 0.872  |
|       | 鋼箱桁橋=1,それ以外=0                  | 0.477  | 0.307  | 0.254  | 0.577  |
|       | アーチ橋=1,それ以外=0                  | -0.382 | 0.552  | -0.898 | 0.173  |
|       | トラス橋=1,それ以外=0                  | 0.599  | 0.337  | 0.057  | 0.930  |
|       | ラーメン橋=1,それ以外=0                 | -0.045 | 0.931  | -0.505 | 0.250  |
|       | 吊り橋=1,それ以外=0                   | —      | —      | —      | —      |
|       | 斜張橋=1,それ以外=0<br>(コンクリート床版橋が基準) | 2.768  | 0.014  | 1.819  | 0.108  |
|       |                                |        |        |        |        |
| 地盤    | 山地=1,それ以外=0                    | 0.733  | 0.012  | 1.070  | 0.001  |
|       | 丘,台地=1,それ以外=0                  | -0.914 | 0.009  | -0.095 | 0.685  |
|       | 人工地形=1,それ以外=0<br>(低地が基準)       | 0.396  | 0.364  | 1.187  | 0.004  |
|       |                                |        |        |        |        |
|       | 橋軸垂直方向変位=1,それ以外=0              | 0.290  | 0.300  | 0.290  | 0.232  |
|       | 斜め方向変位=1,それ以外=0<br>(橋軸変位が基準)   | 0.452  | 0.092  | 0.191  | 0.431  |
| 路線の種類 | 国道=1,それ以外=0                    | 0.128  | 0.656  | -0.331 | 0.290  |
| 閾値    | $\mu_0$                        | 2.936  |        | 2.777  |        |
|       | $\mu_1$                        | 3.428  |        | 4.319  |        |
|       | $\mu_2$                        | 3.909  |        |        |        |
|       | $\mu_3$                        | 4.334  |        |        |        |
| 標本数   |                                | 378    |        | 377    |        |
| 対数尤度  |                                | -148.0 |        | -134.9 |        |
| 疑似R2  |                                | 0.189  |        | 0.248  |        |

クリート桁橋の場合のみ、推定値がマイナスである。

4. 考察

始めに耐荷性に関する考察を述べた後に、走行性についても述べる。また、今回は文章量が限られている

震度が大きいほど耐荷性が低くなる結果が得られているが、揺れが大きいほど橋梁へのダメージが大きいことが明らかである。そして、架設年次が新しいほど耐荷性が高い結果が得られているが、橋梁を造る際の基準が過去と比べて現在の方が厳密であることを踏まえると納得の結果である。構造形式に関しては、コンクリート床版橋と比較して、斜張橋と鋼鈑桁橋の耐荷性が低かった。斜張橋に関しては、データが3つしかなく、その内の1つの損傷例が影響したと考えられる。鋼鈑桁橋は床版橋と比較すると、主桁がねじりモーメントを受けやすく地震の揺れにより主桁が損傷したことが想定される。地盤変位においては、斜め方向の変位が耐荷性を低くする結果となっている。これは、橋梁が普段受けることのない揺れ方向に揺れを受けたためだと考えられる。

震度に関しての考察、斜張橋に関しての考察は耐荷性と同じなので省略する。構造形式に関しては、コンクリート床版橋と比較して、コンクリート桁橋の走行安全性が高かった。コンクリート桁橋は主桁であるのに対して、床版橋は版であるためその分自重が重くなったことが要因だと考えられる。運動方程式から分かるように、自重が大きければ外力も大きくなるため、コンクリート桁橋の方が走行安全性が高いという結果が得られたと考えられる。

5. 参考文献

1) 熊本市:平成 28 年熊本地震 熊本市震災記録誌, pp.8-9, 敷島印刷株式会社, 2018.  
2) 玉越隆史, 横井芳輝, 石尾真理, 鎌田敏郎:劣化予測の観点からみた我が国の道路橋の規格・規準類, pp.101-116, 土木学会論文集 D3 (土木計画学) 71 巻 3 号, 2015.