

京都大学工学部 学生員 ○森田 遼
 京都大学大学院工学研究科 正会員 小池 武
 JFE エンジニアリング 正会員 今井俊雄

1. はじめに

2007 年新潟県中越沖地震において、柏崎市内の六識橋水管橋¹⁾で支承部・伸縮継手部の破損被害が発生した。その被害は大規模漏水を伴うものであり終局限界状態を超過するものであった。現行水道管耐震設計法²⁾では、水道施設全般については耐震性能を3段階に分けて定義し、その性能を満足する設計法を提示している。しかし、管路と水管橋は「漏洩発生の有無で耐震性能が規定されるため、保持すべき耐震性能は耐震性能2までとする」としている。すなわち、耐震性能3（終局限界状態）は許容しないとの考え方をとっている。しかし、六識橋水管橋は新潟県中越沖地震というレベル2地震動で終局限界状態を超える破壊を生じており、耐震性能3を超える破壊を生じたことになる。この事実、耐震性能3に対する耐震安全性照査の必要性を示唆しているものと言えよう。

ここでは、現行設計法が適用除外している耐震性能3（終局限界状態）に対する水管橋伸縮継手の新しい設計法を提案する。

2. 六識橋水管橋の地震時被害分析

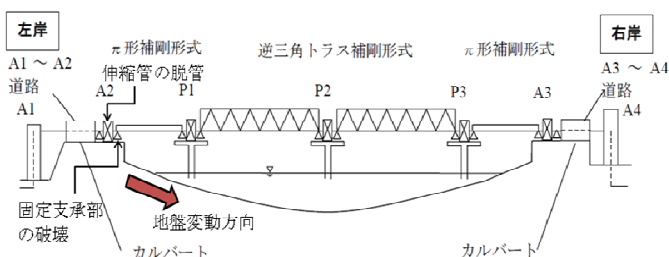


図-1 六識橋水管橋の概略図

図-1 は 2007 新潟県中越沖地震で被災した六識橋水管橋である。同水管橋左岸部に地震時被害が集中し、A2 橋台部で固定支承部アンカーボルトの引き抜きと伸縮管の脱管が生じた。また護岸部が河川方向にはらみ出す被害が発生した。既往の設計法では、

Ryo MORITA, Takeshi KOIKE, Toshio IMAI
 r.morita@hs2.ecs.kyoto-u.ac.jp

伸縮継手の耐震安全性照査は地盤震動と水管橋支点部の相対変位、温度による変位および設置誤差が抜け出し限界変位を超過するかどうかについて検討する。

いま、地震被害が発生した六識橋水管橋では、地盤震動、支点間相対変位を次式で算定する。

1) 地盤震動による変位

$$\delta_G = U_h \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} d\right) \quad (1)$$

ここで、 U_h ：地盤の水平変位

d ：A1 橋台部から A2 橋台部の伸縮管までの距離

λ ：地震波の波長

2) 構造物応答による相対変位

$$\delta_s = \max\{u_1(t) - u_2(t)\} \quad (2)$$

ここで、

$u_1(t)$ ：支点 A1 の構造物応答変位

$u_2(t)$ ：支点 A2 の構造物応答変位

議論を単純化して温度変化と設置誤差の影響を無視すると、当該水管橋の地盤変位 22mm、相対変位 7mm、その総和が 29mm となり、限界寸法 150mm を大幅に下回り、この照査方法では伸縮継手抜け出し事象を説明するのが不十分であることが判明した。

一方、A2 橋台部の護岸部近傍の地盤が河川方向にはらみ出した影響を考え「地盤変状による変位」を導入し、Newmark³⁾の手法によりその変位を概略推計することにした。

Newmark の方法は、図-2 に示すように土塊を剛塑性体と仮定し、ある一定値以上の加速度が土塊に

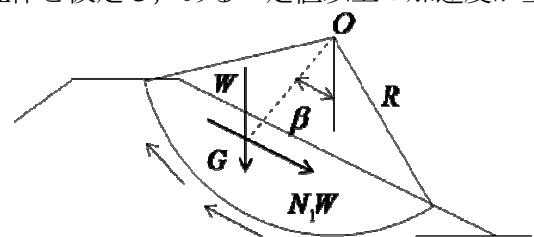


図-2 すべり土塊の Newmark モデル

働くとその土塊はすべると考え、加速度の継続時間をもとに、すべり変位量を簡易的に求める方法であり、次式で表される。

3) 地盤変状による変位

$$\delta_p = \frac{V^2}{2gN_1} \left(1 - \frac{N_1 g}{A_g} \right) \cos \theta \quad (3)$$

ここで、 g : 重力加速度

A_g : 最大加速度

V : A_g による最大速度

N_1 : 動的抵抗係数

θ : 斜面角度

柏崎市の最大加速度 A_g 、継続時間 t_0 は盛土の固有周期 $T_{盛土}$ の半周期分として最大速度を $V = A_g t_0$ と推定すると、地盤変状による変位は

$$\Delta u_p = 165 \text{ mm} \quad (4)$$

となり、伸縮管の変位は次式により

$$\Delta U = \Delta u_s + \Delta u_G + \Delta u_p = 194 \text{ mm} \quad (5)$$

となり、当該水管橋の伸縮管変位が限界寸法を超過し伸縮継手の拔出しが発生可能との結果となり、実際の現象を説明することができた。

3. 提案する設計法

耐震性能 3 に対する設計法として、以下の限界状態設計法を提案する。すなわち、耐震性能 3 における限界状態 Z^{major} を以下のように定義する。

「レベル 2 地震動(EQ2)による非弾性応答値 S_2 が水管橋管路の大規模漏洩限界 R^{major} を上回ることによって構造物要素に大損傷（耐震性能 3 を確保できない状態）を与える事象」。

その限界状態式は次式で定義される。

$$Z^{\text{major}}(t) \equiv R^{\text{major}} - (D + L) - S_2 \cdot 1_{EQ_2} < 0 \quad (6)$$

ここで、

D : 死荷重

L : 活荷重

S_2 : EQ2 に相当する地震荷重

1_{EQ_2} : S_2 の発生事象

ただし、

$$1_{EQ_2} = \begin{cases} 1: \text{地震動EQ2が発生した場合} \\ 0: \text{地震動EQ2が発生しない場合} \end{cases} \quad (7)$$

全継手変位を次式で定義し、

$$\Delta = \delta_s + \delta_G + \delta_p \quad (8)$$

機能関数を次式で定義し、

$$Z_J^{\text{major}} = \Delta_{cr}^{\text{major}} - \delta_T - \Delta < 0 \quad (9)$$

ここで、 δ_T は温度応力の影響による変位である。

目標破壊確率を次式で設定する場合には、

$$P[Z_J^{\text{major}} < 0] < p_f^{\text{Target}} \quad (10)$$

目標破壊確率に対応する目標安全性指標

$$\beta_J^{\text{Target}} = -\Phi^{-1}[p_f^{\text{Target}}] \quad (11)$$

を用いることで、伸縮継手が必要とする限界変位は次式で求めることができる。

$$E[\Delta_{cr}^{\text{major}}] \geq (E[\delta_T] + E[\delta_s] + E[\delta_G] + E[\delta_p]) + \beta_J^{\text{Target}} \sqrt{\text{Var}^2[\Delta_{cr}^{\text{major}}] + \text{Var}^2[\delta_T] + \text{Var}^2[\delta_s] + \text{Var}^2[\delta_G] + \text{Var}^2[\delta_p]} \quad (12)$$

4. まとめ

現行水管橋耐震設計法では、伸縮継手の設計において地盤変状が考慮されていなかった。そこで、実際の伸縮継手の破壊メカニズムに基づいて六識橋水管橋の地震時被害を分析したところ、盛土部の地盤変状が伸縮継手の拔出し被害要因の 1 つであることがわかった。そこで、盛土変位を考慮に入れて伸縮継手の寸法を決める耐震設計法を提案した。

既往の設計法では、伸縮継手の寸法を決める際に、余裕量という不確定な値を伸縮継手の移動量に含めることで耐震安全性を確保する手法を採用してきたが、この照査式で確保できる安全性の根拠が不明確であった。しかし、今回限界状態設計法を採用することで、継手破壊に対する目標破壊確率を満足する伸縮継手寸法を合理的に説明できる手法を提案することができた。

参考文献

- 1) 今井敏雄：2007 年新潟県中越沖地震六識橋水管橋地震時被害報告，JFE エンジニアリング報告書，2007.
- 2) 日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説，日本水道協会，2009.
- 3) Newmark, N. M. : Effects of Earthquakes on Dams and Embankments, Fifth Rankine Lecture, Geotechnique, Vol.15, No.2, pp.139-160, 1965.