

波動論に基づく RC 橋脚段落し部の地震時破壊メカニズムの推定

(株)アライズソリューション 正会員 吉田 隆千代

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震や2004年新潟県中越地震では、RC 橋脚段落し部の損傷が数多く見られた。それらは周方向に輪切り状に壊れていることが共通の特徴であり、強い衝撃で突上げられたことによるものと推察される。輪切り状の破壊はこれまでの地震では見られなかった新しい形態であるが、旧来の振動論に基づく曲げやせん断の作用で説明できるとされ、上下動の衝撃作用の影響は軽視されてきた。衝撃作用による破壊は塑性変形に伴うエネルギー吸収が期待できないことから、脆い破壊を誘発する可能性がある。そのため、上下動の衝撃作用の解明は耐震安全上きわめて重要であると考えられる。

そこで、本稿では波動論に基づき、上下動による RC 橋脚段落し部の破壊メカニズムの推定を行った。

2. 上下動による破壊事例と破壊形態の特徴

上下動の衝撃作用による破壊事例を示す。写真1 写真2は2004年新潟県中越地震の際に上越新幹線魚野川橋梁で見られた段落し部の被災状況である。



写真1 魚野川橋梁の被災状況



写真2 段落し部の拡大

段落し部の破壊形態には次の特徴がある。

- (1) かぶりコンクリートが剥落し軸方向鉄筋が外側に座屈している。
- (2) 同じ破壊パターン（かぶりコンクリートの剥落、軸方向鉄筋の外側への座屈）が同心円状に分布している。
- (3) 段落しされた鉄筋位置で、コンクリートに水平の切断面が生じている。

軸に対称な破壊の特徴が明瞭に現れており、上下動による衝撃作用の影響が強く示唆される。

3. 弾性応力波の伝播理論

弾性応力波の波動伝播について考える。一様な断面積を有する棒状弾性体を伝播する縦波の一次元波動方程式は次のように表される。

$$\frac{\partial^2 \sigma}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 \sigma}{\partial x^2} \quad , \quad c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (1)$$

ここに、 σ は軸応力、 E は縦弾性係数、 ρ は密度、 c は応力波の伝播速度である。(1)の一般解は次式で与えられる。

$$\sigma(x,t) = f\left(t - \frac{x}{c}\right) + g\left(t + \frac{x}{c}\right) \quad (2)$$

ここに、 f は x の正方向に進む波を表し、 g は x の負方向に進む波を表す。

キーワード : 段落し 上下動 衝撃作用 波動論 反射波 非線形波動

連絡先 : 〒730-0833 広島市中区江波本町4番22号 (株)アライズソリューション Tel(082)293-1231 FAX(082)292-0752

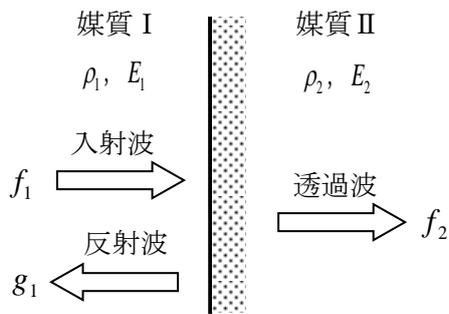


図1 媒質境界面における反射と透過

伝播特性の異なる媒質に波が入射すると、境界面で入射波の一部が反射し、残りが透過する(図1)。ここで、入射波、反射波、透過波を次のように表す。

$$\left. \begin{aligned} f_1 &= A_1 e^{i\omega\left(t - \frac{x}{c_1}\right)} \\ g_1 &= B_1 e^{i\omega\left(t + \frac{x}{c_1}\right)} \\ f_2 &= A_2 e^{i\omega\left(t - \frac{x}{c_2}\right)} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ここに、 ω は角周波数、 c_1 c_2 は媒質I 媒質IIの応力波の伝播速度である。境界面における応力と粒子速度の連続条件から、反射率 α と透過率 β が次式で与えられる。

$$\alpha = \frac{B_1}{A_1} = -\frac{1-s}{1+s} \quad (4)$$

$$\beta = \frac{A_2}{A_1} = \frac{2s}{1+s} \quad (5)$$

ここに、 s はインピーダンス比であり、次のように表される。

$$s = \frac{\rho_2 c_2}{\rho_1 c_1} \quad (6)$$

(4)(5)から、次のことがわかる。すなわち、インピーダンス比 s が1.0より小さい場合には、反射波は入射波に対して逆位相で反射する。1.0の場合は反射せずすべて透過する。1.0より大きい場合は同位相で反射する。透過では位相のずれは生じない。

4. RC橋脚段落し部の破壊メカニズムの推定

応力波の伝播理論を段落し部に適用して、破壊メカニズムを推定する。ここで、次の仮定をおく。

①引張応力場では鉄筋のみ有効である(コンクリートは無効)、②圧縮応力場では全断面有効である。

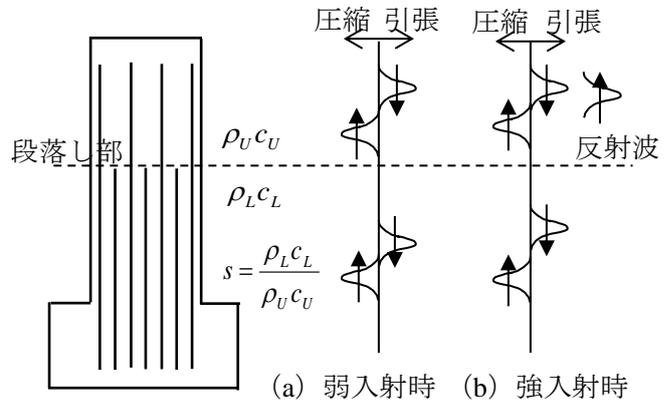


図2 段落し部の模式図

図2に段落し部の模式図を示す。いま、パルス状の圧縮応力波が上向きに入射したとする。橋脚頂部は自由端($s=0$)だから頂部で位相が逆転し引張応力波となって下降する。下降波が自重による圧縮応力よりも小さいときは橋脚内に引張応力が生じない。そのため段落し部の上下のインピーダンスは等しくなり($s=1$)、下降波はそのまま透過する(図中a)。下降波の大きさが自重による圧縮応力よりも大きいときは橋脚内は引張応力が生じる。コンクリートは引張に抵抗しないので引張応力はすべて鉄筋が負担することになる。鉄筋断面積は段落し部の上下で変化するため上下のインピーダンスが相違し($s \neq 1$)、段落し部が境界面となって上向きに反射波が発生する(図中b)。インピーダンス比($s > 1$)の関係から位相のずれはない。下降する引張応力波と反射して上昇する引張応力波が重畳されて段落し部付近に局所的に大きな引張応力が発生する。この引張応力が鉄筋の降伏耐力を超えていれば鉄筋は塑性変形し、コンクリートに水平破断面ができる。鉄筋は伸びた長さ分だけ外側に座屈変形する。写真2の破壊はこのように説明できる。

以上が波動論から推定したRC橋脚段落し部の破壊メカニズムである。なお、この現象は非線形であることから、非線形波動の発生も考えられる¹⁾。線形波動では二つの波が衝突するとき衝突時の波高はそれぞれの波高の和になるが、非線形波動では波高の和よりも大きくなることが知られている。

5. まとめ

RC橋脚段落し部の地震時破壊のメカニズムを推定した。非線形波動発生の可能性を示した。

参考文献

1) 戸田盛和：ソリトンとは一付・非線形の破壊現象一、特集ソリトン、数理科学、pp.5-11、1985.2