

1. まえがき

1995年の阪神・淡路大震災では、大きな上下動を含む震源近傍における多くの地震観測記録が得られたが、構造物や地盤に対して上下動が及ぼす影響については未だ明確な結論が得られていない。しかしながら、RC単柱橋脚に対しその被害形態からみて上下動の影響が疑われるものが指摘されている^{1), 2), 3)}。本報では、RC単柱橋脚に及ぼす上下動の影響、特に文献に示されているようなRC柱の輪切り状ひび割れの被害形態の原因を明らかにするため、上部構造と橋脚を一質点および棒材の弾性体としてモデル化し、上下動が入力した時に柱に発生する直応力を振動数領域において解析的に算定した。また、震災当時に使用された代表的な橋脚の断面寸法に対して試算を実施し、ひび割れを生ぜしめる上下動の振幅や振動数に対する考察を行うものである。

2. 基本方程式と境界条件

図1を参照し、柱の微小要素 dx についての運動方程式は、式(1)となる。

$$A dx \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = (\sigma + d\sigma)A - \sigma A \quad (1)$$

ここに、 u ：柱の鉛直変位、 A ：柱の断面積、 ρ ：柱の密度、 σ ：直応力である。
直応力 σ と直ひずみの関係より

$$\sigma = E \frac{\partial u}{\partial x} \quad (E: \text{柱のヤング係数}) \quad (2)$$

式(1)および(2)より、柱の上下振動に対する基本方程式が式(3)で得られる。

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \text{柱の弾性波速度}) \quad (3)$$

境界条件については、柱下端での変位が入力変位 $U_0(t)$ に一致し、柱上端での軸力が質量 m の慣性力と釣り合うことから、式(4)が得られる。

$$x=0 \text{ で } u=u_0, \quad x=l \text{ で } E \frac{\partial u}{\partial x} \cdot A = -m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (4)$$

3. 変位と応力の算定

式(3)の振動数領域での解は、 $u = U \exp(i\alpha x)$ (ω ：円振動数)と置いて、式(5)のように書ける。

$$U = [c_1 \exp(-ikx) + c_2 \exp(ikx)] \exp(i\alpha x) \quad (5)$$

ここに、 c_1, c_2 ：境界条件より定まる任意定数、 $k = \omega/c$ (波数)である。

境界条件式(4)を用い、式(5)を考慮すれば、式(6)および(7)が得られる。

$$c_1 + c_2 = U_0 \quad (\because u_0 = U_0 \exp(i\alpha x)) \quad (6)$$

$$-(m\omega^2 + ikEA) \exp(-ikl) \cdot C_1 + (-m\omega^2 + ikEA) \exp(ikl) \cdot C_2 = 0 \quad (7)$$

式(6)および(7)を連立することにより、任意定数 c_1 および c_2 が求められる。

次に、振動数領域での応力 σ は、式(2)より、

$$\sigma = ikE [-c_1 \exp(-ikx) + c_2 \exp(ikx)] \quad (8)$$

式(8)に、式(6)および(7)から求まる c_1 および c_2 を代入して、応力 σ が式(9)で表わされる。

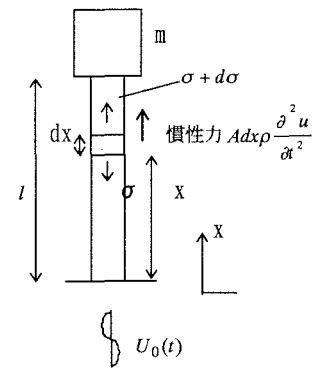


図1 解析モデル

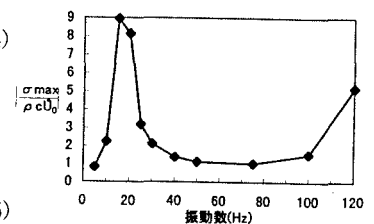


図2 最大無次元応力

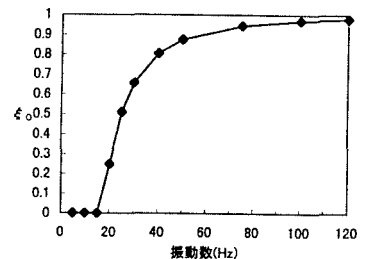


図3 最大応力の発生位置

キーワード：上下動，RC単柱，引張応力，衝撃，高振動数

連絡先：〒305 茨城県つくば市刈間字西向515-1 TEL0298-58-8813 FAX0298-58-8829

$$\frac{\sigma}{\rho c \dot{U}_0} = i \frac{\sin\{\kappa(1-\xi) + \alpha\}}{\sin(\kappa + \beta)} \quad (9)$$

$\kappa = kl = \omega l / c$ (無次元振動数), $\xi = x / l$ (無次元座標),

$$\alpha = \tan^{-1}(1/p), \quad \beta = \tan^{-1}(-p), \quad p = \frac{m_p}{m} \cdot \frac{1}{\kappa}$$

ここに, m_p : 柱の質量, $\dot{U}_0$: 振動数領域での入力速度 ($\dot{U}_0 = i \omega U_0$) である.

式(9)より, 柱の無次元応力 $\sigma / (\rho c \dot{U}_0)$ は, 無次元振動数 κ , 柱と上部構造の質量比 m_p/m および無次元座標 ξ に依存することがわかる. さらに, 式(9)より $\kappa + \beta = 0$ で共振点となり, 無次元固有振動数 κ_n および固有振動数 f_n は, 式(10)で表わされる.

$$\kappa_n \tan \kappa_n = \frac{m_p}{m}, \quad f_n = \frac{\kappa_n c}{2\pi l} \quad (10)$$

4. 試算結果

RC単柱橋脚の試算例として, 上部構造重量 $W=1200\text{tf}$, 断面 $2.8\text{m} \times 2.8\text{m}$ の矩形, 弾性波速度 $c=3000\text{m/s}$, 橋脚長さ $l=12\text{m}$ および柱と上部構造の質量比 $m_p/m=1/5$ とする. 本条件で式(10)より, 一次および二次の固有振動数は $f_1=17.2\text{Hz}$, $f_2=127.5\text{Hz}$ となる.

図2および3に, 振動数の違いによる最大無次元応力と最大応力の発生位置を示す. 図3から一次共振点より小さい振動数では柱下端で最大応力が発生するが, 一次共振点から二次共振点に向かうにつれて最大値の発生位置が柱上端に移動することがわかる. 図4に, 無次元応力の高さ方向分布を示す. 図4から一次共振点付近では, 柱の高さ方向に一樣な引張・圧縮になるのに対し, 二次共振点付近では高さにより引張・圧縮の両方が生じていることがわかる. 図3および4の結果は, RC柱にみられた輪状ひび割れが柱中間部に発生している事実と考え合わせると, 20Hz以上の高振動数を有する上下動が起因した可能性が考えられる. 図5に, 振動数ごとのひび割れ発生が予想される入力速度を示す. ここで, 図5の算定には上部構造重量による常時圧縮応力を考慮し, さらにコンクリートの引張強度を 30kgf/cm^2 と仮定した. 本検討では減衰を考慮していないため共振点付近での応答は過大評価していると考えられるが, 図5から, 振動数 20Hz から 120Hz の間で 50kine 程度の入力速度であればひび割れが生じる可能性があることがわかる.

5. あとがき

本検討では, RC単柱橋脚に及ぼす上下動の影響を調べるため, 上部構造と橋脚を一質点・棒材でモデル化し, 柱に発生する直応力を算定した. その結果, 20Hz以上の高振動数成分で 50kine 程度の入力速度に対して, 柱中間部でのひび割れ発生の可能性が示された. なお, 上下動が橋脚に及ぼす影響は, 上部構造の桁が上下に振動することにより橋脚の軸力を増大させることも考えられるが, これについては別途検討の予定である.

<参考文献> 1) 宮本文穂, 小野紘一, 北村八朗, 井上正一: RC橋脚の損傷に及ぼす衝撃的上下動の影響に関する一考察, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.2, 1996 2) 高田直俊: 衝撃的上下動による構造物被災, 大阪市立大学工学部紀要・震災特別号, 1997年1月 3) 別府万寿博, 香月智, 石川信隆, 宮本文穂: RC橋脚の地震時輪切り状ひび割れ発生に関する実験的考察, 第2回阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集, 1997年1月

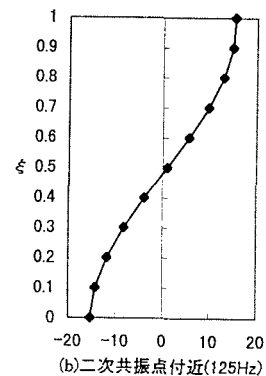
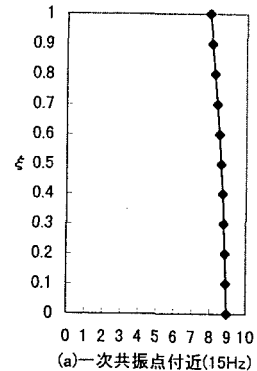


図4 高さ方向の分布
(無次元応力)

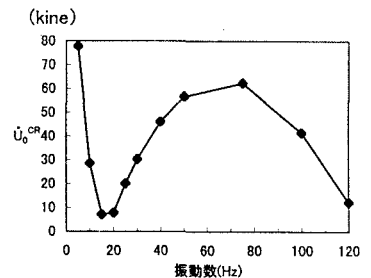


図5 ひび割れ発生時の入力速度