

実大 CFT 橋脚における耐震性能と寸法効果に関する解析的検討

株式会社横河ブリッジ 正会員 ○曾我麻衣子 名古屋工業大学大学院 学生員 松岡 陵平
 名古屋工業大学大学院 フェロー会員 後藤 芳顕 名古屋工業大学大学院 正会員 海老澤健正

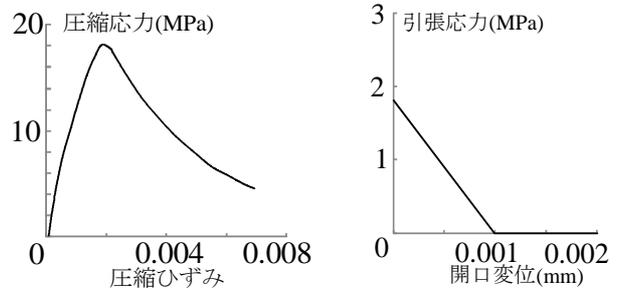
1. はじめに： 著者らは縮小模型($s=1/8$)を用いた繰り返し載荷実験，振動台による加振実験，精緻な FE 解析により，CFT が優れた耐震性能を発揮する主たる原因が繰り返し荷重下での鋼管の局部座屈変形の抑制・修復メカニズム(自己修復機能)に有ることを明らかにした．さらに，CFT 橋脚に特有のくびれのある履歴曲線を FE 解析で精度よく再現することにも成功した^{1,2)}．しかし，充填コンクリートには軟化挙動が生じるので CFT 橋脚の挙動特性において厳密には相似則が成立しない．したがって，縮小模型による上記検討結果の実大橋脚への適用性は必ずしも自明ではない．本研究では実大円形 CFT 橋脚の解析モデルを構築しその耐震性能を評価するとともに寸法効果の影響について解析的に検討を行う．

表 1 実大橋脚解析モデルの諸元

| 橋脚 | h (m) | h_c (m) | t (mm) | D (m) | R_t | $\bar{\lambda}$ | P/P_y | H_0 (MN) | δ_0 (mm) |
|------|------------|--------------|-------------|------------|-------|-----------------|---------|---------------|--------------------|
| No.1 | 9 | 5 | 28.1 | 2.36 | 0.108 | 0.276 | 0.163 | 3.48 | 30.2 |
| No.2 | 14 | 7 | 31.4 | 2.64 | 0.108 | 0.385 | 0.131 | 3.24 | 68.0 |

なお，寸法効果の検討では，材料の軟化挙動による影響に着目し，コンクリートの材料自体は同一と考え骨材粒径の相違等による影響は考慮しない．

2. 解析モデル： 本研究で対象とする円形断面 CFT 橋脚の設計は，鋼種を SM490 とし改定が行われた平成 24 年道路橋示方書³⁾に基づいて最小重量設計すなわち断面の最小化により最適設計を行った．その結果，設計条件として上載質量($M=1080\text{ton}$)に対して高さを 2 通り($h=9,14\text{m}$)に考慮した橋脚 No.1, No2 に対して構造諸元が表 1 のように決定された．モデル化においては既往研究^{1,2)}と同様に，鋼管部は三曲面モデルを用いたシェル要素，充填コンクリートは損傷塑性モデルを用いたソリッド要素を適用し，水平 1 方向漸増繰り返し載荷において履歴曲線が収束するまでコンクリートが引張強度に達する位置に順次仮想ひび割れを挿入する．コンクリートの材料構成則を図 1 に，鋼とコンクリートのそれぞれの材料パラメータを表 2, 表 3 に示す．仮想ひび割れを導入した解析モデルの例として橋脚 No.1 の結果を図 2 に示す．また，充填コンクリートと鋼界面の初期間隙として乾燥収縮率を 200μ とし求めた値を鋼管とコンクリート界面およびダイヤフラム下面に与える．上記界面での接触・離間の挙動を考慮するため，ABAQUS に準備されているコンタクトペアを用いる．接触時の界面の摩擦挙動にはクーロン摩擦モデルを適用し，摩擦係数を鋼とコンクリート界面では 0.2，コンクリートのひび割れ界面では 1.0 とする．



(a) 一軸圧縮応力-ひずみ (b) 一軸引張応力-開口変位
 図 1 充填コンクリートの材料構成則

3. CFT 橋脚の耐震性能評価： 上記，円形断面 CFT 橋脚および同寸法の無充填橋脚を対象に，載荷履歴の相違による耐震性能への影響を評価する．載荷パターンとしては Pushover 解析および水平 1 方向漸増繰り返し載荷と螺旋載荷(2 方向繰り返し載荷)の 3 種類である．まず，図 3 においては Pushover 解析お

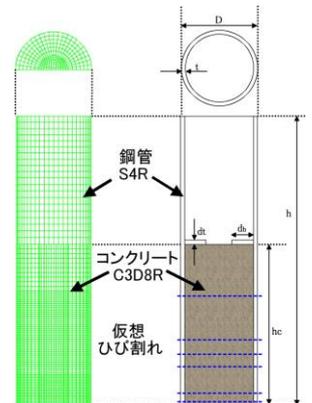


図 2 解析モデル

表 2 材料パラメータ
 (a) 鋼管(三曲面モデル)

| 鋼種 | E (GPa) | ν | σ_y (MPa) | σ_u (MPa) | f_b/σ_y | β | ρ | κ | ξ |
|-------|--------------|-------|---------------------|---------------------|----------------|---------|--------|----------|-------|
| SM490 | 206 | 0.3 | 315.5 | 584.1 | 0.65 | 150 | 2.0 | 2.0 | 0.3 |
| SS400 | 206 | 0.3 | 235.3 | 494.8 | 0.58 | 150 | 2.0 | 2.0 | 0.3 |

(b) 充填コンクリート(損傷塑性モデル)

| E (GPa) | ν | f'_c (MPa) | σ_{t0} (MPa) | K_c | σ_{b0}/σ_{c0} | e | ψ |
|--------------|-------|-----------------|------------------------|-------|---------------------------|-----|------------|
| 19.5 | 0.2 | 18.0 | 1.80 | 0.70 | 1.10 | 0.2 | 10° |

よび水平1方向漸増繰り返し載荷での水平復元力-水平変位関係、**図4**には3種類の載荷履歴について水平復元力合力-吸収エネルギー関係を橋脚No.1を例に示す。**図3**よりCFT橋脚では載荷履歴によらず無充填橋脚と比べてピーク点以後の荷重の低下が少ない。そのため、ピーク点近傍における荷重の変動が小さくピーク点変位の特定には誤差を含みやすい。耐力については、**図4**より1方向繰り返し載荷に比べて螺旋載荷においては低下するものの、その低下率は10%と比較的小さく、無充填橋脚での低下率9%と較べても大差はない。したがって、無充填橋脚において提案したPushover解析での最大荷重点を任意の載荷履歴でも耐力として設定する手法⁴⁾はCFT橋脚にも適用できる。

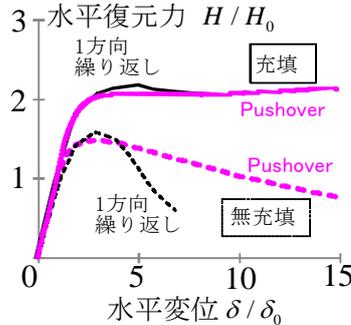


図3 水平復元力-水平変位

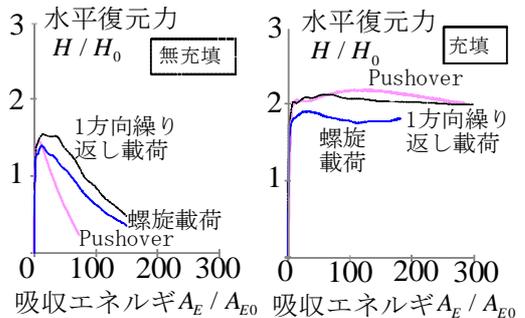


図4 水平復元力合力-吸収エネルギー

4. 充填コンクリートが相似則に与える影響：

充填コンクリートの軟化挙動が相似則に与える影響を解析的に検討する。寸法効果の検討では、充填コンクリートの平均要素体積が同一の実大モデルと縮小モデルモデル¹⁾を比較するべきであるが、既往実験モデルの縮尺率が1/8であることを考慮すると実大橋脚の要素数は $8^3 = 512$ 倍となる。このため、実大橋脚に適した要素サイズを用いた場合(表3のD1)、縮小モデルモデルでの分割が粗くなりすぎ解析精度を確保できない。一方、縮小モデルモデルに適した要素サイズでは実大モデル(A3)での要素数が膨大となり現実的でない。そこで、表3のように縮尺率の比が1/2となる2つのモデルに対して充填コンクリートの平均要素体積が同一となる解析(A1とB1、B2とC2、C3とD3)を順次実施して比較することで、最終的に実大モデルと1/8モデルモデルの比較を行う。

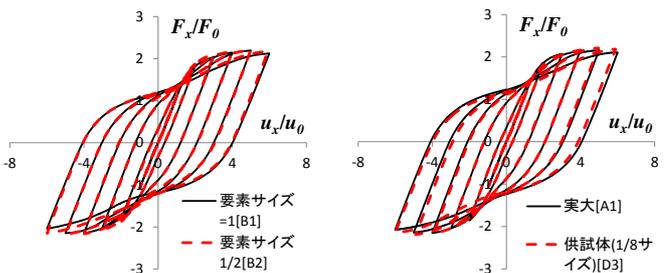
表3 寸法効果の検討モデル

| 橋脚寸法 | 縮尺率 | 要素サイズ* | | |
|----------|-----|--------|-----|------|
| | | 1 | 1/2 | 1/4 |
| 実大橋脚 | 1 | A1 | | (A3) |
| (1/2モデル) | 1/2 | B1 | B2 | |
| (1/4モデル) | 1/4 | | C2 | C3 |
| 縮小モデル | 1/8 | (D1) | | D3 |

*: 実大A1モデルに対する要素サイズ(平均要素体積の立方根)の相対値

表4 解析モデルの諸元(寸法効果の検討)

| h (m) | h_c (m) | t (mm) | D (m) | R_t | $\bar{\lambda}$ | P/P_y | H_0 (MN) | δ_0 (mm) |
|------------|--------------|-------------|------------|-------|-----------------|---------|---------------|--------------------|
| 14.43 | 8.08 | 31.4 | 3.00 | 0.091 | 0.3 | 0.15 | 2.98 | 46.2 |



(a) 要素サイズの影響 (b) 実大橋脚と供試体との比較
図5 水平復元力-水平変位関係(寸法効果の検討)

検討対象の実大橋脚として橋脚直径を3m、細長比パラメータ $\bar{\lambda} = 0.3$ とし、径厚比パラメータと軸力比は既往の模型供試体の値を用いて諸元を表4のように設定した。材料の構成則は表2と同様である。**図5(a)**に同一縮尺率1/2のCFT橋脚モデルについて充填コンクリートに異なった要素サイズ(1:1/2)を用いた場合の水平復元力-水平変位関係を示す。これより、充填コンクリートの要素サイズによる影響はほとんどなく、段階的に縮尺率を変化させて寸法効果の影響を順次検討することの妥当性が確認できる。最終的な実大モデルと1/8縮尺モデルの比較を**図5(b)**に示すが、履歴曲線はほとんど変化しておらず、CFT橋脚でもほぼ相似則が成立すると考えられる。

5. まとめ：

実大サイズの円形断面CFT橋脚の耐震性能を数値解析により検討した。その結果、ピーク荷重後の荷重低下が小さいためピーク点変位の特定には誤差が生じやすい。一方、載荷履歴の相違による最大復元力の変化率は無充填橋脚の場合と同程度に小さいものであり、無充填橋脚において提案したPushover解析での最大荷重点を任意の載荷履歴での耐力として設定する方法はCFT橋脚でも適用できる。また、充填コンクリートの軟化挙動が相似則に与える影響は小さく、縮尺モデルの挙動で実大CFT橋脚の挙動を推定することは可能である。

謝辞： 本研究の一部はJSPS 科研費 24656279(代表：後藤芳顯)の助成を受けたものです。

参考文献： 1)後藤芳顯ら,土木学会論文集 A1,Vol.69,No.1,pp.101-120,2013. 2)後藤芳顯ら,土木学会論文集 A,Vol.65,No.2,pp.487-504, 2009. 3)日本道路協会,道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編,2012. 4)後藤芳顯ら,構造工学論文集,Vol.55A,pp629-642,2009.