

## 鋼製ラーメン橋脚の耐震性能と崩壊過程に関する検討

京都大学大学院 学生員 武居 正樹  
 京都大学大学院 正会員 杉浦 邦征  
 阪神高速道路公団 正会員 足立 幸郎

京都大学大学院 フェロー 渡邊 英一  
 京都大学大学院 正会員 永田 和寿  
 (株)ニュージェック 正会員 陵城 成樹

## 1. はじめに

鋼製ラーメン橋脚に関しては、地震力を受けた時の応答性状、エネルギー吸収性能の評価、崩壊に至るまでの挙動など、未解明な部分が多い。このような状況において京都大学と阪神高速道路公団では平成10年より、鋼製ラーメン橋脚の面内挙動を明らかにすることを目的とした共同研究を実施してきた。本研究では、実験供試体を製作し、橋軸直角方向に対して単調載荷実験および繰り返し正負交番載荷実験を行った。また実験との対比のため、局部座屈を精度よく表現できるように、シェル要素を用いた汎用有限要素解析コード ABAQUS による弾塑性有限変位解析も別途行い、鋼製ラーメン橋脚の崩壊過程を明らかにした。

## 2. 載荷実験概要

一層の門型鋼製ラーメン橋脚として阪神高速道路公団・湾岸線・岸 P34 橋脚を取り上げ、実験施設の空間的制約から、Fig.1 に示すように対象橋脚を約 1/17 に縮尺した実験供試体を製作した。主として幅厚比パラメータ、補剛材剛比が一致するように供試体の製作を行った。供試体製作には、SS400 材の 1.6mm(一般部)および 2.3mm(隅角部)鋼板を用いた。これら使用鋼材の材料試験結果を Table1 に示す。実験供試体への載荷方法を Fig.2 に示す。軸力の載荷に関しては、左右柱部材の真上から鉛直に 2 台のアクチュエータでそれぞれ載荷を行った。柱基部の軸力比  $\alpha_y$  ( $\alpha_y$ : 対象橋脚における上部構造死荷重反力により生じる軸圧縮応力、 $\alpha_y$ : 鋼材の降伏応力) を対象橋脚の軸力比レベル(降伏軸圧縮力の 4.15%) とほぼ同等とし、試験中一定に保った。制御方法は荷重制御とした。また水平力の載荷に関しては、左右柱頭上部をヒンジで Fig.2 に示すような形でリンクさせた構造を採用した。なお、制御は変位制御とした。また、載荷パターンについては、単調載荷および繰り返し正負交番載荷とした。単調載荷に関しては、降伏変位の 20 倍まで行い、繰り返し正負交番載荷に関しては、各振幅 1 サイクルずつとして  $\pm 12$  倍まで行った。降伏変位に関しては、実験に先立って行われた解析結果をもとに決定した。決定方法に関しては後述する。後に示す水平荷重-水平変位曲線における水平荷重(縦軸)、水平変位(横軸)に関しては、水平荷重をアクチュエータの荷重値、水平変位を Fig.2 の LVDT-1、LVDT-2 の両外部変位計の平均値とした。

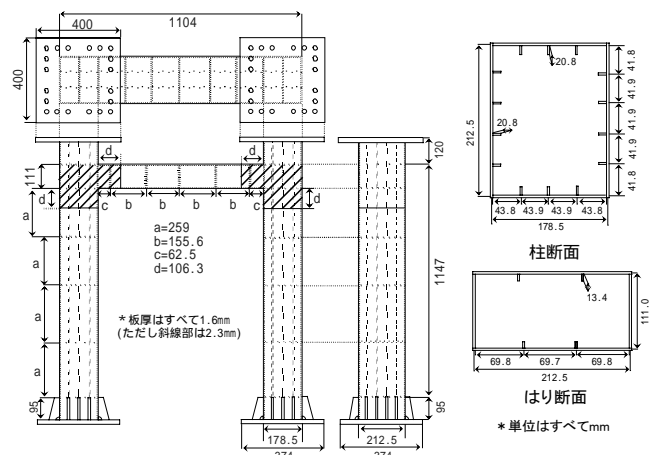


Fig.1 実験供試体

Table1 材料引張試験結果

| 板厚 (mm) | ヤング係数 (GPa) | ポアソン比 | 降伏応力 (MPa) | 引張強度 (MPa) | 破断伸び (%) |
|---------|-------------|-------|------------|------------|----------|
| 1.6     | 191.2       | 0.34  | 153.2      | 280.7      | 61.6     |
| 2.3     | 210.7       | 0.28  | 277.5      | 307.4      | 65.8     |

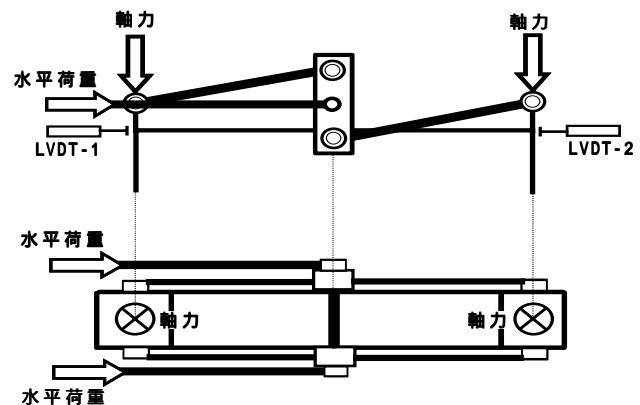


Fig.2 載荷方法

キーワード 鋼製ラーメン橋脚、崩壊過程、載荷実験、弾塑性有限変位解析

連絡先 606-8501 京都市左京区吉田本町 TEL:075-753-5079 Fax:075-753-5130

### 3. 解析概要

鋼製ラーメン橋脚の部材断面を構成する薄肉要素の局部座屈を考慮した詳細解析を行うため、鋼箱型断面、縦方向補剛材、ダイヤフラムのすべての構造部材に対してシェル要素でモデル化を行った。また、Y軸(橋軸方向)に垂直なX-Z平面(X軸・橋軸直角方向、Z軸・高さ方向)に対して対称な変形モードを仮定することにより供試体の1/2のみを解析対象とした。なお、材料の各定数は材料試験結果の値を用いた。材料硬化則は混合硬化則を仮定した。残留応力については、断面全体が自己平衡となるように矩形分布とした。初期たわみに関しては正弦波(1/2波)で与え、補剛板全体としての初期たわみ波形と、補剛材間の波形との重ね合わせとした。荷重方法は実験と同様である。また、降伏条件としては、解析モデル全体のすべての要素のうち1要素でも von Mises の相当応力が材料の降伏応力に達した時点の荷重位置における水平変位と水平荷重を  $\delta_y$  および  $H_y$  とした。

### 4. 単調荷重実験結果(水平変位-荷重曲線)

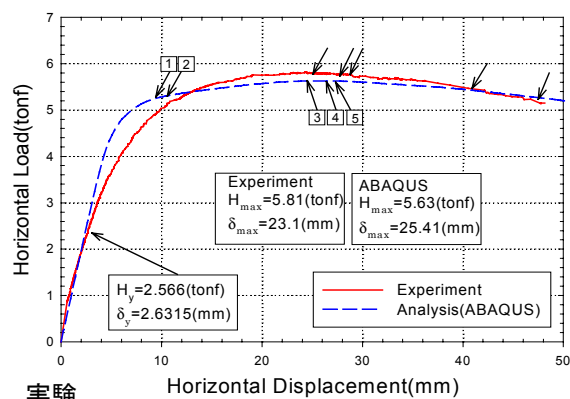
Fig.3 に水平荷重-水平変位曲線および崩壊過程を示す。橋脚の損傷箇所は、解析、実験ともに柱基部のみならず、はり部においても現れている。最大耐荷力点付近において局部座屈が顕著に現れ始めており、柱基部での局部座屈とともにはり部における局部座屈が橋脚全体の耐荷力を低下させていることがわかった。実験において、最大荷重点付近においてははり部ウェブ面においてせん断力に起因すると思われる局部座屈が発生した。最大荷重点を通過した後に左右柱基部右側フランジ、左右はり部隅角部近傍上下フランジ面に局部座屈が発生し、その後、終局点(耐荷力の95%劣化点)付近において左右柱基部ウェブ面に損傷が進展していった。つまり、不静定次数の高いラーメン形式橋脚は1箇所の局部座屈の発生による構造全体の崩壊は生じず、複数断面で断面崩壊が生じてから終局状態に至るといって極めて粘り強い構造であることがわかる。

### 5. 繰り返し荷重実験結果(水平変位-荷重曲線)

Fig.4 に示すように、降伏点以降も耐荷力は上昇し続け、最高耐荷力点では  $H_y$  のおよそ2.4倍を示しており、その後耐荷力は緩やかに減少していることがわかる。また最高耐荷力点における変形性能  $\delta_y$  は解析結果では約5、実験結果では約7であることから、不静定構造であるラーメン形式橋脚が優れた変形性能を有することがわかった。解析と実験との比較では、最大耐荷力はほぼ同じ値を示しており、最大耐荷力以降の領域における劣化の挙動は実験結果と解析結果とで近似していると言える。

### 6. まとめ

- 1) 崩壊の過程に関しては、最大耐荷力点付近において局部座屈が顕著に現れ始めており、柱基部での局部座屈とともにはり部における局部座屈が橋脚全体の耐荷力を低下させており、鋼製ラーメン橋脚は複数断面で断面崩壊が生じてから終局状態に至るといって極めて粘り強い構造であることが分かった。
- 2) 解析と実験を比べた場合、降伏点近傍までは良く一致していた。降伏点以降においては、実験結果の剛性が劣化し傾きが小さくなっており若干の差異が見られるが、その後最大耐荷力はほぼ同等の値を示し、耐荷力の劣化の過程も一致しており、解析が実験を定性的に良く近似できていた。



実験

- ① はり部ウェブ面座屈発生
- ② 左・右柱基部フランジ面座屈発生
- ③ はり部フランジ面左隅角部近傍上側座屈発生
- ④ はり部フランジ面右隅角部近傍下側座屈発生
- ⑤ 左・右柱基部ウェブ面座屈発生

解析

- ① はり部フランジ面右隅角部近傍下側座屈発生
- ② はり部フランジ面左隅角部近傍上側座屈発生
- ③ はり部ウェブ面座屈発生
- ④ 右柱基部フランジ面座屈発生
- ⑤ 左柱基部フランジ面座屈発生

Fig.3 単調荷重実験結果

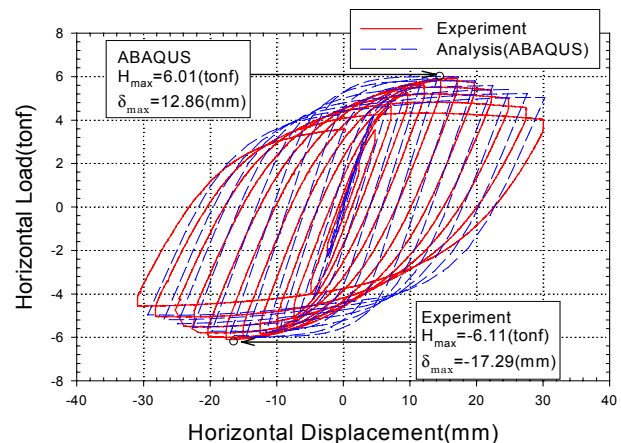


Fig.4 繰り返し荷重実験結果