

# コンクリート部分充填鋼製橋脚の非線形解析と実験

葛西 昭\*, 天野 麻衣\*, 宇佐美 勉\*\*, 葛 漢彬\*\*\*, 岡本 真悟\*\*\*\*, 前野 裕文\*\*\*\*\*

\*学生会員 名古屋大学大学院工学研究科博士課程(前期課程)(〒464-01 名古屋市千種区不老町)

\*\*フェロー会員, D.Sc., 工博 名古屋大学大学院 教授 工学研究科土木工学専攻(〒464-01 名古屋市千種区不老町)

\*\*\*正会員 工博 名古屋大学大学院 助手 工学研究科土木工学専攻(〒464-01 名古屋市千種区不老町)

\*\*\*\*名古屋高速道路公社 工務部設計課 主査(〒460 名古屋市中区丸の内二丁目1番36号)

\*\*\*\*\*正会員 工博 名古屋高速道路公社 工務部設計課 主査(〒460 名古屋市中区丸の内二丁目1番36号)

本研究では、コンクリート部分充填鋼製橋脚の弾塑性有限変位解析を行う際に、汎用非線形構造解析プログラム MARC を用いて、様々な構造物に対応する解析手法を確立した。この解析手法の妥当性を検証するために、名古屋高速道路公社で実施された実験を元に、その実験結果との比較、および同諸元を持たせたモデルに対して既存の解析手法による結果との比較を行った。また、コンクリートを部分的に充填した門型ラーメンの解析を行い、コンクリート充填率の影響などについて考察を行った。

**Key Words** : Concrete-filled steel bridge pier, Nonlinear analysis, Experiment

## 1. 緒言

鋼製橋脚において、柱基部にコンクリートを適切に充填されたものの耐震性能(強度と変形能)が飛躍的に向上することが、過去に実施された静的、準静的(繰り返し載荷)およびハイブリッド地震応答実験によって証明されている<sup>1)</sup>。これらの結果を踏まえて、文献1), 2)では、鋼製橋脚に対する終局設計指針案または提案が作成されている。また、文献4)によると、その設計指針案に対して若干の検討が加えられ、パラメトリックスタディー等、設計のための資料、特にコンクリートの最適充填率に関する資料が提供されている。

これらの既存の研究では、鋼製橋脚の中でも片持柱を対象としており、今後、門型ラーメンに代表されるような、様々な構造物を解析対象とする必要性が予想される。従って、前論文3)に用いられた解析用プログラムよりも、より汎用性の高いプログラムを用いてこれらの構造物に対応する必要がある。そこで、本研究では、[a]本解析手法のMARC<sup>5)</sup>における適用、[b]実験結果との比較、[c]門型ラーメン構造物の解析といったことを行う。

文献3)で用いられている有限要素法プログラムは、FEAP(Finite Element Analysis Program)であるが、本研究では、さらに汎用性の高い汎用非線形構造解析プログラムMARCを使用し、弾塑性有限変位解析を行う。これにより、門型ラーメンといった片持柱とは異なる構造形態への拡張が容易となる。

実験結果との比較では、名古屋高速道路公社において平成8年度に行われた実験結果を用いて比較を行う。そして、最後に門型ラーメン構造物の解析モデルを作

成し、コンクリートを部分的に充填した鋼製ラーメンの非線形解析を行う。

## 2. 解析手法

### 2.1 概要

本研究での具体的な解析手法は、文献2)等に詳しく記載されている。ここでは、解析手法をMARCに適用する段階で、文献2)につけ加える点を中心に述べる。従って、解析手法の詳細は文献2)を参照されたい。

この節では、前解析に用いられた解析プログラムFEAPとの比較、およびすでに行われた実験結果との比較を行うために、片持柱を解析対象とする。

片持柱の概略図を図-1に示す。ここに、 $h$  = 柱高さ、 $l_c$  = コンクリート充填高さ、 $P$  = 上部工重量に相当する一定軸圧縮力、 $H$  = 地震力に相当する斬増水平荷重であり、斜線部分は、コンクリートが充填されていることを示す。本研究で用いる水平荷重-水平変位関係( $H-\delta$ 関係)とは、図-1における水平荷重 $H$ と、その水平荷重作用点における水平変位 $\delta$ との関係のことである。解析によって得られた水平荷重-水平変位関係より、妥当な破壊基準に基づいて強度および変形能を算定することができる。

本解析では、 $P-\Delta$ 効果の影響を考慮し、局部座屈の影響を考慮しない弾塑性有限変位解析を行う。ただし、せん断変形の影響は考慮しない。そして、コンクリート充填部に関しては、コンクリートと鋼は完全付着とし、平面保持の仮定を用いる。

なお、解析対象となる橋脚断面は、コンクリート部

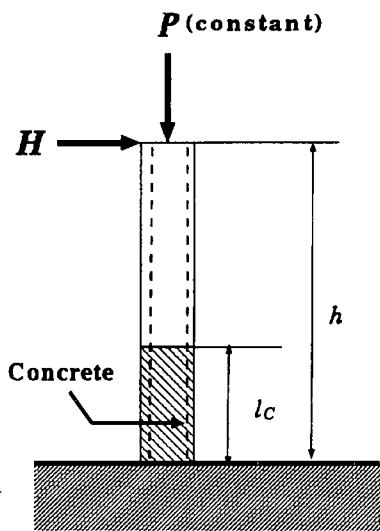


図-1 コンクリート部分充填鋼製橋脚の概略図

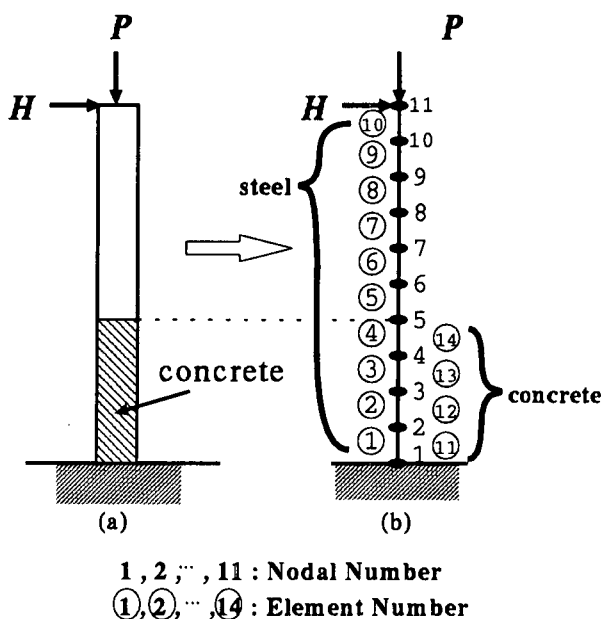


図-2 片持柱の要素定義

分充填補剛箱形鋼断面とコンクリート部分充填無補剛箱形鋼断面である。また、溶接等による残留応力も考慮する。

解析をする際に考慮すべき要素分割、および断面形状とその断面の分割等について次節より述べる。

## 2.2 要素分割

解析に用いる要素は、2節点の3次元薄肉開断面はり要素である。このはり要素は2個の数値積分点があり、これらの点は第1の節点寄りと、第2の節点寄りに位置している。解析対象が箱形断面であるのに対して、開断面を有する要素を用いる理由については後述

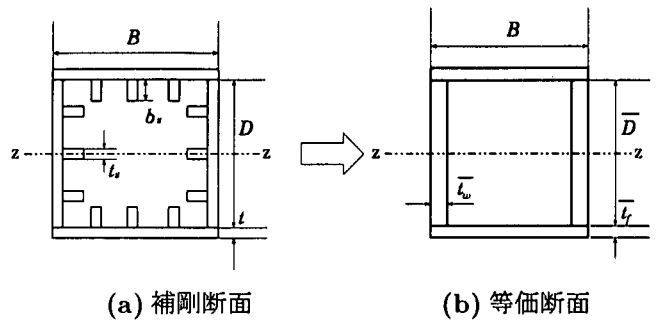


図-3 等価断面の概念図

する。以下で、要素の分割方法について述べる。

要素分割は、図-2(b)に示されるように、部材軸に沿って10分割する。例えば、図-2(a)に示されるようなコンクリート充填率が40%程度の片持柱では、節点1から節点5までの4要素をコンクリート充填断面部における鋼断面部分とし、節点5から節点11までの6要素を中空鋼断面部とする。断面分割の際にコンクリート充填部は、鋼断面部分とコンクリート断面部分に分けて定義する(後述)ため、さらに、コンクリート充填断面部における充填コンクリート部分を、⑩から⑭の4要素とする。ただし、コンクリート充填部では、要素①と⑩、②と⑪、などの対応する要素の節点を共有させる(図-2(b)参照)。上記の例では、コンクリート充填部を4要素としたが、1要素の長さに極端な差がないように、コンクリートの充填率に合わせて、コンクリート充填部の要素数を変化させる。ただし、有効破壊長領域<sup>2)</sup>として2要素を確保する必要があるため、コンクリート充填部の要素数は2以上とする。

## 2.3 断面形状

橋脚の断面形状は、無補剛箱形断面あるいは図-3(a)に示される補剛箱形断面である。ここに、図-3(a), (b)において、 $B$  = フランジ幅、 $D$  = ウェブ幅、 $t$  = 板厚、 $b_s$  = 補剛材幅、 $t_s$  = 補剛材板厚、 $t_f$  = フランジ板の板厚(等価断面時)、 $t_w$  = ウェブ板の板厚(等価断面時)、 $\bar{D}$  = ウェブ幅(等価断面時)である。補剛箱形断面の場合は、計算を簡略に行うために、等価断面に置き換えるが、その際の計算方法等は、文献2)を参照されたい。具体的な条件は、以下に示す3つの条件である。

1. 断面の外形は変わらない。
2. 断面積は変わらない。
3.  $z$  軸回りの全塑性モーメントは変わらない。

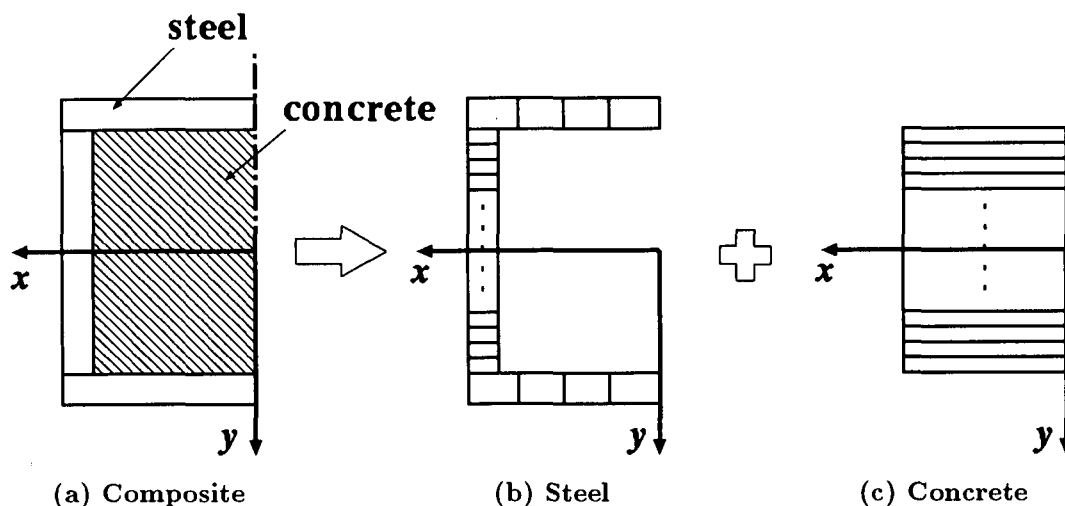


図-4 断面定義

この等価断面を考えることによって、以下の断面分割は、無補剛断面に関する分割方法を考えるのみでよいこととなる。

## 2.4 断面分割

図-4(a) はコンクリート充填断面の断面モデルを示しており、断面の対称性を利用し半断面としている。なお、このことが開断面はり要素を用いた理由である。

コンクリート充填断面は、鋼箱形断面部分とコンクリート部分に分けて考え、鋼とコンクリートを別々の要素（鋼断面部分は図-4(b)、コンクリート断面部分は図-4(c))としてそれぞれ定義する。そして、対応する要素の節点を共有させることによって、コンクリート充填断面を定義する。また、中空断面部は鋼断面部分のみであるので、図-4(b)のみで定義する。

鋼断面部分（図-4(b)）の分割に関しては、フランジ部分を  $x$  軸方向に 4 分割し、ウェブ部分を  $y$  軸方向に 12 分割する。コンクリート断面部分（図-4(c)）の分割に関しては、 $y$  軸方向に 20 分割する。

## 2.5 その他

鋼材、および充填コンクリートの構成則、有効破壊長領域、破壊基準等は、すべて文献2)に準ずる。特に、充填コンクリートの破壊基準に関しては、文献3)にて、検討されているので参照されたい。また、残留応力の分布は、矩形分布であり、引張側の応力の大きさは降伏応力、圧縮側の応力の大きさは降伏応力の 0.3 倍とする。なお、次節より用いられる損傷度は、コンクリート充填部の損傷度  $D_c$ 、中空断面部の損傷度  $D_s$  として、

次式のように定める。

$$D_c = \frac{\varepsilon_{a,c}}{\varepsilon_{u,c}} \quad (1)$$

$$D_s = \frac{\varepsilon_{a,s}}{\varepsilon_{u,s}} \quad (2)$$

ここに、 $\varepsilon_{a,c}$  = 充填コンクリートの最縁端に発生する有効破壊長領域での平均圧縮ひずみ、 $\varepsilon_{a,s}$  = 中空断面部における圧縮フランジに発生する有効破壊長領域での平均圧縮ひずみ、 $\varepsilon_{u,c}$  = 充填コンクリートの限界圧縮ひずみ、 $\varepsilon_{u,s}$  = 鋼材の限界圧縮ひずみである。

## 3. 実験

### 3.1 実験の概要

1996年に名古屋高速道路公社が土木研究所で実施した、コンクリート部分充填鋼製橋脚（供試体名 N-1, N-2）の繰り返し載荷実験結果を例にして、本解析によって得られる結果、および既往の解析プログラムである FEAP によって得られる結果と、実験結果との比較を行い、本解析手法の妥当性を検討する。

実験供試体の概略図を図-5に示し、諸元を表-1と表-2に示す。供試体の断面形は、2体とも補剛箱形断面である。また、コンクリート充填率は、N-1で39%、N-2で41%である。この2つの供試体間で大きく異なるのは、ダイヤフラム間の間隔  $l_d$  と、縦方向補剛材断面である。また、表-2には、鋼材に関しては公称値と引張試験結果の平均値、コンクリート材に関しては設計値と圧縮試験結果の平均値が示されている。

表－1 片持柱供試体のパラメータ

供試体名		N－1	N－2
フランジ幅	$B(\text{mm})$	900	900
ウェブ幅	$D(\text{mm})$	880	880
板厚	$t(\text{mm})$	10	10
補剛材幅	$b_s(\text{mm})$	75	100
補剛材板厚	$t_s(\text{mm})$	10	13
サブパネル数	$n$	4	4
断面積	$A(\text{mm}^2)$	44600	51200
供試体高さ	$h(\text{mm})$	3423	3423
ダイアフラム間隔	$l_d(\text{mm})$	450	700
コンクリート充填高さ	$l_c(\text{mm})$	1350	1400
コンクリート充填率	$l_c/h$	0.39	0.41
フランジ板厚 (等価断面)	$\bar{t}_f(\text{mm})$	11.29	12.04
ウェブ板厚 (等価断面)	$\bar{t}_w(\text{mm})$	13.83	16.86
幅厚比パラメータ	$R_f$	0.496	0.496
柱の細長比パラメータ	$\bar{\lambda}$	0.261	0.267
補剛材細長比パラメータ	$\bar{\lambda}_s$	0.290	0.305
軸圧縮力比	$P/P_y$	0.15	0.15

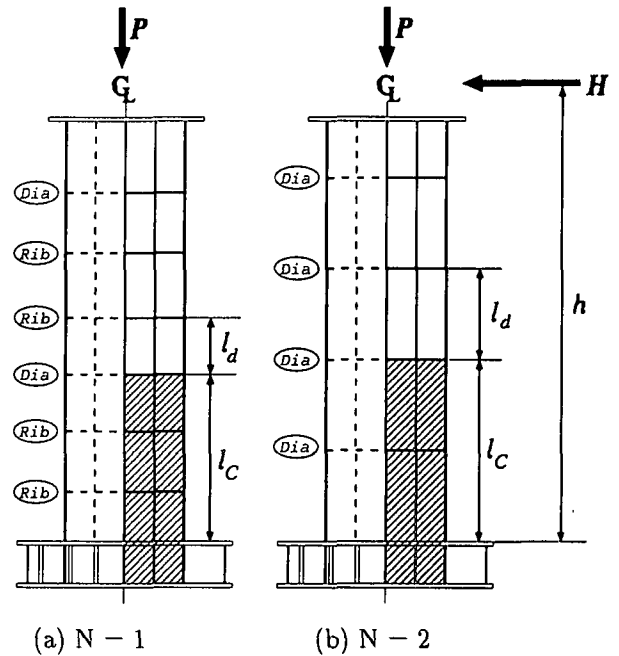
表－2 材料パラメータ

材料強度 ( $\text{kgf}/\text{mm}^2$ )	公称値 または 設計値	材料試験結果
鋼降伏応力 $\sigma_y$ (SM490)	32.0	37.8
コンクリート圧縮強度 $\sigma_{ck}$	1.60	2.31

### 3.2 解析結果と実験結果との比較

図－6には、供試体 N－1 および N－2 の、水平荷重－水平変位関係 ( $H/H_y - \delta/\delta_y$  関係) および損傷度－水平変位関係 ( $D_c - \delta/\delta_y$  (コンクリート充填部),  $D_s - \delta/\delta_y$  (中空断面部) 関係) が示されている。なお、実験結果は、繰り返し載荷実験結果の包絡線を示している。横軸に水平変位をとり、縦軸には水平荷重 (図－6(a), (b)) または損傷度 (図－6(c)~(f)) をとっている。ただし、これらの図は、軸力を考慮した鋼柱のみの降伏水平荷重  $H_y$ 、およびその降伏水平荷重に対応した降伏水平変位  $\delta_y$  を用いて無次元化されている。また、図中の実線は、MARC による残留応力を考慮しない解析結果であり、点線は FEAP による解析結果 (残留応力は考慮されていない)、1点鎖線は実験結果、破線は MARC による残留応力を考慮した解析結果である。

図－6(a), (b) によると、点線で示された前解析結果が、実験値と非常に精度で一致していることがわかる。これに対して、本研究で行った、前解析と同様の解析、つまり、残留応力を考慮しない解析による結果と前解析結果を比較すると、水平荷重に若干の差が見られるものの、良く一致した結果が得られた。従っ



図－5 実験供試体

て、本解析によってもよい精度で実験結果と一致することが確認できる。

さらに、残留応力を考慮した場合、図中の破線で示されるように、よりいっそう実験結果と一致する結果が得られた。

次に、損傷度に関して、前解析結果と比較を行う。図－6(c), (d) から、同一の変位における損傷度が、前解析と本解析では若干の差が生じていることが確認できる。しかし、現象をとらえるという点では、比較的一致していると言える。また、この若干の差は、解析による破壊点が前解析に比べて安全側に評価できることも考え合わせると、本解析手法が妥当なものであるといえる。図－6(e), (f) において、残留応力を考慮していないものを比較すると、非常に良く一致していることがわかる。残留応力を考慮した破線が、他のものに比べて同一の変位において損傷度が高くなることから、本解析で残留応力を考慮していることが確認できる。

なお、供試体 N－1, N－2 ともにコンクリート充填部における損傷度が、中空断面部における損傷度よりも、早く 1.0 に達しているのも、中空断面部よりも先にコンクリート充填部が破壊に至り、供試体が終局状態に達したことがわかる。解析による終局変位は、N－1 は、約  $7.3\delta_y$  程度、N－2 は、約  $6.7\delta_y$  程度であったが、実験において、最大水平荷重の 95% まで水平荷重が低下したときを構造物の破壊とみなせば、本解析結果による破壊と実験結果とは、ほぼ一致しているといえる。また、N－1 供試体の方が若干変形能が大きい結果となっているが、これは  $\bar{\lambda}_s$  が N－1 の方が小さい

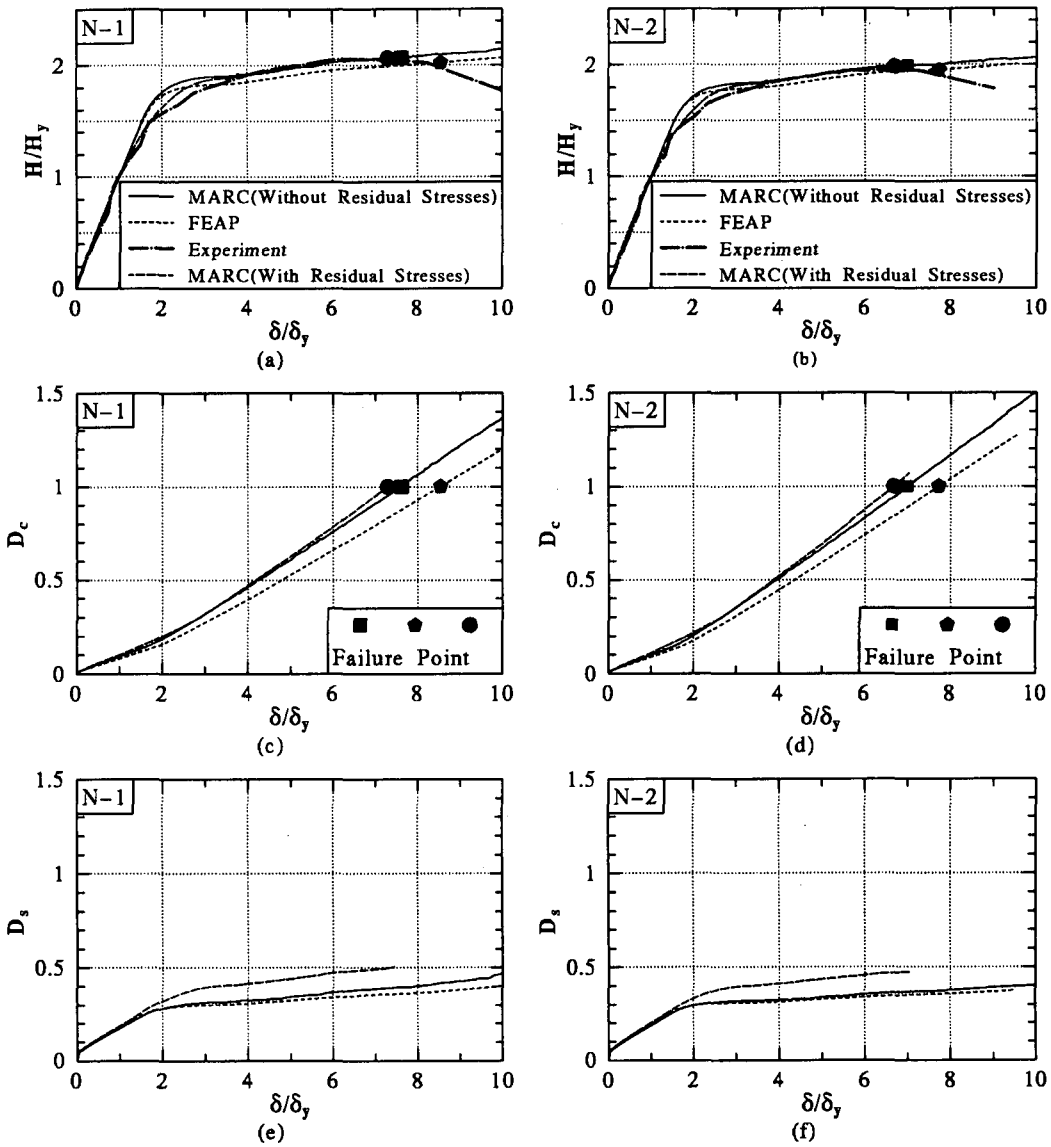


図-6 実験と解析の水平荷重-水平変位曲線および損傷度-水平変位曲線

からである。

### 3.3 片持柱のコンクリートの最適充填高さ

図-7は、N-1、N-2 供試体のコンクリートの充填高さを様々に変化させて解析した結果である。文献3)によると、最適充填高さのときは、終局変位が最大になる。本解析結果によると、供試体N-1の最適充填高さが35%で、供試体N-2の最適充填高さも35%となった。この最適充填高さのとき、N-1とN-2のいずれも最も大きな変形能を有している。この結果から、実験供試体のコンクリート充填率は、若干大きいと判断できる。

N-1、N-2ともに、コンクリート充填率が10%から30%にかけて、損傷度 $D_s$ が先に1.0に達し、中空断面部で破壊しており、コンクリート充填率が35%から40%にかけては、損傷度 $D_c$ が先に1.0に達し、コン

クリート充填部で破壊していることがわかる。これにより、コンクリート充填率が最適充填率となる前後で、破壊のモードが変わることがわかり、文献3)と同様の結果が得られた。

## 4. 門型ラーメン構造物の解析

### 4.1 概要

前節までで、単柱式の橋脚について本解析手法の妥当性を評価することができた。従って、この章では、本解析手法をラーメン構造物に適用する方法、および解析結果に関して述べる。

門形ラーメンおよび荷重状態の概略図を図-8に示す。断面ははり、柱で同一とする。また、隅角部のせん断変形は無視する。 $e$ は一定鉛直荷重 $P$ の作用位置を表すものである。また、図-8(b)は、損傷度を求

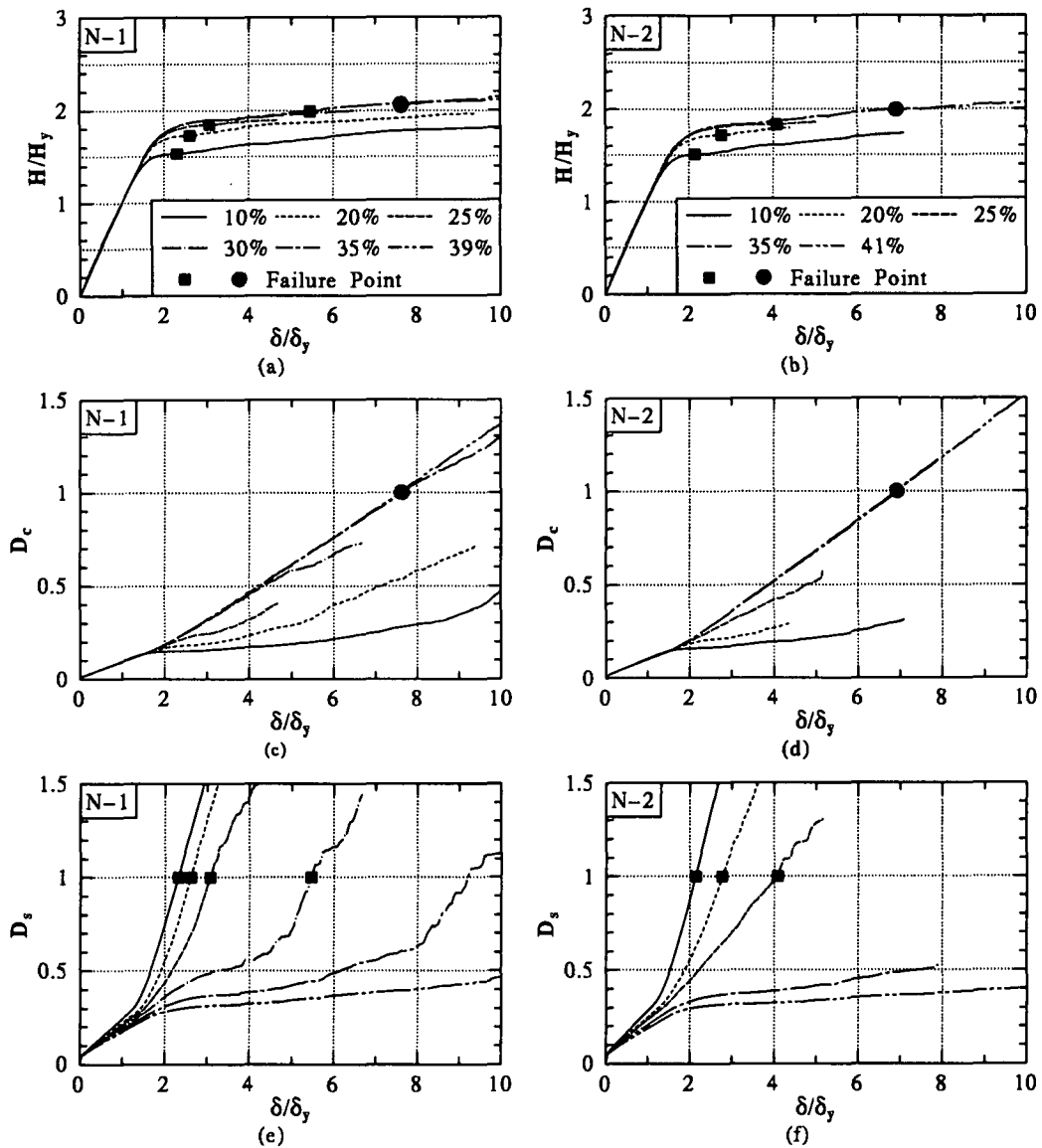


図-7 変形能に対する  $l_c/h$  の影響

める際の照査位置が示されている。頭文字がCのものは、コンクリート充填部におけるコンクリートの損傷度の照査位置、頭文字がSのものは、中空断面部における鋼材の損傷度の照査位置を示している。どの照査位置も有効破壊長の長さを有する。橋脚部の照査位置は、片持柱のときと同様であるが、門型ラーメンの場合、橋脚の柱頂部における曲げモーメントが大きくなることが予想されるため、新たに橋脚柱頂部での照査を付与した。解析に際しての要素分割、断面分割等の方法に関しては、片持柱の場合とすべて同様である。なお、片持柱の場合と同様に、いずれかの破壊照査位置で損傷度が1.0に達した状態で構造物の破壊とみなす。

#### 4.2 解析例

図-8において、右側橋脚の柱頂部で初期降伏をするように設計されたモデルの解析例について述べる。表-

表-3 解析モデルのパラメータ

フランジ幅	$B(\text{mm})$	1275
ウェブ幅	$D(\text{mm})$	1275
板厚	$t(\text{mm})$	20
補剛材幅	$b_s(\text{mm})$	136.8
補剛材板厚	$t_s(\text{mm})$	20
サブパネル数	$n$	4
柱高さ	$h(\text{mm})$	12372
はり長さ	$l(\text{mm})$	14489
鉛直荷重載荷位置	$e(\text{mm})$	2000
軸圧縮力比	$P/P_y$	0.2
幅厚比パラメータ	$R_f$	0.35
柱の細長比パラメータ	$\bar{\lambda}$	0.4
補剛材細長比パラメータ	$\bar{\lambda}_s$	0.2

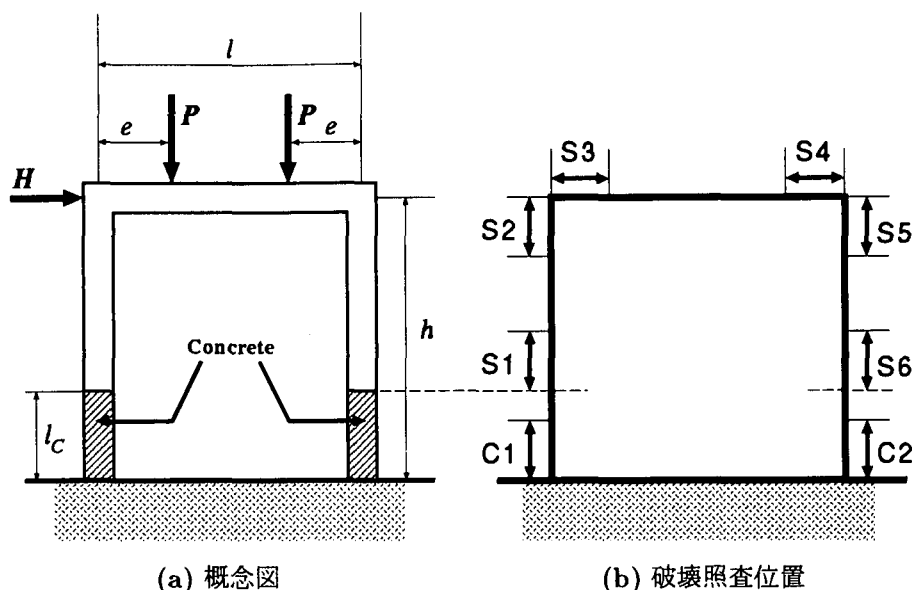


図-8 門型ラーメンモデルの概念図および破壊照査位置

3には、設計する際に用いた諸パラメータが示されている。このモデルは、はりの部分と柱の部分の断面積は同一であり、左右のコンクリート充填率に関しても同一としている。ただし、柱の細長比パラメータは、有効座屈長  $K$  は 1.18 である。また、材料パラメータに関しては、表-2 に示される定数を用いた。このような門型ラーメンモデルに対して、コンクリート充填率を変化させた解析を行った。

図-9には、解析によって得られた損傷度-水平変位関係が示されている。ただし、すべての関係は示されていない。コンクリート充填率の変化にともなって、損傷度の変化が著しい部分についてのみ示されている。

図-9(a), (b) は、両橋脚のコンクリート充填部の損傷度を示している。また、(c), (d) は、右側橋脚部の橋脚頂部および中空断面のコンクリート充填部近傍部の損傷度を示している。図-9(b), (c) より、右側橋脚部に柱頂部、あるいは柱基部において構造物が破壊する結果が得られた。この部分における曲げモーメントが、他の照査位置に比べて大きくなることが予想されることから、妥当な結果であるといえる。図-9(c) から、損傷度の進展がコンクリート充填率にはほぼ無関係であることがわかり、橋脚頂部における損傷度は、コンクリート充填率の変化による影響が小さい。

右側橋脚の曲げモーメントは、プラス側からマイナス側へ変化する。そして、柱頂部および柱基部に大きな曲げモーメントが発生する。従って、柱頂部と柱基部を同時に破壊させるようなコンクリートの充填率（最適充填率）は片持柱に比べると小さい値となるが、これらの図から、コンクリートの最適充填率は 10% 程度

であり、妥当な結果が得られた。

## 5. 結言

本研究では、より汎用性を高めるために、汎用解析プログラム MARC によるコンクリート部分充填鋼製橋脚の弾塑性有限変位解析手法を確立した。さらに、解析結果を 2 体の大型単柱式橋脚モデルの実験結果と比較を行った。本研究によって得られた結果をまとめると、次のようになる。

1. 実験供試体は、ほぼ同程度の変形能を有するが、 $\bar{\lambda}$  の小さい実験供試体である N-1 の方が若干大きな変形能を有する。
2. 片持柱において、MARC による解析結果は、既存の解析結果および実験結果とほぼ一致した。
3. 片持柱実験供試体のコンクリート充填率は、やや高めであった。どちらの供試体も約 35% にすることで、さらに大きな変形能が得られる。
4. 門型ラーメンにおいて、橋脚頂部の損傷度は解析で対象としたモデルに関してはコンクリート充填率に無関係である。
5. 門型ラーメンの場合は片持柱と異なり、曲げモーメントが、柱頂部から柱基部までプラスからマイナスに変化するので、コンクリートの最適充填高さが片持柱に比べて低くなる。

片持柱に関しては、実験結果との比較が行われ、解析手法の妥当性を検証することができた。今後の課題としては、門型ラーメンモデルに関して、実験結果との比較により、本解析手法の妥当性の検証を行う必要

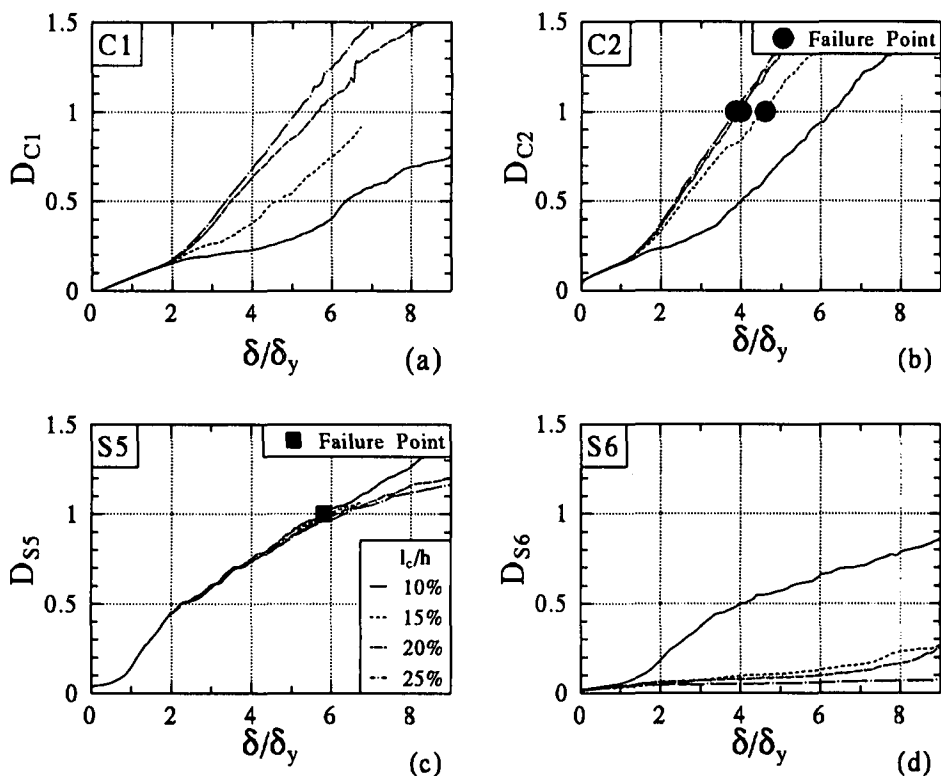


図-9 門型ラーメンモデルにおける  $l_c/h$  の影響

がある。その後、隅角部のせん断変形を考慮できるモデルを考案するなど、より精度の高い解析プログラムを開発していく予定である。

## 参考文献

- [1] 土木学会鋼構造委員会, 鋼構造新技術小委員会, 耐震設計研究 WG (主査: 宇佐美勉): 鋼橋の耐震設計指針案と耐震設計のための新技術, 平成 8 年 7 月.
- [2] 宇佐美勉, 鈴木森晶, Iraj H. P. Mamaghani, 葛漢彬: コンクリートを部分的に充填した鋼製橋脚の地震時保有水平耐力照査法の提案, 土木学会論文集, No.525, pp.69-82, 1995 年 10 月.
- [3] 名古屋高速道路公社, 名古屋大学工学部土木工学科: コンクリートを中詰めした鋼製橋脚の耐震設計法の開発に関する研究 (その 4), 平成 8 年 3 月.
- [4] 葛西昭, 葛漢彬, 宇佐美勉: コンクリート部分充填鋼製橋脚の耐震性能, 「橋梁と基礎」へ掲載予定.
- [5] 日本マーク株式会社: MARC プログラム ユーザーズ・マニュアル, Vol.A~Vol.E, 1990.

(1997. 3. 31 受付)

## NONLINEAR ANALYSES AND TESTS OF PARTIALLY CONCRETE-FILLED STEEL BRIDGE PIERS

Akira KASAI, Mai AMANO, Tsutomu USAMI, H. B. GE, Singo OKAMOTO and Hirofumi MAENO

In this study, a nonlinear structural analysis program MARC is used to calculate the load-deformation characteristics of partially concrete-filled steel bridge piers. In order to verify the present analytical method, computed results are compared with experimental results. And then an numerical analysis of a rigid portal frame partially filled with concrete is carried out. Moreover, the influence of the filled-in concrete length on the frame's nonlinear behavior is investigated.