

コンクリート部分充填鋼製橋脚の統一的耐震照査法

葛 漢彬¹・宇佐美 勉²・浅田秀史³

¹正会員 博士(工学) 名古屋大学助教授 工学研究科土木工学専攻(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

²フェロー Dr.Sci. 工博 名古屋大学教授 工学研究科土木工学専攻(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)
修士(工学) 積水ハウス株式会社 岐阜支店(〒500-8842 岐阜市金町4-30)

1. 緒言

コンクリートを部分的に充填した鋼製橋脚に対し、地震時保有水平耐力の照査を行う際、想定される破壊点における終局強度とそれに対応する変位を求めておく必要がある。これらを求めるのに必要な荷重-変位関係をPushover解析を用いて求め、保有水平耐力の照査を行う方法が提案されている^{1)~3)}。この照査法においては、終局点を限界ひずみにより定義した破壊基準を基に求める必要がある。提案されている破壊基準では、コンクリート充填部において鋼断面の限界ひずみの大きさに関わらず、充填されているコンクリートが限界ひずみに達した時点で破壊とみなし、鋼断面に関しては損傷度が定義されていない。しかし、コンクリート充填部の鋼断面の限界ひずみが、充填コンクリートに比べ非常に大きい厚肉断面の場合、充填コンクリートが限界ひずみに達しても鋼断面は限界ひずみに達していないため、コンクリート断面のみで破壊とみなすことは、実際よりも終局変位を低く評価することになる。

そこで、本研究は、これまでの評価方法にさらに詳細な検討を加え、薄肉、厚肉断面を問わず保有水平耐力照査を行うための統一的な破壊基準の構築を目的として行われたものである。具体的にはコンクリートの充填部において、コンクリートについてだけでなく、鋼断面に関しても損傷度を定義し、評価を行う。すなわち、コンクリートが先に限界ひずみに達し、その後、鋼断面が限界ひずみに達する場合、コンクリートの損傷度で評価するのではなく、鋼断面の損傷度で破壊の照査を行う点を新たに付け加えることによって、破壊基準を構築する。

また、本研究では、新たな破壊基準の提案に先立ち、充填コンクリートの応力-ひずみ関係についても見直しを行う。コンクリートの応力-ひずみ関係は、これまで、コンクリートが限界ひずみに達した後も強度軟化しない

と仮定されていたが、上記検討のためには、限界ひずみ以後の挙動を再検討する必要がある。そこで、限界ひずみ以後、コンクリートの強度が低下するモデルを構築することで、限界ひずみ以降の挙動がより現実に近づく解析モデルの構築を試みる。

なお、新たな破壊基準を用いた本照査法の妥当性は、過去に行われている実験結果との比較により検討する。

2. 解析手法

本研究では構造解析用汎用プログラム ABAQUS⁴⁾を用いて弾塑性有限変位解析を行った。解析を行うにあたり ABAQUS に用意されている、せん断変形の影響を考慮した Timoshenko のはり理論に基づく平面はり要素 B21 を用いた。なお、 $P-\Delta$ 効果の影響は考慮するが、局部座屈の影響については無視した。

解析は、図-1 に示す片持柱形態のコンクリート部分充填鋼製橋脚について、一定荷重 P のもとで水平荷重 H を与える Pushover 解析を行った。そして、与えた水平荷重 H と水平荷重作用点における水平変位 δ の関係 ($H-\delta$ 関係) より、後述の破壊基準を用いて終局変位を求めた。

解析モデルは長さ方向に 10 分割している。また、断面に関しては、鋼断面は箱形断面、充填コンクリートは矩形断面を用い、それぞれ積分点は 21 個としている。

本研究で解析対象とする実験供試体の断面は補剛箱形断面であるが、計算の簡略化のため、文献 1) と同様に等価な無補剛箱形断面に置き換えた。

鋼材の応力-ひずみ関係に関しては、新技術小委員会報告書²⁾で提案されているようなひずみ硬化の影響を考慮に入れたモデルを適用した。充填コンクリートの応力-ひずみ関係については、従来は図-2(a)に示されるものを用いてきた。このモデルでは、鋼板によって充填コンクリートが横方向への膨張を拘束されているため、圧縮

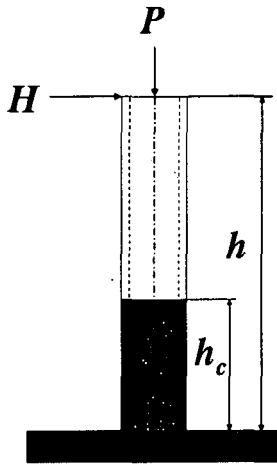


図-1 コンクリート部分充填鋼製橋脚

強度 σ_{α} に達した後も、強度の低下はないものとしている。また、引張側におけるコンクリートの強度は無視する。このように、現在用いられているコンクリートの応力-ひずみ関係は、限界圧縮ひずみ $\epsilon_{uc}=0.011$ に達した後もコンクリートは強度を失うことなくそのまま持続する。しかし、本研究ではコンクリートが限界ひずみに達しても、鋼断面が限界ひずみに達しなければ構造物全体の破壊とはならないと考える。ただし、限界ひずみを越えたコンクリートは破壊とみなし、強度を受け持たないものと仮定する。そこで、図-2(b)に示すような、ひずみが限界圧縮ひずみに達した後、軟化し強度を失う応力-ひずみ関係を適用した。なお、軟化曲線は傾きを初期接線勾配 E_c の1/5とする。本研究で、本来必要とされるコンクリートの応力-ひずみ関係は、限界ひずみに到達後、圧縮応力を完全に受け持たないようにしたほうがよいと思われるが、解析上、ある程度の傾きを持たせて、連続的に軟化させる必要があるため、このように設定した。なお、軟化域の傾きは、試行錯誤的に定めた。

3. 破壊基準

(1) 従来の破壊基準²⁾

破壊基準とは、破壊の判定を行い、破壊点を定めるための基準であり、Pushover 解析で得られた水平荷重-水平変位関係において終局水平荷重 H_u 、およびその点における変位 δ_u が求められる。

終局の判定は有効破壊長の概念を導入し、有効破壊長領域における平均圧縮ひずみを用い、損傷度を定義することによって行う。ここで、有効破壊長とは、破壊の判定を行う照査領域の長さであり、コンクリート充填部においてフランジ幅の0.7倍、中空鋼断面部においてフランジ幅の0.7倍もしくはダイアフラム間隔のいずれか小さいほうを適用する。有効破壊長領域の位置、つまり破壊の照査位置については、構造物の曲げモーメントが大き

く、それに伴い圧縮ひずみが大きくなると考えられる領域および断面形状が変化する領域とする。単柱式橋脚の場合、破壊照査位置はコンクリート充填部の最下部および中空断面部のコンクリート充填部上端から上方の部分となる。また、変断面の場合には上記に加え、断面変化部も照査する必要がある³⁾。

損傷度とは、有効破壊長領域の平均圧縮ひずみを限界ひずみで除したものであり、従来の照査法で用いられてきた破壊基準の損傷度は、コンクリート充填部では平均圧縮ひずみ ϵ_{ac} としてコンクリートの最縁端に発生する圧縮ひずみの有効破壊長領域での平均値を用い、中空鋼断面部では平均圧縮ひずみ ϵ_{as} として圧縮フランジの最外縁に生じる圧縮ひずみの有効破壊長領域での平均値を用いる。中空鋼断面部の損傷度 D_s とコンクリート充填部の損傷度 D_c はそれぞれ次式で表す。

$$D_s = \frac{\epsilon_{a,s}}{\epsilon_{u,s}} \quad (1)$$

$$D_c = \frac{\epsilon_{a,c}}{\epsilon_{u,c}} \quad (2)$$

ここで、 $\epsilon_{u,c}$ 、 $\epsilon_{u,s}$ はそれぞれコンクリート充填部、および中空鋼断面部の限界ひずみである。前述したように、コンクリート充填部のコンクリートの限界ひずみが1.1%である。一方、鋼断面の限界ひずみ⁴⁾に関しては次のように求められている。橋脚のダイアフラム間のフランジ補剛板を取り上げ、それを純圧縮(載荷辺は剛棒を介して載荷されていると考え、板の幅方向に一樣な変位を長さ方向に与える)を受ける時の載荷辺での平均応力 σ_a (圧縮力/補剛板断面積)と平均ひずみ ϵ_a (載荷辺の縮み/補剛板の長さ)関係を弾塑性有限変位解析より求め、平均応力がピーク値 σ_{max} を過ぎ、 $0.95\sigma_{max}$ まで降下した点での平均ひずみを鋼断面の限界ひずみ $\epsilon_{u,s}$ とする。解析結果より、以下の経験式が提案されている。

$$\frac{\epsilon_{u,s}}{\epsilon_y} = \frac{0.145}{(\bar{\lambda}_s - 0.2)^{1.11}} + 1.19 \leq 20.0 \quad (3)$$

ただし、 $\bar{\lambda}_s$ 0.20のときは $\epsilon_{u,s}/\epsilon_y = 20.0$ とする。なお、 $\bar{\lambda}_s$ は補剛材細長比パラメータであり、その定義については文献1)に参考されたい。

先に述べたように、コンクリート充填部、中空鋼断面部それぞれの部分では、有効破壊長領域の平均圧縮ひずみが限界ひずみに達することでその断面の破壊を意味する。すなわち、損傷度が1.0に達した時点でその断面が破壊となる。構造物全体にとっての破壊(すなわち、終局判定)は、両損傷度(D_c および D_s)のうちどちらかが1.0に達するときとする。

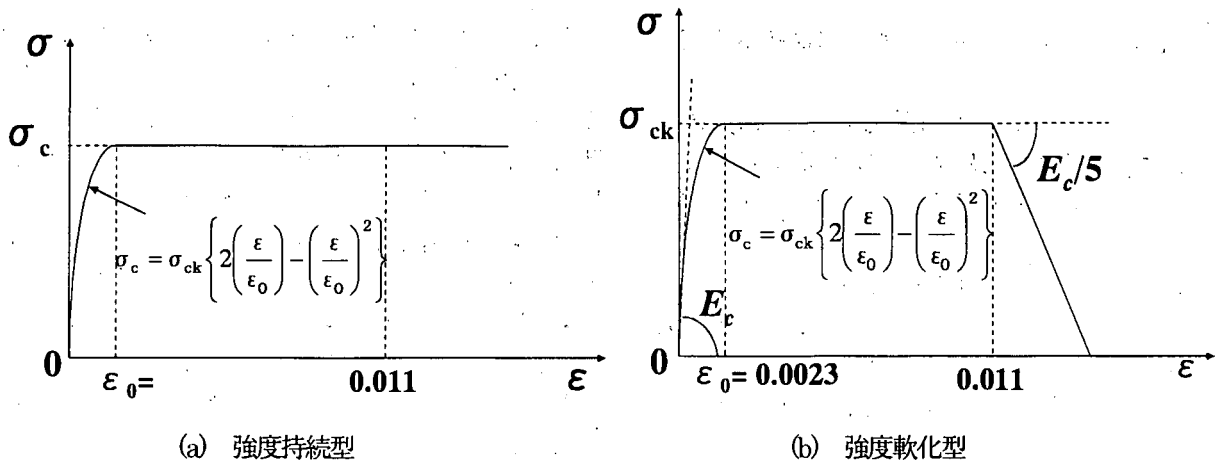


図-2 コンクリートの応力-ひずみ関係

以後、コンクリートの応力-ひずみ関係として、図-2(a)に示す強度持続型の応力-ひずみ関係を使用して解析を行い、式(1)と(2)の損傷度で評価した結果を従来法と称する。

(2) 新しい破壊基準

従来の破壊基準では、コンクリート充填部においてコンクリートが破壊に達した時、コンクリート充填部の鋼断面がコンクリート破壊後も耐力を保ち続けることが可能なケースにおいても充填コンクリートの破壊と同時にコンクリート充填部が破壊に達し、セグメントの変形能力を過小に評価しかねない。そこで新しい破壊基準では、このようなケースも想定するため、コンクリート充填部では充填コンクリートと鋼の両断面に関して損傷度を定義することとする。以下では、従来法に即して、具体的に破壊基準について述べていく。

コンクリート充填部の、鋼断面の損傷度 D_{bc} と充填コンクリートの損傷度 D_{cs} はそれぞれ次式で表す。

$$D_{bs} = \frac{\epsilon_{a,bs}}{\epsilon_{u,s}} \quad (4)$$

$$D_{bc} = \frac{\epsilon_{a,bc}}{\epsilon_{u,c}} \quad (5)$$

ここで、 $\epsilon_{a,bs}$ はコンクリートの最縁端に発生する圧縮ひずみの有効破壊長領域での平均値、 $\epsilon_{a,bc}$ はコンクリート充填部の有効破壊長領域での鋼断面の圧縮フランジに発生する圧縮ひずみの平均値である。また、 $\epsilon_{u,c}$ 、 $\epsilon_{u,s}$ はそれぞれコンクリート充填部のコンクリート断面と鋼断面の限界ひずみである。

中空鋼断面部の損傷度 D_s に関しては式(1)に示す、従来の破壊基準により定義された損傷度と同じものを用いる。

充填コンクリートの限界ひずみは従来法の場合と同様で、1.1%とする。したがって、コンクリート充填部のコンクリートに対する照査は従来法と同様の方法で行なわれる。すなわち、ここでの D_{bc} は従来法での D_c と同一のものである。

一方、中空断面部およびコンクリート充填部の鋼断面の限界ひずみはいずれも部材セグメントの解析⁹⁾から得られた破壊ひずみを用いる。部材セグメントの破壊ひずみは以下のように求められている。一定圧縮力 P の元で漸増曲げモーメント M を受ける補剛箱形断面の弾塑性有限変位解析から得られた M - P - ϕ (平均曲率) の関係より、ピークから 95% だけ強度低下した点に対応する平均曲率を求め、さらに軸圧縮力による軸ひずみと曲げモーメントによる中立軸の移動によって生じた軸ひずみを考慮して求められた圧縮側最外縁のひずみを破壊ひずみとする。なお、次式に示される推定式が得られている。

$$\frac{\epsilon_{u,s}}{\epsilon_y} = \frac{0.8(1 - P/P_y)^{0.94}}{(R_f \cdot \bar{\lambda}_s^{0.18} - 0.168)^{1.25}} + 2.78(1 - P/P_y)^{0.68} \leq 20.0 \quad (6)$$

上式はフランジ幅厚比パラメータ R_f 、補剛材細長比パラメータ $\bar{\lambda}_s$ および軸力比 P/P_y (P_y = 全断面降伏荷重) の関数で表されている。 R_f は次式で定義される。

$$R_f = \frac{b}{nt} \sqrt{\frac{12(1 - \nu^2)}{4\pi^2}} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \quad (7)$$

ここで、 b = フランジ板幅、 t = 板厚、 n = サブパネル数、 σ_y = 降伏応力、 E = 弾性係数、 ν = ポアソン比である。なお、この式の適用範囲は $R_f = 0.3 \sim 0.7$ 、 $P/P_y = 0.0 \sim 0.5$ である。

コンクリート充填部において、充填コンクリートの損傷度 D_{bc} と鋼断面の損傷度 D_{cs} のどちらを適用するか、その判定基準を以下に示す。

コンクリート充填部において、鋼とコンクリートの平均圧縮ひずみがそれぞれの破壊ひずみとの比較により、適用すべき損傷度が決定される。すなわち、コンクリートより先に鋼断面が破壊ひずみに達している場合、言い換えれば鋼断面が破壊してもコンクリートが耐力を受け持つとき、コンクリートの損傷度 D_{bc} を適用し、逆にコンクリートが先に破壊ひずみに達する場合は、コンクリートが破壊しても鋼断面が耐力を受け持つとき、鋼断面の損傷度 D_{cs} を適用する。

なお、コンクリートの応力-ひずみ関係として、図-2(b)

に示される強度劣化型の応力-ひずみ関係を使用して解析を行う。

以後、コンクリート充填部の損傷度として式(4)、(5)に示す損傷度で破壊照査した結果を、新提案法と称する。

従来法から新提案法への変更点をまとめると、以下のようである。

1. コンクリート充填部における照査は、コンクリートだけでなく、鋼断面も行われる。ただし、終局判定は限界ひずみの大きいほうで行う。
2. 中空鋼断面と充填部の鋼断面の限界ひずみに部材セグメントの提案式を適用する。
3. コンクリートの応力-ひずみ関係は限界ひずみに達した後強度軟化型のものとする。

4. 実験結果による検証

解析対象としては、文献 3), 7)および 8)で報告されているコンクリート部分充填鋼製橋脚の繰り返し載荷実験供試体を用いる。ここでは、計 8 体の実験供試体について、従来法と新提案法による解析結果を繰り返し載荷実験結果の包絡線との比較を行う。その例として、SC40-35-20H と N-3 という 2 つの実験供試体に対する解析の結果を図-3 と図-4 に示す。図では実線、破線および鎖線がそれぞれ新提案法、従来法および実験の結果を表している。また、(a)~(d)の各プロットはそれぞれ、水平荷重-水平変位関係、中空鋼断面部の損傷度-水平変位関係、コンクリート充填部のコンクリートの損傷度-水平変位関係および鋼断面の損傷度-水平変位関係である。ただし、従来法ではコンクリート充填部の鋼断面に対する照査を行わないので、プロット(d)には新提案法の結果がしかないことに注意されたい。なお、水平荷重と水平変位の無次元量 H_y と δ_y は、それぞれコンクリートを無視した鋼柱に対する降伏水平荷重と降伏水平変位である。さらに、プロット(a)に示される実験結果の終局点については、終局状態を最大荷重の 95%まで低下した点と考え、最大荷重の 95%の値 H_{95} とそれに対応する変位 δ_{95} の点が示されている。

まず、SC40-35-20H 供試体の場合、図-3(a)に見られるように、実験では最大荷重 H_{max} と H_{95} の点に対応する変位はそれぞれ $8\delta_y$ 、 $10.5\delta_y$ 程度で、大きな変形能力を有することを呈している。これは、この供試体のコンクリート充填高さが $0.2h$ としかないが、幅厚比パラメータ R_f が 0.368 と小さく比較的厚肉の断面を有するもので、部材セグメントの変形能が大きいためと考えられる。また、図-5 に示される実験終了後の写真を見ると、中空断面部に手で触ると分かる程度の小さな座屈が生じているが、柱基部のコンクリート充填部で大きな損傷が確認できる。この

ように、柱基部に局部座屈が集中したため座屈の進展が早く、急激な耐力低下が見られる(図-3(a))。これに対して、従来法による結果(図-3(b)と(c))をみると、中空鋼断面部はコンクリート充填部のコンクリートより早く破壊に達し、そのときの変位は約 $4.5\delta_y$ 程度となっている。この結果は実験値に比べて安全側にあるものの、破壊個所の予測が実験と異なっている。一方、新提案法による結果ではコンクリート充填部のコンクリートと鋼断面の損傷度 D_{bc} と D_{cs} が中空鋼断面部の損傷度 D_s より早く 1.0 に達したため、充填部で破壊する結果となり、実験現象と一致している。終局状態の判定に関しては、充填部の鋼断面の限界ひずみが 0.0186 であり、コンクリートの限界ひずみ (0.011) より大きいため鋼断面の損傷度が適用された。その結果、コンクリート充填部の鋼断面で破壊に達したとき、橋脚は終局状態を迎え、その変位は $4.5\delta_y$ 程度から $8\delta_y$ 程度となり、図-3(a)に示される $H-\delta$ 関係をみると、実験値に、かなり近い値が得られた。このように、本提案法では部材セグメントを用いているため、鋼断面の限界ひずみが大きくなり、破壊位置が中空断面部からコンクリート充填部が変わることで、終局変位は従来法に比べ大きな値となった。

次に、図-4 に示す N-3 についてであるが、この供試体の幅厚比パラメータ R_f が 0.488 で、比較的薄肉の断面を有している。実験では、図-6 に示されるように、中空鋼断面には座屈変形が見られず、コンクリート充填部で破壊している。また、図-4(a)より分るように、 H_{95} の荷重点での変位は約 $10\delta_y$ である。従来法による評価は、図-4(b)と(c)に示されるように、鋼断面の損傷度に比べ、コンクリート充填部のコンクリートの損傷度が約 $6.5\delta_y$ で 1.0 になり、この点が終局点と判定された。この結果は、実験値の最大荷重点を非常に良く予測しているが、 H_{95} の荷重点に対しては若干安全側の評価をしている。一方、新提案法の結果をみると、充填コンクリート断面で破壊に至るという形態は、従来の照査法と本研究の照査法で違いはないのだが、終局変位としては新提案法のほうが僅かに小さく評価された。また、従来法と同様に、コンクリート充填部のコンクリートで終局判定がなされている。これは、中空鋼断面の補剛材剛比 (γ/γ^*) が 3.0 程度であるのに対して、コンクリート充填部の鋼断面の補剛材剛比 (γ/γ^*) が 1.0 程度と比較的小さく、部材セグメントの限界ひずみが 0.106 で、コンクリートの限界ひずみのほうが大きいためである。なお、従来法より新提案法の変形能が僅かに小さかった理由は、用いたコンクリートの応力-ひずみ関係が従来法では限界ひずみに達しても耐力は低下しないのに対し、新提案法では破壊ひずみに達した後、強度が低下するようにしたからである。

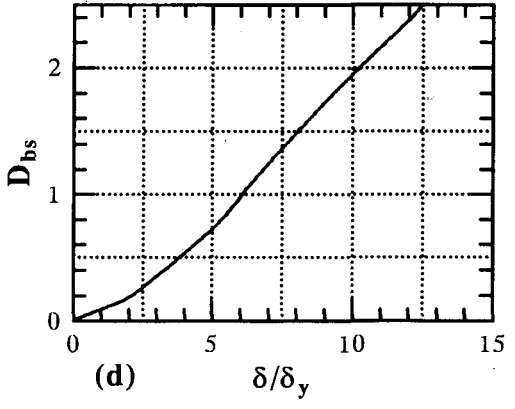
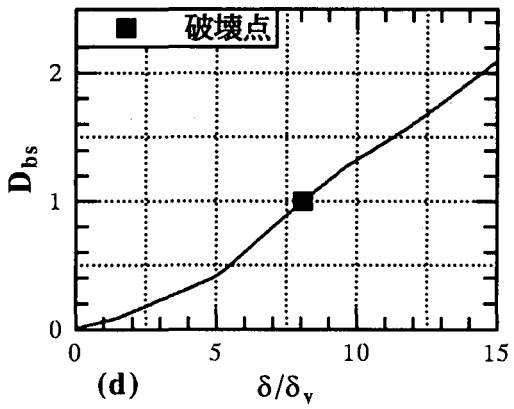
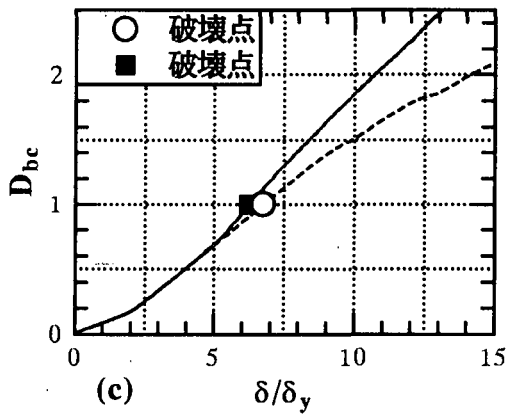
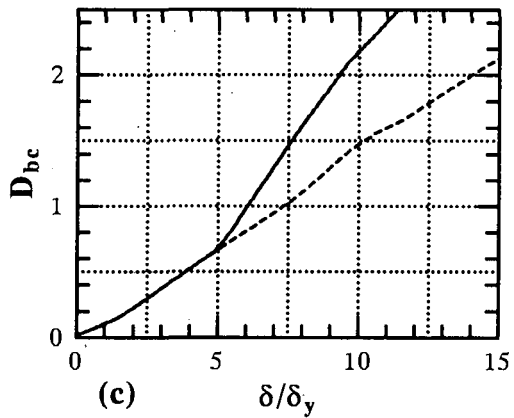
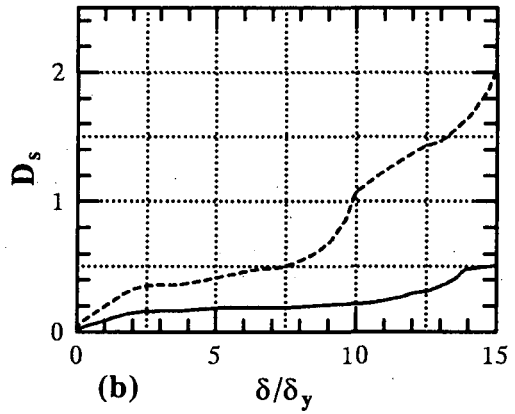
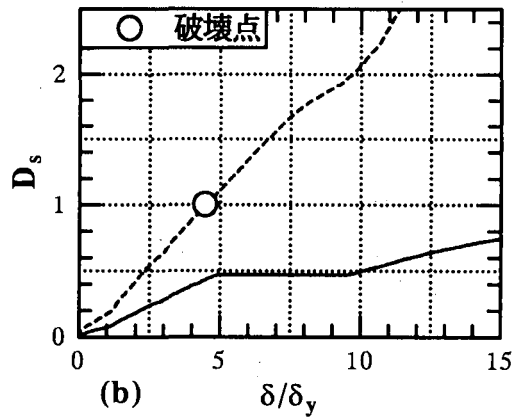
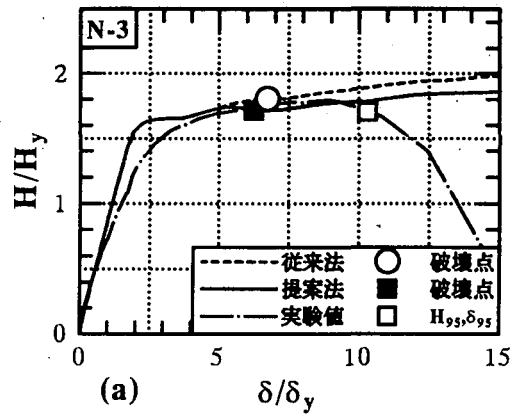
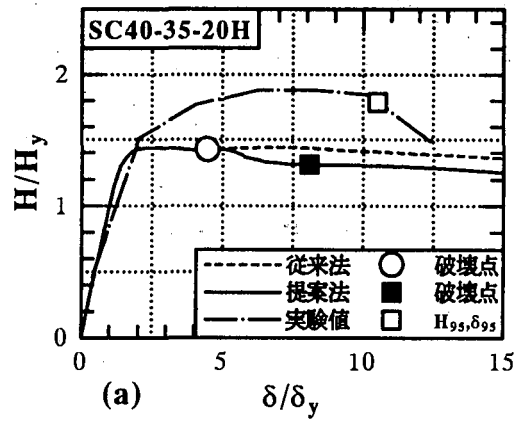


図-3 SC40-35-20Hの解析結果

図-4 N-3の解析結果

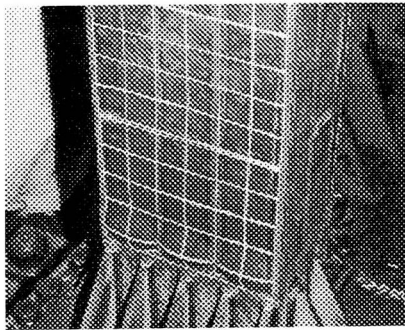


図-5 SC40-35-20Hの破壊状況

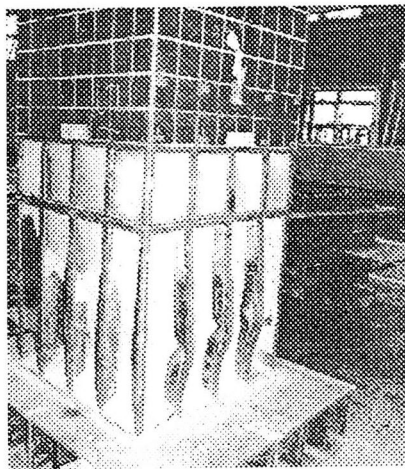
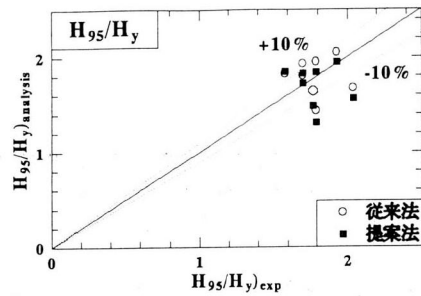


図-6 N-3の破壊状況

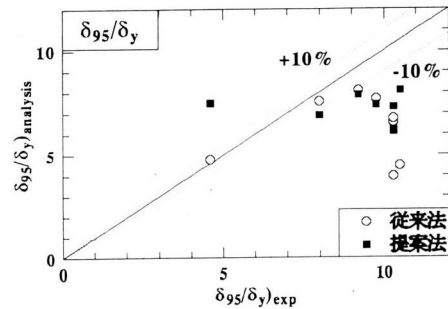
図-7は、本研究で解析した8体の供試体について従来法と本提案法による終局点の強度と変形能を実験結果との比較を行ったものである。この図から分るように、各解析法による終局強度の差は小さいが、変形能にはばらつきが見られた。1つの点(限界ひずみの適用範囲外のN-4供試体)を除いて、新提案法は実験結果を全般的に安全側の予測をしている。特に、変形能の大きい供試体では従来法に比べ提案法は実験結果を精度よく推定できている。したがって、新提案法は薄肉断面のみならず厚肉断面の橋脚にも適用でき、統一的に照査できる手法と考えられる。

5. 結言

本研究は、コンクリートを橋脚基部に部分充填した鋼製橋脚の耐震性能を評価する手法について、解析的な検討を行ったものである。具体的には、コンクリート充填部の耐震性能照査方法を改善し、比較的厚肉のコンクリート部分充填鋼製橋脚に対しても従来の評価法の適用が可能な新提案法を提示した。解析は過去に行なわれた静的繰り返し载荷実験8体について、従来法と新提案法によって強度と変形能を推定し、実験結果との比較から従来法および新提案法の妥当性を検討した。従来法および新提案法のどちらにおいても、終局強度の推定値は、ほ



(a) 強度



(b) 変形能

図-7 強度と変形能の比較

ぼ同程度であったが、変形能の推定は比較的厚肉の断面を有する橋脚に対して新提案法のほうが実験結果をより精度よく推定できた。

今後の課題として、より多くの単柱式橋脚およびラーメン橋脚の実験結果による新提案法のさらなる検証が挙げられる。

参考文献

1. 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.525/1-33, pp.69-82, 1995.
2. 土木学会鋼構造委員会・鋼構造新技術小委員会・耐震設計WG(主査:宇佐美勉): 鋼橋の耐震設計のための新技術1996.
3. 宇佐美勉: Pushover解析による鋼製橋脚の地震時保有水平耐力照査, 第1回地震時保有水平耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.183-186, 1998.
4. ABAQUS/Standard User's Manual: Ver.5.7, Habbitt, Karlsson & Sorensen Inc., 1998.
5. 葛漢彬, 宇佐美勉: コンクリートを部分的に充填した鋼箱形断面柱の終局強度と変形能に関する解析的研究, 土木学会論文集, No.513/1-31, pp.77-88, 1995.
6. 鄭沂, 葛漢彬, 宇佐美勉: 鋼構造物の強度と変形能の統一的評価法, 第3回鋼構造物の非線形数値解析と耐震設計への応用に関する論文集, pp.25-32, 2000.
7. 才塚邦宏, 宇佐美勉: コンクリート部分充填鋼製橋脚の終局耐震設計法と耐震実験による検証, 土木学会論文集, No.570, pp.287-296, 1997.
8. 天野麻衣, 葛西昭, 宇佐美勉, 葛漢彬, 岡本真悟, 前野裕文: コンクリート部分充填鋼製橋脚の弾塑性挙動に関する実験的及び解析的研究, 構造工学論文集, Vol.44A, pp.179-188, 1998.