

繰り返し荷重作用後の鋼板の残存強度評価

池内智行

正会員 工博 鳥取大学工学部助手(〒680-8552 鳥取市湖山町南 4-101)

本研究では弾塑性有限変位解析により、地震損傷を受けた鋼板の残存強度評価を行った。鋼板は周辺単純支持とし、初期不整として初期たわみおよび残留応力を考えた。解析では、面内繰り返し圧縮引張を作用させて地震損傷を与えた後、単調圧縮を行い極限強度を求めた。地震損傷を与えた直後の板中央でのたわみを損傷たわみ、損傷後の極限強度を損傷後強度として定義し、両者の関係について解析結果の整理を行った。これより、損傷たわみが限界値を超えると、損傷後強度が損傷たわみをパラメータとして評価できることが分かった。また、損傷たわみが限界値以下の場合、極限強度はほとんど低下しないことが分かった。この損傷たわみの限界値と、限界値以降の損傷後強度について評価式を提案した。

Key Words: steel plate, earthquake damage, out of flatness, ultimate strength, FEM

1. はじめに

兵庫県南部地震以来、各研究機関で鋼製橋脚の耐震性能評価および向上策について精力的に研究が行われている。しかし、一方で塑性化・座屈などの被害を受けた鋼製橋脚がどの程度の強度を有しているかは明らかになっていない。これらの情報は被災後に補修を行うか否かあるいは補修の優先順位を決定する上で非常に重要である。そこで本研究では数値解析を用いて、鋼製橋脚の最小構成要素である周辺単純支持板が地震損傷を受けた後の耐荷力について明らかにする。数値解析では鋼板に対して、まず地震動を模擬した繰り返し圧縮引張を作用させて地震損傷を与え、その後に極限強度を求めた。また解析結果について、地震損傷を受けた直後の鋼板中央でのたわみを損傷たわみ、損傷した鋼板の極限強度を損傷後強度と定義し、この両者の関係に着目して整理を行った。さらに、この関係から損傷たわみをパラメータとした損傷後強度の評価式を提案する。

2. 損傷後強度の評価に用いた解析モデル

本研究では、地震によって損傷を受けた鋼板が、地震後に保有している極限強度について、弾塑性有限変位解析を行って評価した。解析モデルは図-1 に示すように、鋼製橋脚の補剛材間の板パネルを想定して、周辺単純支持の正方形板とした。なお、解析モデルはアイソパラメトリックシェル要素で分割を行い、構造と変形の対称性を

から1/4モデルとした。初期不整に関しては初期たわみと残留応力を考慮した。初期たわみは図-1 に示すように板中央で最大値となるような板曲げモードとした。初期たわみの形状を式(1)に示す。

$$\delta = \frac{b}{150} \cos \frac{\pi x}{b} \sin \frac{\pi y}{b} \tag{1}$$

ここで、 b は板幅であり、板たわみの最大値は製作時の許容誤差である $b/150$ とした¹⁾。また、残留応力については図-2 に示すように圧縮側で降伏応力の 0.3 倍となるような分布を考えた。

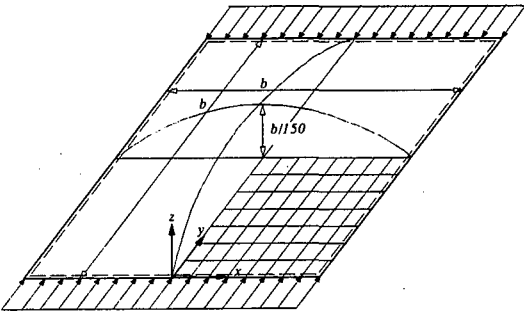


図-1 解析モデル

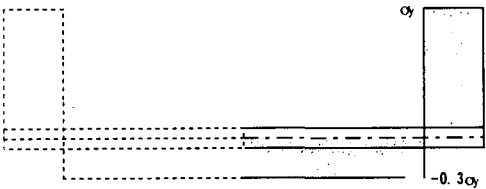


図-2 考慮した残留応力

解析モデルの鋼種として SM490 を考えた。繰り返し荷重を受ける鋼板を精度良く解析するため、材料構成則として BMC モデル²⁾を用いた。使用した材料定数の主な値について表-1 に示す。他の材料定数は文献 2) に従った。

弾塑性有限変位解析では、まず解析モデルに地震損傷を模擬して面内の繰り返し圧縮引張载荷を行い、その後耐荷力について評価を行うこととした。地震損傷を与える載荷パターンとして図-3 に示すような3種類を考えた。図中、 ϵ は載荷辺の変位を板長さ b で除した平均ひずみを示す。それぞれ交番载荷の中心を降伏ひずみ ϵ_y の 0, 1, 2 倍とした載荷パターンとなっている。解析から得られる荷重-たわみの模式図を図-4 に示す。図に示すように地震損傷シミュレーション直後のたわみを損傷たわ

表-1 材料定数

Steel type	Young's modulus E (kgf/cm ²)	Yield Stress σ_y (kgf/cm ²)	Poisson's ratio ν
SM490	2.13×10^6	3900	0.3

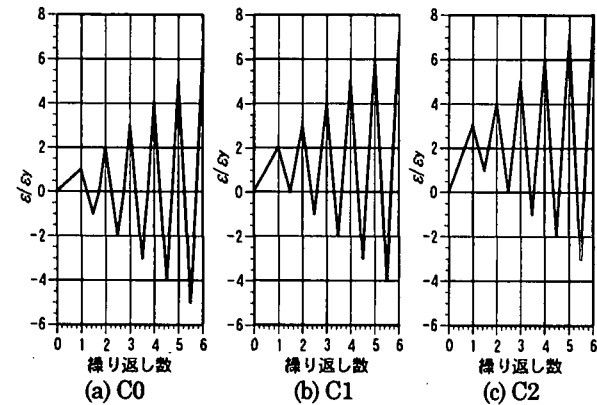


図-3 地震損傷シミュレーションのパターン

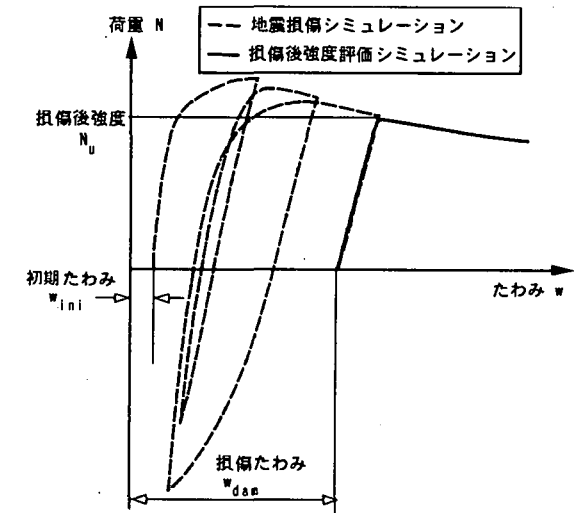


図-4 荷重-たわみ曲線

表-2 解析パラメータ

	パラメータの範囲
幅厚比パラメータR	0.3,0.4,0.5,0.6,0.7,0.8
地震損傷パターン	C0,C1,C2
地震損傷パターンの繰り返し数	1,2,3,4,5,6

み、その後の最大強度を損傷後強度として評価した。解析で考えたパラメータの範囲を表-2 に示す。

3. 解析結果

1) 損傷前の鋼板の強度

地震損傷後の強度について弾塑性有限変位解析を実施する前に、初期状態での極限強度について解析を行った。図-5 に単調圧縮した場合の荷重-平均ひずみを示す。図中の R0.3~R0.8 は幅厚比パラメータの値を示している。図-6 は、この解析結果を極限強度-幅厚比パラメータで整理したものである。図から分かるように解析結果は、土木学会が提案している極限強度の下限值曲線³⁾とほぼ一致していることが分かる。この下限値曲線を式(2)で示される。

$$\frac{N_u}{N_y} = 1 \quad (R \leq 0.5)$$

$$\frac{N_u}{N_y} = \left(\frac{0.5}{R}\right)^{0.80} \quad (R > 0.5) \tag{2}$$

2) 損傷後の鋼板の強度

まず、損傷パターン C0 を与えた場合の損傷後強度に

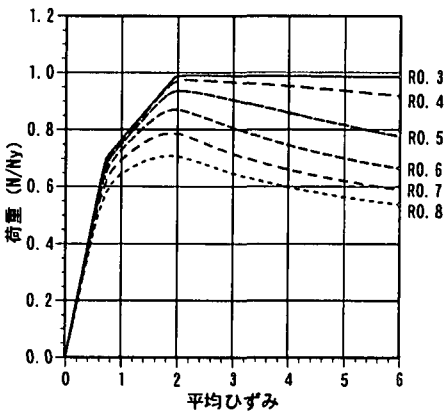


図-5 単調載荷

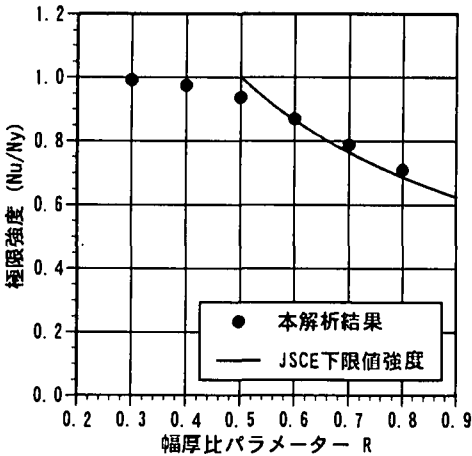
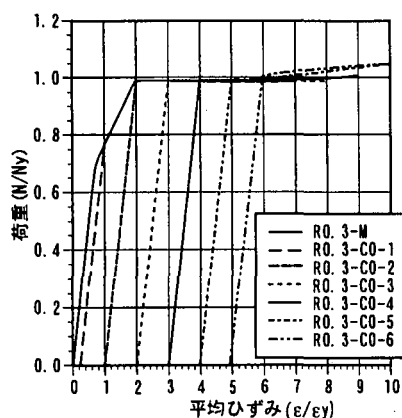
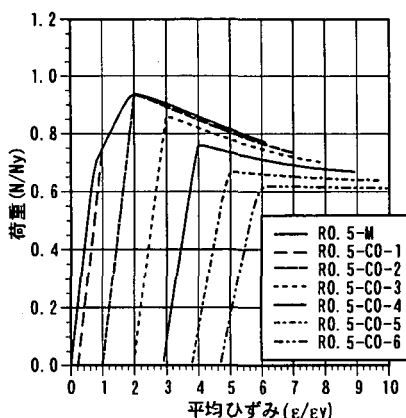


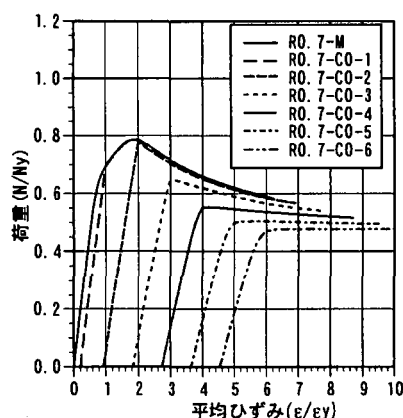
図-6 極限強度-幅厚比パラメータ



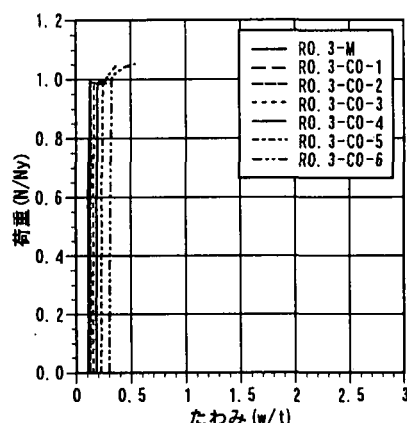
(a) 荷重-平均ひずみ(R=0.3,C0)



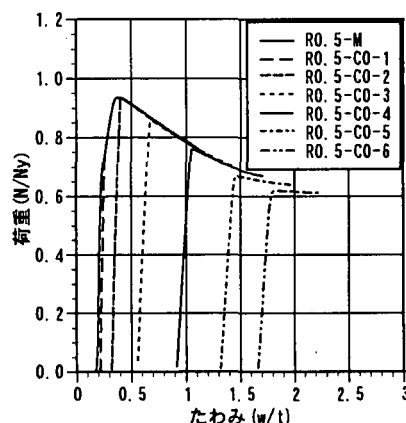
(b) 荷重-平均ひずみ(R=0.5,C0)



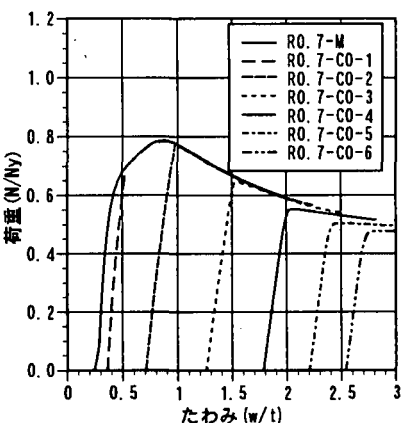
(c) 荷重-平均ひずみ(R=0.7,C0)



(d) 荷重-たわみ(R=0.3,C0)

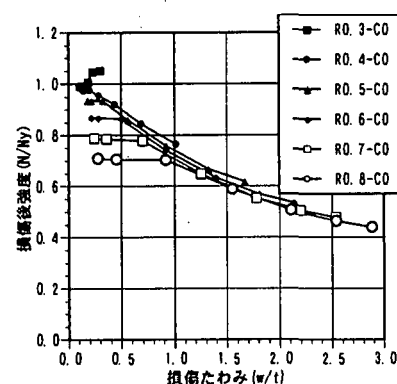


(e) 荷重-たわみ(R=0.5,C0)

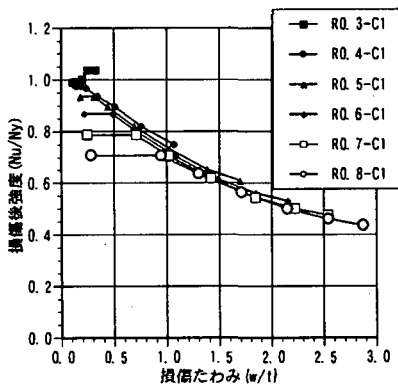


(f) 荷重-たわみ(R=0.7,C0)

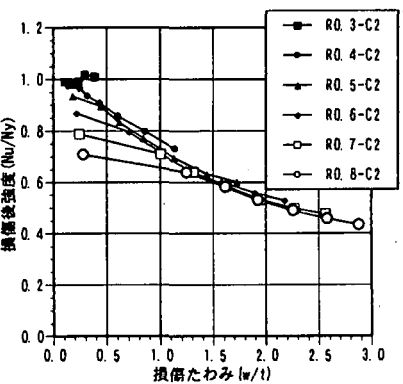
図-7 損傷後強度解析結果



(a) 損傷パターン C0 の場合



(b) 損傷パターン C1 の場合



(c) 損傷パターン C2 の場合

図-8 損傷たわみ損傷後強度の関係

について弾塑性有限変位解析を行った。損傷後の荷重-平均ひずみと荷重-たわみの関係を図-7 に示す。荷重 N については降伏軸力 N_y 、たわみ w については板厚 t で無次元化して表示している。図-7(a)から分かるように幅厚比パラメータ $R=0.3$ の場合、損傷を受けても極限強度が低下しない。図中、R0.3-C0-1~R0.3-C0-6 の最後の数字は損傷シミュレーションの繰り返し数を示す。また、R0.3-M は通常の単調圧縮の結果である。繰り返し数が多くなれば強度が上昇しているが、これは鋼材のひずみ硬化の影響と思われる。この $R=0.3$ では強度が上昇し続けたため、損傷後から ε の増分が $6\varepsilon_y$ となるまで解析を行い、このときの強度を損傷後強度として評価した。図-7(b)に示される $R=0.5$ の場合、損傷の繰り返し数が多くなるに従っ

て、強度が低下していることが分かる。また、図-7(e)より繰り返しによって損傷たわみが累積していることが分かる。図-7(c),(f)に示される $R=0.7$ の場合は、0.5 の場合に比較し損傷後の強度低下と損傷たわみの累積がより大きくなっている。

図-8 に損傷たわみと損傷後強度の関係を示す。損傷パターンが C0 の場合、幅厚比 0.8 のモデルに着目すると全体的な傾向として損傷たわみが増加するに従って損傷後強度が低下していることが分かる。ただし、損傷たわみが 1.0 を超えない範囲では初期の強度とほぼ等しくなっている。他の幅厚比パラメータ 0.4~0.7 のモデルもある限界の損傷たわみに達するまでは初期の強度を保ち、その限界強度を超えると損傷たわみの増加に伴って損傷

後強度が低下する傾向となっている。ただし、幅厚比パラメータ 0.3 の場合は損傷たわみが大きくなっても強度の低下は見られず、ひずみ硬化の影響から逆に強度が上昇している。他の損傷パターン C1,C2 を与えた後の損傷たわみ-損傷後強度についてみると C0 の場合と同様の傾向であることが分かる。

4. 損傷たわみを指標とした損傷後強度評価法

3 章の解析結果に対する考察より、損傷たわみがある限界値を超えると損傷たわみが増加するにつれて損傷後強度が低下することが分かった。そこで、この関係を利用した損傷後強度の評価法を提案する。損傷たわみは地震後に構造物に起きた変形を測定することで容易に求めることができる。

解析を行った全ケース中から、幅厚比パラメータ 0.3 のケースと初期の極限強度と比較してほとんど強度に変化のなかったケースを除き、損傷たわみと損傷後強度の関係を図-9 にプロットした。この図より、このようなケースでは幅厚比パラメータによらず損傷たわみのみに損傷後強度が依存していることが分かる。そこで、この解析結果を満たすように損傷たわみ-損傷後強度の関係を式(3)のように提案する。

$$\frac{N_u}{N_y} = \frac{2.1}{w_{dam}/t + 2.0} \tag{3}$$

図より式(3)が解析結果とよく一致していることが分かる。また、3 章で損傷たわみが限界損傷たわみを超えない場合は初期の極限強度とほぼ等しいと考察できたため、式(3)を式(2)に代入して、極限強度を消去すると以下の式(4)のようになり幅厚比パラメータと限界損傷たわみの関係を導くことができる。

$$w_{lim}/t = 2.1 \left(\frac{R}{0.5} \right)^{0.8} - 2.0 \tag{4}$$

以上の結果より、損傷後強度の評価手順を図-10 のように提案する。この評価法を用いれば、鋼板の幅厚比パラメータと損傷たわみを測定することで損傷後強度を評価することが可能となる。

5. まとめ

弾塑性有限変位解析を用いて、周辺単純支持板の損傷たわみと損傷後強度の関係を調べた結果、以下のようなことが明らかになった。

1)鋼板の強度は、繰返し荷重を受けるにしたがってたわみが累積し、これにつれて強度の低下が起こる。同

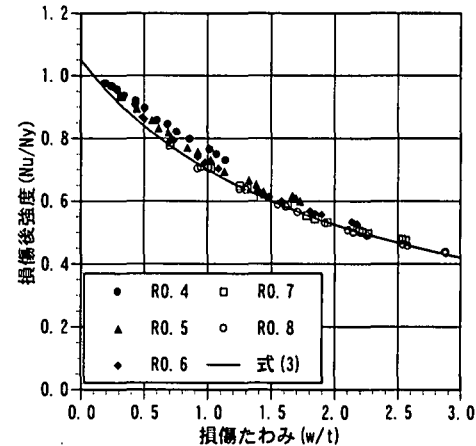


図-9 損傷後強度評価式

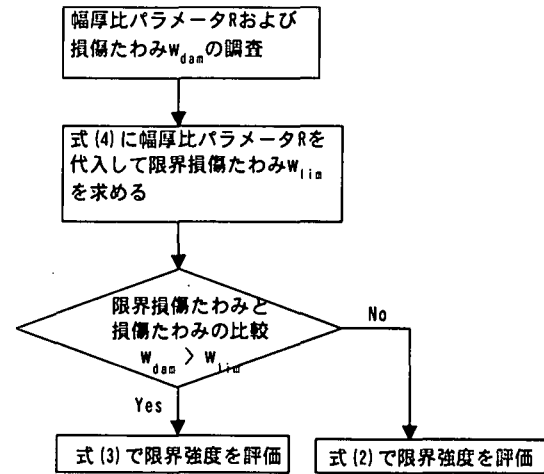


図-10 損傷後強度の評価手順

- じ繰返し履歴を受けても、幅厚比パラメータが大きいほどたわみの累積が大きい。
- 2)損傷たわみが幅厚比パラメータ固有の限界値を超えると、幅厚比パラメータに依存せず損傷たわみにのみ依存して強度が低下する。その関係を式(3)として提案した。
- 3)損傷たわみが限界値以下の場合、ほとんど極限強度の低下が見られず、損傷を受けていない鋼板の極限強度と等しくなる。これより限界損傷たわみについて式(4)を提案した。

謝辞：本研究の数値計算を遂行するにあたって、鳥取大学大学院の田口大介氏にご協力いただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本道路協会:道路橋示方書・同解説(I 共通編,II 鋼橋編),1996.
- 2) 西村宜男, 小野潔, 池内智行: 単調荷重曲線を基にした繰返し塑性履歴を受ける鋼材の構成式, 土木学会論文集, No.513/I-31, pp.27-38, 1995.
- 3) 土木学会鋼構造委員会:鋼構造物の終局強度と設計,1994.

(2001.5.25 受付)