

鋼橋の耐震・制震設計における「ひずみ照査法」の基本理念

葛 漢彬¹・宇佐美勉²

¹フェロー 博（工） 名城大学教授，理工学部社会基盤デザイン工学科
（〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口1-501）

²名誉会員 D.Sc., 名城大学総合研究所（〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口1-501）

1. 緒言

構造物の耐震・制震性能照査法は，大別すると，変形（ひずみ，変位等）で照査する方法，および，力（断面力，慣性力等）で照査する方法に分かれる．土木学会鋼・合成構造標準示方書〔耐震設計編〕の2008年版¹⁾（前示方書と称する）では，変形で照査する方法として，主として鋼製橋脚を対象とした「変位照査法」と，特殊橋梁を含む鋼橋全般を対象とした「ひずみ照査法」が併記されている．一方，2018年版²⁾（現示方書と称する）では，「力で照査する方法」が主体に記述されている．それと共に，巻末の付録3(pp.297-321)に，ひずみ照査法の問題点として次の2項目に関連する諸事項がまとめられている．

2.1 部材座屈を考慮できない問題

2.2 終局ひずみの精度が悪い問題

しかしながら，著者らの見解では，指摘されている問題点の多くはひずみ照査法の本質が十分理解されていなかったことに因ると考えている．

以上の背景を踏まえ，本論文では，ひずみ照査法の基本理念を整理し，照査プロセスに誤解を招かないように修正を加え，上記2つの問題点に対する著

者らの見解を述べ，最後に耐震性能照査例³⁾を引用して，具体例を基にひずみ照査法の本質を述べる．

2. ひずみ照査法の基本理念

(1) 概論

ひずみ照査法は，弾塑性有限変位解析（複合非線形解析）に基づく構造設計であり，その概念は文献3)の pp.286-287 に整理されている．ここでは，論点を明確にするためにその概要から説明する．

性能照査式は，周知のように次式で表される^{1)~3)}．

$$\gamma \cdot S \leq R \quad (1)$$

ここで， S =応答値， R =限界値， γ =部分係数である．部材の性能照査に用いる応答値および限界値は「平均ひずみ」を用いて表す．すなわち，板要素では有効破壊長領域での平均ひずみ（表-1の限界状態②，④の照査），座屈拘束ブレース(BRB)では変形部材長両端の相対変位を変形部材長で除した平均ひずみ（限界状態⑤，⑥の照査）で表示する．構造全体の性能照査に用いる応答値および限界値は地震外力（限界状態⑧の照査）である．

表-1 弾塑性有限変位解析に基づく鋼橋の耐震・制震設計の限界状態の例

- (a) 部材の限界状態：①部材座屈，②局部座屈（構造安全性），③部材座屈と局部座屈の連成，
④修復性，⑤変形，⑥低サイクル疲労 etc.
- (b) 構造全体の限界状態：⑦最大荷重，⑧95%荷重，⑨最大変位 etc.

Note: 下線部は耐震設計，2重下線部は制震設計の履歴型制震ダンパーに適用

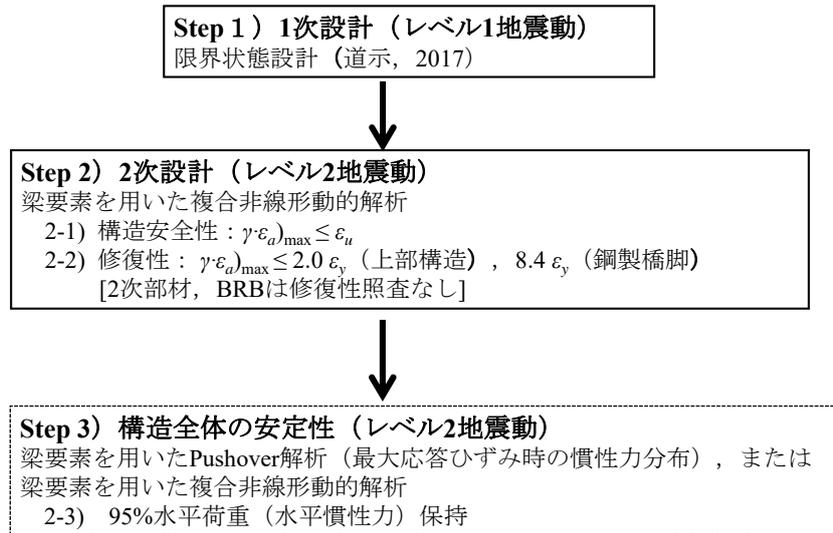


図-1 ひずみ照査法の流れ[前示方書¹⁾修正]

限界値(R)

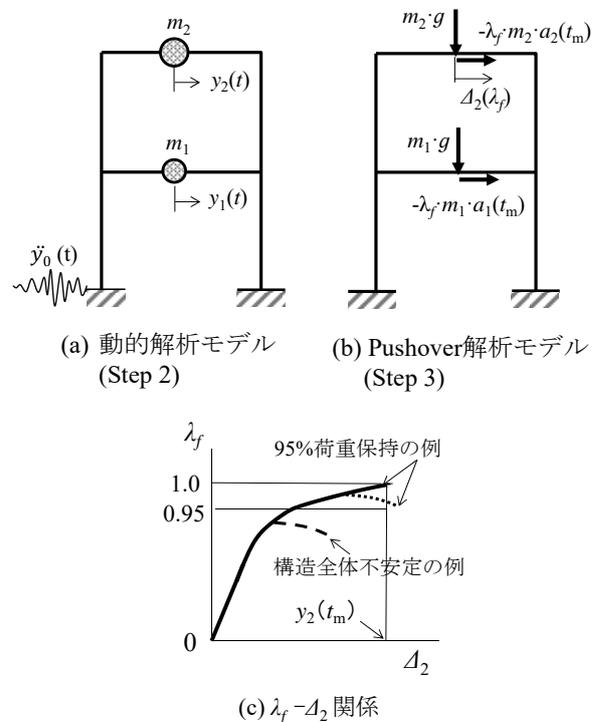
限界値を規定するために、多種多様な限界状態が設定される。それらを部材と構造全体の2種類に分類して、表-1に例示する^{1), 3)}。ただし、引張部材および部品（支承等）の限界状態は省く。

ひずみ照査法で設定されているレベル2地震動に対する限界状態は、表-1の②、④および⑧（下線部）で、⑤、⑥（2重下線部）は座屈拘束ブレースに対して規定されている。限界状態⑧を除く限界値は「平均ひずみ」で表される。ひずみ照査法では、道示⁴⁾に設定されている部材座屈①および③に関連する限界値の設定はなく、部材座屈の照査は行わない。なお、⑥低サイクル疲労は、現示方書に若干触れられているが、今後の研究を基に一般の部材に対しても追加する必要がある。

応答値(S)および数値解析手法

設定された限界状態に対応する応答値を、梁要素を用いた複合非線形動的解析により算定する。限界状態②、④、⑤および⑥では、先述のように「平均ひずみ」を用いる。限界状態⑧に対応する限界値は後述する。

複合非線形解析に基づく構造設計では、部材座屈ならびにその後のポストピーク挙動が解析の過程で算定されるため、有効座屈長概念を導入する必要がない。但し、部材の適切なモデル化と解析手法の選択が重要である。例えば、横構・対傾構のブレース材を両端ピンのトラス部材にモデル化する場合、载荷の初期から曲げ変形が生ずるように初期不整（初期たわみ、初期横荷重等）を部材に与えておく必要がある。さもないと、曲げ座屈が生じないトラス部材としての解しか得られない。さらに、そのよ



(記号)

m_i =質量, $y_i(t)$ =相対水平変位, $a_i(t) = \ddot{y}_0(t) + \ddot{y}_i(t)$ =絶対加速度, t_m =最大応答ひずみ発生時刻, λ_f =荷重係数, $D_2(\lambda_f)$ =最大水平変位点（モニター点2）の水平変位

図-2 Step 2)および Step 3) (図-1) の概念図

うな部材の繰り返し、あるいは動的解析においては、パウシンガー効果（繰り返し载荷に伴う弾性域の縮小）を考慮できる構成則あるいはそれに代わる解析手法を用いる必要がある。さもないと、繰り返し載

荷による圧縮耐荷力の低下を考慮できない、あるいは再圧縮負荷時の収束解を得るのが難しい場合がある。これらについては、文献⁵⁾⁶⁾で詳細な検討が行われ、初期横荷重を与えてバイリニア移動硬化則を用いて解析する初期横荷重法 (ILLM) が実用性、信頼性、安定性の点から最も優れていることが示されている。

さらに、シェル要素を部分的に用いた梁-シェル混合要素による部材座屈と局部座屈の繰り返し連成座屈挙動の解析も可能になってきている⁹⁾。その場合には、限界状態②に代って③が照査すべき限界状態になる。また、シェル要素を用いることにより局部的なひずみも算定が可能で、限界状態⑤低サイクル疲労の照査への展望も拓ける。

(2) 照査プロセス

ひずみ照査法による耐震性能照査のプロセスを図-1に示す。図-1は、前示方書のひずみ照査法の概念 (pp.34-36) の曖昧であった表現を修正し、説明不足な箇所に追補を行って流れ図にまとめたものである。変更点は Step 3)で、2-3)の照査を義務づけ、2種類の照査方法を明記したことである。図-2は2質点平面構造物を用いた Step 2)および Step 3)の説明図である。以下に説明を加える。

1) 前示方書の「第2章 耐震性能設計の基本原則」の p.18に、「構造安全性の限界状態 (終局限界状態) はピーク後の95%荷重値を標準にする」と謳ってあるので、図-1の Step 3)で、すべての構造物に対して95%荷重保持の照査が必要であることを明確にし、2つの照査方法を併記した。

2) **Pushover解析法**：図-2の2質点平面構造物 ($m_i =$ 質量, $i=1,2$) を用いて説明する。Step 2)の複合非線形動的解析 (時刻歴応答解析) で得られた最大応答ひずみ発生時 ($t=t_m$) に各質量に作用する水平慣性力 $-m_i \cdot a_i(t_m)$ ($a_i(t)$ =絶対加速度) を λ_f 倍 ($0 < \lambda_f \leq 1.0$) した漸増水平荷重 $-\lambda_f \cdot m_i \cdot a_i(t_m)$ と一定自重 $m_i \cdot g$ を用いた Pushover 解析を実施し、 $\lambda_f - \Delta_2$ 関係 (Δ_2 は水平変位が最大になる点、すなわちモニター点 2 の水平変位) を元に構造全体の安定性 (95%荷重保持) を照査する方法である。この方法は、基本的には多質点構造物の変位照査法で用いられる方法と同じである (前示方書, pp.32-36, 図-解 4.2.2)。前示方書 p.35 では「スレンダーな構造物に高軸力が作用する場合には、ひずみが限界値に達する前に構造物全体が P-A 効果によって不安定になる場合もあり得るが、ひずみ照査法ではこの影響は考慮できない。従って、そのよう

な構造物に対しては、(上述の) Pushover 解析による構造全体の安定性の照査が望ましい」となっている。意図する所は「構造全体の不安定がひずみ照査法の限界状態に先行して生ずる可能性がある場合には、Pushover 解析による照査も行い終局限界を決める必要がある」という意味である。ただ、一般的にどのような場合に照査が必要かを明示することは現状では難しいため、全ての構造物に適用するように「望ましい」から「必要である」という内容に変えた。3章の(2)の1), 2)で対象とする1質点系の片持柱あるいは中心軸圧縮柱ではこのような検証は容易である。

前示方書では、荷重係数 $\lambda_f = 1.0$ で強度劣化が生じないことを荷重増分法による Pushover 解析でチェックするようになっていた。この方法は解析が容易であることと、95%荷重保持の十分条件 (安全側) を与えるため、第1段階の照査で用いるのがよい。もし、 $\lambda_f = 1.0$ に達する前に解が発散する、すなわち強度劣化が生ずることがあるときは、第2段階として弧長法などによる劣化域を含む解析を行い、水平変位 Δ_2 が $y_2(t_m)$ に達する時点で95%荷重を上回るかをチェックすることになる (図-2(c)の点線)。

3) **動的解析法**：Step 2)の複合非線形動的解析で算定された各質量に作用する水平慣性力の総和 $H(t) = -\Sigma(m_i \cdot a_i(t))$ とモニター点 2 の応答水平変位 $y_2(t)$ の履歴曲線の包絡線を基に Step 3)の 2-3)の照査を行う方法である。この方法は、1質点系構造物に対する付録の方法と同じであり、繰り返し横荷重が水平慣性力に相当する。

(3) 適用の注意点

単柱式鋼製橋脚を対象とした片持柱、あるいは構造物中から部材 (例えば、中心軸圧縮柱) を独立に取り上げてひずみ照査法を適用するときは、これらは、部材であると同時に構造全体であるので、部材の構造安全性 2-1) (限界状態②)、修復性 2-2) (限界状態④) の照査に加え、構造全体の安定性照査 2-3) (限界状態⑧) も同時に考慮する必要がある。このことにより、次章の(2)で述べるような、ひずみ照査法の適用の誤りが回避出来るようになる。また、「部材座屈の影響を考慮できるように、終局圧縮ひずみを細長比の関数にする」 (前示方書, p.303) 等のひずみ照査法の理念に反する操作を行う必要はない。ひずみ照査法では部材座屈は解析の中で自動的に考慮できる。

3. 部材座屈が考慮できない(問題点 2.1)

(1) 論点

ひずみ照査法の問題点 2.1 として、部材座屈が考慮できないことが挙げられ、部材座屈を照査しないのは正しくない結論づけられている。構造物内に設置された部材に対して部材座屈を照査しないことがどのような結果に繋がるかを見るために、ブレース材付きフレームの性能照査の実例⁶⁾を付録に示し、関連する知見を以下に抜粋する。①、②・・・は表-1中の限界状態の番号、番号 1, 2・・・は図-A2中のイベント番号である。

- 1) 図-A2中のA点は右ブレース材の初期部材座屈点であるが、ひずみ照査法における部材の限界状態ではない。2次部材であるブレース材の限界状態は、②局部座屈(この例では限界値 $\epsilon_u=20\epsilon_y$ 、表-A2参照)で、イベント番号3近辺にある。部材座屈点Aは道示⁴⁾で設定されている限界状態であるが、図-A2(a)から、構造全体の挙動を表すH-Δ曲線の極めて安定した領域にあり、単なる通過点に過ぎない。
- 2) 図-A2(b)に示すように、初期部材座屈点Aは、道示⁴⁾の中心軸圧縮柱(箱形断面)の圧縮耐荷力とほぼ一致し、部材座屈後のポストピーク挙動、あるいはその後の正負の繰り返し載荷に伴う圧縮耐荷力の低下も精度良く解析出来る⁶⁾。
- 3) 構造全体の限界状態(⑧95%荷重)はH-Δ曲線に劣化域が生じていないので、イベント9以降にある。この構造物の終局限界は、右柱基部外側フランジの軸ひずみが④修復性限界(2.0 ϵ_y)に達する点であり、イベント番号1点近辺が相当する(表-A2)。この点も構造物全体の挙動の安定した領域にある。

結局、この構造物では、道示⁴⁾の終局限界点である部材座屈(A点)は、構造物全体の挙動に大きな影響を与えない。また、構造全体の数値解析の中で、ブレース材の精確な履歴挙動が自動的に生成出来ることがわかる。

(2) 「ひずみ照査法の問題点」の内容に対する反論

上記を踏まえ、ひずみ照査法の問題点(現示方書, pp.297-308)の内容に対する反論を項目順に述べる。

- 1) pp.298-302: (a)細長比や軸力比が大きな部材ではセグメントが限界ひずみに達する以前に(部材が)不安定現象で終局状態に到達するため、危険側の照査になる場合がある。

対象構造物は片持柱あるいは中心軸圧縮柱であ

るので、図-1の照査項目2-3)の構造全体に対する⑧95%荷重保持の照査が必要で、それを行えば、危険側の照査になることはない。実際、当該部分に示されている解析は、2章(2)のPushover解析法に基づく検証を行ったことに他ならない。

- 2) pp.302-303: (b)局部座屈が生じない中心軸圧縮柱の解析から得られた部材座屈後の95%荷重時の圧縮ひずみ ϵ_{max} は、部材セグメント(短柱)の局部座屈に基づくひずみ照査法の限界ひずみ ϵ_{95} より小さくなる場合があるので、ひずみ照査法は危険側の評価になる場合がある。

この問題は1)の片持柱と同じで、 $\epsilon_{max} < \epsilon_{95}$ であるので、⑧95%荷重保持の照査を行えば、支配限界値は ϵ_{95} ではなく ϵ_{max} となり、ひずみ照査法が危険になることはない。

- 3) pp.303-305: (c)トラス部材における限界ひずみ2.0 ϵ_y の問題点

対傾構、横構などの2次部材を初期不整のない両端単純支持の中心軸圧縮柱でモデル化した解析結果に関する議論で、前示方書に「両端単純支持のトラス要素では曲げ座屈は考慮できない(p.35)」と明示してあるが、それに反するモデルを用いた解析結果の議論であり、上記1), 2)と同様、不適切な指摘である。ちなみに、限界ひずみ2.0 ϵ_y は1次部材に適用される修復性限界で、対傾構などの2次部材に対するものではない。

- 4) pp.305-306: (d)アーチリブの橋軸方向の安全限界状態の照査の問題点

ひずみ照査法の適用の誤りがある。アーチリブは上部構造であるので、図-1の2-2)修復性照査を考慮する必要がある。文献2)の図-付3.2.11から読み取った、アーチリブの限界状態での u_x/h の値は次のようである: ②局部座屈(限界値10 ϵ_y)は0.045, ④修復性(限界値2.0 ϵ_y)は0.024, ⑧95%荷重は0.030(シェルモデル)または0.031(はりモデル)。結局、最初に限界状態に達するのは、④の修復性限界($u_x/h=0.024$)で、この点が終局限界であり、指摘されている②の局部座屈限界($u_x/h=0.045$)ではない。なお、④の修復性限界での荷重はほぼピーク時の荷重である。このことから、ひずみ照査法が危険側の評価になることはない。

- 5) p.307: (e)アーチリブの終局挙動の実験

現示方書 p.316-317の討議と回答だけの方が誤解を招かないと思われる。

結局、上記1)~4)の指摘事項は、ひずみ照査法の3項目の照査(図-1)を正しく適用していなかったことから生ずる誤解である。

4. 終局ひずみの精度が悪い（問題点 2.2）

ひずみ照査法が単柱式鋼製橋脚の終局変位を危険側に評価する機会が多いとの指摘である。これについてもひずみ照査法の理念を正しく理解していないことから生ずることを示す。

危険側に評価する理由として、a) 部材座屈の影響が考慮できない、b) 終局圧縮ひずみの算定公式自体が危険側の評価を与える、の2点が挙げられている。a) については、3章で述べたように⑧95%荷重保持の照査を行えば大きな問題は生じない。b) については、ひずみ照査法の終局ひずみ ϵ_u の算定式（前示方書、表-解 4.4.5）は平均値ベースで算定されたものである。実験値との比較の場合は、終局ひずみ ϵ_u を用いて算定された水平変位の予測値 δ_{95} を部材係数 γ_b で除した下界相当値 δ_{95}/γ_b を用いる必要がある。例として、単柱式鋼製橋脚の繰り返し載荷実験の水平変位 δ_{95} （横軸）とひずみ照査法による予測値 δ_{95}/γ_b （縦軸）の比較⁷⁾が、現示方書 p.318 の図-付 3.3.3 に記載されているので、図-3 に転載する。前示方書の部材係数は、 $\gamma_b=1.1$ （不静定構造）、 $\gamma_b=1.32$ （静定構造）であるので、両ケースを考慮している。この図から、 $\gamma_b=1.1$ でも数点を除いた実験値、また $\gamma_b=1.32$ では全ての実験値は安全側（傾き 45°の斜線の下側）であり、ひずみ照査法が危険側の予測値を与えることはほとんどない。また、静定構造である片持柱に対する精緻な FEM 解析値との比較が、現示方書 p.314 の図-付 3.3.18(a),(b)に見られる。この場合もひずみ照査法の結果は、ほとんどのケースで安全側にある（これらの図では、横軸がひずみ照査法による予測値であることに注意）。以上より、ひずみ照査法に用いる終局ひずみの精度には問題がなく、むしろ、図-付 3.3.18(b)に見られるように2方向載荷に対しても高い精度を持っているのは興味深い。

5. ひずみ照査法の特徴と将来展望

最後に、ひずみ照査法の持つ特徴と将来展望をまとめる。

1. 鋼製橋脚から特殊橋梁（アーチ橋、斜張橋、トラス橋等）を含む鋼橋全般の動的解析に基づく耐震・制震性能照査が一貫した手法で実施できる。
2. 梁要素による複合非線形動的解析（構成則はパイリニア移動硬化則）が基本であるため、市販の多くの構造解析用コードの利用が可能である。
3. 塑性域での適用の妥当性に問題が残されている

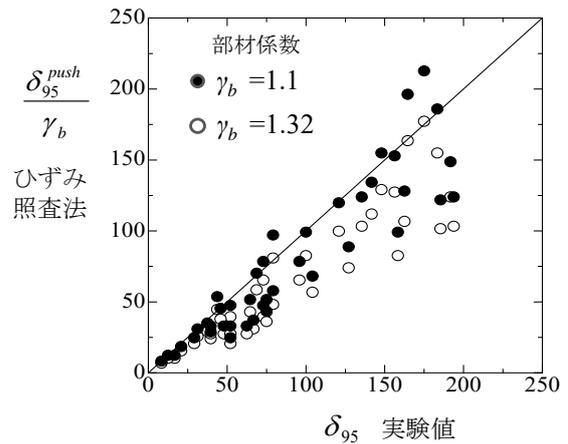


図-3 終局圧縮ひずみの妥当性の検討⁷⁾

「有効座屈長」の概念を用いない照査法である。

4. 耐震・制震設計とも変形（ひずみ）をベースにした共通の照査法である。そのため、残留変形によって定められる修復性照査、あるいは累積塑性変形（または低サイクル疲労寿命）に基づく低サイクル疲労性能照査も比較的容易に導入できる。
5. 数値解析ツールとして初期横荷重法（ILLM）⁶⁾を用いることにより、多様な問題に対するひずみ照査法の適用が可能となる。例えば、部分的にシェル要素を用いた梁-シェル混合要素による解析により、局部座屈発生から低サイクル疲労による破断に至るまでの性能照査の展望も拓けている⁶⁾。

6. 結言

現示方書²⁾の付録3 ひずみ照査法をめぐる問題に記載の「2. ひずみ照査法の問題点」に対する著者らの見解を述べた。得られた結論をまとめると以下のようである。

- 1) ひずみ照査法は、梁要素を用いた複合非線形解析に基づく耐震・制震性能照査法(図-1 参照)で、部材座屈は限界状態として設定されていない。即ち、部材座屈は解析の中で自動的に考慮されることを前提に、照査する必要はない。
- 2) ひずみ照査法で設定されているレベル2地震動に対する限界状態は、部材に対しては②局部座屈および④修復性、構造全体に対しては⑧95%荷重保持である（表-1 の下線部）。
- 3) 単柱式鋼製橋脚など、柱部材を単独で取り上げてひずみ照査法を適用するときは、部材の限界状態②、④に加え、構造全体の限界状態⑧95%荷重保持も考慮する必要がある。

- 4) 両端ピンのトラス要素などでは、その要素だけが独立に部材座屈するモードが存在するため、曲げ変形が载荷初期から部材に生ずるような適切なモデル化と解析手法^{4),5)}が必要である。
- 5) 現示方書「2.1 部材座屈を考慮できない問題」に記載のひずみ照査法に対する批判は、図-1の流れ図に沿った耐震性能照査を行えば、解消できる。
- 6) 現示方書「2.2 終局ひずみの精度が悪い問題」に記載の、ひずみ照査法の終局ひずみは危険側の予測値を与えるとの指摘は、実際の設計では終局変位の予測値を部材係数 γ_b で除した下限相当値を用いることを考慮すれば、危険側になることは非常に希である(図-3)。

付録 ひずみ照査法の実例⁵⁾

ひずみ照査法が意図している点の理解のために、複弦アーチ橋の主構・横構をモデル化した図-A1(a)に示す一定鉛直荷重 $P=0.2P_y$ (P_y =柱の全断面降伏荷重)および慣性力を想定した繰返し水平荷重 H を受ける両端ピンのブレース材付き2次元フレームを取り上げ、初期横荷重法(ILLM)^{4),5)}による解析結果を検討する。図-A1(b)は解析モデルで、初期不整としての一定初期横荷重 q をブレース材直角方向下向きに水平荷重載荷前に与える。断面はすべて正方形箱形断面で、諸量を表-A1に示す。初期横荷重は $q_{(Box)}=2.93$ kN/mである。全ての部材で、局部座屈の影響は考慮せず、材料構成則はバイリニア移動硬化則(2次勾配 $=E/100$)を用いた。

図-A2(a)~(f)は解析結果を示す。図-A2(a)はフレームの水平荷重 H/H_y -水平変位 Δ/Δ_y 関係、図-A2(b), (c)は右、左ブレース材の軸方向力 N/N_y -軸変位 δ/δ_y 関係、図-A2(d), (e)は水平荷重 H/H_y -左右柱基部外側フランジの軸ひずみ $\varepsilon_f/\varepsilon_y$ 関係である。軸ひずみ $\varepsilon_f/\varepsilon_y$ は有効破壊長¹⁾($L_e=0.7b$)領域での平均値である。

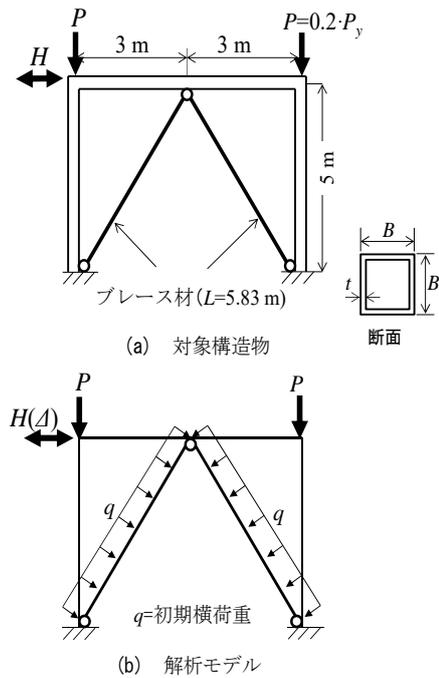


図-A1 ブレース材付きフレーム構造

図-A2(f)は右ブレース材圧縮フランジ中央のひずみの履歴を表す。ここで、 $H_y=1,230$ kN, $\Delta_y=27$ mm は Pushover 解析より求めたフレームの初期降伏時の値である。図-A2(f)を除いた全ての図中には、右方向に水平変位 Δ を増大させたときの Pushover 解析結果(Monotonic)も併記してある。また図中には、イベント番号が記載されており、図-A2(a)~(f)のイベントの対応がとれるようにしてある。図-A2(a)~(f)より次のことが分かる。

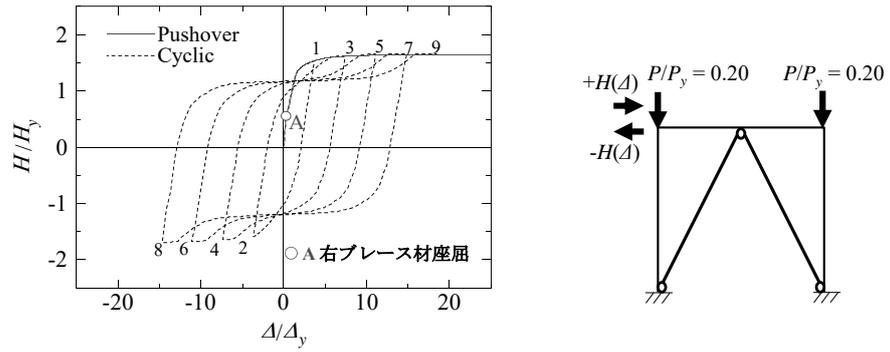
- a) Pushover 解析により、全ての履歴曲線の包絡線がほぼ予測出来る。
- b) 図-A2(b), (c)のブレース材の履歴曲線は、両端単純支持のブレース材単一の履歴曲線と、座屈耐力力の低下挙動を含めほとんど変わらない⁶⁾。このこ

表-A1 部材諸元 (正方形箱形断面) (鋼材: SM490, $\sigma_y=315$ MPa)

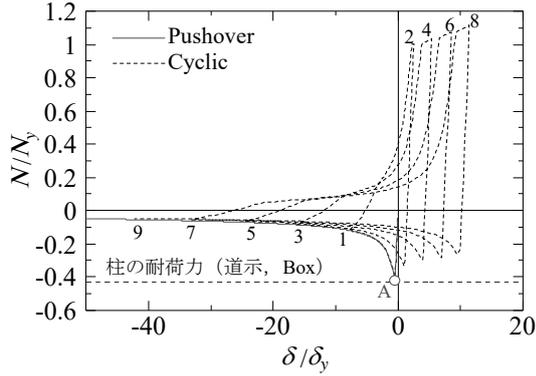
部材	断面 (mm)		L (m)	R	$\bar{\lambda}$	P_y, N_y (kN)	δ_y (mm)	$q=q_{(Box)}$ (N/mm)	$\varepsilon_u/\varepsilon_y$
	幅 B	板厚 t							
柱	500	20	5.0	0.50	0.32	12.1	7.90	-	7.02
はり	500	20	6.0	0.50	0.39	12.1	9.48	-	9.79
ブレース材	150	10	5.83	0.29	1.29	1.76	9,21	2.93	20.0

Note: R=幅厚比パラメータ, $\bar{\lambda}$ =細長比パラメータ, P_y =柱, はりの全断面降伏軸力,

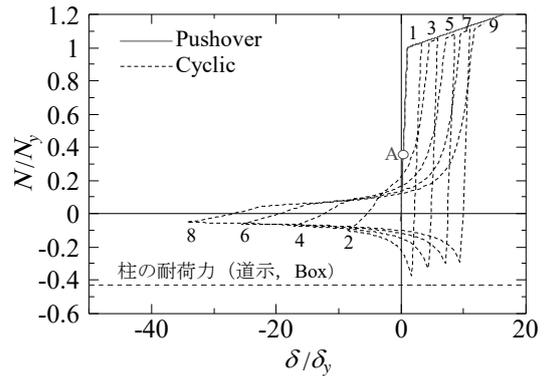
N_y =ブレース材の全断面降伏軸力, δ_y =降伏軸変位, q =初期横荷重, $\varepsilon_u/\varepsilon_y$ =終局圧縮ひずみ^{5),6)}



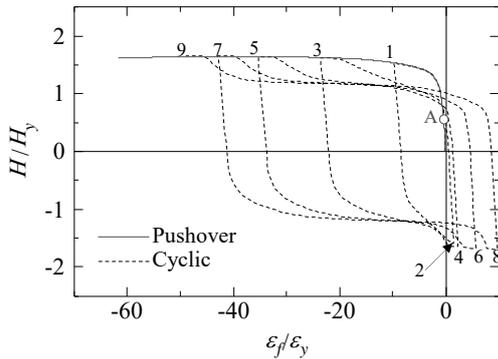
(a) フレームの $H-\Delta$ 履歴曲線



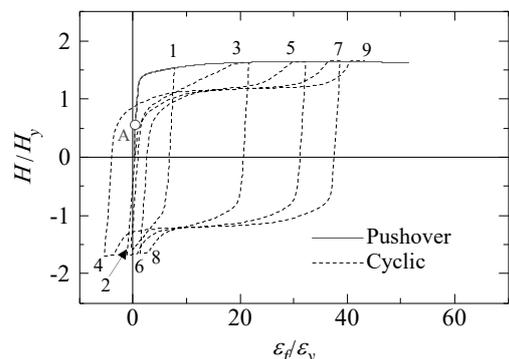
(b) 右ブレース材の $N-\delta$ 履歴曲線



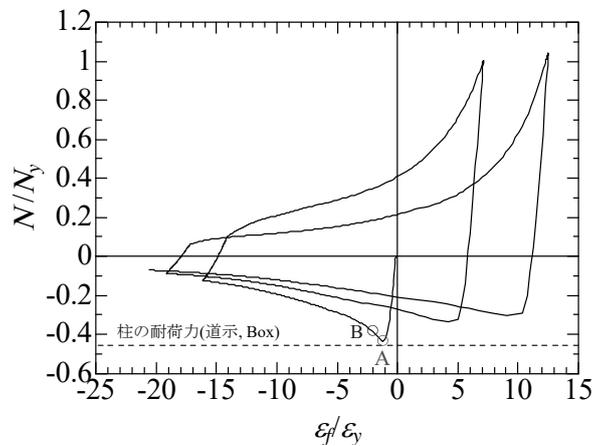
(c) 左ブレース材の $N-\delta$ 履歴曲線



(d) 右柱基部外側フランジひずみ



(e) 左柱基部外側フランジひずみ



(f) 右ブレース材圧縮フランジ中央部ひずみ

図-A2 ブレース材付きフレームの繰り返し弾塑性挙動 ($P/P_y=0.20$)

表-A2 限界状態到達点のまとめ

対象構造		部材の種類	部材健全度	限界状態(表-1)	限界値($\gamma=1.0$)	限界値到達イベント番号	到達順位
(1)フレーム(基部)	右柱	1次部材	2	④修復性	$2.0\epsilon_y$	No. 1 近辺	1
	左柱					No. 1 近辺	2
(2)ブレース材(中央)	右	2次部材	4	②構造安全性	局部座屈 $20.0\epsilon_y$	No. 3 近辺	3
	左					No. 4 近辺	4
(3)構造全体		1次部材	2	⑧構造安全性	95%水平荷重保持	No. 9 以降	5

Note: ②, ④, ⑧は表-1の限界状態の番号

とは, ILLM により, 構造全体の数値解析の中で, ブレース材の精確な履歴挙動が自動的に生成出来るという事実を示唆している.

- c) 構造全体の履歴挙動は次のようにまとめられる. 即ち, 水平変位がイベント 1 までの载荷の途中 A 点で右ブレース材が座屈し (図-A2(a)), 耐力はほぼ $0.1N_y$ 以下に低下する (図-A2(b)). しかし, 左ブレース材はひずみ硬化域に達するため (図-A2(c)), イベント 1 での水平荷重の低下はほとんど見られず, 以降の载荷 2~9 でも同じ事象が繰り返される (図-A2(a)). このことより, 引張および圧縮部材が対となったブレース材付きフレームは, 圧縮部材の座屈が必ずしも構造全体の終局限界に繋がらないことを示している.
- d) 図-A1 の構造は, 上部構造とみなし, 図-A2 の履歴曲線を地震応答解析の結果 (H =水平慣性力), Pushover 解析結果を履歴曲線の包絡線と見なして構造全体の耐震性能を支配する限界状態を推定してみる. 道示⁴⁾では初期降伏あるいは初期座屈を限界状態にしているのので, 図-A2 の A 点が限界点となる. 一方, ひずみ照査法では, (1)フレームは主部材であるので, 部材健全度 2 の修復性限界 $2.0\epsilon_y (< \epsilon_w)$, (2)ブレース材は 2 次部材であるので, 部材健全度 4 の終局圧縮ひずみ $\epsilon_u=20\epsilon_y$ あるいは 5%引張ひずみ, (3)構造全体の水平荷重 H がピーク荷重の 95%保持, の内最も早く照査を満たす点が終局限界点である. (1)は概略イベント 1 点, (2)は概略イベント 3 点, (3)はイベント 9 の範囲内 ($\Delta/\Delta_y < 20.0$) では該当点なし, に対応する. 部分係数 γ を 1.0 とすると, 結局, (1)のフレーム基部の応答圧縮ひずみの修復性限界によって耐震性能が決まり, 終局限界点はイベント 1 近辺で, 構造全体の挙動はまだ安定した領域にある. 表-A2 は以上の知見をまとめたものである.

- e) ブレース材を例えばトラス橋の斜材と見なし, 1 次部材とすると限界値は修復性限界の $2.0\epsilon_y$ である. この点は図-A2(f)より, A 点から軸力 N/N_y がほぼ-0.4 に低下した B 点にある. この点の到達順位は 1 位でこの点が終局限界となる.
- f) ブレース材の低サイクル疲労破断については照査を行っていないが, ブレース材は梁要素でモデル化しており, 軸ひずみ履歴が算定出来るため, それを元に照査が可能であろう. これは今後の研究課題である.

参考文献

- 1) 土木学会：鋼・合成構造標準示方書 [耐震設計編], 丸善, 2008.
- 2) 土木学会：鋼・合成構造標準示方書 [耐震設計編], 丸善, 2018.
- 3) 土木学会：座屈設計ガイドライン[改定第 2 版], pp.286-287, 2005.
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説, V耐震設計編, 丸善, 2017.
- 5) 宇佐美勉, 馬越一也, 齊藤直也, 野中哲也：鋼橋の耐震解析におけるブレース材のモデル化, 構造工学論文集, Vol.56A, pp.381-392, 2010.3.
- 6) 宇佐美勉, 鈴木元哉, 葛漢彬：ブレース材付きフレーム構造物の耐震解析における初期横荷重法(ILLM)の適用性, 構造工学論文集, Vol.65A, pp.200-213, 2019.3.
- 7) 宇佐美勉：小野潔ら著「ファイバーモデルを用いた補剛矩形断面鋼部材の耐震性能照査法に関する一提案(2007.6)」への討議, 橋梁と基礎, Vol.42, No.3, pp.297-311, 2008.3.