構造物の累積損傷抑制設計に関する研究

STUDY ON DESIGN FOR CONTROL OF CUMULATIVE DAMAGE IN STRUCTURES

内田 保博*

Yasuhiro UCHIDA

A method of design is presented for the purpose of controlling the cumulative damage such as the strength deterioration and the accumulation of deformation in structures subjected to repeated loading. In the presented method of design, the limitation of the constant force acting on the beam-column and the beam is incorporated into the current method of design, and its limiting values can be derived from the critical force for convergence of the accumulation of deformation proposed by the author. The concept of design also presented is that the separation of a portion subjected to the constant force in a structure from that subjected to repeated loading is effective for preventing an increase in accumulation of the deformation. Examples of design for bracing structures, reinforced concrete walls and the steel beam-columns give a concrete form for the concept of design. The validity of the presented method of design and its examples are discussed with analytical results of beam-columns and truss structures.

Keywords: cumulative damage, constant force, convergence of accumulation, beam-column, truss structure, elastic-plastic analysis, method of design

累積損傷、一定外力、累積の収束、柱、トラス構造、弾塑性解析、設計法

1. 序

構造物が大地震時及び暴風時におけるように大きな繰返し外力を受けるとき、耐力低下を生じることが予想される。そこで大きな繰返し外力に対し安全な構造物を設計するためには、繰返し外力による耐力低下及び変形の累積等の累積損傷を抑制する必要がある。構造物が繰返し外力を受けるとき損傷の累積が生じ、累積の量がある限界に達すると構造物は崩壊する。鋼構造、鉄筋コンクリート構造、鉄骨鉄筋コンクリート構造の累積損傷及び崩壊過程について多くの研究がなされてきたが、繰返し外力を受ける構造物及び部材の安定性に関しては、次の研究が挙げられる。1)高梨・宇田川¹⁾、2)、松井⁷⁾、平石⁸⁾は、繰返し荷重を受ける鉄骨はり、鉄骨鉄筋コンクリート柱及び鉄筋コンクリート柱の履歴曲線が定常化する安定限界について調べている。2)上谷³⁾、4)は、定振幅繰返し荷重を受ける構造物及び部材の変形累積経路に分岐現象が生じる限界としての対称限界、及び非対称定常状態経路の限界としての定常状態限界を示し

ている。3)近藤⁵⁾、6)は、繰返し変動荷重を受ける構造物のShake Down後の応答領域と荷重の変動領域の関係を組織的に追跡しうる解析手法の開発をしている。

繰返し荷重を受ける構造物及び部材の性能を向上させる設計については、各種構造において個々に様々な提案がなされているが、繰返し荷重を受ける構造物及び部材の損傷に関する理論に基づいた設計法については、加藤、秋山⁹⁾、10)及び山田、河村¹¹⁾により体系的な研究が進められてきた。

構造物には自重や積載荷重等の一定鉛直力が作用しており、これにより構造物の柱及びはりに一定軸力や一定曲げモーメントが作用する。本研究ではこれらの力を構造物又は部材に作用する一定外力と定義する。構造物が繰返し水平力等の繰返し外力及び一定外力を受けるとき、一定外力に対応した変形に累積現象が生じる。ここに一定外力とは作用させた力を意味し、繰返し外力とは、変位又は変形を作用させるときの力、すなわち変位制御で与えた力を意味している。なお繰返し外力が荷重

* 鹿児島大学工学部建築学科 助教授・工博

Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Kagoshima Univ., Dr. Eng.

制御で与えられれば、一定外力のみでなく繰返し外力に対応した変形にも累積現象が生じる。一定外力の大きさは変形累積挙動に大きな影響を与えるが、上記の研究においてこの観点から累積損傷は十分には調べられておらず、また累積損傷を抑制する構造及び設計法についても示されていない。

筆者らは、従来下記の1)～4)の事項について調べてきた。

1) 局部座屈により耐力低下を生じる角形鋼管柱の耐力低下挙動及び変形の累積挙動が収束するか発散するかは、一定軸力の大きさに依存することを調べた^{12)～13)}。またさらにこれを一般化し、定変位振幅繰返し外力を受ける構造物に耐力低下が生じるか否かに拘らず、一定外力の大きさに応じて、変形の累積に収束・発散現象が存在することを仮説として提案した¹⁵⁾。ここに変形累積の収束とは、変形が同じ累積経路上で挙動し定常化することを表し、変形累積の発散とは、変形累積が収束することなく進行し続けることを意味している。

2) 変形の累積現象と耐力低下挙動は密接に関係することを明かにし、この仮説に基づき構造物の耐震安全性確保及び部材の靱性確保を目的とした一定外力比制限が可能であることを示した。ここに一定外力比とは、一定外力と構造物の規準耐力の比として定義される。

3) 定変位振幅繰返し荷重を受け耐力低下を生じる鋼柱、鉄骨鉄筋コンクリート柱、トラス構造の変形累積が収束する限界時及び崩壊限界時の一定軸力や一定鉛直力を求め、各々を一定外力比制限の下限値及び上限値とすることができるとを示し、収束限界時及び崩壊限界時の一定外力を用いて繰返し加力時の変形累積や耐力低下挙動を予測することが可能であることを明らかにした^{14)～17)}。

4) 収束限界軸力及び崩壊限界軸力を理論的に導きその一般的特性を示すとともに¹⁸⁾、2次仕事を用いた変形累積の安定性の判定方法を示した¹⁹⁾。

本研究では今までに得られた知見をもとに、耐力低下及び変形累積等の累積損傷を抑制するための構造物の設計法について提案するとともに設計例を示す。また計算により得られたブレース構造及び柱のモデルの一定外力比制限値及び変形の累積挙動に照らして設計法及び設計例の妥当性を検討する。

2. 累積損傷を抑制する設計

2.1 設計手順

建物の構造設計は、通常図-1の①～③の手順で行われる。従来筆者らは、構造物や部材の耐力低下及び変形累積を抑制するために、自重や積載荷重などの常時荷重により生じる柱軸力比及びはりの鉛直力と構造物の基準耐力に対する比などの一定外力比が制限値以下になるよう

図-1 構造設計手順

図-2 累積損傷抑制設計に用いる収束限界外力曲線

に設計されるべきことを提案してきた^{12)~17)}。本論文ではこの提案に基づきさらに、図-1の構造計算の流れ図の中に、新たに④の設計手順を組み込むことを提案する。構造計算の流れ図の中で、④の判定条件を満足しなければ、①又は③へ戻り④の判定条件を満足するまで設計をやり直すことになる。①又は③においては、繰返し加力時の耐力低下及び変形の累積を抑えるために又は塑性ヒンジ等の靱性確保を目的とし、後述の設計事項等を考慮して構造形態、構造種別の組合せ、断面設計における要素材料の選択及び配置の工夫をする。ここに④における判定の規準値として用いられる一定外力比の制限値は、構造物の寸法、材料の機械的性質等により決定され、構造物の設計が一応終了する③の最後で得られる量であり、反復計算過程において一定外力比とともに変化する量である。設計で用いられるべき一定外力比の制限値を提案するまでに未だ至っていないが、定変位振幅繰返し外力の下で得られる収束限界外力比を一定外力比制限の下限值及び崩壊限界外力比を上限值として良いことを示している¹⁴⁾。

2.2 収束限界及び崩壊限界外力曲線

収束限界外力及び崩壊限界外力を図-2(b)に示す。図-2(a)に示す柱や構造物に一定外力 p 及び定変位振幅繰返し水平力 h が作用するとき、一定外力に対応する変形の累積がある変位 δ_c で収束する限界時の一定外力 p_c を収束限界外力と定義する。すなわち p が p_c 以下では変形の累積は δ_c で収束することが可能であるが、 p_c を超えた値では変形累積は δ_c で収束することはない。同様に累積変位が δ_c に達したとき崩壊する限界時の一定外力 p_b を崩壊限界外力と定義する。図中のAで示される領域では変形の累積は収束するが、Bの領域では変形の累積は増大する。Cは崩壊領域である。収束限界外力及び崩壊限界外力は、これに対応する変形及び曲率振幅等のパラメータを用いて曲線で表され、これを収束限界外力曲線及び崩壊限界外力曲線と称する¹⁸⁾。図-2(c)中の曲面は、一定軸力と定曲率振幅繰返し曲げを受ける柱のひずみの累積が、軸力 p 、重心ひずみ e_c 及び曲率振幅 ϕ_c の空間において収束する領域を示す。任意の ϕ_c の位置での e_c 軸方向の横断面である p - e_c 関係をX方向から見た図が収束限界軸力曲線である。またY方向から収束する領域を見たとき、収束限界軸力 p の最大値の点を結んだ曲線として p - ϕ_c 曲線を表すことができる。ただし p - e_c 関係が常に正勾配で上昇するA領域では p - ϕ_c 曲線は存在しない。

1 方向加力時の骨組の水平荷重 h -変位 δ 関係は、図-2(d)の実線で表される。繰返し加力時と同様、A領域は力の釣合いが成立する領域であり骨組は安定であるが、B領域では力の釣合いが成立せず変形が動的に増大する。骨組の耐力に基づく設計では、図-2(d)に示す荷重-変形関係が基礎になるが、骨組の変形累積、耐力低下等

の累積損傷抑制を目的とした設計では、図-2(b)に示す収束限界外力曲線を基礎として良いと考えられる。

2.3 一定外力比制限と定変位振幅

一定外力の収束限界及び制限値は、定変位振幅(図-3(a)参照)の繰返し荷重の下で導かれる。図-3中の δ_h は与えられる繰返し変位、cycleは繰返し回数である。図-3(b)、(c)に示す変位の繰返しパターンを伴う荷重を構造物が受けるとき、繰返しパターンの違いにより収束限界は変化するが、これらの収束限界値は各定変位振幅に対する限界値から概ね予測できる。また地震力が構造物に作用するとき、数サイクルの大きな非定常状態の力が問題となり、定常状態の繰返し外力の下で数十サイクル後に履歴曲線が収束するか否かの問題と耐震性能評価の問題と直接結びつかないように思えるが、材料試験等で行われているように明確な一定の評価規準を設け、規則性がある負荷を与えたときの耐震性能は、真の耐震性能をある程度表しているし、性能評価をする上での目安になると考えられる。また地震時の耐力低下や塑性変形は、一般に主要な数サイクルの繰返しにより大きく生じるが、収束・崩壊限界外力曲線からこれらの挙動は概ね予測できる。

2.4 一定外力比制限及び定変位振幅制限

本研究では、図-4(a)に示すように定変位振幅 δ_{hr} の繰返し外力を与えたときの一定外力比 p の制限を行ない、変位レベル一定下での規準を用いる方法を提案する。図-4中の p_{cr} 、 δ_{cr} は各々 p 及び δ_{hr} の制限値である。

図-3 変位履歴

図-4 一定外力比制限及び定変位振幅制限

一方図-4(b)に示すように一定外力比の大きさを不変とする外力レベル一定下で、耐力低下が顕著となる限界点又は変形累積が急増する安定限界点における変位振幅 δ_{cr} が制限値以下になるように設計する方法も考えられる。しかし変位レベル一定下で一定外力比制限を行う方法の方が、フィードバックし断面サイズ等を変更して一定外力比制限値を変えることにより、一定外力比の判定条件を満足するように設計することが容易であり、設計においては利便性を有していると考えられる。

定変位振幅繰返し加力の下で一定外力比制限を行うとき、定変位振幅の大きさの設定には、地震力等の繰返し外力を受ける構造物の応答評価の問題と関わっている。従って一定外力比制限を行うとき、例えば使用限界時及び終局限界時の定変位振幅の大きさを個別に定めたり、許容できる累積変形量を設定することが必要である。

2.5 累積損傷抑制のための設計事項

構造計画及び部材設計において、耐力低下及び変形の累積を抑制するために考慮しなければならない設計事項として以下の事項が考えられる。

(1) 構造物の収束限界外力及び崩壊限界外力が大きくなるように、部材及び断面内要素を配置するとともに力学的特性の選択をする。

(2) 初期外力の導入

(3) 変形累積収束時の破壊抑制のための一定外力比の設定

(1)の事項の詳細は3、(2)及び(3)の事項の詳細は4.において述べられる。

3. 累積損傷を抑制するための部材及び断面内要素の配置及び力学的特性の選択

3.1 設計理念

構造物の耐力低下及び変形の累積を抑えるためには、『構造物又は部材に一定外力と繰返し外力が作用するとき、一定外力に主に抵抗する構造部分と主に繰返し外力に抵抗する構造部分とを分離して設計する』必要があると考えられる。これは、もし一定外力と繰返し外力に抵抗する構造部分が同一であれば、構造部分に耐力低下が生じたとき、一定外力を保持するために変形の累積が生じ、耐力低下をさらに引き起こし易いからである。「一定外力に主に抵抗する構造部分の耐力を大きくし、耐力低下が生じないようにする」ことも重要である。もし一定外力に主に抵抗する部分の耐力低下が大きいたことが予想されるとき、繰返し外力を主に受ける構造部分の耐力を一定外力を主に受ける部分に比べて相対的に小さくする必要がある。これは、繰返し外力を主に負担する構造部分の耐力を小さくすれば、変形の累積が

生じないと仮定したとき繰返し加力に伴い発生する、繰返し外力を受ける部分の不釣り合い力を減少させることができるので、この不釣り合い力を解消させる役目を持つ一定外力を主に受ける部分の負担を小さくすることができるためである。

3.2 設計例

3.1の設計理念を形に表した例を図-5(a)~(f)に示す。柱及びはり材が各々軸力、曲げ、せん断全てに抵抗する剛節骨組ではなく、主に一定鉛直力に抵抗する部分と水

図-5 構造物の累積損傷抑制設計例

図-6 部材断面の累積損傷抑制設計例

平力に抵抗する部分とを切り離した設計例を示している。図-5(a)~(d)において、一層スパン構造の例及び同(e),(f)に多層多スパン構造の例を示している。図中 p は一定外力を表し、 h は繰返し外力を表す。また一定軸力と繰返し曲げが作用する部材断面についても、図-6に示すように一定外力である軸力 p のみ負担する芯部分と繰返し外力である曲げモーメント m を負担する周囲の部分に分けて断面設計を行うと、重心ひずみの累積が小さいことが予想される。図-6(a)は、角形鋼管の中に芯鉄骨を入れた柱断面である。この場合断面中央に面積が集中しかつ強度が高い芯鉄骨を入れておけば、角形鋼管の幅厚比が大きくても、繰返し外力による耐力低下の進行は遅いと予想される。また図-6(c)に示す鉄骨断面のウェブの交点の鉄骨量を多くして、ここで軸力を主に抵抗させるときも同様の効果がある。図-6(d)に示すようにSRC断面内に鉄骨を配置すると、一定軸力及び一定曲げ並びに直交軸回りに繰返し曲げを受けるときの累積損傷抑制に効果があると考えられる¹⁰⁾。なお一定外力を主に負担する要素のサイズは、次に述べるように、変形累積の抑制や最大耐力を考慮して適切に定めなければならない。

3.3 柱の累積損傷抑制設計法の検討

次に3.2で述べた設計法の妥当性について明らかにするため、図-7に示す鋼柱3要素断面モデルが、一定軸力と x 軸回り定曲率振幅繰返し曲げを受けるとき、耐力低下及び変形の累積を抑制する条件を導く。仮定した各要素の軸方向応力度-ひずみ度関係を図-8に示す。圧縮側の符号を負とし、局部座屈による鋼材の耐力低下を巨視的にとらえて、応力度-ひずみ度関係を劣化型と仮定した。応力 s 、ひずみ e は降伏時の量で無次元化されている。図-9には、降伏時の量で無次元化された x 軸回り曲率 ϕ の履歴を示す。

文献17)において、変形累積収束限界時の一定外力すなわち収束限界外力に関する定理を下記の通り提案している。

『収束変位 $\{\delta_i\}$ を有する収束限界状態から変位増分 $\{\Delta\delta_i\}$ を比例的に与えながら、定振幅繰返し変位を構造体に与えたときに得られる $\{\delta_i\} + \{\Delta\delta_i\}$ に対応する外力の最小値は収束限界外力と一致し、 $\{\delta_i\} + \{\Delta\delta_i\}$ の最大値は、累積変位の収束値の最大値である。』

この定理によると、図-7に示す3要素断面モデルの収束限界軸力は、ある値の一定重心ひずみを与えて定曲率振幅繰返し曲げを加えたとき、変動する軸力 p の最小値として与えられる。本計算例では、曲率反転点において p は最小値をとるので、収束限界軸力 p 及び収束時曲げモーメント m は(1)式で与えられる。変形累積が収束するとき、1,3質点の応力-ひずみ関係上の履歴を図-8に太線

で示し、ある曲率反転点における質点1,3の応力 s_1, s_3 を同図中に記入している。なお s_1, s_3 に対応するひずみ e_1, e_3 は、各々 $e_0 - d_1 \phi$ 、 $e_0 + d_3 \phi$ で与えられる。(1)式における p は降伏時の量で無次元化された軸力であり、曲げモーメント m は $A \cdot d \cdot \sigma_y$ で無次元化されている。ここに A は全断面積、 d は1,3要素と断面の重心間距離、 σ_y は降伏応力である。

$$p = \sum_{i=1}^3 a_i s_i, \quad m = \sum_{i=1}^3 a_i \cdot d_i \cdot s_i \quad \text{----- (1)}$$

図-7 3要素モデル

図-8 応力度-ひずみ度関係

図-9 曲率履歴

図-10 耐震設計と収束限界軸力関係

図-11 繰返し载荷時の変形能力の評価

$$s_1 = \mu_{c1}(e_o - 2d_1\phi_r + 1 + \alpha) - 1$$

$$s_3 = \mu_{c3}e_o + \alpha$$

$$s_2 = \begin{cases} e_o & (e_o \geq -1) \\ \mu_{c2}(e_o + 1) - 1 & (e_o < -1) \end{cases}$$

ここに、 a_i = i 要素の断面積、 d_i = i 要素の重心位置の座標、 $d_1=d_3=d=1$ 、 $d_2=0$

μ_{c1} 、 μ_{t1} = i 要素の圧縮側及び引張り側塑性域の勾配、 s_i = i 要素の応力、 e_o =重心ひずみ

(1)式から得られた収束限界軸力曲線及び累積収束時の曲げモーメント-重心ひずみ関係の計算例a, b, cを図-10に示す。 e_o は、図-7に示す重心ひずみである。応力度-ひずみ度関係の圧縮側塑性域の勾配 $\mu_c = -0.02$ 及び引張り側塑性域の勾配 $\mu_t = 0.02$ とし、全断面積で無次元化された1、3要素の断面積 $a_1 = a_3 = 0.4$ 、2要素の断面積 $a_2 = 0.2$ とした。また曲線aのケースでは、引張り側降伏応力 $\alpha = 0.5$ 、曲線bのケースでは $\alpha = 1.0$ 、曲線cのケースでは $\alpha = 1.0$ 、2要素の $\mu_c = 0.02$ とした。 α の値は通常1.0であるが、後述するスライダー等により α の値が調整できることを前提に、 $\alpha = 0.5$ についても検討した。

曲線aのケースでは、収束限界軸力は大きい、収束時の曲げ耐力は小さい。一方曲線bのケースでは、収束限界軸力比の大きさは全般に小さいが、収束時の曲げ耐力は曲線aのケースに比べ大きい。a, b何れのケースも各々得失があり、耐力低下、変形累積、曲げ耐力の観点からa, b何れのケースの耐震性能が優れているかを総合的に判断する問題は、今後の課題としたい。曲線cのケースでは、収束限界軸力曲線は正勾配を持っており、曲線bのケースと比べると曲げ耐力は同じであるが変形の累積が小さいことが分かり、明らかにbのケースに比べ耐震性能は優れている。これら3ケースを耐震設計の視点から分類すると以下の様になる。

- 1)変形能力が要求されない部材、構造物に対してはbのタイプで設計すればよい。
- 2)靱性がなく十分な変形能力が期待できないケースで累積損傷を生じさせたくないときは、耐力を大きくとるようにしてaのタイプで設計すればよい。
- 3)靱性設計が可能なときは、cのタイプで設計ができる。

なお上記の計算例では応力-ひずみ関係をBi-Linear型としたため収束限界軸力曲線もBi-linear型となっているが、一般に収束限界軸力曲線は図-11の様に表される。収束限界軸力低下時の重心ひずみ e_{op} 及び最大収束限界軸力に対応するひずみ e_o から計算される $\mu = e_{op}/e_o$ は、繰返し力を受けたときの柱の変形能力を表しており、一方向単調加力時の塑性率に相当するパラメータである。

3.4 トラス構造の累積損傷抑制設計の検討

次に定変位振幅 δ_{hr} (図-13参照)の繰返し水平力を受けるブレース及び床板を有する1層1スパンの構造物 (図-12参照)を例にとり、図-5(a)~(d)において示される骨組の累積損傷抑制設計法の妥当性について調べる。床板の重量は w 、 δ_h 及び δ_v は床板重心の水平変位及び鉛直方向変位であり、 θ_i は部材の傾き、 ℓ は柱材の長さである。柱材の部材番号 i は1、4、5であり、ブレースの部材番号は2、3である。各部材の両端はピン接合されており、床板は剛とする。柱材及びブレースの材料は鋼であり、それらの軸方向応力度-ひずみ度関係を図-14に示す。ブレース材の計算においては、曲げ座屈による耐力低下を考慮して劣化形の応力度-ひずみ度関係を仮定した。図中、 s_i 、 e_i は各部材の降伏時の量で基準化された無次元応力、無次元ひずみである。

水平力が構造物の床板に加わるとき、水平変位及び鉛直変位とともに構造物全体のモーメントが釣合う様に、一般に床板の回転が生じる。しかし、ここでは構造物をせん断形にモデル化しており、床板には水平変位と鉛直方向変位のみが生じるものとする。なお、引張り側の力及び変位の符号を正とする。

図-12のモデルの鉛直方向及び水平方向の力の釣合式は下記の通りとなる。

1)鉛直方向

$$w = \sum_{i=1}^5 s_i(e_i) \cdot A_i \cdot \sigma_{yi} \cdot \sin \theta_i / W_y \quad \text{-----(2)}$$

2)水平方向

$$h = \sum_{i=1}^5 s_i(e_i) \cdot A_i \cdot \sigma_{yi} \cdot \cos \theta_i / W_y \quad \text{-----(3)}$$

図-12 トラス構造

図-13 変位履歴

(a)ブレース

(b)柱

図-14 応力度-ひずみ度関係

ここに $W_y = \sum A_i \sigma_{yi} \sin \theta_i$ 、 i =部材番号

$$e_i = (\delta_h \cos \theta_i + \delta_v \sin \theta_i) \cdot \sin \theta_i / (\ell \cdot \varepsilon_{yi})$$

A_i = 各部材の断面積

σ_{yi} = " 降伏応力

ε_{yi} = " 降伏ひずみ

$w = W_y$ で無次元化された床板荷重

$h =$ " 水平荷重

δ_v の累積が収束したとき、左右各反転点において δ_h が δ_{hr} 、 $-\delta_{hr}$ であるときの各部材の応力 s_i を図-15に示す。部材番号 $i=2, 3$ のブレースのひずみ e_i は、収束時各々 $\delta_v \cdot \sin \theta_i / (\ell \cdot \varepsilon_{yi})$ を中心にして $\delta_{hr} \cdot \cos \theta_i \cdot \sin \theta_i / (\ell \cdot \varepsilon_{yi})$ の振幅で変動する。また $i=1, 4, 5$ の柱材のひずみ e_i は $\delta_v / (\ell \cdot \varepsilon_{yi})$ の値をとる。累積収束時 $\delta_h > 0$ の反転点における鉛直方向の力の釣合式である(2)式から、累積の収束、発散領域を表す w 、 δ_h / ℓ 、 δ_v / ℓ の関係式が(4)式として得られる。ここに $s_i (i=1, 4, 5) = \mu_2(e_i + 1) - 1$ 、 $s_2 = \mu_2(e_2 - \bar{e}_2) + \bar{s}_2$ 、 $s_3 = \mu_2(e_3 - \bar{e}_3) + \bar{s}_3$ である。また、 δ_v の累積が収束したときのブレースのひずみ振幅は $\delta_{hr} \cdot \cos \theta_i \cdot \sin \theta_i / (\ell \cdot \varepsilon_{yi}) \geq 1$ とし、柱材の変位の累積は弾性域で収束しないものとする。各部材の ε_{yi} の値は同一とし ε_y とする。

$$C_1^j \cdot w + C_2^j \cdot \delta_h / \ell + C_3^j \cdot \delta_v / \ell + C_4^j < 0 : \text{発散} \\ (j=1, 2) \quad \geq 0 : \text{収束}$$

----- (4)

$j=1$ のとき $\delta_h = \delta_{hr}$

$j=2$ " $\delta_h = -\delta_{hr}$

$$C_1^1 = -(A_1 + A_4 + A_5) - A_2 \cdot \sin \theta_2 - A_3 \cdot \sin \theta_3$$

$$C_2^1 = (A_2 \cdot \mu_2 \cdot \cos \theta_2 \cdot \sin^2 \theta_2 + A_3 \cdot \mu_1 \cdot \cos \theta_3 \cdot \sin^2 \theta_3) / \varepsilon_y$$

$$C_3^1 = \mu_3 \cdot (A_1 + A_2 + A_5) / \varepsilon_y + (A_2 \cdot \mu_2 \cdot \sin^3 \theta_2 + A_3 \cdot \mu_1 \cdot \sin^3 \theta_3) / \varepsilon_y$$

$$C_4^1 = (A_1 + A_4 + A_5) \cdot (\mu_3 - 1) + A_2 \cdot \sin \theta_2 \cdot (\bar{s}_2 - \mu_2 \cdot \bar{e}_2) + A_3 \cdot \sin \theta_3 \cdot (\bar{s}_3 - \mu_1 \cdot \bar{e}_3)$$

$C_i^2 (i=1 \sim 4)$ は、 C_i^1 の式の中の $\bar{s}_n$ 、 $\bar{e}_n$ 、 μ_n ($n=1, 2$) を $\bar{s}_m$ 、 $\bar{e}_m$ 、 μ_m に置き換えることにより得ることができる ($n=1$ のとき $m=2$ 、 $n=2$ のとき $m=1$)。

ここに $\bar{s}_1$ 、 $\bar{e}_1$ 、 $\bar{s}_2$ 、 $\bar{e}_2$ = 図-14(a)に示す、ブレースの無次元降伏応力度及びひずみ度

μ_1 、 μ_2 = 図-14(a)に示すブレースの応力度-ひずみ度関係の塑性域の勾配

μ_3 = 図-14(b)に示す柱の応力度-ひずみ度関係の塑性域の勾配

(4)式を用いて、累積の収束限界時の鉛直力として定義される収束限界鉛直力を計算により得ることができる。計算に用いたパラメータは以下の通りである。

$$\{A_i\} = \{5, 10, 10, 5, 5\}, \{5, 10, 15, 5, 5\} \quad (\text{cm}^2)$$

$$\{\theta_i\} = \{90, 135, 45, 90, 90\} \quad (\text{度})$$

$$\{\sigma_{yi}\} = \{2.4, \text{"}, \text{"}, \text{"}, \text{"}\} \quad (\text{t/cm}^2)$$

$$\{\varepsilon_{yi}\} = \{0.11, \text{"}, \text{"}, \text{"}, \text{"}\} \quad (\%)$$

$$\mu_1 = 0.02, \mu_2 = -0.05, \bar{s}_1 = 1, \bar{e}_1 = 1, \bar{s}_2 = -1, \bar{e}_2 = -1, \delta_{hr} / \ell = 0.02$$

$$1) \mu_3 = 0, A_3 = 10 \text{cm}^2$$

$$2) \mu_3 = 0.02, A_3 = 15 \text{cm}^2$$

また w 、 δ_h / ℓ を与え (2)、(3) 式を用いて反復法による数値計算により逐次 h 、 δ_v / ℓ を求め、得られた変形の累積挙動と収束限界鉛直力曲線との比較・検討を行った。

図-15 曲率反転点における応力状態

図-16 収束限界鉛直力曲線

理論計算により得られた収束限界鉛直力曲線である $w \cdot \delta_v / l$ 関係を実線の曲線で図-16に示す。図-16(b)には、部材番号2、3のブレース断面が異なる場合の $\delta_h > 0$ 、 $\delta_h < 0$ における曲線を示すが、このとき収束限界鉛直力曲線は提案した定理^{16)~18)}に基づき、 w の値が小さい $\delta_h > 0$ の曲線となる。

(4) 式で表される収束限界鉛直力曲線の勾配が正のとき、 w が一定値の下では鉛直変位の累積は必ず収束し構造は安定である。しかし、勾配が負のときは、変位の累積がConvergentと記された領域を越えた領域で生じると構造は不安定となり、変位の累積は発散する。収束限界鉛直力曲線の勾配 C_3^j / C_1^j の符号は、 C_1^j の符号が本計算例では常に負であるから、 C_3^j の符号で決まる。 C_3^j の符号が正のとき C_3^j / C_1^j の符号は負となり、曲線の勾配の符号は正となって変位の累積は必ず収束するが、 C_3^j の符号が負のときは発散する場合がある。

(4) 式から、最大耐力後の変形の累積を抑え耐力低下を小さくするためには、収束限界曲線の勾配を正側に大きくすれば良く、 C_3^j の値を大きくすればよいことが分かる。そのためには A_1 、 A_3 、 A_4 、 A_5 、 μ_1 、 μ_3 の値を大きくとり、かつ A_2 、 μ_2 の値を小さくすればよい。しかし安定領域を増大するためには C_2^j 、 C_4^j を小さくする必要があり、このときは A_1 、 A_2 、 A_4 、 A_5 、 μ_2 、 μ_3 の値を大きくかつ A_3 、 μ_1 の値を小さくすればよい。従って、安定領域を大きくしてかつ耐力低下量を小さくするためには、圧縮材の最大耐力、塑性域の勾配を大きくするとともに、引張り力加力時及び圧縮力加力時の耐力のバランスを考慮して、ブレースの断面を決定する必要がある。

図-16には、数値計算から得られた床板の鉛直方向変位の累積挙動を破線で示す。図中、○及び●は、各々変形の累積が収束及び発散することを表している。理論計算から得られた収束限界と数値計算から得られた弾塑性挙動は良く対応していることが分かる。 $\mu_3 > 0$ のとき、収束限界鉛直力曲線は正勾配であり、構造物の耐力低下や変位の累積は収束し易い(図16(b)参照)。なおここでは両端ピンの部材からなる単純な構造物のモデルを取り上げたが、一般のトラス構造物についても同様の結果が得られた¹⁷⁾。

3.5 骨組の累積損傷抑制設計

次に図-17に示す骨組を例にとり、骨組の収束限界外力及び崩壊限界外力が大きくなるように、適切な構造特性をもつ部材の構造設計について考えてみる。『一定外力に主に抵抗する部分の耐力を大きくして耐力低下が生じない』様に設計すれば良いが、この例では、はりは一一定鉛直力により生じる曲げを負担し柱は一一定軸力を負担している。従ってはり及び柱がともに一定外力を負担しているので一概に累積損傷を抑制する設計法を述べるこ

とは難しく、骨組全体の収束限界外力曲線に基づき一定鉛直力比を制限する必要がある。ただし、骨組全体の収束限界外力及び崩壊限界外力の計算が困難であるときは、柱及びはりを取り出して、柱は軸力一定の条件、はりは鉛直力一定の条件の下で収束限界外力及び崩壊限界外力が大きくなるように柱及びはり部材を設計すれば良いと考えられる。文献20)では、繰返し水平力及びはりに一定鉛直力を受ける骨組の塑性ヒンジ解析を行ない、収束限界鉛直力は、骨組のはりを単純ばりと仮定したとき、はりの鉛直力載荷点に塑性ヒンジを形成してはりが崩壊するときの一一定鉛直力であることを示しており、骨組の収束限界時の一定鉛直力を比較的簡単に予測できることを提示している。なお本論文で提案した累積損傷を抑制するための設計法は、構造材料を適材適所に用いる合成構造及び混合構造に適していると考えられる。

3.6 構造特性の制御による設計

収束限界外力及び崩壊限界外力が大きくなるように適切な荷重-変形関係、応力度-ひずみ度関係を有する部材及び断面を選択することにより、変形の累積を抑えることができる。図-7のモデルが圧縮力を受けているとき、図-18の応力度-ひずみ度関係において引張り側の降伏応力 α の値は小さく、 μ_t の値が大きい程また μ_c (< 0) の大きさが小さい程、耐力低下及び変形の累積は小さく、累積は早く収束する¹³⁾。しかしこのとき、最大耐力は小さくなるので、最大耐力の大きさと耐力低下の大きさのバランスを考慮して、適切な μ_t 、 μ_c 及び α の設定が必要である。もし累積損傷が小さくなるように、荷重-変形関係における引張り側降伏耐力 α 及び引張り側塑性域剛性 μ_t の値が調整されたスライダが製作可能であれば、図-19(a),(b)に示す構造の累積損傷は小さいであろう。図-19(b)に示す骨組では、図-19(a)のはりと同様、繰返し水平力を受けて圧縮側柱の塑性化が生じると、鉛直力を支持するため骨組の柱の鉛直方向変形の累積が生じる。しかしスライダを用いて引張り側柱の引張り力を制御することにより、鉛直方向変形の累積を制御できると考えられる。また所定の荷重-変位関係を持つように機械的に調整されたヒンジ(メカニカルヒンジと呼称する)が製作可能であれば、自由に累積損

図-17 骨組の累積損傷抑制設計

図-18 応力度-ひずみ度関係

傷を制御することが可能である。図-19(c),(d)は、メカニカルヒンジを取り付けた構造の一例である。

4. 初期外力による変形累積の制御及び変形累積収束時の破壊の制御

4.1 初期張力の導入による累積損傷抑制

耐力低下及び変形累積を抑制する方法として、2.において示したように初期外力を導入する方法も挙げられる。一定外力及び繰返し外力を受ける構造物の収束限界外力曲線が与えられたとき一定外力が p_0 であれば(図-20(a)参照)、これは収束限界外力曲線の最大値を超えているので構造物の変形累積は発散する。しかしこのとき、図-20(b)に一例として示す方法などにより初期張力 p_0 を導入することにより、変形累積を収束させることができ、また一定外力 p_0 と収束限界外力曲線から必要とされる初期張力の大きさを決定できる。

4.2 亀裂発生抑制

耐力低下及び変形累積の問題と関連して、鋼構造では2.で挙げた亀裂発生の問題がある。一例として図-21に一定軸力と定曲率振幅繰返し曲げを受ける角形鋼管柱の収束限界軸力曲線の模式図を示す。一定軸力が p_0 のとき、破線で表される重心ひずみの累積が収束限界軸力曲線に近づくとき、↓印の箇所では局部座屈発生部分に亀裂が発生する¹⁴⁾。ただし繰返し変位の振幅の大きさが疲労限度より小さいとき亀裂は発生しないことが予想されるが、通常の低サイクル疲労の問題では、疲労限度を超えた変位振幅を問題にするので、変形の累積が収束に向かい繰返し回数が多くなると亀裂は発生すると考えられる。

塑性域における繰返し加力により入力されるエネルギーは、変形の累積が進行中では微視的にみると結晶等の材料構成要素の内部に蓄積されるが、変形の累積が収束に向かい蓄積エネルギーがある値に達したとき破断が生じると考えられる。この破断現象は鋼材では亀裂となって現れ、鉄筋コンクリート部材ではせん断補強筋の破断⁸⁾となり出現すると予想される。図-21において一定軸力の値が、収束限界軸力曲線より若干大きい軸力 p_0 になるように設計すれば、又は収束限界軸力曲線的位置を下げるように設計すれば、変形の累積は収束しないが累積の割合は小さくかつ亀裂の発生を防ぐことができる。

5. 結論

一定外力及び繰返し外力を受ける構造物及び部材の耐力低下並びに変形の累積を抑制する設計法を、設計例とともに提案し、筆者らが行った既往の研究結果及び計算例に基づいて、その設計法の妥当性について検討した。得られた結論は以下の通りである。

(1) 累積損傷を抑制する設計法として、収束限界外力曲線及び崩壊限界外力曲線に基づき従来の設計手順に一定外力比制限の判定を組み込む方法が提案できる。

(2) 累積損傷を抑制するための設計事項として次の事項が挙げられる。

1) 収束限界外力が大きくなるように、部材要素の配置及び力学特性を選択する。

2) 初期外力の導入

3) 変形累積収束時の破壊抑制のための一定外力比の設定

(3) 『一定外力に主に抵抗する部分と主に繰返し外力に抵抗する部分を分離して設計する』ことが累積損傷抑

図-19 構造特性を制御した設計例

図-20 初期張力の導入による累積損傷抑制設計

図-21 亀裂発生を抑制する設計

制に有効である。

今後さらに引き続いて、累積損傷を抑制するための設計法及び設計例の妥当性を実験及び解析により確かめていく予定である。

参考文献

- 1) 高梨晃一、田中尚、宇田川邦明、笠井政之：軸力と繰返し曲げを受けるH形鋼柱の変形能力、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1081～1082、昭和51年10月
- 2) 宇田川邦明、高梨晃一、田中尚：繰返し載荷を受けるH形鋼はりの復元力特性（その1）定変位振幅繰返し載荷時の塑性ヒンジ回転能力、（その2）ランダム変位履歴における耐力の低下、日本建築学会論文報告集、第264号、pp.51～59、1978年2月、第265号、pp.45～52、1978年3月
- 3) 上谷宏二、中村恒善、常岡次郎：繰返し両振り曲げを受ける片持ち梁－柱の構面外変形発生機構と限界点理論、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1077～1078、昭和63年10月
- 4) Uetani, K. and T. Nakamura: Symmetry Limit Theory for Cantilever Beam-Columns Subjected to Cyclic Reversed Bending, J. Mech. Phys. Solids, Vol.31, pp.449～484, 1983
- 5) 近藤一夫、花井正実：繰返し変動荷重を受ける構造物の弾塑性解析、日本建築学会構造系論文報告集、第364号、pp.33～43、昭和61年6月
- 6) 近藤一夫、王学鋒、中倉健介、花井正実：繰返し変動曲げを受ける鋼柱の弾塑性・崩壊挙動、日本建築学会構造系論文報告集、第434号、pp.59～74、平成4年4月
- 7) 松井千秋、津田恵吾、江冠華：一定軸力と繰返し曲げを受けるSRC断面および柱材の曲げ挙動について（その1）、（その2）、日本建築学会九州支部研究報告、第31号、pp.341～348、平成元年3月
- 8) 平石久廣、稲井栄一、板倉康久、高崎哲哉、石渡康弘、川島俊一、勅使川原正臣：鉄筋コンクリート造柱の曲げ降伏後の限界変形に関する研究（その1）柱の中心圧縮実験、純曲げ実験および曲げせん断実験とその相関、日本建築学会構造系論文報告集、第410号、pp.27～39、平成2年4月
- 9) 加藤勉、秋山宏：鋼構造剛接骨組の耐震極限設計、日本建築学会論文報告集、第237号、pp.59～65、昭和50年11月
- 10) 秋山宏、高橋誠：損傷分散型骨組の一般化、日本建築学会論文報告集、第365号、pp.20～27、1986年7月
- 11) 山田稔、河村広：鋼構造物の耐震安全について（1）、（3）、日本建築学会論文報告集、第227号、pp.67～74、1975年1月、278号、pp.55～66、1979年4月
- 12) Uchida, Y. and S. Morino: Biaxial Bending Moment-Curvature Relation of Box Beam-Column with Degrading Stress-Strain Relation, Research Reports of the Faculty of Eng., Mie University, Vol.11, pp.55～67, Dec. 1986
- 13) 内田保博、森野捷輔：Limit of Axial Force Ratio for De-

grading Steel Beam-Columns Involving Local Buckling, 日本建築学会構造系論文報告集、第425号、pp.57～68、平成3年7月

- 14) 内田保博、三谷勲、上遠野明夫、小御門匡：角形鋼管柱の軸力比制限に関する実験的研究、日本建築学会構造系論文報告集、第454号、pp.139～149、平成5年12月
- 15) 内田保博：繰返し外力を受ける構造物および部材の変形累積に関する法則、鹿児島大学工学部研究報告、第33号、pp.167～177、平成3年9月
- 16) 内田保博：複数の一定外力及び繰返し曲げを受け耐力低下を生じる角形鋼管柱の一定外力制限、日本建築学会九州支部研究報告、第33号、pp.285～288、平成4年3月
- 17) 内田保博、小御門匡：繰返し外力を受けるトラス構造の耐力低下及び変形累積挙動に関する研究、日本建築学会構造系論文報告集、第454号、pp.161～170、平成5年12月
- 18) 内田保博：軸力及び繰返し曲げを受け耐力低下を生じる柱の変形累積の安定性、日本建築学会構造系論文報告集、第448号、pp.131～140、平成5年6月
- 19) 内田保博：2次仕事に基づく構造に生じる変形累積の安定性解析、日本建築学会構造系論文報告集、第454号、pp.151～159、平成5年12月
- 20) 内田保博、肥山正宏：一定鉛直力及び繰返し水平力を受ける骨組及び耐力壁の累積損傷に関する研究、日本建築学会九州支部研究報告、第34号・1、pp.377～380、1994年3月
- 21) 内田保博：繰返し外力を受ける構造物の累積損傷抑制設計、構造工学論文集、Vol.39B, pp.619～631、1993年3月

（1994年4月4日原稿受理、1994年10月14日採用決定）