

## 第4章 構造解析

### 4.1 一般

- (1) 構造解析においては、対象とする構造物と照査する限界状態の種類、および、その照査事項と照査方法に応じて、適切な構造モデルと境界条件、および、荷重条件を設定するものとする。
- (2) 構造モデルの設定は、はり、柱、格子、板、シェル、トラス、ケーブル、ラーメン、および、アーチなどにより、あるいは、これらの組み合わせにより、構造物を適切に簡略化して行うものとする。
- (3) 荷重の動的作用による影響の考慮にあたっては、構造モデル、荷重、および、解析法を適切に単純化した動的解析、あるいは、動的効果を静的なものに置き換えた静的解析によってもよい。
- (4) 構造解析は、静的解析、動的解析とともに、対象とする構造物と照査する限界状態の種類に応じた適切な方法を選定して行うものとし、コンピュータを使用する場合には、計算に用いるプログラムが基づいている基礎理論や仮定、数値解法の適合性、および、解の精度とその収束性、安定性に十分配慮するものとする。

#### 【解 説】

- (1) (2) 構造解析においては、対象とする構造物と照査する限界状態の種類、および、その照査事項と照査方法に応じて、はり、柱、格子、板、シェル、トラス、ケーブル、ラーメン、および、アーチなどにより、あるいは、これらの組み合わせにより簡略化した適切な構造モデルと境界条件、荷重条件を設定する必要がある。

部材の偏心や変形、断面の急変、トラス格点の剛性、ケーブルの曲げ剛性、可動支承の摩擦などによる2次応力については、できる限り小さくなるように設計するものとして無視するのが一般的であるが、無視できない大きさになることが考えられる場合には、十分な配慮が必要である。また、類似の構造物の設計基準等に有効幅や孔引きなどの規定がある場合には、その定めに従う必要がある。なお、道路橋示方書<sup>1)</sup> 3.1.2項、10.6節、および、鉄道構造物等設計標準(鋼・合成構造物)<sup>2)</sup> 10.3節には、検討を要する2次応力が要因別に定められている。

- (3) 荷重の動的作用による影響の考慮は、構造解析の複雑さを避けるため実用上問題のない範囲で、構造モデルを静的解析用のものに比べて簡略化したり、動的荷重、および、解析法を適切に単純化した動的解析、あるいは、動的効果を静的なものに置換えた静的解析により、効率的に行ってもよいものとした。多くの設計基準等に規定された衝撃係数による動的効果の考慮や、動的効果も考慮して定められた静たわみ制限値による使用安全性の照査(6.5.2項)などもその実例である。

道路橋示方書<sup>1)</sup> 共通編 2.1.4項では、橋面の凹凸、車両の加速と減速、前後車両との協同作用など種々の理由による動的効果を考慮するために、各構造物の実態を把握し、かつ諸外国の規定も参考として、道路橋(歩道部は衝撃を考慮せず)の設計衝撃係数の算定式を橋種と支間長に応じて定めたと解説している。ただし、吊構造のうちの吊橋の主ケーブルと補剛げたについては、可とう性に富み衝撃を吸収しやすいので、衝撃を考慮しなくてもよいとしている。また、斜張橋については、多ケーブル形式や長支間の場合、支間長のとり方によっては、実際の振動性状とかけはなれて過大に評価されることがあるので、影響線の形状などを参考にして別途検討することが望ましいとしている。

鉄道構造物等設計標準(鋼・合成構造物)<sup>2)</sup> 3.5節では、列車走行による鉄道橋の振動発生を、橋桁が急激にたわむ効果、車両の周期力の効果、および、レール継目、軌道、車輪等の不整の効果に

大別して考え、最近の実測結果も考慮に入れて、列車の最高速度と影響線の基線長 $L$ に応じた設計衝撃係数の算定式を定めており、複線の場合の低減係数も与えている。この規定の解説図として、実測衝撃係数の最大値を実測速度による算定値で除したものの頻度分布図を示し、ただ1例の実測値が計算値を上回っているものの、列車荷重が実状よりも大きく規定されていることを考えれば、実際に超過する確率は十分に小さいとしている。ただし、非常に重い桁やたわみの大きい桁など固有振動数が低い桁では、低速走行であっても共振の影響を無視できなくなることがあり、静たわみのみの関数の近似式による非載荷時の固有振動数が条件式を満足しない場合には、載荷時の基本固有振動数を求めて精密計算することなどによらなければならないことも規定されている。

上記の設計標準の付属資料には、2項から成る設計衝撃係数式の根拠が詳述されており、第1項については、桁の振動特性と車両の走行速度に関連する項として、実測と簡単な計算により $L$ のみの関数とした載荷時の基本固有振動数の近似式を速度パラメータ $\alpha$ を表す式に代入して定めたとしている。また、第1項の $\alpha$ の補正係数、および、 $L$ のみに関連する第2項については、走行車両モデルによる動的応答解析結果と実測結果により定めたとし、上述の振動要因別の根拠が述べられている。

なお、類似の構造物に対する設計基準等の規定や信頼性のある測定結果等がない場合、および、従来は対象としていない動的現象を静的問題に置き換えるような場合には、適切な構造解析係数 $\gamma_a$ を定めることなどにより、構造解析やモデル化の不確実性に対する安全性を確保する必要がある。

- (4) 構造解析は、線形理論によるものと非線形理論によるものとに大別され、非線形理論には弾塑性問題を含めて種々の解析レベルのものがあるが、同じ構造物の各限界状態に対して必ずしも同一の解析理論を用いる必要はなく、照査する限界状態の種類に応じた適切な解析法を選定できるものとした。したがって、線形解析では十分な精度が得られない構造物であっても、適切な解析レベルの非線形解析法を適用することによって所要の精度が得られれば、構造解析係数 $\gamma_a$ を1.0としてよい。

コンピュータ・プログラム化された代表的な計算手法には、平面・立体骨組解析法、任意形格子理論に基づく解法や、有限要素法、有限帯板法、境界要素法、および、直交異方性板理論あるいは折板理論に基づく解法などがあるが、これらの適用にあたっては、静的解析、動的解析ともに、解析理論、および、数値解法の適合性に十分配慮しなければならない。特に、有限要素法などにおいては、解の所要精度を満足できる適切な部材要素分割が必要であり、さらに、非線形解析を行う場合には、解の収束性を確保できる適切な荷重制御あるいは変位制御が不可欠である。また、動的応答解析を直接積分法あるいはモード重畳法(モード解析法)によって時刻歴で行う場合は、数値積分の安定性の確保にも十分配慮して、適切なパラメータや時間間隔を設定することが必要であり、モード重畳法、および、応答スペクトル解析法による場合は、解の所要精度を満足できる適切な次数の固有振動解析結果を適用することなども必要である。

## 4.2 終局限界状態の構造解析

- (1) 終局限界状態の構造解析においては、対象とする構造物、および、その照査事項と照査方法に応じて、適切な構造モデルと境界条件、および、荷重条件を設定するものとする。
- (2) 終局限界状態の構造解析は、弾性微小変位解析法の適用による静的解析を原則とするが、責任技術者が必要と認める場合には、座屈固有値解析法、弾性有限変位解析法、弾塑性有限変位解析法などから、対象とする構造物に応じた適切な解析法を選定して適用するものとする。
- (3) 弾性微小変位解析法以外の解析法を用いる場合には、対象とする構造物の終局限界状態における変形挙動に十分配慮し、照査事項と照査方法に応じて、これらに適合する解析レベル以上の解析理論と数値解法を適用するものとする。

(1) (2) これまでの適用実績，および，各荷重に対する計算結果の重ね合わせや，影響線処理が可能であることなどから，設計実務の効率を考え，弾性微小変位解析法の適用による静的解析を原則とした。しかし，対象とする構造物の規模や変形特性，および，設計条件，荷重条件によっては，弾性微小変位解析法では十分な精度が得られない場合も考えられ，そのような場合には，責任技術者の判断により，座屈固有値解析法，および，弾性有限変位解析法，弾塑性有限変位解析法などから適切な解析法を選定できるものとした。

このような規定の背景には，コンピュータ技術の急速な進歩やプログラムのシステム化による解析計算処理の効率化によって，設計現場における座屈固有値解析法，弾性有限変位解析法の適用が一般化したこと，さらには，特有の設計条件を有する吊構造への適用方法などもほぼ確立され，解析の信頼性を保てるようになったことなどがある<sup>3)</sup>。弾塑性有限変位解析法についても，適用実績は未だ多いとはいえませんが，アーチ，ラーメン，および，吊構造などの実構造物への適用例も既にあり，これらを参照して適切な構造モデルを用い，解析理論，および，数値解法の適合性に十分配慮すれば，信頼し得る解が得られる状況にあるといえる。

道路橋示方書<sup>1)</sup> 11.3節には，アーチの変位の影響すなわち死荷重，活荷重によって生じる骨組線形形状の変化の影響を考慮することが必要な条件が規定されており，11.6節には，11.3節の規定により非線形性を考慮した場合における終局強度の照査が規定され，死荷重と活荷重(衝撃を含む)の合計を1.7倍した荷重による応力が許容応力度の1.7倍を上回らないようにすることが定められている。

鉄道構造物等設計標準(鋼・合成構造物)<sup>2)</sup> 6.1節では，弾性微小変位解析を用いて所要の精度が得られる通常の構造物に対しては構造解析係数  $\gamma_a$  を1.0としてよく，橋桁の浮き上がりに対する照査についてのみ特に1.1の値を用いることとしている。また，弾性微小変位解析によりがたい構造物として長スパンのアーチ，斜張橋を挙げ，これらの場合も線形化弾性有限変位理論，具体的には幾何剛性を含む解析を行えば所要の精度が得られ，同様に構造解析係数  $\gamma_a$  を1.0としてよいと解説している。

(3) 弾性有限変位解析法<sup>3),4)</sup>は幾何学的非線形性を考慮したものであり，棒部材の場合は，解説表4.1に示すような解析レベルI~IVに分類できる。同様に，板要素やシェル要素などの場合もこれに準ずるものになる。解説表4.2は，各レベルの解析法に対応する弾性有限変位理論について，平面骨組構造の場合の支配方程式と解析解を示したものである。実際の計算プログラムには，汎用性のある有限要素解が組み込まれ，解析解はプログラムの精度の確認や比較などに用いられる。

解説表 4.1 弾性有限変位解析法の分類

弾性有限変位解析法の種類 : 解析レベル	解析内容(棒部材の場合) 注1) ○:考慮, ×:無視				解析範囲 (数値解法) 注2)
	ひずみによる 部材軸の伸縮の 有限性を考慮	部材軸の回転の 有限性を考慮	曲げ変位による 軸力の変化を 考慮	変形後で つり合いを 考える	
有限ひずみ・有限回転の 弾性有限変位解析法 : レベルI	○	○	○	○	後座屈領域 も含む (変位制御: 変位増分法 弧長増分法 など)
微小ひずみ・有限回転の 弾性有限変位解析法 : レベルII*	×	○	○	○	座屈点近傍 まで
微小ひずみ・小回転の 弾性有限変位解析法 : レベルIII*	×	×	○	○	
線形化 弾性有限変位解析法 : レベルIV	×	×	×	○	(荷重制御: 荷重増分法 など)

\* : 一般に用いられる弾性有限変位解析法であり，レベルIとIIの解析結果に差異が現れることは，細長比が極端に小さい特殊な部材の場合などを除いてほとんどない。

注1) : せん断変形や，そり変形などの考慮の有無によっても区分される。

注2) : 荷重増分法，変位増分法，弧長増分法などの各増分段階における非線形解は，接線剛性行列を用い，反復法(Newton-Raphson法または修正Newton-Raphson法)による収束値として求められるのが一般的である。

解説表 4.2 骨組構造の弾性有限変位理論の支配方程式と解析解

弾性有限変位解析法の種類 : 解析レベル	対応する弾性有限変位理論	支配方程式 (軸力: $N$ , せん断力: $M$ , 変位: $u, w, \lambda$ )		解析解 (平面骨組構造の場合)
		つり合い式	構成則	
有限ひずみ・有限回転の弾性有限変位解析法 : レベル I	有限ひずみ・有限変位理論	$\{N \cos \lambda + (M'/fg) \sin \lambda\}' = 0$ $\{N \sin \lambda - (M'/fg) \cos \lambda\}' = 0$	$N = EA(fg - 1)$ $M'/fg = -EI \lambda' / fg$	注1) 第 I, II, III 種 楕円積分解
微小ひずみ・有限回転の弾性有限変位解析法 : レベル II	微小ひずみ・有限変位理論	$\{N(1+u') - M' w'\}' = 0$ $\{Nw' + M'(1+u')\}' = 0$	$N = EA(u' + \frac{1}{2}u'^2 + \frac{1}{2}w'^2)$ $M = -EI(w'(1+u') - u'w')$	第 I, II 種 楕円積分解 [Elastica (エラスティカ)]
微小ひずみ・小回転の弾性有限変位解析法 : レベル III	はり・柱理論 (Bowling考慮)	$N' = 0$ $(Nw' + M')' = 0$	$N = EA(u' + \frac{1}{2}w'^2)$ $M = -EIw'$	軸力(安定関数) および、 変位に関する 非線形解
線形化弾性有限変位解析法 : レベル IV	線形化はり・柱理論 (Bowling無視) 注2)		$N = EAu'$ $M = -EIw'$	軸力(安定関数)に関する非線形解 [座屈たわみ角公式]

注1):  $\cos \lambda = (1+u')/fg, \sin \lambda = -w'/fg, g = (1+u')^2 + w'^2, \lambda' = \{\tan^{-1}(-w'/(1+u'))\}' = \{-w'(1+u') + u'w'\}'/g$

注2): 線形化はり・柱理論は、曲げ変位による軸力の変化(Bowling)を無視することによって、はり・柱理論を線形化したものである。

解説表 4.3 は、一般的な有限要素解による骨組構造の弾性有限変位解析法を示したものである。有限ひずみ・有限変位理論、および、微小ひずみ・有限変位理論の有限要素解も導かれているが、プログラムに組込むためには数式処理や数値積分が必要など、一般的なものとはいえない。実際には、この表に示したように、部材の長さを十分に短く取ってモデル化を行い、移動座標系で剛体回転を除去することにより、下位のレベルの基礎理論に基づく一般的な有限要素解を用いて、レベルIIに相当する微小ひずみ・有限回転の解析を実行することが多い。細長比が極端に小さい部材を除いて、レベルIとIIの差異が現れることはなく、実構造物の設計にレベルIの解析が適用されることはほとんどない。

解説表 4.3 におけるレベルIII、および、レベルIVに相当する解析は、解説表 4.1 に示した数値解法によるものの他、弾性2次解析法と呼ばれる実用的な近似解析手法を適用して行われることも少なくない。特に、軸力を係数とする幾何剛性行列を1次の非線形項として含む剛性行列を用いたレベルIVの線形化弾性有限変位解析法に相当する解析は、弾性2次解析法の適用によることが多く、ラーメン構造特有の近似解析手法である  $P-\Delta$  法は、本解析法に対応している。これらの他にも、解説表 4.1 の注釈に記述したように、各レベルの弾性有限変位解析法において、完成系あるいは架設系の着目する平衡状態での接線剛性行列を用いることにより剛性を線形化する近似解析手法があり、対象構造物の変形特性や荷重条件によっては十分な精度を満足できる有用な手法で、荷重の重ね合わせや影響線処理も可能となることから、線形化弾性有限変位解析法とともに吊構造などへの適用実績も多い。

解説表 4.3 一般的な有限要素解による骨組構造の弾性有限変位解析法

座標系	基礎理論	有限要素解 (応力とひずみの構成関係: $\sigma = E \epsilon$ )			有限要素解が相当する解析法 [解析レベル]
		ひずみ-変位式	変位関数	剛性行列	
移動座標系 (剛体回転の除去)	はり・柱理論 (Bowling考慮)	$\epsilon = u' + \frac{1}{2}w'^2$ $\chi = -w''$ : 曲率	べき級数の 1次(u), 3次(w) 多項式	線形項, および, 1, 2次の 非線形項	微小ひずみ・有限回転の 弾性有限変位解析法  [レベルII]
	線形化 はり・柱理論 (Bowling無視) #2)			線形項と 軸力を係数 とする1次の 非線形項	
	微小変位理論			線形項のみ	
固定座標系	はり・柱理論 (Bowling考慮)	$\epsilon = u' + \frac{1}{2}w'^2$ $\chi = -w''$ : 曲率  (平面骨組構造の場合)	べき級数の 1次(u), 3次(w) 多項式	線形項, および, 1, 2次の 非線形項	微小ひずみ・小回転の 弾性有限変位解析法  [レベルIII]
	線形化 はり・柱理論 (Bowling無視) #2)			線形項と 軸力を係数 とする1次の 非線形項	
	線形化			線形項と 軸力を係数 とする1次の 非線形項	

#1): モデル化に際して、部材の長さを基礎理論に応じて十分に短く取ってあげれば、移動座標系(剛体回転の除去)の設定により、はり-柱理論やその線形化理論はもちろん、微小変位理論を基礎理論とする有限要素解であっても、レベルIIに相当する解析が可能である。

#2): 線形化はり・柱理論に基づく有限要素解は、解説表4.2の解析解における安定関数を軸力についてTaylor展開、1次項までを残したものと一致し、剛性行列は、部材軸力を係数とする幾何剛性行列を1次の非線形項として含む。

したがって、弾性有限変位解析法を用いる際には、解説表4.1～解説表4.3を参照し、対象とする構造物の終局限界状態における変形挙動に十分配慮しながら、照査事項と照査方法に応じて、これらに適合する解析レベル以上の解析理論と数値解法を適用する必要がある。

また、座屈固有値解析法については、これらの解説表におけるレベルIVの線形化弾性有限変位解析法における幾何剛性行列を用いるのが一般的であるが、上述の各レベルの弾性有限変位解析法における接線剛性行列を用いて剛性を線形化する手法を座屈固有値解析にも適用し、接線剛性行列の非線形項を幾何剛性行列の代わりに置き換えて固有値問題を解くこともよく行われている。

一方、弾塑性有限変位解析法<sup>3),4)</sup>は材料的非線形性、および、幾何学的非線形性の両者を考慮した複合非線形問題の解析法であり、棒部材の場合は、解説表4.4に示すような解析レベルA～Cに分類できる。同様に、板要素やシェル要素などの場合も、これに準ずるものになる。したがって、弾塑性有限変位解析法を用いる際には、解説表4.4とともに、幾何学的非線形性の考慮に関しては解説表4.1～解説表4.3も参照して、対象とする構造物の終局限界状態における変形挙動に十分配慮しながら、照査事項と照査方法に応じて、これらに適合する解析レベル以上の解析理論と数値解法を適用する必要がある。また、この表中の解析内容の他に構造物の耐荷力特性に影響する因子として、部材形状や製造方法の違いによる残留応力分布の相違、材片の局部座屈後挙動、荷重履歴、および、継手の弾塑性的特性などにも十分に配慮する必要がある。さらに、解析精度の不明な実績のないプログラムを使用する場合には、簡単なモデルについて、他の実績あるプログラムの計算結果と比較するなどして、精度の確認を行ってから用いることが望ましい。

なお、これらの解析法以外に、表下の注釈にも記述したように塑性ヒンジ理論によるものがあり、現段階では、残留応力や塑性域の広がりやを考慮できないなど、終局状態に至る途中の荷重-変位関係などの挙動を求めるにはそれほど精度のよい解析法とはいえないが、解析誤差を構造解析係数  $\gamma_a$  の中に適切に組み入れることができれば、終局荷重を求める簡便な方法として有用性の高いものである。近年、欧米では、塑性ヒンジ理論を改良して、残留応力や塑性域の広がりやを考慮するための種々の手法が提示されるようになり、ここでいうレベルCに対応する解析法に代わるものとして設計に適

用しようとする動きが強くなっている。

解説表 4.4 弾塑性有限変位解析法の分類

①) 弾塑性有限変位 解析法の 解析レベル	解析内容 (棒部材の場合)				○：考慮、×：無視		幾何学的非線 形性の考慮と 解析範囲 (数値解法)
	板要素の局部 座屈との連成 を考慮 ②)	弾塑性ねじり を考慮 ③), ④)	ひずみ硬化を考 慮 (無視：完全 弾塑性体) ④)	部材軸方向の 塑性域の進展 を考慮	要素断面内の 塑性域の進展 を考慮		
レベル A	○	○	○ ×	○	○	○	幾何学的非線 形性の考慮に ついては、解 説 表 4.1~解 説 表 4.3参照  後座屈領域も 含む解析範囲 (変位制御： 変位増分法 弧長増分法 など)
レベル B*	×	○	○	○	× **	○	
			×	○	× **		
レベル C*	×	×	○	○	× **	○	
			×	×	× **		

\*：初期たわみ、残留応力などの初期不整を考慮でき、一般に用いられている弾塑性有限変位解析法。

\*\*：部材長が十分に短く、部材軸方向の塑性域の変化を無視できる場合。

①)：塑性ヒンジ理論は、簡便で有用な方法であり、残留応力、および、塑性域の広がり を考慮できる手法が確立されれば、レベル C に相当する解析をそれに基づいて容易に実行できる。

②)：板要素の局部座屈と、部材の座屈、および、構造物全体の座屈との連成現象を厳密に取扱うことは困難であり、板要素の局部座屈を有効幅で評価したり、局部座屈が問題となる箇所のみを板要素でモデル化するなどの工夫が必要である。

③)：より高い精度の解析を行うためには、断面のねじり剛性の評価に塑性域の広がり を考慮したり、降伏条件の判定にねじり応力を考慮することなどが必要であり、さらに、開断面の場合は、そり変形の影響の考慮も検討する必要がある。

④)：ひずみ増分理論による応力-ひずみの構成則において、塑性変形の空間的な方向を決定する流れ則には、閃速流れ則を、硬化則には、等方硬化則、移動硬化則、および、これらの混合硬化則が一般に適用される。移動硬化則は、鋼材のパウジナガー効果 (交番荷重時の降伏応力が初期の降伏応力値を下回る現象) を表現できるが、等方硬化則では表現できない。

### 4.3 使用限界状態の構造解析

- (1) 使用限界状態の構造解析においては、対象とする構造物、および、その照査事項と照査方法に応じて、適切な構造モデルと境界条件、および、荷重条件を設定するものとする。
- (2) 使用限界状態の照査における静的解析は、弾性微小変位解析法の適用を原則とするが、責任技術者が必要と認める場合には、対象とする構造物に応じた適切な解析レベルの弾性有限変位解析法を選定して適用するものとする。ただし、作用荷重には、原則として衝撃を含めないものとする。
- (3) 使用限界状態の照査における動的解析は、弾性微小変位理論に基づく固有振動解析法、および、動的応答解析法の適用を原則とするが、責任技術者が必要と認める場合には、弾性有限変位理論に基づく対象構造物に応じた適切な解析レベルの解析法を選定して適用するものとする。

#### 【解 説】

- (1) (2) 使用限界状態における構造物または部材の変形は一般に大きくなく、弾性微小変位解析法の適用を原則とした。道路橋示方書<sup>1)</sup> 11.8 節には、たわみ制限の形でアーチの使用限界状態の照査を行う場合、たわみ量の算出にあたっては、11.3 節に規定された変位の影響すなわち死荷重、活荷重によって生じる骨組線形状の変化を無視してよいことが規定されている。しかしながら、吊構造などでは幾

何学的非線形性の考慮を必要とする場合も考えられ、そのような場合には前節の解説表を参照し、対象構造物に応じた適切な解析レベルの弾性有限変位解析法を選定して適用するものとした。

鉄道構造物等設計標準(鋼・合成構造物)<sup>2)</sup> 6.1節では、使用限界状態の照査においても、前節で解説した終局限界状態の照査における場合と同様に、弾性微小変位解析を用いて所要の精度が得られる通常の構造物に対してだけでなく、弾性微小変位解析によりがたい構造物として挙げた長スパンのアーチ、斜張橋に対しても、線形化弾性有限変位理論、具体的には幾何剛性を含む解析を行えば所要の精度が得られ、ともに構造解析係数  $\gamma_a$  を1.0としてよいとしている。

また、たわみによる照査は、動的作用を含む現象を静的現象に置き換えるだけでなく、構造物全体として必要な剛性を確保することで使用限界状態における安全性を大略的に照査しようとするものであり、道路橋示方書<sup>1)</sup>をはじめとする多くの設計基準の定めにしたがって、荷重は実状に応じて単純化でき、衝撃は原則として含まないものとした。上述のように、アーチのたわみ量の算出において変位の影響を無視することも、同様の考え方による構造解析の単純化といえる。

鉄道構造物等設計標準(鋼・合成構造物)<sup>2)</sup>では、使用限界状態の照査の場合は、比較的しばしば発生する大きさの列車荷重を考えればよいとして、衝撃を無視することだけでなく、実状に応じて列車荷重そのものを終局限界状態の照査におけるものより低減してもよいこと、および、複線橋の場合も原則として単線載荷とすることなどが定められている。

これらの根拠となった検討結果が上記標準の付属資料に詳述されており、たわみ限度の規定値を基に設計した桁橋を対象に走行車両モデルによる動的応答解析を実施し、車体加速度、輪重減少、衝撃係数などを求めて検討した結果、特に問題はなく、実際に発生するたわみが計算値に比べて小さいことなども考慮に入れて、衝撃の影響を無視しても差し支えないとしたことが述べられている。複線橋の場合については、規定限度値に相当するたわみを生じた桁上を半車体モデルが通過する際の輪重減少とともに、実たわみ比(実測たわみ/計算たわみ)を複線橋を対象とした算定表の上限値に近い0.85の値とし、急激にたわむ効果を考えた衝撃係数による衝撃の影響も考慮して、複線載荷で最大たわみを生じる状態での輪重減少などを求めて検討した結果、単線載荷とし衝撃も考慮しなくても特に問題ないことが確かめられたとされている。

- (3) 静的解析の場合と同等の変形と考え、弾性微小変位理論に基づく固有振動解析法、および、応答スペクトル解析法、モード重畳法(モード解析法)あるいは直接積分法による時刻歴応答解析法の適用を原則とした。固有振動解析について、立体横断施設基準<sup>5)</sup> 2.13節には、単純支持げたの固有振動数の計算式が示され、それ以外の構造系に対しては「土木技術者のための振動便覧」<sup>6)</sup>を参照すればよいとする一方、簡単な構造系に対して、静的最大たわみによって表された簡略計算式が与えられている。

しかしながら、吊構造などでは幾何学的非線形性の考慮を必要とする場合も考えられ、そのような場合には同様に、弾性有限変位理論に基づく対象構造物に応じた適切な解析レベルの解析法を選定して適用するものとした。線形化弾性有限変位解析法や、前節で解説した完成系あるいは架設系の着目する平衡状態における接線剛性行列を用いて剛性を線形化する近似解析手法は、固有振動解析においても有効であり、吊構造などにも既に数多く適用されている<sup>7)</sup>。

弾性有限変位理論に基づく非線形形の動的応答解析法は、静的解析法とは異なり、設計現場において未だ一般的といえないが、解析プログラムの整備が進められ、解析理論、および、数値解法の適合性に十分配慮すれば、信頼し得る解が得られる状況になりつつある。また、上述の固有振動解析と同様の線形化は、動的応答解析においても有効であり、吊構造などに適用された実績も既に報告されている<sup>7)</sup>。

#### 4.4 疲労限界状態の構造解析

- (1) 疲労限界状態の構造解析においては、対象とする構造物、および、その照査事項と照査方法に応じて、適切な構造モデルと境界条件、および、荷重条件を設定するものとする。
- (2) 疲労限界状態の照査における構造解析は、弾性微小変位解析法の適用による静的解析を原則とするが、責任技術者が必要と認める場合には、対象とする構造物に応じた適切な解析レベルの弾性有限変位解析法を選定して適用するものとする。
- (3) 疲労限界状態の照査にあたって、類似の構造物における実測応力と設計計算応力の関係から、構造解析により求められた応力値が実際に作用する応力値を下回ることが明らかな場合には、実応力比(実測応力/設計計算応力)に基づいて解析値を低減してもよい。
- (4) 疲労限界状態の照査にあたって、荷重の動的作用が及ぼす影響を衝撃係数により考慮することが必要な場合、衝撃係数は、類似の構造物における測定結果に基づいて定めることを原則とするが、信頼性のある測定結果等がない場合は、終局限界状態の照査におけるものを用いてもよい。

#### 【解 説】

(1) (2) 疲労限界状態における構造物の部材または連結部の変形は一般に大きくなく、弾性微小変位解析法の適用を原則としたが、吊構造などでは幾何学的非線形性の考慮を必要とする場合も考えられ、そのような場合には前々節の解説表を参照し、対象構造物に応じた適切な解析レベルの弾性有限変位解析法を選定して適用するものとした。鉄道構造物等設計標準(鋼・合成構造物)<sup>2)</sup> 6.1節では、疲労限の照査には、前節、前々節で解説した終局限界状態、使用限界状態の照査における場合と同様に、弾性微小変位解析を用いて所要の精度が得られる通常の構造物に対してだけでなく、弾性微小変位解析によりがたい構造物として挙げた長スパンのアーチ、斜張橋に対しても、線形化弾性有限変位理論、具体的には幾何剛性を含む解析を行えば所要の精度が得られ、ともに構造解析係数  $\gamma_a$  を1.0としてよいとしている。

(3) 疲労限の照査を満足できない場合などに適用される繰返し数の影響を考慮した疲労限界状態の照査にあたっては、実際に作用する応力をより合理的に把握して、実態に応じた適切な照査を行う必要がある。鉄道構造物等設計標準(鋼・合成構造物)<sup>2)</sup> 6.1節では、繰返し数の影響を考慮した疲労限界状態の照査には、実測応力と設計計算応力の比(実応力比)の算定結果の上限値0.75程度にばらつきを考慮し、構造解析係数  $\gamma_a$  として、終局限界状態、使用限界状態の照査、および、疲労限による照査における標準値1.0に比べてかなり小さい0.85の値を用いることとしている。

鋼構造物の疲労設計指針<sup>3)</sup>においては、5.2.3項の規定における設計計算応力補正係数  $\alpha$  が構造解析係数に対応しており、設計計算応力が実際の応力よりも低くなることが明らかな場合に補正するものとしている。この設計計算応力補正係数  $\alpha$  の値については、類似の構造物での測定結果や模型実験の結果に基づき設定するものと解説し、本指針による下路プレートガーダー鉄道橋の疲労設計例では、鉄道構造物等設計標準(鋼・合成構造物)<sup>2)</sup>の規定に即して0.85の値が繰返し数の影響を考慮した照査に用いられている。

本指針の資料編では、鉄道橋の維持管理における疲労損傷の発生予測について、疲労限に対する照査、および、疲労亀裂発生時期や範囲の予測に用いる最大応力範囲はシミュレーションまたは実測によって求め、シミュレーションによる場合は、通常0.65(影響線長 $\leq 10\text{m}$ )あるいは0.75( $> 10\text{m}$ )の値の実応力比  $\alpha$  を乗ずる必要があるとしている。さらに、実測による場合は、実応力比  $\alpha$  の値を1.0としてよいが、応力範囲の実働最大値を測定しているとは限らないことから、極値統計解析を適用して推定するか、もしくは補正係数  $\beta$  (実測値に乗ずる係数、例えば、新幹線の場合1.4~1.7の値)をサンプリングした各実測最大応力範囲の平均値に乗ずる必要があるとしている。ただし、 $\alpha$  は荷重



の種類や部材の構造によってややばらつきがあること、および、 $\beta$  もデータ不足であることなどから、今後も見直しやデータの蓄積がともに不可欠であると指摘している。

一方、道路橋に関しても、本指針では、設計計算応力補正係数  $\alpha$  について、各種タイプの合成桁、非合成桁の実応力比の測定結果を示し、非合成桁で上限値が0.70程度であることから、この値を  $\alpha$  とすることも一つの考え方であると解説している。本指針による道路橋の設計例では、疲労損傷が発見された単純上路トラス橋や単純非合成箱桁橋の照査には1.0の標準値が用いられているが、単純合成板桁橋と非合成連続箱桁橋の主桁、および、鋼床板の縦リブと横リブの疲労設計には0.80の値が、単純合成板桁橋と非合成連続箱桁橋の床組の疲労設計には0.70の値が、繰返し数の影響を考慮した照査だけでなく、疲労限の照査でもそれぞれ用いられている。

また、本指針の付録には、破壊力学の手法を用いた疲労亀裂進展解析の方法が示されており、類似の連結部に対する設計基準等の定めがない特殊な連結部の疲労強度評価や、維持・管理における検査周期の設定、疲労亀裂が検出された構造物の部材または連結部の疲労寿命、および、構造物の余寿命の評価などへの適用が可能である。

この疲労亀裂進展解析においては、応力集中、亀裂形状、表面亀裂、板厚・板幅が有限であること、および、亀裂が偏心していることに対する補正係数を有限要素法などの数値解法によりそれぞれ求めるものとし、通常は亀裂形状に応じた適切な3次元モデルを対象とすることが必要であるが、3次元効果効果が補正係数にほとんど影響を及ぼさないことが明らかな場合には、2次元モデルを対象としてもよいとしている。同時に、各々の補正係数を求めるための簡便式を例示し、それらを参考に定めてもよいとしている。

- (4) 鋼構造物の疲労設計指針<sup>8)</sup> 5.1.4項の規定を準用したもので、衝撃係数に関する測定結果などの正確なデータがない場合は、終局限界状態の照査におけるものを用いれば、一般に安全側の疲労照査となると解説されている。本指針による鉄道橋の設計例では、鉄道構造物等設計標準(鋼・合成構造物)<sup>2)</sup> 9章の規定に即して、疲労限の照査には終局限界状態の照査における列車荷重(荷重係数  $\gamma_f = 1.1$ )と設計衝撃係数をそのまま用いている。また、繰返し数の影響を考慮した疲労の照査には、別に定められた平均的な列車荷重( $\gamma_f = 1.0$ )に対して、衝撃係数は設計衝撃係数の値を用いるものとしているが、衝撃の影響を平均的なものとするために、設計衝撃係数の3/4の影響として算出された応力の補正係数  $f_1$  (繰返し数を考慮した係数)が導入され、解説表に影響線長別の値が示されている。

本指針の資料編では、鉄道橋の維持管理における耐用年数の評価について、累積疲労の算定で扱う応力(実応力比  $\alpha$  は特に定めない場合1.0の標準値)は平均的なものでよく、衝撃係数の算定に用いる列車速度も最高速度ではなく「通トン表」の平均速度でよいとし、この速度が不明な場合は設計速度とすることとしている。それに加えて、衝撃荷重の大きさは、疲労設計の場合と同様に、設計衝撃荷重の75%程度を考慮するものとし、算定された衝撃係数をさらに25%低減して求めている。なお、蒸気機関車の場合の衝撃係数の算定式には載荷時の固有振動数が含まれており、実測値を用いるのが望ましいが、それが無い場合などには、死荷重によるたわみの計算値と列車荷重によるたわみの実測値で与えられる簡易計算式によってもよいとしている。

一方、本指針による道路橋の疲労設計例では、繰返し数の影響を考慮した照査におけるトラック荷重の3倍のものを疲労限の照査において作用させているが、衝撃係数は両照査ともに道路橋示方書<sup>1)</sup>に規定された設計衝撃係数の値をそのまま用いている。ただし、鋼床板の繰返し数の影響を考慮した照査には実態荷重モデルが用いられており、鋼床板の縦リブについては、同示方書 6.2.2項の規定に従って衝撃を両照査ともに含めていない。

#### 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), 1994年2月。
- 2) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説(鋼・合成構造物), 1992年10月。
- 3) 土木学会：鋼構造物の終局強度と設計, 鋼構造シリーズ6, 1994年7月。
- 4) 土木学会：構造工学における計算力学の基礎と応用, 構造工学シリーズ7, 1996年12月。
- 5) 日本道路協会：立体横断施設技術基準・同解説, 1979年1月。

- 6) 土木学会：土木技術者のための振動便覧，1985年10月．
- 7) 橋梁振動研究会：橋梁振動の計測と解析，技報堂出版，1993年10月．
- 8) 日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説，1993年4月．