

第Ⅲ編
設 計 編

第1章 総則

1.1 一般

本編は、性能照査型設計体系に基づく鋼構造物の設計に適用する。

【解説】

設計体系のあるべき姿としては、設計者は自身の設計した構造物の性能を十分に把握し、構造物の性能に関する情報を利用者に提供することで、構造物の保有する性能が価値判断の材料となることである¹⁾。これを実現する手段として、最近“性能照査型設計法”が注目されており、複数の機関から設計法についての考え方や照査方法についての提案がなされている。以下に、各機関における“性能照査型設計法”の定義を列記する。

- ①性能照査型設計法とは「必要とされる性能のみを規定し、その性能を実現するための方法は原則的に自由とする設計法」である²⁾。
- ②性能照査型設計法とは「構造物の目的とそれに適合する機能を明示し、機能を備えるために必要とされる性能を規定し、規定された性能を構造物の供用期間中確保することにより機能を満足させる設計方法」と言えよう¹⁾。
- ③性能照査型設計体系：構造物の計画、設計、施工、維持管理に至る各段階で、構造物に要求すべき性能を明確に設定し、その性能を満たすことを何らかの形で照査することによって、ライフサイクルにわたる構造物の性能（要求性能）を確保させようとする体系。

それぞれ若干のニュアンスの違いがあるが、基本思想は同一である。本指針（試案）では③の考え方によっており、以後性能照査型設計体系と呼ぶ。

なお、想定した供用期間の全てに渡って構造物に要求される性能を満足する方法として、
a)設計時にかなり高いレベルの性能を保有するようにし、特別の維持管理を実施せずに要求性能レベルを確保する方法

b)設計時にはそれほど高い性能を保有させるわけではなく、供用期間中に適切な維持管理（補修・補強を含む）を施すことにより構造物の要求性能を確保する方法

の2つが考えられる。いずれの方法を採用するかは、設計の対象となる構造物により異なるが、ライフサイクルコストが最小となることを念頭において設計者が決定することが望ましい。

上記b)の方法を採用する場合には、設計終了段階で構造物が保有する性能を評価する事前評価と、供用中の構造物が保有する性能を評価する事後評価が必要となり¹⁾、設計業務が煩雑となる。しかしながら、第Ⅲ編7.2.4に記すように、供用中の構造物に適切な維持管理が施されることが極めて重要であり、また、供用中の構造物に適切な維持管理を施しつつ構造物の長寿命化を図ってきている現状を鑑みると、少なくとも当面の間は、b)の方法が採用されることになると考えられる。

1.2 設計の基本

1.2.1 設計の目的

鋼構造物は、設計供用期間における構造物の安全性、使用性、耐久性、耐震性、社会・環境適合性および初期健全性の各要求性能を考慮して設計されなければならない。

【解説】

鋼構造物は、その使用目的に適合し、安全でかつ機能的でなければならない。このためには、鋼構造物または部材が施工期間中ならびに供用期間中の作用に対して適切な安全性をもち、供用時に十分な機能を発揮するように設計しなければならない。また、十分な耐久性、耐震性を保有するとともに、環境に適合することにも留意しなければならない⁴⁾。

例えば橋梁は、道路や鉄道が河川、海峡、道路、鉄道上を横断して、人と物資を輸送するために建設される。橋梁は安全であることが第一条件であるが、十分長期にわたって健全であること、すなわち耐久性の高い構造物であることも大切である。また、地域の住民にとっても親しみやすいもので、車両の通行に伴う不快な振動、騒音の発生原因となつてはならない。さらに景観にも優れたものであることが要求される⁵⁾。

また、橋梁の設計においては、使用鋼材、防食仕様等の選定、部材断面の決定など種々の比較検討が行われる。これらの比較検討は主に経済性をベースとして行われるが、単に初期建設コストが最小であるという観点からの判断ではなく、半永久構造物としての耐久性を念頭に置いた、維持管理の容易さとそのコスト（いわゆるライフサイクルコスト）を考慮しなければならない。

構造物の設計供用年数は以下の三種類で構成され、このうち物理的供用年数が他の二つを超えることを前提として設計するのが一般的である。

- a) 経済的供用年数（減価償却資産としての経済的な寿命）
- b) 機能的供用年数（期待される機能を失う社会的な寿命）
- c) 物理的供用年数（構造物の性能低下による絶対的な寿命）

ライフサイクルコストは、経済的供用年数と物理的供用年数の両者を組み合わせて経済性を追求するもので、現時点では定量的な評価を行えるまでには至っていないが、その評価方法の確立に対する社会的要求が高まっている設計思想である。機能的供用年数は、社会経済活動の変化に伴い対象となる構造物が不要になる状態を言う。現在の技術レベルでは機能的供用年数を設定するまでには至らない場合が多い。しかし、予測できる範囲で物理的供用年数が機能的供用年数を超えるように設計しなければならない。道路橋や鉄道橋の現行の設計基準によると、設計供用年数は60～100年に設定されているが、適切な維持管理を行うことにより鉄道橋では既に100年を超えて供用されているものもあり、現在は設計供用年数を100年に設定するのが一般的である。

1.2.2 設計の原則

- (1) 設計にあたっては、鋼構造物に要求すべき性能を明確に設定しなければならない。
- (2) 設計では、要求される性能項目ごとに性能レベルを明示し、それぞれの項目について照査を行わなければならない。
- (3) 要求される性能を満足しているかどうかを照査する方法として「部分安全係数を用いた照査様式」を用いてよい。

【解説】

(1) について 設計にあたっては、最初に鋼構造物に要求すべき性能を明確に設定しなければならない。鋼構造物に要求すべき性能については、第Ⅰ編（総則編）第3章に示されているが、これら全ての性能を要求する必要はなく、設計の対象となる構造物に応じて、適宜選定すればよい。

なお、鋼構造物の設計にあたっては、「基本要件」第Ⅰ編（総則編）第2章を遵守した上で、各要求性能に対して照査する。

(2) について 鋼構造物の設計において、要求性能を満足しているかどうかを照査する場合、要求される性能のレベル（性能レベル）に対応する限界状態を対象として、限界状態に達するか否かを照査するのが一般的である。ここでいう“限界状態”とは、要求性能を細分化した性能項目のそれぞれに対して想定される限界の状態であり、これを明確にすることにより、限界状態設計法に基づく照査が可能となる¹⁾。すなわち、性能照査型設計における照査の基本として、ここでは、各要求性能項目について（要求性能） \leq （保有性能）を満足すればよいこととする。なお、具体的な要求性能項目については第Ⅲ編（設計編）第5章～第9章の各章に示されている。また、要求性能項目に対する性能レベルの具体事例として、例えば、耐久性（耐腐食性、耐疲労性）に関する性能レベルが第Ⅰ編（総則編）3.3の解説に、使用性に関する性能レベルが第Ⅲ編（設計編）第6章の表Ⅲ-6.2.3に、耐震性に関する性能レベルが第Ⅲ編（設計編）第8章8.3に示されている。

鋼構造物の設計において考慮される代表的な限界状態を以下に示す⁶⁾。

<終局限界状態>

- ・ 構造物あるいは部材の転倒（安定）
- ・ 材料強度を超過する作用による部材断面の破断
- ・ 力学機構に関わる構造物の変形（崩壊）
- ・ 安定性の損失（座屈など）
- ・ 構造物の取り替えが必要となるほどの過度な変位や変形
- ・ 繰り返し作用を受ける構造物あるいは部材の破壊（疲労）

<使用限界状態>

- ・ 通常の使用に支障が生じたり、構造・非構造材の性能に影響がでるような変形
- ・ 不快感を引き起こしたり、構造・非構造材あるいは設備に悪影響を及ぼす振動

- ・構造物の耐久性を低下させたり、構造・非構造材の性能に影響がでるような局所的損傷。これには小さな亀裂も含まれる。

(3) について 鋼構造物あるいは構造部材の設計においては、それらが限界状態に達する確率を要求されたレベル値以下にとどめることができるように鋼構造物の形式・形状・寸法を決定するのが最も望ましい。しかしながら、鋼構造物あるいは構造部材が限界状態に達する確率の算出が可能な場合は極めて少なく、現時点での採用は無理とみなすのが一般的である¹⁾。

そこで、本設計指針（試案）では、鋼構造物あるいは構造部材に要求される性能が満足されているか否かを照査する方法として、部分安全係数を用いた以下の照査様式を用いればよいこととした⁴⁾。

$$\gamma_i \frac{S_d}{R_d} \leq 1$$

ここで、

R_d ：設計限界値

$$= \frac{1}{\gamma_b} R \left(\frac{f_{k,1}}{\gamma_{m,1}}, \frac{f_{k,2}}{\gamma_{m,2}}, \dots, \frac{f_{k,n}}{\gamma_{m,n}} \right)$$

$f_{k,j}$ ：材料強度の特性値

γ_m ：材料係数。材料強度の特性値からの望ましくない方向への変動，供試体と実構造物中との材料特性の差異，材料特性が限界状態に及ぼす影響，材料特性の経時変化等を考慮して定める。

γ_b ：部材係数。部材耐力の計算上の不確実性，部材寸法のばらつきの影響，部材の重要度（対象とする部材がある限界状態に達したときに構造物全体に与える影響）等を考慮して定める。

$R(\cdot)$ ：材料強度から構造物の限界値を算出するための関数

S_d ：設計応答値

$$= \sum \gamma_a \cdot S(\gamma_{f,j} \cdot F_{k,j})$$

$F_{k,j}$ ：個々の荷重の特性値

γ_a ：構造解析係数。構造解析の不確実性，構造物のモデル化の信頼性等を考慮して定める。

$\gamma_{f,j}$ ：個々の荷重に対する荷重係数。荷重の特性値からの望ましくない方向への変動，荷重の算出方法の不確実性，荷重特性が限界状態に及ぼす影響，環境条件の変化等を考慮して定める。

$S(\cdot)$ ：設計荷重を載荷した場合に生ずる応答値を算出するための関数

γ_i ：構造物係数。構造物の重要度，限界状態に達したときの社会的・経済的影響を考慮して定める。

である。

この照査様式において、個々の係数をさらに分割したり、あるいは、複数の係数を1つの係数にまとめたりした照査様式が他の設計基準等で用いられたり提案されたりしているが（コンクリート標準示方書⁷⁾、鉄道構造物等設計標準・同解説⁸⁾、ISO2394⁹⁾）、どの程度まで安全係数を分割あるいは一括して設計するかは、設計者の裁量に委ねることとした。

なお、構造細目の規定（第Ⅲ編第10章）によって要求性能を満たすとみなすこともできる。また、化学的变化の影響等については通常の構造解析とは異なったアプローチにより評価されるのが一般的であり、別の形で性能の照査様式が規定される場合もある。

参考文献

- 1) 土木鋼構造の性能設計に関する調査研究小委員会：土木鋼構造物の性能設計ガイドライン，JSSCテクニカルレポート，日本鋼構造協会，2001年10月
- 2) 道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編，(社)日本道路協会，2002年
- 3) 宮川豊章：維持管理，新しい示方書－仕様規定から性能照査へ，土木学会誌，Vol. 85，2000年4月
- 4) 土木学会「鋼・コンクリート共通構造設計基準小委員会」：鋼構造とコンクリート構造の限界状態設計法に関する共通の原則，土木学会論文集，No. 450/I-20，pp. 13-20，1992年7月
- 5) 長井正嗣：橋梁工学，共立出版，1997年4月
- 6) ISO-10721 Steel Structures，1999年
- 7) 土木学会コンクリート委員会：コンクリート標準示方書〔構造性能照査編〕，2002年3月.
- 8) 鉄道構造物等設計標準・同解説 鋼・合成構造物，(財)鉄道総合技術研究所，2000年
- 9) ISO2394 General Principles on Reliability for Structures，1998年6月

第2章 作用

2.1 一般

鋼構造物の設計では、施工中および設計供用期間中に発生する可能性のある作用を、検討すべき限界状態に応じてそれぞれ定めるものとする。

【解説】

作用は、頻度、持続性および変動の過程によって永続作用、変動作用、偶発作用に分類される。同じ作用でも対象とする限界状態が異なるとその大きさあるいは種類の設定方法が異なることがあり、検討すべき限界状態に応じてそれぞれの作用を適切に組合せる必要がある。

永続作用：設計供用期間を通して絶えず生じる作用で、時間的変動が少ない作用。代表的な事例として、
構造物やその機能を満たすための付属物の死荷重が挙げられる。

変動作用：設計供用期間内の変動が平均値に比べて無視できない作用で、かつ単調な変化をしない作用。
代表的な事例として、自動車や列車の走行による影響や風が挙げられる。

偶発作用：設計供用期間中にはまれにしか生じないが、一度生じると構造物に重大な損傷を及ぼすと考えられる作用。代表的な事例として、落石、衝突、断層変位、地震の影響が挙げられる。

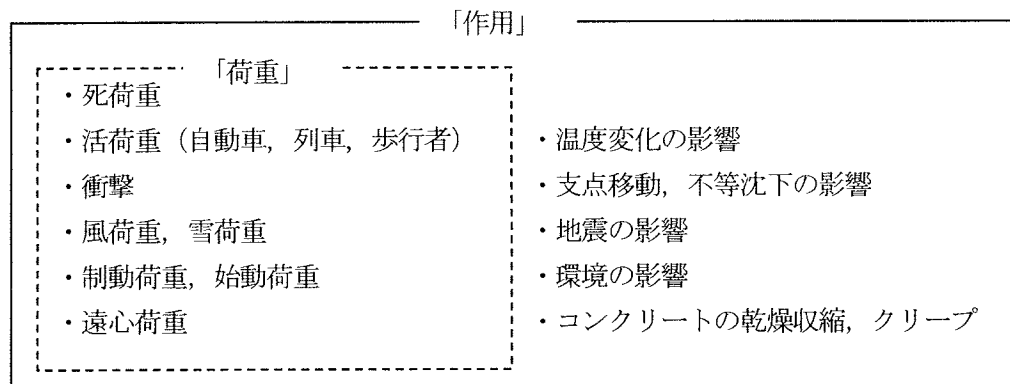
立地条件などの環境が構造物の性能に影響を及ぼす作用（環境作用）については、塩分飛来などは永続作用に分類されるが、変動作用として捉えて扱う方が説明し易い場合もある。

各作用は、社会的な対応の必要性に応じて設計の対象とする必要がある。社会的な対応の必要性とは、公共構造物に限らず一般住宅等の私的な構造物であってもその安全性に一定の社会的責任を伴うことを指す。

近年、構造物の設計において地震の影響等を静的な力としてモデル化せずに動的解析法や非線形解析法により直接応答値を求める事例が増えており、地震の影響等を「荷重」と分類する考え方に違和感が生じている。本指針（試案）では、環境条件による影響も含めて構造物への働きかけを「作用」として定義する。図Ⅲ-2.1.1に、本指針における「作用」と「荷重」の位置づけを概念図として示す。この図の中で「衝撃」や「遠心荷重」は、自動車や列車の「走行の影響」として力に置き換えモデル化されるのが一般的であるため「荷重」に含める。

作用：構造物または部材に応力、変形の増加、材料特性に経時変化をもたらす全ての働き

荷重：力にモデル化した作用。（荷重の特性値に荷係数を乗じて設計荷重とする）



図Ⅲ-2.1.1 「作用」と「荷重」の位置づけの概念図

2.2 作用の大きさ

(1) 破壊・崩壊などの安全性の照査に用いる永続作用、主たる変動作用の大きさは、作用の大きさのばらつきを想定したうえで、構造物の施工中および設計供用期間中の最大値分布の期待値または最小値分布の期待値としてよい。主たる偶発作用の大きさは既往最大値としてよい。また、従たる変動作用の大きさは、主たる変動作用または偶発作用との組合せに応じて定める。

(2) 使用性の照査に用いる作用の大きさは、構造物の施工中および設計供用期間中に比較的しばしば生じる値とし、検討すべき限界状態および作用の組合せに応じて定める。

(3) 疲労耐久性の照査に用いる作用の大きさは、設計供用期間中の荷重作用の変動を考慮して定める。

(4) 耐震性の照査に用いる作用の大きさは、性能レベルに応じて安全性および使用性の作用の大きさに準じて定めてよい。

【解説】

(1) について 破壊・崩壊などの安全性に関する限界状態では、構造物の破壊、大変形、大変位などにより機能や安定が著しく損なわれる状態を考えるため、その照査に用いる作用としては、構造物の施工中および設計供用期間中に最大の影響を与える大きさのものとする必要がある。一般には、安全性の照査に用いる永続作用、主たる変動作用の大きさは、設計供用期間を上回る再現期間における最大値または最小値とする場合が多い。しかし、現時点ではこれらに関するデータが必ずしも十分でないため、そのような大きさを判断する資料に乏しい事情を勘案し、最大値分布の期待値または最小値分布の期待値としてよいことにした。また、主たる偶発作用については統計的な評価が行えないが、作用として理解が容易な方法で明示する必要があるため、日本や米国の耐震規定で多く使用されている既往最大級という概念を取り入れた。

設計において考慮する変動作用は、一つだけを対象とすることは少なく、同時に複数を考慮するのが一般的である。しかし、同時に作用し得る変動作用にあっても、最大値もしくは最小値が同時に起きる可能性は一般に必ずしも大きくないと考えられるので、複数の変動作用を考える場合には、何らかの調整を行うことが合理的である。したがって、作用の組合せにおいて、変動作用は主たる変動作用と従たる変動作用に分け、主たる変動作用の大きさは最大値または最小値の期待値とし、従たる変動作用の大きさは、主たる変動作用または偶発作用との組合せに応じて適切に定めることとした。その大きさは、同じ変動作用を主たる変動作用とした場合よりも一般に小さい値に設定してよい。

(2) について 使用性の照査に用いる「比較的しばしば生じる大きさ」の作用とは、その段階までは鋼材料の降伏、有害な変形等の限界状態に達して欲しくないという作用で主に永続作用、変動作用を対象とする。それぞれの構造物の特性や作用の種類、検討すべき限界状態に応じて定める。

2.3 作用の種類

鋼構造物の設計にあたっては、検討が必要な照査項目と部材ごとに作用を適切に設定しなければならない。

【解説】

鋼構造物の設計にあたっては、照査項目と継手・連結部、鋼床版などの部材ごとに作用を適切に設定する必要がある。

鋼構造物の設計にあたって考慮する必要がある作用の種類を以下に列挙するが、架設地点の諸条件や構造種別などによって適宜選定すればよく、必ずしも総て採用する必要はない。

(1) 一般に力にモデル化して考慮する作用（荷重）

①死荷重

死荷重は、構造物を構成し、または付帯する材料の重量に起因する作用（荷重）である。死荷重の特性値は実作用を基本とし、そのばらつきを調査して定める必要がある。死荷重の公称値の算出は、設計図書に基づいて行い、固定死荷重と付加死荷重に分けるのが一般的である。道路橋および鉄道橋のように各種材料の単位重量の標準値が示されている場合には、それらが参考になる。

②活荷重（自動車荷重、列車荷重、群集荷重）

活荷重は、構造物上を移行する自動車、列車、歩行者（群集を含む）等を考慮した作用（荷重）である。活荷重の特性値は、荷重の変動を考慮して定めなければならない。道路橋および鉄道橋のように、活荷重について規格値のある場合は、それらが参考になる。疲労耐久性の照査には、設計供用期間中の変動荷重をすべて考慮し、適当な大きさの荷重とそれに応じた等価繰返し回数を定める解析手法もある。

③衝撃

衝撃は、自動車、列車等が構造物上を移行することに伴って生じる動的な影響により、静荷重よりも大きな影響が構造物に生じる現象を考慮した作用（荷重）であり、活荷重の載荷に際して考慮する必要がある。衝撃の特性値は、構造物の支間、構造特性等に応じて定める必要がある。衝撃係数を活荷重に乗じることによって、動的効果を静的な力にモデル化して設計する方法が一般的である。

④風荷重

風荷重の特性値は、構造物が設置される地点の風の特性、構造物の種類、部材の断面形状等によって異なるため、これらを考慮して定める必要がある。吊橋や斜張橋のように可とう性に富む構造や部材では、風による振動の影響を受けるため、風による動的な影響も考慮する必要がある。

⑤雪荷重

雪荷重を考慮する必要がある地域においては、架設地点での積雪の特性や管理の実状に応じて雪荷重の特性値を定める必要がある。

⑥制動荷重および始動荷重

制動荷重および始動荷重の特性値は、走行車両の種類、構造物の特性に応じて定めるものとする。制動荷重および始動荷重は、走行車両の減速時および始動時に作用する荷重であり、主に列車が走行する構造物に対して考慮するものとするが、極端に軽い構造物上を自動車が走行する場合についても考慮するか否かを十分に検討する必要がある。

⑦遠心荷重

遠心荷重は、曲線軌道がある場合に考慮するもので、遠心荷重の特性値は軌道車両の種類、構造物の特性に応じて定める必要がある。

⑧衝突荷重

衝突荷重は、自動車、流木、船舶等が衝突する可能性のある場合に対して考慮する必要がある。

(2) 構造物または部材に応力、変形、材料特性に経時変化をもたらす荷重以外の作用

①温度変化の影響

ラーメン、アーチ等の不静定構造物では、温度変化により受ける部材間あるいは部材各部における鋼材の伸縮量の差による影響が無視できない場合があり、構造物の種類、環境条件、部材の寸法等に応じて温度変化の影響を考慮する必要がある。

②支点移動，不等沈下の影響

支点の移動や沈下が予想され，かつ，それが構造物に影響を与える場合には，支点の沈下および移動の大きさを構造物の種類，地盤条件に応じて定める必要がある。不静定構造物に対して，地盤の圧密沈下等により支点の沈下および移動が予想される場合には，支点移動および不等沈下の影響を考慮する。

③地震の影響

地震の影響は，構造物の架設地点，構造物の種類，地盤条件等に応じて定める必要がある。構造物に対する地震の影響は，架設地点，地盤，地形，構造物の種類などによって異なり，地盤，基礎構造物を含めた構造系全体として考慮する必要がある。

④環境の影響

鋼構造物の立地条件によっては，飛来塩分，排気ガスなどの作用を受け，塗装やシェルターなどの要求性能が決定される場合がある。したがって，架設地点や使用材料などを考慮し，設計供用期間中において最も作用が厳しくなるように大きさを定める必要がある。

(3) その他，必要に応じて考慮する作用

構造物が土中，水中にある場合には土圧，水圧，波圧，軌道がある場合にはロングレール荷重，コンクリートとの複合構造物ではコンクリートのクリープ，乾燥収縮などの影響を考慮しなければならない。

また，施工時は完成後とは異なった構造系で実施している場合があり，施工方法によっては施工後の状態とはまったく異なった応力が発生することがあるため，施工時には，施工方法，施工中の構造および重量による作用を考慮する必要がある。施工時荷重とは，構造物の施工時に作用する荷重である。また，施工方法によっては施工時の応力が完成後に残留する場合があり，この場合には完成後に作用する応力にたしあわせるなどの配慮をする必要がある。

2.4 荷重係数

荷重係数は，照査する要求性能に応じて適切に定めなければならない。

【解説】

荷重係数の設定では，確率・統計的手法を用いた信頼性理論に基づいて，大きさのばらつきを表わす確率分布を用いることが考えられる。例えば，ある作用の大きさのばらつきを表わす確率分布が得られれば，あらかじめ指定された超過確率（ $=1 - \text{「非超過確率」}$ ）を持つ値が求められることとなる。

荷重係数は，一般に限界状態における安全性や復旧性の検討において意味を持つものと考えられ，永続作用，変動作用，偶発作用について考慮しなければならない。また，使用性の検討に対しても形式的に安全係数を考慮する。作用の種類に対する安全係数（荷重係数）の例を表Ⅲ-2.4.1に示す²⁾。

上記の例において永続作用のうち死荷重の変動は，主にコンクリート部材の材料の単位重量変動と構造物の断面寸法変動の相乗効果によるものであり，安全性の検討に対し荷重係数は，小さい方が不利となる場合 0.9～1.0，大きい方が不利となる場合 1.0～1.1 とする。鋼材は，公差による断面寸法変動の相乗効果によるものが考えられるが，一般的に小さいと考えられるので，荷重係数は 1.0 としている。

外装材や防音壁，高欄，舗装などの付加死加重に対する荷重係数は，ばらつきも大きく，将来その規模，形状が変動する可能性が大きいので，安全性の検討に対し 0.8～1.2 とすることが多い。

偶発作用は，設計供用期間中に作用する確率がきわめて小さいか，もしくは算定できない作用であり，その大きさや現象を適切に求めることを前提として，一般には荷重係数は 1.0 とすることが多い。

表Ⅲ-2.4.1 荷重係数の例

要求性能	作用の種類	安全係数
安全性・耐震性(復旧性)	永続作用	0.9~1.1
	主たる変動作用	0.8~1.2
	従たる変動作用	1.0
	偶発作用	1.0
耐久性(疲労)	永続作用+変動作用	1.0
使用性	永続作用+変動作用	1.0

2.5 作用の組合せ

要求性能の照査に対して、作用を適切に組合せるものとする。

【解説】

性能の照査において、死荷重や活荷重による作用のみを考慮することは少なく、発生頻度の低い作用も組合せて断面力を計算するのが一般的である。この場合、それぞれの作用の上限値を重ね合わせたのでは不経済な設計となるばかりでなく、不合理な設計となる。そこで、安全性や耐震性(復旧性)に対する照査は、ある一つの変動作用を主たる変動作用とし、その他の変動作用を従たる変動作用とする作用の組合せに対して行うのが実用的である。

設計の実務上では作用からの変換を経て得られる荷重あるいは荷重効果のレベルにおいて考慮されることが多いため「荷重の組合せ」と称されることが多いが、本章の位置付けから「作用の組合せ」とした。

作用の組合せの例を表Ⅲ-2.5.1 に示す²⁾。

表Ⅲ-2.5.1 作用の組合せの例

要求性能	考慮すべき作用の組合せ
安全性・耐震性(復旧性)	永続作用+主たる変動作用+従たる変動作用
	永続作用+偶発作用+従たる変動作用
耐久性(疲労)	永続作用+変動作用
使用性	永続作用+変動作用

主たる変動作用：作用の大きさは最大値または最小値分布の期待値

従たる変動作用：主たる変動作用と偶発作用との組合せに応じた適切な大きさ

参考文献

- 1) 国土交通省：土木・建築にかかる設計の基本，2002年10月
- 2) 土木学会コンクリート委員会：複合構造物の性能照査指針(案)，2002年10月。
- 3) 土木学会コンクリート委員会：コンクリート標準示方書[構造性能照査編]，2002年3月。
- 4) 土木学会鋼構造委員会：土木鋼構造物の性能設計ガイドライン，2001年10月。
- 5) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編，2002年3月。
- 6) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 鋼・合成構造物編，1992年10月

第3章 材料

3.1 一般

3.1.1 材料の物性に関する基本的事項

鋼構造物に使用する材料は、その基本的な物性として以下を満たすものでなければならない。

- (a) 適当な強度と粘りを有すること
- (b) 供用期間中に生じる材質や特性の変化、劣化が予測できること
- (c) 地球環境に与える影響が小さいこと
- (d) 人や動植物に対して与える影響が小さいこと

【解説】

本条は、鋼構造物に使用する材料、すなわち構造体を構成する材料（鋼、コンクリート）、付属物や舗装に使用する材料（ゴム、プラスチック、瀝青材料）、施工に使用する材料（溶接、塗装）、あるいは供用の便を高めたり、維持管理に使用する材料（融雪剤、洗浄剤など）に求められる基本的な物性を示したものである。

- (a) 構造物を形成する素材の基本的要件として、様々な荷重等の作用に対して抵抗しうること。
- (b) 供用期間中の劣化現象が予測でき、想定外の限界状態に至らないこと。
- (c) CO₂ 排出量やエネルギー消費量が小さいこと（LCA）、およびリサイクル性に優れていること。
- (d) 施工中、供用時に発生、飛散あるいは流出する物質についても、人や動植物に対して与える影響が小さいこと。

3.1.2 材料に要求される特性

(1) 鋼構造物に使用する材料は、構造物および部材に対する要求性能を満足するために必要な特性を有するものでなければならない。

(2) 材料の特性は、測定可能な物理量により記述され、計算モデルに合致しているものでなければならない。

【解説】

(1) について 材料に要求される特性は、その使用目的によって異なる。すなわち、使用材料はその材料から構成される構造物および部材に対する安全性、使用性、耐久性等の要求性能に適合することを検討して選定されなければならない。

(2) について 材料は、設計上の必要に応じて、引張・圧縮・せん断等の強度特性、弾性係数その他の変形特性、熱特性、水密性等の材料特性によって評価する。

材料の特性およびそのばらつきを考慮した特性値は、JIS等で定められた試験、既に認められた方法で実施された試験結果により定められ、これらの実験は考慮する母集団の代表値であるランダムなサンプルに基づいて行われる必要がある。また、試験体から得られた特性値は、適切に設定された換算係数あるいは関数を用いて、計算に用いるモデルに変換される。しかし、一般に設計段階では使用される材料は特定されていないため、このような実験的方法によるより、統計値から推測する方が合理的である¹⁾。なお、JIS等で規格値が定められている場合はその値を特性値とし、また、定められていない場合は試験値がその値を下回る確率がある一定の小さな値となる値を特性値とする²⁾。

3.2 鋼材

3.2.1 鋼材に要求される特性

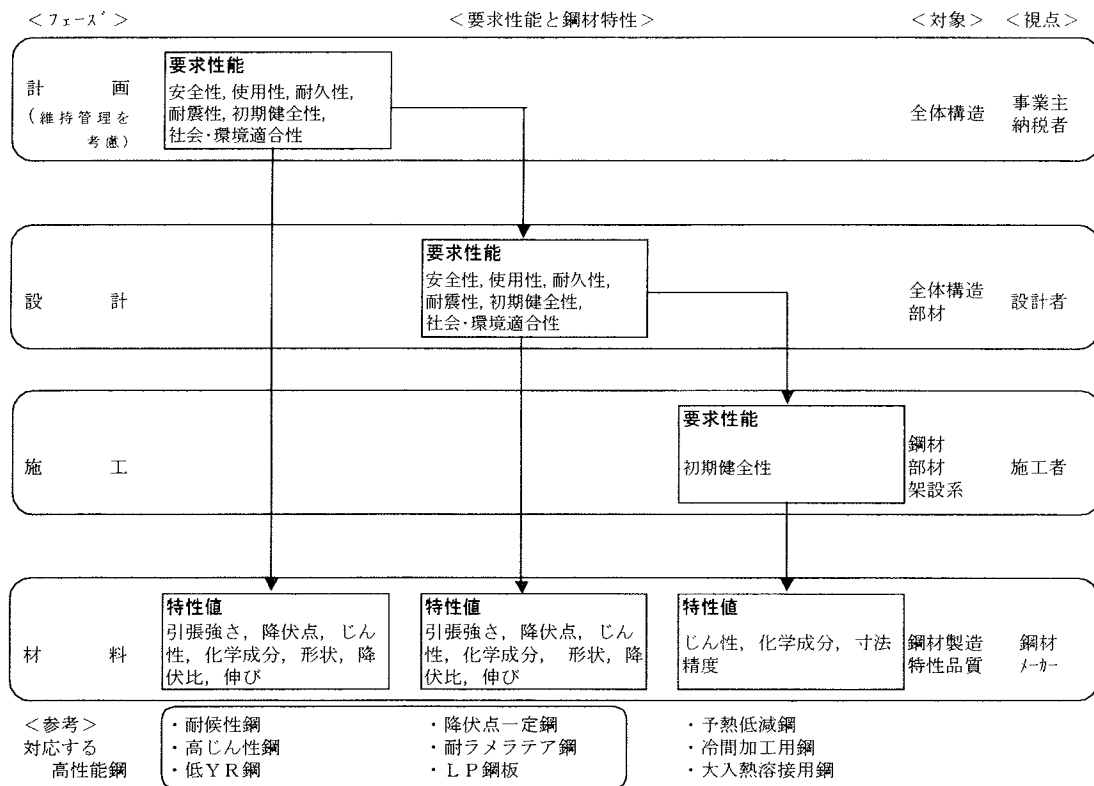
(1) 鋼材は、強度・伸び・じん性等の機械的性質、化学組成や有害成分の制限、厚さやそり等の形状寸法などの材料特性が、構造物に要求される様々な性能を満足するものでなければならない。

(2) JISなどの規格に適合し、かつ十分な使用実績のある鋼材については、(1)に示す必要な材料特性を有するものとみなしてよい。これらは、鋼材検査証明書により規格に適合していることを確認することによって使用することができる。

【解説】

(1) について 鋼構造物に使用する鋼材への基本的な要求を規定したものである。使用材料は、全体構造や部材の安全性、耐久性、あるいは溶接等の施工性など、使用目的に応じて要求される種々の性能を満足するために、必要な特性や品質を有するものでなければならない⁵⁾。

図Ⅲ-3.2.1は、文献4)を参考にして、鋼構造物の要求性能と鋼材特性との関係を模式的に示したものである⁵⁾。この関係図の基本的な考え方は、鋼構造物の計画、設計、施工、維持管理の各フェーズにおける要求性能に対して対象と視点を設定し、建設段階の各フェーズよりなる階層毎に、“要求性能”と“鋼材特性値”との関係を連鎖の形で表現したものであり、各フェーズからも“鋼材特性値”が導かれるというものである。ここでいう対象、視点は、それぞれ構成部材、事業の関係者のことを示す。また、要求性能は、この対象、視点、フェーズ毎に設定されるが、対象、視点が下層になるにしたがって要求性能は限定的なものとなる。そして最下層の「材料」においては、各フェーズにおける要求性能を満たす鋼材特性値を総合することによって、最適な材料仕様が決定される。



図Ⅲ-3.2.1 鋼構造物の要求性能と鋼材特性との関係⁵⁾

このように、橋を設計・施工する上で要求される種々の性能と、それを満たすために必要な鋼材の特性や品質とは相互に影響しあっている。例えば、鋼材のじん性（シャルピー吸収エネルギー）に着目すると、寒冷地に建設される構造物では、供用時の脆性破壊を避けるために鋼材には必要なじん性が要求され、また、鋼材を常温で曲げ加工する場合にも、塑性加工に起因する脆化を考慮して予めじん性の高い鋼材を使用することが望まれる。一方、溶接の熱影響部に要求されるじん性を満足させるためには、溶接方法、溶接条件、および要求じん性値に基づき、化学成分を調整した鋼材を使用しなければならない。すなわち、設計、施工、供用を通して要求される種々の性能に対して、鋼材の特性や品質はこれらを最大公約数的に満たすように用いられなければならない。

(2) について 通常、構造物の設計は使用材料の特性や品質をあらかじめ想定した上で行われる。そのため、使用する鋼材は安定した品質が確保されていることが使用上の前提条件となる。一般に工業製品の場合、製品の特性にはばらつきがあるため、その平均値や分布状態が所定の水準を確保するなど、所要の品質を有するものでなければならない。このような品質確保の手段として一般的に JIS などの規格品が用いられている。JIS などの規格に適合し、かつこれまでに十分な使用実績のある鋼材は、通常の場合品質が一定の水準以上であるものと考えられるため、条文(1)に示した必要な品質を有しているものとした。したがって、これらの鋼材については、必ずしも事前の品質確認試験によらなくとも、鋼材検査証明書（ミルシート）をもって、その品質確認に替えることができることとした³⁾。

また、最近、設計施工のさらなる合理化や経済化、あるいは耐久性などの性能向上を目的に、特性や品質が改善された種々の新しい鋼材が使用されている(3.2.2 (2) 参照)。これらの鋼材の大半は、JIS などの規格品を下敷きとして化学成分や圧延方法を部分修正することによって製造されるものである。したがって、このような鋼材を構造物に適用するにあたっては、鋼材特性の部分的変更が構造物の性能に及ぼす影響を試験等によって確認することによって使用することができる。また、その品質については JIS などの規格と同等であると考えられるため、鋼材検査証明書をもってその品質確認に替えることができる。なお、鋼材特性の一部が現行規格から逸脱したものについても同様に扱うことができる。

3.2.2 鋼種や材質の選定

(1) 鋼構造物に使用する鋼材の鋼種や材質の選定にあたっては、使用される部位における応力状態、架設位置の環境条件、防食法、施工方法などに応じて鋼材の強度、延性、じん性、化学組成、形状寸法、表面性状等を考慮しなければならない。

(2) 所定の品質確保、施工性の改善、省力化などを目的として、種々の特性を有する鋼材を選定することができる。ただし、その目的を満たす特性を有することを試験等により確認するものとする。

【解説】

(1) について 鋼種や材質の選定における基本原則を示したものである⁶⁾。また、以下の場合は鋼種や材質の選定に特別な配慮が必要である。

1) 地震時にエネルギー吸収性能や変形性能を期待される部材に使用される場合

道路橋示方書V耐震設計編⁷⁾では、設計地震動のレベルと橋の重要度に応じて必要とされる耐震性能を確保するとの基本理念に基づき、レベル2地震動に対しては、地震後の耐震性能を確保する条件付きで、ある程度の損傷発生を許容する設計法が採用されている。コンクリートを充填しない鋼製橋脚については、レベル2地震動による発生ひずみが、使用する鋼材の降伏点を越えた弾塑性領域に至ることを許容することにより、地震エネルギーを構造部材で吸収することを意図した設計法である。

この場合、構造部材や接合部位には割れ等の破損が生じないことが前提となる。このため、地震時にエネルギー吸収性能や変形性能を期待される部材に使用される鋼材には、降伏点以降の応力-ひずみ関係^{8),9)}や破壊じん性¹⁰⁾、板厚方向の絞り値⁷⁾などに対する配慮が必要である。

2) 気温が著しく低下する地域に建設される場合

気温が著しく低下する地方では、低温ぜい性に注意して鋼種の選定を行わなければならない。特に引張力を受ける重要な溶接構造部材に使用される鋼材は、その地方における最低気温を考慮して適切なじん性を確保することが望ましい。寒冷地における鋼種の選定基準については、道示には明確な規定はないが、独自の規定を適用している機関もあり、選択の際にはそれらを参考にするとよい¹¹⁾。なお、北海道開発局の基準では最低気温により3つの区分(最低気温 $\geq -25^{\circ}\text{C}$ 、 $-35^{\circ}\text{C} < \text{最低気温} < -25^{\circ}\text{C}$ 、最低気温 $\leq -35^{\circ}\text{C}$)により地域を分割し、それに応じた鋼材の使用基準が定められている。

3) 溶接により拘束力を受ける主要部材で板厚方向に主として引張力を受ける場合

拘束条件が厳しい貫通板継手、T形継手、かど継手などの溶接施工を行う場合や、構造的に板厚方向に引張力を受けるような部材では、鋼材の板厚方向の強度または延性の限界を上回った場合には、ラメラテアと呼ばれる板厚方向の割れが生じることがある。

ラメラテアは、鋼中の主に硫化物系(MnS系)の介在物が、圧延によって鋼板の表面に平行に長く伸ばされ、介在物と地鉄との間に板厚方向の作用によって開口が生じる現象である。したがって、材料面では鋼中の硫黄含有量がラメラテア感受性の目安となる。

ラメラテアを防止するには、適正な継手形式の選択(溶接設計)、溶接時に生じる板厚方向の応力またはひずみの低減(溶接施工)、板厚方向の強度または延性の大きい鋼材(耐ラメラテア鋼)の使用、の三者を総合的に評価することが基本的な考え方となる¹²⁾。

4) 主要部材において小さな曲げ半径で冷間曲げ加工を行う場合

景観上やより合理的な構造とすることを目的として、小さな曲げ半径を有する部材が採用される機会が増加している。このような部材は冷間曲げ加工することによって形成される場合が多いが、鋼材は冷間曲げ加工により硬化し、この影響でじん性が低下する。この硬化は加工後の時間の経過により進行し、この現象をひずみ時効ぜい化という。素材の性能を保持し、ひずみ時効ぜい化の影響を極力小さく留めるためには局所的に大きなひずみを与えないようにすることが重要であり、一般には曲げ加工にあたっては表面ひずみが約3%以下となる内側半径の大きさを板厚の15倍以上確保することが望ましい。鋼材の材質によっては調質鋼のようにじん性があまり低下しないとの報告¹³⁾もあり、このような材料を使用する場合や適当な試験によってぜい性破壊が生じないことを確認した場合はこの限りではない。なお、一般的に曲げ加工を行う際には次のようなことに注意する必要がある。

- ・加工によって材料に切欠きとなる傷を与えないよう加工前に押刃及び受台をよく清掃しておく。
- ・折曲げ部のエッジは、加工前に最小0.1tの面取りを行う。
- ・曲げ加工を行う鋼板の外側には、加工前にポンチを打たない。

5) 溶接割れ防止の予熱温度を低減して溶接施工を行う場合

合金元素が多く、また拘束度が大きな部材を溶接する場合、溶接時に水素に起因するわれが発生することがある。これを防止するため、一般的に鋼材を予熱している。最近、使用鋼材の厚肉化に伴い、予熱温度が高くなる傾向にあるが、この予熱作業は施工上多大な負荷を要し、また作業環境上も好ましくなく、極力予熱温度の低減が望まれている。

予熱温度と鋼材の化学成分の関係については、溶接われ感受性組成(P_{CM})で良く整理できることが明らかとなっており、したがって鋼材面から溶接われを防止するには P_{CM} の低減が有効である。

ただし、溶接われは鋼材の化学成分(P_{CM})のみで決まるものではなく、溶接材料の種類(拡散性水素量)、溶接継手形状(板厚、拘束度)も大きく影響するため、実際の予熱温度選定にあたってはこれらも考慮する必要がある。

6) 溶接入熱量の大きい溶接法を適用する場合

少数主桁橋に用いられる大断面 I 桁に現場溶接を採用する場合などでは、極力溶接入熱量を大きくし、溶接パス数を低減することにより、溶接施工の効率化が図られる。しかし、一般的な鋼材の溶接熱影響部は、溶接入熱量が大きいほどじん性が低下する傾向にあるため、無条件に入熱の高い溶接法を適用することは避けなければならない。道路橋示方書においても鋼種に対応して入熱量の制限値が設けられている。ただし、最近ではこのような入熱制限を上回る大入熱溶接を適用しても溶接熱影響部のじん性低下が小さく、じん性が確保できる鋼材が開発されており、溶接施工試験により品質を確認したうえで、このような鋼材を使用することができる。

なお、大入熱溶接を行う場合、溶接材料についても、溶接金属の性能を確保できる適切な材料を選定する必要がある。

(2) について 鋼構造物に汎用的に使用されている鋼材と比較して、強度、じん性、溶接性、曲げ加工性、耐腐食性等において、より優れた特性を有する鋼種、鋼材を使用する場合の考え方について示したものである。以下に、最近開発された、優れた特性を有する鋼材について記す。

1) じん性の高い鋼材

主要部材において冷間曲げ加工を行う場合、じん性が低下する問題があるため、内側半径は板厚の15倍以上とするのが望ましい。ただし、じん性の高い鋼材の使用により、冷間曲げ加工部のじん性を十分に確保できる場合には、より小さな曲げ半径での冷間曲げ加工が可能となる。具体的には、鋼材規格で衝撃試験が規定されている鋼種で JIS Z2242 に規定するシャルピー衝撃試験の結果が表 III-3.2.1 に示す条件を満たし、かつ化学成分中の全窒素量が 0.006% をこえない材料は、内側半径を板厚の7倍以上又は5倍以上で冷間曲げ加工することができる。

また、一般に低温では鋼材のじん性が低下し、ぜい性破壊を起こしやすくなるが、じん性の高い鋼材を用いることによって、寒冷地への適用の問題を改善することができる。

表 III-3.2.1 シャルピー吸収エネルギーに対する冷間曲げ加工半径の許容値

シャルピー吸収エネルギー (J)	冷間曲げ加工の内側半径	付記記号 ^(注)
150以上	板厚の7倍以上	-7L, -7C
200以上	板厚の5倍以上	-5L, -5C

注) 1 番目の数字: 最小曲げ半径の板厚に対する倍率

2 番目の記号: 曲げ加工方向 (L: 最終圧延方向と同一方向 C: 最終圧延方向と直角方向)

2) 耐ラメラテア性能を有する鋼材

板厚方向に大きな引張応力が作用する溶接継手では、鋼板表面と平行に発生するわれ(ラメラテア)を生じる危険性がある。このような場合、溶接施工上の対策とともに、耐ラメラテア性能を有する鋼材を使用することもできる。JIS G3199では、板厚方向引張試験における絞り値と鋼中の硫黄含有量を保証した耐ラメラテア性能を有する鋼材が規定されている(表 III-3.2.2 参照)。

表Ⅲ-3.2.2 厚さ方向の絞り値及び硫黄含有量(JIS)

クラス番号	3個の試験値の平均値	個々の試験値	硫黄含有量
Z15S	15%以上	10%以上	0.010%以下
Z25S	25%以上	15%以上	0.008%以下
Z35S	35%以上	25%以上	0.006%以下

3) 鋼板の板厚を長手方向に変化させた鋼材

圧延技術の進歩により、長手（圧延）方向に連続的に板厚が変化する鋼板（LP（Longitudinally Profiled）鋼板）が製造可能となった。LP鋼板の適用により、鋼重低減、製作加工工数の削減、接合部の等厚化によるボルト接合部でのフィラープレートの省略、溶接継手部での板厚調整作業の省略などの効果が得られる可能性がある。

4) 溶接施工時の予熱温度を低減できる鋼材

鋼材を溶接する場合、一般に鋼材の合金元素量が多いほど、また板厚が厚いほど溶接割れが生じやすくなるため、予熱が必要となる。このような場合、溶接割れ感受性組織（PCM）を低くした鋼材を用いることにより、割れ防止予熱温度を下げることができ、予熱作業およびその付帯作業の軽減あるいは省略が可能となる。

5) 溶接入熱量を増大しても溶接熱影響部のじん性を確保できる鋼材

一般に、溶接熱影響部のじん性は、溶接熱量の増大に伴って低下する傾向にあり、大入熱溶接を行うと、溶接熱影響部において所定のじん性を確保できなくなる場合が生じる。このような場合、大入熱溶接を適用しても所定のじん性を確保できる鋼材（大入熱溶接対策鋼）を使用することにより所定のじん性の確保が可能となる。大入熱溶接対策鋼の使用にあたっては、溶接機器、開先形状、溶接条件などが影響するため、道路橋示方書鋼橋編⁶⁾17.4.4に記載されている方法により品質を確認する必要がある。

6) 板厚により降伏点または耐力の保証下限値が変化しない鋼材

現在のJISでは、鋼材の降伏点または耐力は板厚が厚くなるにつれて低下する。これに対して板厚により降伏点または耐力の保証下限値が変化しないことを保証した鋼材が製造可能となっており、板厚が40mmをこえる鋼材について、鋼重低減、設計上の煩雑さ回避などの効果が期待できる。

7) 塩分に対する耐食性を向上させた耐候性鋼材

機械的性質がJISの耐候性鋼材の規格に適合し、塩分に対する耐食性を向上させた耐候性鋼材（ニッケル系高耐候性鋼）が使用され始めている。これらは、Crを無添加とし、Ni、Cu、Mo、Ti等を添加した低合金鋼であり、従来の耐候性鋼(JIS G 3114)の適用が難しい塩分環境においても適用が可能である。

3.3 コンクリート

鋼構造物に使用するコンクリートに要求される特性、ならびに材料選定に関する事項は、土木学会「コンクリート標準示方書」の該当規定による。

3.4 材料の設計用値

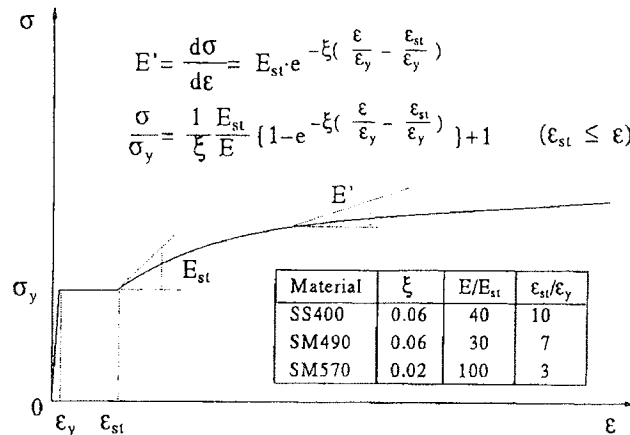
材料の各特性値や設計強度，材料係数は，その材料のばらつき等の品質を考慮して適切な方法により設定しなければならない。

【解説】

材料の引張強度，圧縮強度，せん断強度等の各特性値，ならびに設計強度，材料係数について規定したものである。本指針（試案）において材料強度等の特性値は，試験によって定めることを原則としているが，JIS等で規格値が定められている場合はその値を特性値としてよいものとした（3.1.2参照）。その場合，JIS等の規格に適合する構造用鋼材の特性値は該当規格の下限値としてよい。また，材料の設計強度や材料係数については，土木学会「鋼構造物設計指針」，日本鋼構造協会「鋼構造物の疲労設計指針・同解説」等を参考に定めてよい。

また，構造用鋼材の疲労強度は，鋼材の種類，形状および寸法，継手の方法などを考慮して，日本鋼構造協会「鋼構造物の疲労設計指針・同解説」等を参考に定める。

構造用鋼材の応力－ひずみ曲線を用いて安全性の検討を行う場合には，検討の目的に応じて適切な構成式を設定する。鋼材のひずみ硬化の影響を考慮する場合の応力－ひずみ曲線の例¹⁴⁾を図Ⅲ-3.2.2に示す。



図Ⅲ-3.2.2 鋼材の応力－ひずみ曲線の例¹⁴⁾

参考文献

- 1) 清水建設株式会社：ISO-2394 構造物の信頼性に関する一般原則 邦訳，1998年3月
- 2) 土木学会：鋼構造とコンクリート構造の限界状態設計法に関する共通の原則，土木学会論文集 No.450/I-20，pp.13-20，1992年7月
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I 共通編，2002年3月
- 4) 猪熊明：土木分野における性能規定化に関する基礎的考察，土木学会論文集No.651/VI-47，pp.163-168，2000年6月
- 5) 日本鋼構造協会 鋼橋の性能照査型設計対応研究委員会：鋼橋の要求性能と安全性評価技術，pp.42-54，2002年9月
- 6) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編，2002年3月
- 7) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，2002年3月
- 8) 土木学会，日本鋼構造協会：鋼構造物の耐震解析用ベンチマークと耐震設計法の高度化，2000年4月

- 9) 富永知徳, 安波博道: 厚肉少補剛断面を有する鋼製橋脚の変形能に関する実験的研究, 構造工学論文
集, Vol.40A, 1994年3月
- 10) 佐々木栄一, 橋梁用鋼材の所要靱性値に関する検討, 高機能・高性能鋼材の橋梁への利用研究報告,
日本鋼構造協会, pp.58-67, 2000年
- 11) 日本道路協会: 道路橋施工便覧, 丸善, 1985年2月
- 12) 土木学会 鋼構造委員会鋼材規格小委員会: 耐ラメラテア鋼の土木構造物への適用, 土木学会誌,
1985年8月
- 13) 堀川浩甫: 冷間加工に伴なう構造用鋼材のひずみ時効脆化, 土木学会論文報告集, No.300, 1980
年8月
- 14) 土木学会 鋼構造新技術小委員会: 鋼橋の耐震設計指針案と耐震設計のための新技術, 1996年3月

第4章 構造解析

4.1 一般

(1) 構造物または構造部材に生じる断面力，応力，変位量等の応答値の算出は，架設中および供用中に予想される全ての外的作用に対する構造物または構造部材の挙動を最も適切に評価できる解析理論および解析モデルを用いて行うものとする。

(2) 適切な構造解析理論および構造解析モデルが存在しない場合は，解析を用いないものとする。この場合，実験により求められる構造物または構造部材の応答値を用いてよい。

【解説】

(1) について 鋼構造物の応答値としては，以下のものが挙げられる¹⁾。

- ①動的応答値あるいは静的応答値
- ②弾性応答値あるいは弾塑性応答値
- ③幾何学的線形応答値あるいは幾何学的非線形応答値
- ④時間非依存型応答値あるいは時間依存型応答値（例えば，コンクリートとの合成構造におけるコンクリートのクリープ）

また，構造解析モデルとしては，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，あるいは，これらの組み合わせにより適切に簡略化したモデルがある。

材料の力学特性モデルとしては，線形モデルと非線形履歴モデルがあり，後者は，さらにバイリニア型，トリリニア型等に細分される。

外的作用により構造物または構造部材に生じる断面力，応力，変位量等の応答値は，対象とする構造物と照査する限界状態の種類，作用する荷重状態に応じた部材の材料特性，構造物の規模や構造形式に応じた幾何学的特性，支持条件等を適切に評価できる解析理論や解析モデルを適用して算出することとし，どのような解析理論や解析モデルを用いるかは，設計者の裁量に委ねることとした。なお，構造解析を実施するに際しては，使用する解析理論や解析モデルが，例えば，「信頼度の高い解析結果が得られることが十分実証されている」ものか否かを十分に把握した上で応答値を算出する必要がある。

構造物として複数の限界状態に達するモード（破壊モード）を有する場合には，想定される外的作用の組み合わせに対して最も厳しい条件下で応答値が算出できるようにすることが重要である。この時，個々の部材の応答値を求めて性能を照査するのか，構造物全体としての性能を照査するのかについても十分な検討が必要である。

(2) について 適切な構造解析理論および構造解析モデルが存在しない場合は，実験により構造物または構造部材の応答値を求めてもよいこととした。

実験による応答値に関しては，一般に物理現象そのものの有する不確定性，および，実験データの数が必ずしも十分でないことに起因する統計的不確定性が含まれることから，

統計的な処理が必要となることに留意する必要がある。第Ⅲ編1.2.2(3)に記されているような部分安全係数を用いた照査を念頭に置いている場合には、部分安全係数によりこれらの不確定性を考慮するのが一般的である。

実験では考慮できない条件(例えば、長期間に渡る暴露の結果生じる状態)に関しては、別途十分な考慮が必要である。

4.2 安全性を照査するための応答値の算定

(1) 構造物に要求される安全性を照査するのに最も適した応答値を設定し、その応答値を算出するのに適した解析理論および解析モデルを用いて応答値の算出を行うものとする。

(2) 適切な構造解析理論および構造解析モデルが存在しない場合は、解析を用いないものとする。この場合、実験により求められる構造物または構造部材の安全性を表す応答値を用いてよい。

【解説】

(1) について 設計された構造物または構造部材の安全性は、それらが第Ⅲ編第5章に記された安全性に対する要求性能を満足しているかどうかを照査することにより確保される。安全性照査の対象となる限界状態は終局限界状態であり、終局限界状態には破壊限界、降伏限界、変形限界、変位限界、塑性崩壊、座屈限界、剛体的安定限界が含まれる。安全性の照査に用いる応答値は、設計の対象とする限界状態に応じて「作用軸力」であったり「作用応力」であったりするが、終局限界状態に達するかどうかを最も適切に照査できる応答値を採用するのが望ましい。

終局限界状態に関する応答値の算出に用いられる解析手法としては、変形が大きい場合に変形後の構造物の幾何形状と初期形状との差を考慮する幾何学的非線形を考慮した有限変位解析、構造物を構成する材料の変形挙動が弾性的でないという材料非線形を考慮した弾塑性解析、さらには、これら両者を同時に考慮した複合非線形解析がある。また、有限要素法が構造解析に用いられることが多いが、その際の構造物のモデル化に用いられる要素には、はり要素とシェル要素があり、はり要素は、 $M-\phi$ 要素とファイバー要素に大別される。どの手法、どの要素を用いて構造解析を行うかは、解析の対象とする構造物および終局限界状態の種類に応じて判断するのが望ましい。

(2) について 適切な構造解析理論および構造解析モデルが存在しない場合は、実験により、安全性の照査に必要な構造物または構造部材の応答値を求めてもよいこととした。

4.3 使用性を照査するための応答値の算定

(1) 構造物に要求される使用性を照査するのに最も適した応答値を設定し、その応答値を算出するのに適した解析理論および解析モデルを用いて応答値の算出を行うものとする。

(2) 適切な構造解析理論および構造解析モデルが存在しない場合は、解析を用いないものとする。この場合、実験により求められる構造物または構造部材の使用性を表す応答値を用いてもよい。

【解説】

(1) について 設計された構造物または構造部材の使用性は、それらが第Ⅲ編第6章に記された使用性に対する要求性能を満足しているかどうかを照査することにより確保される。使用性照査の対象となる限界状態は使用限界状態であり、使用限界状態には走行限界、歩行限界が含まれる。使用性の照査に用いる応答値は、設計の対象とする限界状態に応じて「振動加速度」であったり「たわみ」であったりするが、使用限界状態に達するかどうかを最も適切に照査できる応答値を採用するのが望ましい。

使用性の照査の対象となる作用や荷重は、設計供用期間中に比較的頻繁に生じるものであり、終局限界状態の照査に用いられる作用や荷重よりも小さいのが一般的である。そのため、使用限界状態に関する応答値の算出には、幾何学的非線形や材料非線形を考慮しない線形解析を用いればよいことが多い。ただし、場合によっては、あるつり合い状態をもとに線形化して有限変位問題を構築する線形化有限変位解析を用いる方が適切なこともあると考えられる。どの手法を用いて応答値の算定を行うかは、解析の対象とする構造物および使用限界状態の種類に応じて判断するのが望ましい。

(2) について 適切な構造解析理論および構造解析モデルが存在しない場合は、実験により、使用性の照査に必要な構造物または構造部材の応答値を求めてもよいこととした。

4.4 耐久性を照査するための応答値の算定

(1) 構造物に要求される耐久性を照査するのに最も適した応答値を設定し、その応答値を算出するのに適した解析理論および解析モデルを用いて応答値の算出を行うものとする。

(2) 適切な構造解析理論および構造解析モデルが存在しない場合は、解析を用いないものとする。この場合、実験により求められる構造物または構造部材の耐久性を表す応答値を用いてもよい。

【解説】

(1) について 設計された構造物または構造部材の耐久性は、それらが第Ⅲ編第7章に記された耐久性に対する要求性能を満足しているかどうかを照査することにより確保される。耐久性照査の対象となる性能には耐疲労性、耐腐食性、材料耐久性、維

持管理性が含まれる。耐久性の照査に用いる応答値は、設計の対象とする要求性能に応じて「想定される変動荷重によって生じる応力範囲の最大値」であったり「鉄筋位置での塩素イオン」であったりするが、耐久性に関する限界状態に達するかどうかを最も適切に照査できる応答値を採用するのが望ましい。

なお、第Ⅲ編 7.2.4 に記すように、供用中の構造物に適切な維持管理が施されることが極めて重要であり、設計時に想定した応答値が経年劣化により要求性能を下回る状態に達することのないよう維持管理を行う必要がある。耐久性に関する限界状態に達しそうであることが検査等で明らかになった場合には、適切な補強対策等を講ずる必要がある。また、設計段階から適切な維持管理を実施することを前提として耐久性に関する要求性能レベルを設定する方が、構造物の供用期間中に維持管理をほとんど行わないことを前提として要求性能レベルを設定するよりも経済的な場合もあることから、耐久性に関する応答値の算出に際しては、この点に留意することが重要である。

(2) について 適切な構造解析理論および構造解析モデルが存在しない場合は、実験により、耐久性の照査に必要となる構造物または構造部材の応答値を求めてもよいこととした。

参考文献

- 1) ISO2394 General Principles on Reliability for Structures, 1998.6.

第5章 安全性に対する要求性能および照査

5.1 一般

- (1) 鋼構造物は、架設時および設計供用期間中に発生する地震の影響を除く作用に対して、安全性が保持されなければならない。
- (2) 鋼構造物の安全性に関する性能項目として、耐荷性能および安定性を考慮するものとする。
- (3) 耐荷性能および安定性に対する照査は、性能を表現しうる適切な指標を設定し、それぞれの項目ごとに設定された限界状態を満足することを確認することにより行うものとする。

【解説】

安全性には主として構造物自身の耐荷性能を意味する構造安全性と使用者の安全性があるが、本章では、施工編 IV で定める初期健全性が満足されることを前提として、荷重作用下における構造安全性に関する要求性能と照査の標準を示すものである。なお、安全性には落下物等による第三者被害も考慮すべきであるが、本設計指針（試案）では考慮していない。構造物の公共性等に応じて考慮する必要がある。

地震の影響に対する安全性については8章「耐震性に対する要求性能および照査」、疲労に対する構造物の安全性については7章「耐久性に対する要求性能および照査」による。また、使用者の安全性に関わる列車や自動車等の走行安全性については第6章「使用性に対する要求性能および照査」に示す。

これらの作用に対する構造安全性の照査は、通常、構造物の耐荷性能が作用を上回ることを確認することにより行う。具体的には、構造物は、荷重等の作用が増加するにつれて変形・応力が増加し、弾性状態から塑性状態へ、あるいは安定状態から不安定状態を経て、最終的には破壊へと進む。構造安全性では、この過程における構造物の弾性、塑性、座屈、剛体的安定、変位・変形等について安全性の照査を行うこととなる。

5.2 安全性に対する要求性能

鋼構造物は、第2章で定める作用の効果以上の耐荷性能を保持するとともに、考慮する作用の範囲内で安定でなければならない。

【解説】

構造物の安全性に対する要求性能は、耐荷性能と安定性能に分類される。

耐荷性能を失う破壊現象には、部材の破断、板の局部座屈、部材の座屈、構造物全体系の座屈などがある。構造物の耐荷性能は、材料強度（引張強度、圧縮強度、せん断強度等）、部材や構造全体としての座屈強度、変形性能、部材や構造系全体としての剛性、製作や架設時の不整等によって影響を受ける。また、安定性を喪失する状態とは、座屈に伴う剛性の急激な喪失、構造物全体もしくは一部の転倒、滑動、浮き上がり等がある。

構造物は、荷重等作用が増加するにつれて変形・応力ともに増加して、弾性状態から塑性状態へ、あるいは安定状態から不安定状態を経て、最終的には破壊へと進む。しかし、2章に定める作用（地震の影響を除く）の範囲内においては、構造物を構成する部材の一部が耐荷力を失っても、構造物全体が耐荷力を失って破壊しないように構成されなければならない。

構造物に要求される耐荷性能や安定性能を左右する限界状態は、構造物の使用目的、重要度（本設構造物、仮設構造物、構造物を構成する部材の機能、損壊したときの影響度）、損傷発生時の補修・補強や復旧への考え方などによって、部材あるいは構造全体系の破壊に到るまでのどの状態を想定するかは異なる。したがって、耐荷性能および安定性能はこれらを考慮して適切に定める必要がある。

実設計における耐荷性能の具体的設定は、「5.3 安全性に対する照査」に示す照査方法に関わるものであり、設計手法、作用、構造解析方法、安全係数等によって異なるものである。これまでの鋼構造物の設計基準では、許容応力度設計法や限界状態設計法など設計手法は異なるものであるが、作用による安全性に対する最大耐荷性能は一般に弾性限界としている。

また、構造物によっては、全断面が塑性した状態での耐荷力を耐荷性能としてもよいが、この場合、構造細目として、断面構成がコンパクト断面であることが必要となってくる。

5.3 安全性に対する照査

5.3.1 耐荷性能に対する照査

耐荷性能の照査は、最大値と想定される作用効果が十分安全と考えられる抵抗力以下であることを確認することにより行う。

【解説】

性能照査型設計体系においては、安全性の照査方法は特に規定するものではなく原則自由としているが、世界的な趨勢としては確率論にもとづく設計法が提唱されている。この設計法では作用および材料強度等のばらつきから作用効果および抵抗力とも確率変数と考えられており、作用効果が抵抗力以上となる確率（破壊確率）がある目標値以下であることを確認することで安全性が照査される¹⁾。しかし、実際には種々の不確定性の確率論的特性について定量的なデータが得られない場合も多く、そのため破壊確率を直接求めることは困難な場合が多い。

このようなことから、本指針（試案）では、部分安全係数法を用いて安全性を照査する手法を設計の基本とした。部分安全係数法による耐荷性能照査の具体例としては、鋼構造物設計指針²⁾や鉄道構造物等設計標準・同解説³⁾があるが、部分安全係数法で使用される安全係数の決定に際しては、確率論に基づいて検討されることが望ましい。

また、所要の耐荷性能を確保できるならば、これまでの許容応力度設計法による道路橋設計示方書や限界状態設計法による鉄道構造物等設計標準などの設計基準により照査する方法、破壊確率を直接評価する方法、信頼性指標 β を用いる方法、当該構造物への作用荷重の大きさや発生頻度等の詳細な調査に基づく荷重の設定と実験や詳細な構造解析による安全性を確認する方法などによっても良い。

これらによる安全性照査の方法は、基本的には同じであり、作用Fにより構造物に発生する応力・断面力（作用効果S）と構造物の耐荷力や安定に対する抵抗力Rの比較によって行われる。

$$\gamma_i \frac{S}{R} \leq 1$$

この場合、作用F、作用効果S、抵抗力R、 γ_i をどのように評価するかは、設計手法、目的構造物、構造解析方法（精度）などによって異なるものであるが、作用Fと荷重効果Sは想定される最大値を、抵抗力Rは最小値とするのが一般的である。

部分安全係数法による限界状態設計法を適用している鉄道構造物等設計標準では、材料強度の特性値を降伏強度とし表Ⅲ-5.3.1に示す各種の安全係数を用いている。この場合、安全係数と許容応力度設計

法の安全率 f_s , 許容応力度 σ_a , 降伏点応力度 σ_y とは, 式 (5.2.1) のようになる.

$$f_s = \gamma_f \cdot \gamma_a \cdot \gamma_m \cdot \gamma_b \cdot \gamma_i$$

$$= \sigma_y / \sigma_a \tag{5.2.1}$$

表Ⅲ-5.3.1 鉄道構造物等設計標準の安全係数

安全係数	断面力S	耐荷力R	余裕
荷重係数 : γ_f	○		
構造解析 : γ_a	○		
材料係数 : γ_m		○	
部材係数 : γ_b		○	
構造物係数 : γ_i			○

5.3.1.1 骨組部材の耐荷性能に対する照査

骨組部材の耐荷性能の照査は, 必要に応じて以下の項目について行う.

- (1) 軸方向力を受ける場合の照査
- (2) 曲げモーメントを受ける場合の照査
- (3) 軸方向力と曲げモーメントを受ける場合の照査
- (4) せん断力あるいはねじりモーメントを受ける場合の照査
- (5) 曲げモーメントとせん断力が同時に作用する場合の合成応力の照査
- (6) 2方向の応力が加わる場合の2軸応力状態の照査

【解説】

問題の性質によっては, 有限要素法等を用いた座屈固有値解析, 弾性有限変位解析, 弾塑性有限変位解析などから適切な数値解析法を選択し, 構造物もしくは部材の応答値・耐力を計算しても良い. その際, 解析において考慮する初期不整については施工編 3.3.6 部材および組み立ての精度に対する照査で考慮されているものと整合していなければならない. また, この場合, 解析方法に応じて適切な構造解析係数を用いて照査しなければならない.

部分安全係数法によって耐荷力に対する照査を行う場合は, 鋼構造物設計指針²⁾もしくは鉄道構造物等設計標準・同解説を参照してよい.

以下は部分安全係数法を用いた照査方法の一例³⁾である.

(1) について 軸方向力を受ける部材の照査は次により行うものとする.

$$\gamma_i \frac{P_{sd}}{P_{rd}} \leq 1 \tag{5.3.1}$$

ここに, γ_i : 構造物係数
 P_{sd} : 設計軸方向力
 P_{rd} : 設計限界軸方向力

(2) について 曲げモーメントを受ける部材の照査は次により行うものとする.

$$\gamma_i \frac{M_{sd}}{M_{rd}} \leq 1 \quad (5.3.2)$$

ここに、 γ_i : 構造物係数
 M_{sd} : 設計曲げモーメント
 M_{rd} : 設計限界曲げモーメント

(3) について 軸方向力と曲げモーメントを同時に受ける部材は次の各号により照査する。

1) 部材断面の照査

a) 軸方向力が引張の場合

$$\gamma_i \left(\frac{P_{sd}}{P_{trd}} + \frac{M_{sdx}}{M_{trdx}} + \frac{M_{sdy}}{M_{trdy}} \right) \leq 1 \quad (5.3.3)$$

および

$$\gamma_i \left(-\frac{P_{sd}}{P_{crd0}} + \frac{M_{sdx}}{M_{crd0x}} + \frac{M_{sdy}}{M_{crd0y}} \right) \leq 1 \quad (5.3.4)$$

b) 軸方向力が圧縮の場合

$$\gamma_i \left(-\frac{P_{sd}}{P_{trd}} + \frac{M_{sdx}}{M_{trdx}} + \frac{M_{sdy}}{M_{trdy}} \right) \leq 1 \quad (5.3.5)$$

および、

$$\gamma_i \left(\frac{P_{sd}}{P_{crd0}} + \frac{M_{sdx}}{M_{crd0x}} + \frac{M_{sdy}}{M_{crd0y}} \right) \leq 1 \quad (5.3.6)$$

2) 座屈の照査 (箱断面の場合)

$$\gamma_i \left(\frac{P_{sd}}{P_{crd}} + \frac{M_{sdx}}{M_{brdx}} + \frac{M_{sdy}}{M_{brd0y}} \right) \leq 1 \quad (5.3.7)$$

ここに、 γ_i : 構造物係数
 P_{sd} : 設計軸方向力
 M_{sdx}, M_{sdy} : それぞれ強軸および弱軸まわりの設計曲げモーメント
 P_{trd}, P_{crd0} : 断面の設計限界引張力または設計限界圧縮力
 M_{trdx}, M_{trdy} : それぞれ照査する断面の引張側における強軸および弱軸まわりの設計限界曲げモーメント
 M_{crd0x}, M_{crd0y} : それぞれ照査する断面の圧縮側における橋軸および弱軸まわりの設計限界曲げモーメント
 P_{crd} : 強軸または弱軸に関する断面の設計座屈限界力のうちいずれか小さいほうの値
 M_{brdx} : 横倒れ座屈を考慮した強軸まわりの設計限界曲げモーメント
 M_{brd0y} : 弱軸まわりの設計限界曲げモーメント

(4) について

1) プレートガーダーおよびこれに類似の構造物のせん断力を受ける部材の照査は、せん断力を受ける部材の有効断面積を腹板の総断面積とし、次の式によるものとする。

$$\gamma_i \frac{S_{sd}}{S_{rd}} \leq 1 \quad (5.3.8)$$

ここに、 γ_i : 構造物係数
 S_{sd} : 設計せん断力
 S_{rd} : 設計限界せん断力

2) せん断力とねじりモーメントを受ける箱桁の照査は次の式によるものとする。

$$\gamma_i \left(\frac{S_{sd}}{S_{rd}} + \frac{T_{sd}}{T_{rd}} \right) \leq 1 \quad (5.3.9)$$

ここに、 γ_i : 構造物係数
 T_{sd} : せん断中心まわりの設計ねじりモーメント
 T_{rd} : せん断中心まわりの設計限界ねじりモーメント

(5) について プレートガーダーおよびこれに類似の構造物のに曲げモーメントおよびせん断力が同時に作用する場合は、次の式により照査するものとする。

$$\left(\frac{\gamma_i}{1.1} \right)^2 \left\{ \left(\frac{M_{sd}}{M_{rd1}} \right)^2 + \left(\frac{S_{sd}}{S_{rd}} \right)^2 \right\} \leq 1 \quad (5.3.10)$$

ここに、 γ_i : 構造物係数
 M_{sd} : 設計曲げモーメント
 $M_{rd1} = \frac{1}{\gamma_b \gamma_1 \gamma_m} \frac{I}{f}$
 I : プレートガーダーの総断面積の中立軸まわりの断面二次モーメント
 γ_1 : プレートガーダーの総断面積の中立軸から照査する位置までの距離
 f : 基本強度
 S_{sd} : 設計せん断力
 S_{rd} : 設計限界せん断力
 γ_m : 材料係数
 γ_b : 部材係数

(6) について 二方向の応力が加わる箇所
の照査は次の式によるものとする。

$$\left(\frac{\gamma_a \gamma_b \gamma_i}{1.1} \right)^2 \left\{ \left(\frac{\sigma_x}{f/\gamma_m} \right)^2 - \left(\frac{\sigma_x}{f/\gamma_m} \right) \left(\frac{\sigma_y}{f/\gamma_m} \right) + \left(\frac{\sigma_y}{f/\gamma_m} \right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_u/\gamma_m} \right)^2 \right\} \leq 1 \quad (5.3.11)$$

ここに、 γ_a : 構造解析係数
 γ_b : 部材係数
 γ_i : 構造物係数
 σ_x, σ_y : 直交する方向の作用垂直応力度
 τ : 作用せん断応力度

- f : 基本強度
 τ_u : せん断強度の特性値

5.3.1.2 板部材の耐荷性能に対する照査

板部材の耐荷性能の照査は、必要に応じて以下の項目について行う。

- (1) 部材の軸方向に圧縮力を受ける場合の照査
- (2) 部材の軸方向に圧縮力と曲げモーメントを受ける場合の照査

【解説】

板部材の耐荷力を算定する方法として(a)シェル要素を用いた有限要素解析, (b)耐荷力曲線に基づき算定する方法, (c)実験による方法等がある。有限要素解析は解析条件等を自由の設定できる等の汎用性があるが、非線形解析ではモデル化によって解析結果が左右される場合がある等の問題がある。一方、耐荷力曲線を用いる方法は、既往の実験結果に基づくもので信頼性が高く簡便であるが、プレートガーターにおけるフランジとウェブの協調作用や新しい構造の耐荷力が評価出来ないなどの制限がある。また、実験に基づく方法は一般に時間と費用がかかる。

本指針(試案)ではいずれの手法によっても耐荷力を算定してもよく、条件に応じて使い分けてよいこととした。ただし、解析条件、実験条件等は施工編で規定される初期健全性と整合性がなければならず、用いる方法に応じて適切に構造解析係数を定めなければならない。

以下は耐荷力曲線に基づく最大幅厚比 $(b/t)_0$ と部分安全係数法を用いた緩和規定による照査方法の一例³⁾である。以下の例では、降伏応力に近い応力状態においても板が局部座屈しない幅厚比を座屈耐荷力曲線と実験結果から算定し、これを算定最大幅厚比 $(b/t)_0$ として規定している。板部材の耐荷性能の照査は、部材がこの規定値を満足して構成されていることを確認することによって行っている。

また、交番応力として小さな圧縮応力を受ける部材や架設時のみに一時的に小さな圧縮力を受けるような部材については、最大幅厚比 $(b/t)_0$ 規定により板厚を決定することは不経済となるため、最大幅厚比 $(b/t)_0$ 規定を緩和している。

(1) 部材の軸方向に圧縮力を受ける場合の照査の例 部材の軸方向に圧縮力を受ける板の最大幅厚比は、板の支持条件に応じて表Ⅲ-5.3.2の値を標準とする。作用応力度が小さい部材については表Ⅲ-5.3.2の板の最大幅厚比に表Ⅲ-5.3.3の係数を乗じることにより緩和することが出来る。この場合の軸方向圧縮強度の特性値は表Ⅲ-5.3.4により計算する。

表Ⅲ-5.3.2

	板の最大幅厚比 $(b/t)_0$		
	片縁支持板	両縁支持板	補剛板 (n:パネル数)
SS400, SM400, SMA400	12.5	40	28n
SM490	11	34	24n
SM490Y, SM520, SMA490	10	32	22n
SM570, SMA570	9	28	20n

表Ⅲ-5.3.3

部材名	板の名称	係数
柱	片縁支持板	$\sqrt{\frac{\sigma_{cu}}{\gamma_a \gamma_b \gamma_i \gamma_m \sigma}}$ ただし 1.2 以下
	両縁支持板	
	補剛板	$3 - \frac{2\gamma_a \gamma_b \gamma_i \gamma_m \sigma}{\sigma_{cu}}$ ただし 1.7 以下
梁の圧縮 フランジ	片縁支持板	$\sqrt{\frac{\sigma_{cu0}}{\gamma_a \gamma_b \gamma_i \gamma_m \sigma}}$ ただし 1.2 以下
	両縁支持板	
	補剛板	$3 - \frac{2\gamma_a \gamma_b \gamma_i \gamma_m \sigma}{\sigma_{cu0}}$ ただし 1.7 以下

ここで、 γ_a : 構造解析係数
 γ_b : 部材係数
 γ_i : 構造物係数
 γ_m : 材料係数
 b : 板の幅
 t : 板の厚さ
 σ : 最大作用圧縮応力度
 σ_{cu} : 軸圧縮強度の特性値
 σ_{cu0} : $l/r \approx 0$ の時の軸圧縮強度の特性値

表Ⅲ-5.3.4

部材名	板の名称	軸方向圧縮強度の特性値
柱	片縁支持板	$\sigma_{cu} \frac{(b/t)_0^2}{(b/t)_s^2}$
	両縁支持板	
	補剛板	$\sigma_{cu} \left\{ 1.5 - \frac{(b/t)_s}{2(b/t)_0} \right\}$
梁の圧縮 フランジ	片縁支持板	$\sigma_{cu} \frac{(b/t)_0^2}{(b/t)_s^2}$ ただし、 σ_{bu} 以下
	両縁支持板	
	補剛板	$\sigma_{cu} \left\{ 1.5 - \frac{(b/t)_s}{2(b/t)_0} \right\}$ ただし、 σ_{bu} 以下

ただし、 $(b/t)_0$: 表Ⅲ-3.3.2 に定める板の最大幅厚比
 $(b/t)_s$: 実際の幅厚比
 σ_{bu} : 曲げ圧縮強度の特性値

(2) 部材の軸方向に圧縮力と曲げモーメントを受ける場合の照査の例 部材の軸方向の圧縮力と曲げ

モーメントを受ける板の最大幅厚比は、板の両縁が支持されている場合、板の補剛材本数に応じて表Ⅲ-5.3.5の値を標準とする。

表Ⅲ-5.3.5

補剛材の配置 およびその本数	Ψ の範囲	板の最大幅厚比 (b/t) ₀
補剛材なし	$1.0 \leq \Psi \leq 0.25$	$\frac{920 - 1320\Psi}{\sqrt{\sigma_{cu0}}}$
	$0.25 \leq \Psi \leq 1.0$	$\frac{590}{\sqrt{\sigma_{cu0}}}$
板幅の中央 付近に1本	$-1.0 \leq \Psi \leq 0$	$\frac{1220 - 370\Psi}{\sqrt{\sigma_{cu0}}}$
	$0 \leq \Psi \leq 1.0$	$\frac{1220 - 370\Psi}{\sqrt{\sigma_{cu0}}}$
2本以上を 等間隔	$-1.0 \leq \Psi \leq 1.0$	$\frac{420n + (1 - \Psi)(450 - 15n)}{\sqrt{\sigma_{cu0}}}$

表Ⅲ-5.3.6

板の名称	係数
両縁支持板	$\sqrt{\frac{\sigma_{cu}}{\gamma_a \gamma_b \gamma_i \gamma_m \sigma}}$ ただし 1.2 以下
補剛板	$3 - \frac{2\gamma_a \gamma_b \gamma_i \gamma_m \sigma}{\sigma_{cu}}$ ただし 1.7 以下

ここで、
 γ_a : 構造解析係数
 γ_b : 部材係数
 γ_i : 構造物係数
 γ_m : 材料係数
 b : 板の幅
 t : 板の厚さ
 σ : 最大作用圧縮応力度
 σ_{cu} : 軸圧縮強度の特性値
 σ_{cu0} : $l/r \approx 0$ の時の軸圧縮強度の特性値
 $\Psi = \sigma_2 / \sigma_1$: 板要素の両縁における応力度の比
 σ_1, σ_2 : それぞれ曲げにより圧縮および引張が生じる側の縁における作用軸方向圧縮力と作用曲げモーメントによる合応力度

5.3.2 変位・変形性能に対する照査

変位・変形性能を期待する部材の照査は、想定した変位・変形が確実に生じることを確認することにより行う。

【解説】

不静定構造物においては、構造物を構成する一部の部材が耐荷性能を失っても、構造物全体の安全性が確保される場合がある。しかし、一部の部材の破壊を許容した上で、構造物全体の安全性を確保する場合は、部材の非線形性を考慮した照査を行うことが必要であり、照査方法の精度、適用範囲など十分な注意が必要である。また、この場合塑性変形を許容した部材の変形性能が設計で想定した変形性能を上回ることを確認しなければならない。例えば塑性ヒンジの発生を仮定するメカニズム法にて耐荷力を算定する場合は、実際の構造部材が塑性ヒンジの機能を十分に発揮するように、塑性回転性能を照査することが必要となる。

また、部材の耐荷性能を断面力を用いず、曲率や限界ひずみなどの変形量を用いて照査する場合がある。この場合、対象となる極限状態および部材の性質を考慮し、適切な照査指標を用いなければならない。さらに、塑性変形を許容する設計では部材の変位・変形が大きくなり構造物としての安定性が失われることに対しても検討が必要である。

5.3.3 安定性に対する照査

- (1) 構造物の剛体安定性の照査は、鉛直、水平、転倒等に対して行うものとする。
- (2) 安定性の照査は、構造物の全体系もしくは一部において最大値と想定される作用効果が、十分安全と考えられる抵抗値を超えないことを確認することにより行う。その際、照査方法として部分安全係数法を用いてよい。

【解説】

(1) について ここでの安定性とは荷重に対する構造物全体もしくは一部の剛体安定性を意味する。構造物の全体系もしくは一部の安定性の照査は、第8章の耐震性と密接に関連するが、鉛直方向の支持力や桁の転倒など、常時作用する荷重での剛体安定性は耐震性とは別に検討しなければならない。

(2) について 5.3.1 耐荷性能に対する照査と同様に、部分安全係数法を用いて安全性を照査してよい。部分安全係数法で使用される安全係数の決定は、破壊確率に基づいて検討されることが望ましい。なお、破壊確率が目標値以下であることが確認できれば、破壊確率を直接評価する方法、信頼性指標 β を用いる方法、許容応力度設計法などを用いてよい。

以下は、部分安全係数法を用いた照査方法の一例である。

1) 橋桁の転倒に対する照査³⁾

橋桁は、遠心荷重、風荷重などによる力が作用する場合、以下に示す照査を行い、いずれの場合にも転倒に対して安定でなければならない。

$$\gamma_a \cdot \gamma_b \cdot \gamma_i \cdot \frac{M_{sd}}{M_{rd}} \leq 1 \quad (5.3.12)$$

ここに、 γ_a : 構造解析係数
 γ_b : 部材係数
 γ_i : 構造物係数
 M_{sd} : 橋桁の底面端部における転倒モーメント

M_{rd} : 橋桁の底面端部における転倒に対する抵抗モーメント

表Ⅲ-5.3.7 橋桁の転倒に対する照査項目と荷重

	列車の有無	風荷重 (kN/m ²)	列車荷重	遠心荷重	軌道重量	道床重量 (kN/m ³)
①	有	1.5	鋼標準 3.4.2.2 に示す荷重	左記の荷重× 遠心力荷重	鋼標準 7.5(2) に示す重量	16.0
②	無	3.0	0	0		

表Ⅲ-5.3.8 橋桁の転倒に対して照査する場合の安全係数

	列車の有無	荷重係数 γ_f				γ_a	γ_b	γ_i
		列車荷重	死荷重	遠心荷重	風荷重			
①	有	1.1(1.0)	1.0	1.1(1.0)	1.0	1.0	1.05	1.2
②	無	—	1.0	—	1.2	1.0	1.05	1.2

水平方向の力としては、遠心荷重、風荷重、地震の影響による力のほかに車両横荷重および車輪横圧荷重があるが、橋桁に載る車両の各車輪が同時にこのように作用することはなく、また、方向も逆のものもあって打ち消し合う傾向にあると考えられるので、風荷重や地震の影響に対して照査されていけば、原則として車両横荷重および車輪横圧荷重による転倒に対する照査は行わないでよいこととした。

2) 橋桁の浮き上がりに対する照査³⁾

連続桁、カンチレバー桁などは次の式により浮き上がりに対する照査を行い、これに耐えるアンカー装置を設けるか、それを打ち消す重量物を付加するものとする。

$$\gamma_a \cdot \gamma_b \cdot \gamma_i \cdot \frac{-R_s}{R_r} \leq 1 \quad (5.3.13)$$

ここに、 γ_a : 構造解析係数

γ_b : 部材係数

γ_i : 構造物係数

R_s : 支点到に生じる反力で、下記の式により算出する（上揚力が生じる場合は負記号とする）。

$$R_s = \gamma_{fl} \cdot R_l + \gamma_{fi} \cdot R_i + \gamma_{fd} \cdot \left(R_{d1} + \frac{R_{d2}}{2} \right) \quad (5.3.14)$$

$\gamma_{fl}, \gamma_{fi}, \gamma_{fd}$: 列車荷重、衝撃および死荷重に対する荷重係数

R_l, R_i : それぞれ、支点到に上揚力を生じさせる部分に列車荷重に対する荷重係数を載荷した場合の支点到反力、および衝撃による支点到反力

R_{d1}, R_{d2} : それぞれ、支点到に上揚力および下向きの力を生じさせる部分の死荷重による支点到反力

R_r : アンカー装置の耐力あるいはカウンターウェイトの重量

連続桁で支間が短く死荷重が小さい場合や、側径間に比べてとくに中央径間が長い場合、また、カンチレバー桁ではね出し長さが大きい場合や長い吊桁を持つような場合には、活荷重により、また、時には死荷重によって端支点上に揚力が働くことがある。このような上揚力に対してアンカー装置を設けるか重量物を付加して十分押さえておかないと、特にカンチレバー桁の場合には不安定となり落橋のおそれも生じる。また、連続桁の場合には落橋に至らないまでも、支点が浮き上がると支点の衝撃や過大な応力の発生などがあって好ましくない。もともとこのような上揚力が生じるような比率の径間割は好ましくないが、環境などの条件からやむを得ず支点の位置が制限される場合がある。このように支点上に揚力が作用する場合の照査の方法は、通常的设计に用いる作用を用い、活荷重を部材応力上、最も不利な位置において計算するだけでは安全を十分に考慮したことになるので注意が必要である。

5.4 連結部

5.4.1 一般

- (1) 作用により発生する断面力が部材間に円滑・確実に伝えられるように連結部を構成しなければならない。
- (2) 塑性変形を期待する場合には、想定した変形が確実に生じるように連結部を構成しなければならない。
- (3) 防錆・防食上および施工に十分配慮しなければならない。
- (4) 溶接と高力ボルトを併用する場合には、力の伝達に留意しなければならない。

【解説】

(1) について 一般に、鋼片を溶接継手により連結して部材の断面を構成し、異なる部材間を溶接あるいは高力ボルトにより連結して構造物を構成する。これらの連結部では、鋼片間あるいは部材間に発生する応力が円滑に確実に伝えられなければならない。

力を伝達する継手では、例えば、用いる溶接方法によっては、想定した限界状態に達する前に損傷が生じる場合も考えられる。したがって、想定した終局状態に至るまで確実に力を伝え、継手部から破壊が生じない連結構造にすることが重要である。なお、力としては、通常設計に用いる作用に対して構造解析等により得られる断面力を考慮してよい。

連結部の構造は、一般に下記の事項に留意して設計する。

- 1) 連結部の構造は、できる限り単純で、構成する材片の応力の伝達が明確になるように留意する。
- 2) 高力ボルトや溶接は、有害な応力集中を生じさせず一様な応力を受けるように、部材軸に対してできる限り偏心しないように配置する。
- 3) 連結長が長すぎるとボルトに作用する力が著しく不均等になる。したがって、有害な応力集中を生じさせないようにする。例えばボルト接合では、1ボルト本数が多くなるとすべり耐力が低下するため、道示ではボルト本数を8本程度以下とすることを推薦している。
- 4) 有害な残留応力や二次応力を生じさせないようにする。特に、溶接による連結の場合、溶接による残留応力に対しても十分留意しなければならない。

(2) について 兵庫県南部地震を契機に、鋼構造物にも変形性能を期待する設計が一般的になりつつあるが、そのような塑性変形まで許容する設計を行う場合には、完全溶け込み開先溶接を用いることが基本になる。さらに、溶接部の強度と母材の強度のバランスによっては、想定したような変形が生じな

い場合も考えられるので注意が必要である。

(3) について 連結部は腐食に対して弱点部になり易いため、設計に際しては雨水等の浸入や帯水に注意するとともに、維持管理が容易な構造にするなどの配慮を行う必要がある。

また、特に溶接継手では、部材によっては溶接ひずみを小さくするために断続すみ肉溶接を用いることも考えられが、この場合施工法によっては欠陥が生じ易くなるので十分留意する必要がある。現場溶接を行う場合等では、施工に対する様々な制約から良好な溶接ができない場合もあるので作業環境等に十分留意した上で、確実な施工ができるように十分に配慮することが重要である。

(4) について 溶接と高力ボルトの併用は、既設部材の補強で採用せざるを得ないような場合を除いて、できる限り用いるべきではないが、やむを得ず採用する場合には、両者の応力の分担に十分留意しなければならない。なお、道路橋示方書には、応力に直角な方向のすみ肉溶接と高力ボルト摩擦接合、および溶接と高力ボルト支圧接合は併用してはならないことが明記されている。

5.4.2 高力ボルト継手

5.4.2.1 高力ボルト継手に対する要求性能

高力ボルト継手は、力が鋼片間あるいは部材間に確実にかつ円滑に伝達されるものでなければならない。

【解説】

高力ボルト継手は、想定した終局状態に至るまで確実・円滑に力を伝え、継手部からすべり等が生じないようにすることが重要である。

継手部に発生する断面力が小さくても、偏心または応力の不均一な分布により局部的に応力が集中することがある。また、発生断面力が部材断面に対して小さい場合、部材間の連結部を発生断面力で設計すると連結部の剛性が低下して、構造全体として均衡がとれない場合があるので注意が必要である。現行の設計基準⁵⁾では、連結部の強度が母材強度に対して著しく低下しないように、主要部材の連結部強度の下限値を定めている。

5.4.2.2 高力ボルト継手に対する照査

(1) 高力ボルト継手に対する照査は、作用効果以上の耐荷力を有することを確認することにより行う。

(2) 高力ボルト継手が部材全体として必要な継手強度を有し円滑に力を伝達することの照査は、以下の事項を満足していることを確認することにより行う。

- 1) 主要部材連結部の耐荷力が、連結する部材の耐荷力よりはなはだしく小さくないこと。
- 2) 連結部を構成する各材片が偏心の少ないこと。

【解説】

(1) について 高力ボルト継手には、部材間への応力伝達機構により、摩擦接合継手、支圧接合継手、引張接合継手などがある。これらの高力ボルト継手の照査は、以下に示すようにそれぞれの特徴に応じて異なるが、基本的にはどれも連結部の耐荷力が荷重作用による連結部の発生断面力以上あることを確

認することにより行う。照査の対象は、連結部を構成する高力ボルト、添接板および母材である。

以下は部分安全係数法を用いた照査式の例^{3),5)}である。

1) 摩擦接合継手の照査

① 軸方向力またはせん断力を受ける継手の照査は、次式により行う。

$$\gamma_a \gamma_b \gamma_i (P_s/P_u) \leq 1 \quad (5.4.1)$$

ここに、

γ_a : 構造解析係数

γ_b : 部材係数

γ_i : 構造物係数

P_s : 継手に対する作用力

P_u : ボルト継手の耐力 $P_u = nm P_a / \gamma_m$

n : 継手に使用したボルトの数

m : 摩擦面の数

P_a : ボルト 1 本 1 摩擦面当りのすべり耐力の特性値

γ_m : 材料係数

② 曲げモーメントおよびせん断力を同時に受ける継手の照査は、式 (5.4.4)、式 (5.4.5) により行う。

$$\gamma_a \gamma_b \gamma_i (P_i/P_u) \leq 1 \quad (5.4.2)$$

$$(\gamma_a \gamma_b \gamma_i)^2 \left\{ (P_i/P_u)^2 + (S/S_u)^2 \right\} \leq 1 \quad (5.4.3)$$

ここに、

γ_a : 構造解析係数

γ_b : 部材係数

γ_i : 構造物係数

P_i : 接合線の片側にある i 列目のボルト群に対する作用力

P_u : 曲げモーメントに対するボルト群の耐力 $P_u = n_i m P_a / \gamma_m$

n_i : 接合線の片側にある i 列目のボルト群のボルト本数

m : 摩擦面の数

P_a : ボルト 1 本 1 摩擦面当りのすべり耐力の特性値

S : 連結箇所における最大作用せん断力

S_u : せん断力に対するボルト継手の耐力 $S_u = nm P_a / \gamma_m$

n : 接合線の片側にある腹板連結用高力ボルトの総数

γ_m : 材料係数

2) 支圧接合継手の照査

支圧接合継手の照査は、1) に準じて行われる。

なお、支圧接合用高力ボルトの耐力は、その呼び径に基づいて算出したせん断耐力と支圧耐力のうち小さい方の値としてよい。また、ボルトの有効支圧面積は呼び径と支承する鋼材の厚さとの積とし、皿ボルトの有効支圧面積の計算については、皿部はその深さの 1/2 を有効としてよい。

3) 引張接合継手の照査

以下に部分安全係数法を用いた照査方法の例を示す。

① 引張力を受ける継手の照査は、次式により行う。

$$\gamma_a \gamma_b \gamma_i \{P_t + R_t\} / P_U \leq 1 \quad (5.4.4)$$

ここに、

γ_a : 構造解析係数

γ_b : 部材係数

γ_i : 構造物係数

P_t : 継手に対する作用引張力

R_t : T フランジの曲げによって生じるてこ反力であり、T フランジの板厚、ボルト配置および接合部の各部寸法等を考慮して算出される。

P_U : ボルト継手の耐力 $P_U = n P_{t,a} / \gamma_m$

n : 継手に使用したボルトの数

$P_{t,a}$: ボルト 1 本当りの引張耐力の特性値

γ_m : 材料係数

なお、長締め形式では、連結部の局部変形がリブプレートにより抑止され、またリブプレートによってボルト軸力が接合面に均等に伝達されることから、てこ反力が生じにくくこれを考慮しなくてもよい。

② 引張力およびせん断力を同時に受ける継手のせん断力に対する照査は、式 (5.4.7) により行う。

$$\gamma_a \gamma_b \gamma_i (S / S_u) \leq 1 \quad (5.4.5)$$

ここに、

γ_a : 構造解析係数

γ_b : 部材係数

γ_i : 構造物係数

S : 継手に対する作用せん断力

S_u : せん断力に対するボルト継手の耐力 $S_u = n P_a / \gamma_m \{(nP_n - P_t) / n P_n\}$

n : 継手に使用したボルトの数

P_a : ボルト 1 本 1 摩擦面当りのすべり耐力の特性値

P_n : ボルトの初期導入軸力

P_t : 継手に対する作用引張力

γ_m : 材料係数

なお、上記により照査する場合、以下に示す細目を満足することが前提になるため、これらについても検討する必要がある。

1) ボルトの最小中心間隔

ボルトの中心間隔が小さすぎると、ボルト締め作業ができなかったり材質をいためたりするおそれがあるので、これらに配慮してボルトの最小中心間隔を定めなければならない。

2) ボルトの最大中心間隔

外側の板が局部座屈するようなことがあると高力ボルト継手の性能が十分発揮できないため、また、密着が悪いと腐食の原因にもなることから、これらに考慮してボルトの最大中心間隔を定めなければならない。

3) 縁端距離

最小縁端距離は、ボルトがその強度を発揮する前に縁端部が破断しないよう定める必要がある。

4) ボルトの最小本数

高力ボルトを使用する場合は、ボルト1本では、部材どうしの密着性が十分でないおそれがあること、また、組立時のこと等を考慮して1群として2本以上のボルトを配置するのがよい。

(2) について 高力ボルト継手の照査は、(1) に示したように作用力以上の耐荷力を有することを確認することを基本とする。ただし、母材の強度に比べて継手部の作用力がはなはだしく小さい場合には、母材に比べて継手部の剛性が極端に低下し、二次応力等に対して弱点となったり、構造全体として均衡がとれない場合があるため、十分な検討が必要である。道路橋示方書⁵⁾では、作用力による設計のほか連結部強さの下限値を、母材の全強の75%以上の強度をもつように設計するものとしている。また、限界状態設計法による鉄道構造物等設計標準³⁾では、引張強度または圧縮強度の特性値に基づく部材断面積力の50%以上の強度を持つように設計することとしているが、この値は道路橋示方書で示す母材全強75%以上とほぼ同じ意味をもっている。

また、連結部として力を円滑に伝達するために、以下のことを確認する必要がある。

- ①構造がなるべく単純であり構成する材片の応力伝達機構が明確な構造であること。
- ②部材軸に対して、偏心しないように構成されていること。

5.4.3 溶接継手

5.4.3.1 溶接継手に対する要求性能

(1) 力を伝達する溶接継手は、鋼片間あるいは部材間に応力が確実かつ円滑に伝達されるものでなければならない。

(2) 塑性変形を期待する部材に用いる溶接継手は、想定した変形が確実に生じるものでなければならない。

(3) 溶接継手は、施工性に十分配慮されたものでなければならない。

【解説】

(1) について 力を伝達する溶接継手では、用いる溶接方法によっては、想定した限界状態に達する

前に損傷が生じる場合も考えられる。したがって、想定した終局状態に至るまで確実・円滑に応力を伝え、溶接部から破壊が生じない継手することが重要である。このようなことから、鋼橋では、通常溶接金属の強度や伸びを母材と同等、あるいはそれより大きくするいわゆるオーバーマッチングの溶接継手とすることで、溶接部が破壊を生じないようにしている。

また、力を伝達する溶接継手による連結部は、継手部が鋼片間あるいは部材間に発生する応力が確実かつ円滑に伝達できるように溶接されていることや、想定した変形に追随できるように溶接されていることなどが求められる。しかし、溶接継手を作用力で設計すると、溶接継手部に発生する計算応力が小さくても局部的な応力集中が生じることがあることや、連結部の剛性が極端に低下して、地震時や架設時等の不慮の外力あるいは二次応力に対して弱点となる場合があるので注意が必要である。

(2) について 兵庫県南部地震を契機に、鋼構造物にも変形性能を期待する設計法の採用が多くなってきた。このような塑性変形まで許容する設計を行う場合には、完全溶け込み開先溶接を用いることが必要になるが、溶接部の強度と母材の強度のバランスによっては、想定したような変形が生じないことも考えられるので注意が必要である。

(3) について 溶接継手は、施工によってその性能が左右される場合がある。例えば、現場溶接を行う場合等では、施工に対する様々な制約から良好な溶接ができない場合もある。また、拘束が大きい箇所に溶接を行う場合には割れが発生する場合がある。このようなことから、本指針（試案）では、本項を要求性能の一つとして整理した。

5.4.3.2 溶接継手に対する照査

(1) 力を伝達する溶接継手に対する照査は、作用力以上の耐荷力を有することを確認することにより行う。また、力を伝達する溶接継手の耐荷力が、連結する鋼片や部材の耐荷力よりもはなはだしく小さくないことを確認する。

(2) 塑性変形を期待する溶接継手に対する照査は、想定した変形が確実に生じることを実験あるいは解析により確認することを原則とする。

(3) 施工性に対する照査は、それらに対する配慮がされていることを確認することによって行っていく。

【解説】

(1) について 力を伝達する溶接継手では、作用力以上の耐荷力を有することを確認するのが基本とする。

溶接継手は多様であり、これらの安全性は実験や詳細な解析等により照査することができるが、一般に、応力を伝える溶接継手として、完全溶け込み開先溶接、部分溶け込み開先溶接、あるいは連続すみ肉溶接などが用いられる。連続すみ肉溶接が用いられるのは、応力を伝える溶接継手に断続溶接を用いると、応力上からは断続溶接でも十分な場合であっても、溶接の終始端部にクレータ等の欠陥が生じるとともに応力集中部となるからである。

溶接線に直角方向引張力を受ける継手には、応力の伝達が円滑な完全溶け込み溶接を用いるのがよい。これは、部分溶け込み開先溶接では、ルート部に不溶着部を残しているために、応力集中が生じやすいためである。ただし、溶接性や溶接ひずみを考慮すると、すみ肉溶接にする方が良い場合もあるが、これは引張応力が小さい場合等に用いられる。

プラグ溶接やスロット溶接は、十分な溶け込みを得ることが難しく、スラグ巻込み等の欠陥が生じや

すいので力を伝達する継手には用いるべきではない。ただし、板と板との密着をよくする目的でやむを得ずこれらを用いる場合もあるが、採用するにあたっては施工等に十分留意する必要がある。

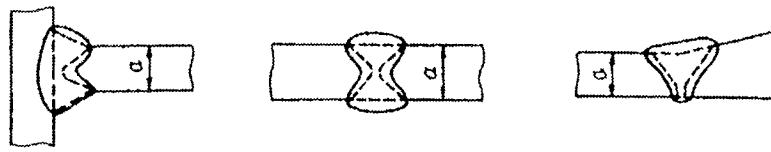
照査において、溶接部の形状等が複雑で精度よく耐荷力を算出することが難しいため、本指針（試案）では、これまでと同様、下記1）～4）により照査を行ってよい。

1) 溶接部の厚さは、以下に定める有効効厚（ a ）としてよい。

① 溶接部の有効厚は、その溶接の理論のど厚とする。

② 溶接継手の種類ごとの理論のど厚は、以下による。

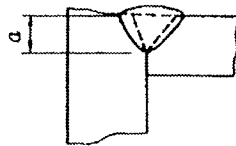
- ・ 完全溶け込み開先溶接の理論のど厚は、ビード仕上げをしないとしないにかかわらず、部材の厚さとしてよいこととし、**図Ⅲ-5.4.1**に示すものを用いてよい。部材の厚さが異なる場合は薄い方の部材の厚さとする。



a :理論のど厚

図Ⅲ-5.4.1 完全溶け込み開先溶接の理論のど厚

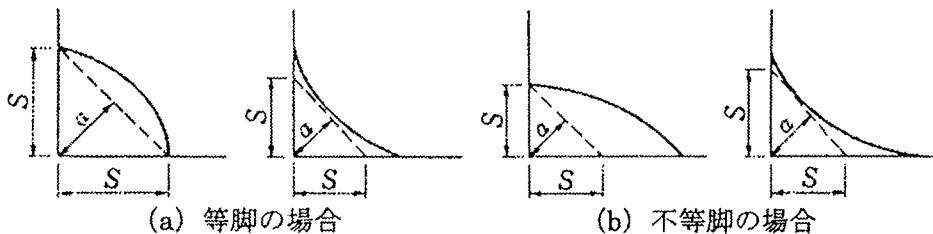
- ・ 部分溶け込み開先溶接はビードに直角な方向の引張力を受けないように設計するが、せん断力に抵抗させるときの理論のど厚は、**図Ⅲ-5.4.2**に示す溶け込み深さとしてよい。



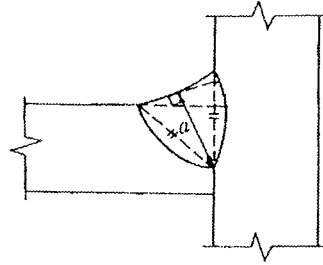
a :理論のど厚

図Ⅲ-5.4.2 部分溶け込み開先溶接の理論のど厚

- ・ すみ肉溶接の理論のど厚は、**図Ⅲ-5.4.3**に示す継手のルートを頂点とする二等辺三角形の底辺のルートからの距離とする。また、**図Ⅲ-5.4.4**に示すように、部分開先溶接にすみ肉溶接を重ね合わせる場合の理論のど厚の算定は、すみ肉溶接の場合に準じてよい。



図Ⅲ-5.4.3 すみ肉溶接の理論のど厚



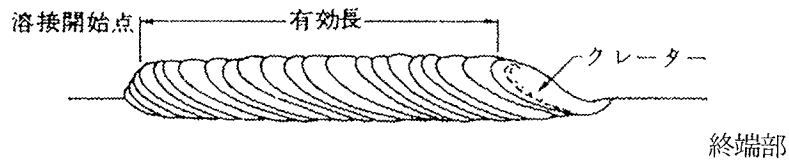
α :理論のど厚

図Ⅲ-5.4.4 部分溶け込み開先溶接にすみ肉溶接を重ねる場合の理論のど厚

2) 溶接部の長さは、以下に定める有効長としてよい。

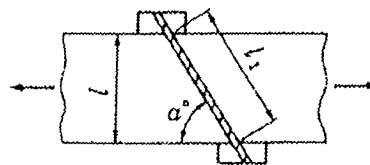
① 溶接部の有効長は、理論のど厚を有する溶接部の長さとする。

図Ⅲ-5.4.5 に示すように、溶接始末端部では、溶接始点部で溶接金属の断面が不完全で溶け込みが不十分で力の伝達が期待できない、また終端部ではクレーター状になり割れが生じやすい。このようなことから、溶接の有効長には、これらの部分をいれてはいけない。



図Ⅲ-5.4.5 溶接の有効長

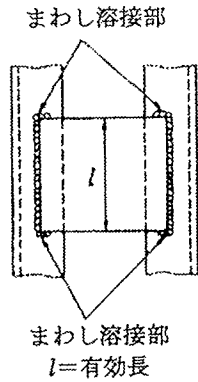
② 完全溶け込み開先溶接で溶接線が応力方向に直角でない場合は、図Ⅲ-5.4.6 のように有効長を応力に直角な方向に投影した長さとする。



$$\text{有効長 } l = l_1 \sin \alpha$$

図Ⅲ-5.4.6 溶接の有効長

③ すみ肉溶接でまわし溶接を行った場合は、まわし溶接部分は、応力の方向が変わり、応力の伝達が不明確になること、またクレーターや溶接始端部の影響を除くことが難しいこと等により、図Ⅲ-5.4.7 に示すように、この部分を有効長に入れないものとする。



図Ⅲ-5.4.7 回し溶接を行った場合の有効長

3) すみ肉溶接のサイズは、設計上必要な寸法を満足するとともに、有害なきずが生じない等の施工上必要な寸法を確保する。サイズとは、図Ⅲ-5.4.8 に示すSのことであり、溶接金属端部までの長さとは限らない。不等脚の場合は、図Ⅲ-5.4.9 に示すSをサイズという。

サイズの大きさは、接合する部材の厚さに比べて溶接のサイズが小さすぎると、溶接部は急冷されて割れ等を生じやすく、また不必要にサイズが大きいと、溶接によるひずみが大きく、また母材の組織が変化する範囲が広がる。このように、すみ肉溶接では、設計計算上必要なサイズ以外にも、施工上から必要になるサイズがあることに留意しなければならない。

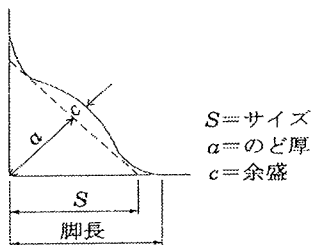


図-Ⅲ5.4.8 溶接のサイズ

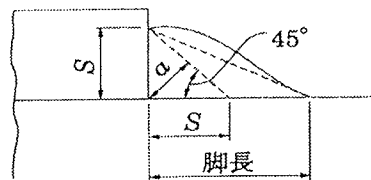


図-Ⅲ5.4.9 不等脚の場合の溶接のサイズ

比較的支間の短い多主桁橋のような比較的一般的な鋼橋の設計では、すみ肉溶接の最小および最大サイズを6mm以上とし、下式を満足する大きさとすれば応力的に問題になることはほとんどない。

$$t_1 > S \quad \text{かつ} \quad S \geq \sqrt{2t_2}$$

ここに、S：サイズ (mm)， t_1 ：薄い方の母材の厚さ (mm)， t_2 ：厚いほうの母材の厚さ (mm)

4) すみ肉溶接の最小有効長

すみ肉溶接の設計では、少なくとも溶接部に有害なきずを生じない施工が可能になる有効長を確保するものとする。

周囲の熱容量に比べてすみ肉溶接の量が少なすぎると、溶接部は急冷されて割れなどの欠陥を生じやすい。通常は、すみ肉溶接の有効長を、サイズの10倍以上かつ80mm以上確保した場合には問題ない。これは、引張強さ490N/mm²級の鋼板で、室温で割れを防ぐには80~100mmの溶接長が必要である

といった実験結果に基づくものである。

なお、溶接継手を作用力のみで設計すると、溶接継手部に発生する計算応力が小さくても局部的な応力集中が生じることがあることや、母材の強度に比べて作用力が小さい場合には、継手部の剛性が極端に低下し、二次応力等に対して弱点になる場合等があるので、そのような場合には十分な検討が必要である。これまでの鋼橋の設計では、このようなことを避けるため、継手が全強の75%以上を確保することによって設計を行っている。

(2) について 塑性変形を許容する設計を行う場合には、溶接部と母材の強度とのバランスによって変形性状が変化するので、実験あるいは解析によって検討する必要がある。

(3) について 現場溶接を行う場合等では、施工に対する様々な制約から良好な溶接ができない場合もあるので作業環境等に十分留意した上で、確実な施工ができるように十分に配慮することが重要である。

拘束が大きい箇所に溶接を行う場合には、割れが発生する場合があるので十分留意する必要がある。

また、部材によっては、溶接ひずみを小さくするために断続すみ肉溶接を用いることも考えられが、このような場合、施工法によっては欠陥が生じ易くなるので十分留意する必要がある。防錆・防食にも十分留意する必要がある。

設計時にはこのような検討が確実に行われていることを、確認しなければならない。

参考文献

- 1) ISO2394, General principles on reliability for structures, ISO2394:1998(E), 1998
- 2) 土木学会：鋼構造物設計指針 Part A 一般構造物, 1997年4月
- 3) 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, 2000年7月
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書[構造性能照査編], 2002年3月
- 5) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編, 2002年3月
- 6) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物, 2000年

第6章 使用性に対する要求性能および照査

6.1 一般

(1) 鋼構造物は、第2章に規定される作用のもとで使用性が保持されなければならない。ただし、気象条件または地震の影響により構造物の供用が制限される場合や利用に支障がある場合はその限りではない。

(2) 鋼構造物の使用性に関する性能項目として、構造物の利用形態に応じて走行性および歩行性を考慮するものとする。

(3) 走行性および歩行性に対する照査は、性能を表現しうる適切な指標を設定し、それぞれの項目ごとに設定された限界状態を満足することを確認することにより行うものとする。

【解説】

(1) について 本指針(試案)における鋼構造物の使用性は、限度以上の不安感、不快感を覚え、快適に構造物を利用するための性能と定義される。このとき、利用者の安全性を確保することを含めて考えている。鋼構造物は、気象条件、地震の影響等により供用できない場合や利用に大きな支障が生じる場合を除き、第2章で規定される作用のもとで使用性が保持されなければならない。第2章 2.5 表Ⅲ-2.5.1に使用性の照査に考慮すべき作用の組合せの例として永続作用と変動作用の組合せが示されている。

(2) について 本指針(試案)では、橋梁を主な対象として、車両の運転者もしくは乗客が対象となる使用性を走行性と定義し、歩行者が対象となる使用性を歩行性と定義する。したがって、鋼構造物の使用性に対する要求性能は、道路橋、鉄道橋あるいは人道橋などの形態に応じて、走行性および歩行性について定めることとなる。ただし、橋梁以外の構造物では、構造物の特性およびその利用形態に応じて適切な要求性能を定めるものとする。

(3) について 設計にあたっては、走行性および歩行性に関する照査指標および限界状態を適切に設定し、照査指標により表現される応答値が限界状態を超えないことを確認することにより照査を行うものとする。

6.2 使用性に対する要求性能

6.2.1 走行性

鋼構造物は、通常的作用および気象条件の下で、その上を通過する車両が安全に走行でき、利用者にある限度以上の不安感、不快感を与えない性能を有しなければならない。

【解説】

本指針(試案)では、第2章で規定される作用および車両が走行できる気象条件の下で、利用者にある限度以上の不安感、不快感を与えないこと、このとき車両が安全に走行できることを含めて走行性に対する要求性能に設定した。

走行性に関する要求性能の項目を表Ⅲ-6.2.1に示す。走行性には、通常時の走行性、雨天時の走行性、強風時の走行性、冬季の走行性および地震時の走行性が考えられる。

地震の影響は偶発作用に分類され、第2章 2.5 表Ⅲ-2.5.1に示す使用性の照査に考慮すべき作用ではないが、レベル1の地震動に対し、鉄道橋では列車が安全に走行できることを要求性能と設定されており³⁾、

道路橋でも橋として健全性を損なわない性能を有することが規定されており²⁾、結果として構造物上を車両が走行できることが要求性能になり得ると考えられる。そのため、本指針（試案）でも地震時の走行性について考慮することとした。

通常時の走行性は、通常の状態を利用者にある限度以上の不安感、不快感を与えない性能であり、その照査項目には、路面の健全性、剛性、乗り心地および走行時の視界が挙げられる。

これまで使用性の代表としてたわみ制限が考えられており、たわみ制限の理由として、道路橋示方書²⁾では二次応力による予期せぬ損傷の発生および走行安全性の問題が上げられている。本指針（試案）では、構造の安全性に関する性能と利用者が対象となる使用性（利用者の安全性の確保を含む）に関する性能を区別するのが合理的と考え、後者を使用性として考慮することとした。

雨天時、強風時、冬季および地震時の走行性は、走行安全性に関わる性能であり、これらの性能に対する照査項目にはそれぞれ路面排水に対する配慮、路面上での強風発生頻度あるいは強風対策、路面凍結に対する配慮および地震時の変位が挙げられる。

なお、濃霧あるいは積雪時における走行性については、設計段階で要求性能として設定する必要は少ないと考え、ここでは考慮していないが、構造物の特性を考慮した上で必要に応じて設定すればよい。

表Ⅲ-6.2.1 走行性に関する性能項目

中項目	小項目	照査項目
走行性	通常時の走行性	路面の健全性
		剛性
		乗り心地
		走行時の視界
	雨天時の走行性	路面排水に対する配慮
	強風時の走行性	強風に対する配慮
	冬季の走行性	路面凍結に対する配慮
地震時の走行性	変位に対する配慮	

注) 土木構造物の性能設計ガイドライン¹⁾を参考に性能項目を設定した。

総則編第3章 3.3 性能レベルと重要度において、使用性についても性能レベルを適切に設定しなければならないことを述べた。使用性は風および雨などの気象条件の影響を強く受け、気象条件に応じて性能レベルを設定するのが妥当と考えられることから、ここでは、表Ⅲ-6.2.2に示すような性能レベルを設定した。

表Ⅲ-6.2.2 走行性に関する要求性能レベルの例

使用性レベル	作用および気象条件	要求性能	内 容
レベル1	<ul style="list-style-type: none"> 設計供用期間中に作用する活荷重 気象条件1（風速、雨量が十分小さい） 	通常時の走行性	走行安全性を確保し、利用者に不快感を与えない。
レベル2	<ul style="list-style-type: none"> 気象条件2（風速、雨量があるレベル以上） 	異常時の走行性	通常の走行性がある程度損なわれることを許容するが、走行安全性を確保する。

表Ⅲ-6.2.2に示す気象条件1は、風速、雨量あるいは路面凍結などの気象条件が走行性に影響しない範囲であり、通常時の走行性を満足させる必要がある。気象条件2は、走行性に大きな影響を受ける気象条件であり、有料自動車道や鉄道で、速度規制が行われているように、通常の走行性がある程度損なわれることを許容するのが合理的と考えられる。なお、風速レベルあるいは雨量レベルについては現在行われている有料自動車道や鉄道における速度規制の事例が参考となる。

構造物の設置目的および重要度に応じて、たとえば、スノーシェルター等の対策により降雪に対し走行性を保持させるように、気象条件2のような場合にもレベル1の使用性レベルを満足させるように設定することも考えられる。

6.2.2 歩行性

構造物は、通常的作用および気象条件のもとで、その上を利用する歩行者にある限度以上の不安感、不快感を与えない性能を有しなければならない。

【解説】

本指針(試案)では、歩行者が安全に歩行できることは前提として、ある限度以上の不安感、不快感を与えないことを歩行性に対する要求性能と設定した。

歩行性に関する性能項目を表Ⅲ-6.2.3に示す。通常時の歩行性には、路面の健全性、歩行時の振動および歩行時の視界が照査項目として考えられる。

表Ⅲ-6.2.3 歩行性に関する性能項目

中項目	小項目	照査項目
歩行性	通常時の歩行性	路面の健全性
		歩行時の振動
		歩行時の視界

注) 土木構造物の性能設計ガイドライン¹⁾を参考に性能項目を設定した。

これまで、歩行性に対する照査項目として、振動のみが考えられていたが⁵⁾、ここでは路面の健全性および歩行時の視界についても歩行性の照査項目として考えることとした。

また、走行性と同様に、表Ⅲ-6.2.4に示すような気象条件に応じて歩行性の性能レベルを定めることが考えられる。

表Ⅲ-6.2.4 歩行性に関する要求性能レベルの例

使用性レベル	作用および気象条件	要求性能	内 容
レベル1	・設計供用期間中に作用する活荷重 ・気象条件1 (風速、雨量が十分小さい)	通常時の歩行性	歩行者に不安感・不快感を与えない。
レベル2	・気象条件2 (風速、雨量があるレベル以上)	異常時の歩行性	振動を感知し、不安感・不快感を持つことを許容するが、歩行の安全性を確保する。

表Ⅲ-6.2.4に示す気象条件1は、風速、雨量あるいは路面凍結などの気象条件が歩行性に影響しない範囲であり、通常時の歩行性を満足させる必要がある。気象条件2は歩行が可能であるが歩行性に影響するレベルの気象条件であり、通常歩行性がある程度損なわれることを許容されるのが合理的と考えられる。なお、異常時の歩行性には雨天時の歩行性、強風時の歩行性および冬季の歩行性がそれぞれ考えられるが、本指針（試案）では具体的な記述は省略する。

構造物の設置目的および重要度に応じて、通常では歩行できない暴風時に対して防風対策により歩行性を保持させることや、スノーシェルター等の対策により降雪に対し歩行性を保持させるように、気象条件2のような場合にもレベル1の使用性を満足させるように設定することも考えられる。

6.3 使用性に対する照査

6.3.1 走行性に対する照査

通常時、雨天時、強風時および冬季の走行性の照査は、それぞれに対して設定した照査指標が限界値を超えていないことを確認することにより行うのを基本とする。

(1) 通常時の走行性に対する照査

通常時の走行性として、路面の健全性、剛性、乗り心地および走行時の視界について下記の内容を照査する。

路面の健全性：路面の平坦度および摩擦係数がある限界を超えないことを確認する。

剛性：活荷重によるたわみがある限界を超えないことを確認する。

乗り心地：車両の振動加速度がある限界を超えないことを確認する。

走行時の視界：視距が設計速度に応じ確保されていることを確認する。

(2) 雨天時の走行性に対する照査

雨天時の走行性の照査は、あらかじめ設定された降雨量以上の路面排水性能をもつことを確認することにより行う。

(3) 強風時の走行性に対する照査

強風時の走行性の照査は、構造物上の風速がある限界値を超えないような対策が行われていること、あるいは風速に応じて適切な走行速度等の規制が行われていることを確認することにより行う。

(4) 冬季の走行性に対する照査

冬季の走行性の照査は、路面凍結が生じにくい床版形式が採用されているかどうか、あるいは、路面凍結防止の対策が採られているかどうかを確認することにより行う。

(5) 地震時の走行性に対する照査

地震時の走行性の照査は、レベル1の地震の影響による変位がある限界を超えないことを確認することにより行う。

【解説】

通常時、雨天時、強風時および冬季の走行性に対する照査は、それぞれに対する適切な照査指標が限界値を超えていないことを確認することにより行う。

表Ⅲ-6.3.1に走行性に関する要求性能の照査項目および照査指標の例を示す。

表Ⅲ-6.3.1 走行性に関する要求性能の照査項目および照査指標の例

中項目	小項目	照査項目	照査指標の例
走行性	通常時の走行性	路面の健全性	路面の平坦度, 摩擦抵抗
		剛性	たわみ
		乗り心地	振動加速度 (乗り心地係数)
		走行時の視界	視界
	雨天時の走行性	路面排水に対する配慮	路面の排水性能
	強風時の走行性	強風に対する配慮	路面上での強風発生頻度と対策 (速度等の規制, 防風柵等) の有無
	冬季の走行性	路面凍結に対する配慮	路面凍結が生じ難い構造の採用 凍結対策の有無
地震時の走行性	変位に対する配慮	地震の影響による変位	

(1) について 通常時の走行性に対する照査は、路面の走行性、剛性、乗り心地および走行時の視界が適切に設定された照査指標の限界値を超えないことを確認することにより行う。

1) 路面の健全性

路面の健全性は、路面の凹凸、舗装の割れ、伸縮部の段差、路面とタイヤとの摩擦係数で表される。路面の健全性は車両の振動あるいは騒音を引き起こし、走行安全性に影響したり、利用者の快適性を損なう可能性がある。これらがある限界値を超えていなければ、車両の走行安全性あるいは利用者の快適性が確保される。これらの限界値は走行試験等に基づき設定されることが望ましい。

自動車のタイヤと路面との摩擦係数は自動車走行の安全性に影響するため、走行安全性が確保できる限界値以上であることが必要である。摩擦係数には縦すべり摩擦係数および横すべり摩擦係数の2種類があり、道路構造令⁴⁾では縦すべり係数には湿潤状態を想定し0.29から0.44として制動停止距離が規定されている。一方、横すべり係数には設計速度に応じ0.1から0.15を考慮して曲線部の線形が規定されている。

2) 剛性

剛性は構造物の変形が使用性に影響を及ぼすことから設定される性能で、車両走行に伴う構造物のたわみのレベルにより利用者の快適性あるいは走行安全性に影響を与えると考えられる。通常時の走行性の照査に用いる活荷重によるたわみの限界値については、適切に設定する必要がある。走行性に影響するたわみの限界値は、一般にはたわみを有する構造物上を走行する車両の加速度が、利用者の乗り心地の限界あるいは車両走行安全性の限界より設定される。

なお、道路橋示方書²⁾、鉄道構造物等設計標準³⁾では、活荷重作用時の変形を制限することで、構造物に必要な剛性が確保されている。それぞれのたわみ制限値の基本的理由は下記のとおりである。

- a. 変形に伴う二次応力増加の制限、車両の走行安全性、歩行者不快感の排除 (道路橋)
- b. 乗り心地の確保、車両の走行安全性 (鉄道橋)

3) 乗り心地

車両振動に対する利用者の乗り心地は、車両の加速度が利用者の不快感から定まる限界値を越えていないことを照査する。車両振動は路面凹凸、構造物のたわみおよび構造物の振動により生じ、路面凹凸および構造物のたわみに関する乗り心地については前述の路面の健全性および剛性の照査により確保される。

鉄道では、乗り心地に関する照査指標として乗り心地係数が用いられている。鉄道構造物等設計標準で

用いられている乗り心地係数は、車両の振動加速度と振動数の関係で示されたJanewayの乗り心地係数である。なお、車両の加速度は橋梁上を車両が走行するシミュレーションにより容易に求まるが、上記設計標準では、様々な橋梁に適用できる制限値を求めるため、形状を仮定したレール面上に車体の振動力学モデルを走行させる動的解析（走行シミュレーション）により評価が行われている。その他、上記設計標準ではたわみおよび左右レール位置でのたわみ差に関する制限値も乗り心地係数から設定されている。

4) 走行時の視界

走行時の視界には、運転者の視界と同乗者ないし乗客の視界があり、前者は走行安全性に影響し、後者は快適性に影響する。

道路構造における運転者の視界に関する照査指標は制動停止視距と追越視距であり、一般に、道路構造令に規定される視距が満足されていれば、走行安全性は確保されるとみなしてよい。その他、同乗者ないし乗客が構造物周辺の景色を眺望できることが構造物の要求される性能となる可能性が考えられる。

(2) について 雨天時の走行性に対する照査は、想定される雨量に対し排水装置の排水能力を確認することにより行う。

実橋では泥の堆積等により、排水性能が低下することが考えられるため、維持管理と関係するが、ある水準で管理されることを前提（維持管理計画に明示）に、この影響を考慮して排水性能を照査する必要がある。

(3) について 強風時は走行安全性が損なわれる可能性があり、その場合減速走行が必要となる。強風時とはおよそ風速 10m/s 以上で 25m/s 以下の強風注意報の対象となる風速範囲であり、車両走行が可能な風速範囲である。一方、風速 25m/s 以上の暴風時は暴風警報の対象となり、車両走行が制限される。

特に、橋梁上では一般部と比べ風速が強いため留意が必要である。強風時に走行性に影響する現象としては、下記が挙げられる。

- a. 風による車両の操舵への影響
- b. 風による桁の振動：走行安全性への影響、利用者に不快感を与える可能性がある
- c. 風による部材振動：利用者に不安感を与える
- d. 構造物上もしくは構造物とその前後における風速の急変：走行安全性に影響する

風による桁の振動については直接走行性に影響するため、ある限度以下に抑制することが必要である。この照査は風洞試験^{7) 8)}による振動振幅をもとに加速度を求め、それが走行安全性あるいは利用者の不快感より設定された限界値を超えていないことを照査する。

風による部材振動は部材の安全性、疲労耐久性に影響するため、その振幅は制限されるが、利用者への不安感についても無視できないことがあるので、その振幅はある限界値に制限される必要がある。

構造物上の風速の急変は吊橋・斜張橋などの塔の前後においてしばしば見られ、構造物とその前後における風速の急変は地形の要因でしばしば見られる。これらの風速変動が大きい場合に車両横転事故につながる可能性がある。このため走行安全性が確保できる範囲に風速変動を押さえる必要がある。この照査は、ある領域内の平均風速の変動が、試験あるいは走行シミュレーションにより設定された走行安全性が確保できる限界値以下であることを確認することにより行う。なお、風速変動の定量的評価法には、風洞試験あるいは数値流体解析に基づく方法と類似例における実測がある。この照査により走行安全性が損なわれる場合には、遮風壁などの設置により風速変動を緩和することが有効である。

構造物の設置目的・重要度により、暴風時にいつも通常の走行性を確保することを要求性能とする場合が考えられる。その場合には、構造物上の車両高さの範囲における平均風速が、要求性能として規定

された風速以下であることを照査するとともに、強風時と同様に桁の振動に対する照査を行う。暴風時において要求性能を満足させるためには、遮風壁の設置等の対策が考えられる。

(4) について 冬季は路面凍結によるタイヤと路面との摩擦係数が低下し、走行安全性に影響する。

鋼床版は、コンクリート床版と比べ路面凍結が生じやすいため、路面凍結が生じやすい地域では床版形式に配慮が必要である。

冬季の走行性に関しては、路面凍結が生じる地域において特に重要な要求性能であり、床版形式により要求性能を確保することが考えられる。構造物の設置目的・重要度によっては、積雪にともなう路面凍結を防止し、走行性を確保することを構造物の要求性能とすることが考えられるが、この場合はロードヒーティングを施す等の対策を講じる必要がある。その他、地吹雪にさらされる構造物では視界確保のための対策を行うことが必要である。

(5) について 地震時の走行性に対する照査は、地震動による変位がある限界を超えないことを確認することにより行う。

鉄道橋では地震の影響により生じるレールレベルの目違いおよび折れ角が走行安全性に影響する。このため、レールレベルの目違いおよび折れ角が走行安全性より定まる限界値以下に抑えることが必要である。この限界値は走行シミュレーションにより定めてよい。この限界値については鉄道構造物等設計標準が参考となる。

道路橋では地震の影響による伸縮装置の変位が自動車の走行安全性に影響する。このため、伸縮装置の変位が自動車走行の機能を保持できる範囲内に押さえる必要がある。

6.3.2 歩行性に対する照査

通常時の歩行性の照査は、路面の健全性、振動および視界に対して、それぞれに設定した照査指標が限界値を超えないことを確認することにより行う。

(1) 路面の健全性に対する照査

路面の健全性の照査は、路面の平坦度および摩擦係数がある限界値を下回らないことを確認することにより行う。

(2) 振動に対する照査

振動の照査は、歩行性に影響する振動速度または加速度が、固有周期に応じて設定されたある限界値を超えないことを確認することにより行う。

(3) 視界に対する照査

歩行性に影響する視界の照査は、視界に関する限界値を下回らないことを確認することにより行う。

【解説】

路面の健全性、歩行時の振動および視界の照査は、それぞれに対する適切な照査指標が限界値を超えないことを確認することにより行う。

表Ⅲ-6.3.2 に歩行性に関する要求性能の照査項目および照査指標の例を示す。

表Ⅲ-6.3.2 歩行性に関する要求性能の照査項目および照査指標の例

中項目	小項目	照査項目	照査指標の例
歩行性	通常時の歩行性	路面の健全性	路面の平坦度, 摩擦係数
		歩行時の振動	速度, 加速度, 固有振動数
		歩行時の視界	前方の視界, 路面の明るさ

(1) について 路面の健全性は、路面の平坦度および摩擦係数で表される。路面の平坦度は、路面の凹凸、舗装の割れ、伸縮部の段差に関する平坦性を評価したもので、利用者の歩行性を損ない、不快感を与えないように、構造物の路面の平坦度がある限界値を超えないことを照査する。この限界値は実験により定めることが望ましい。

摩擦係数は歩行時の安全性に影響するため特に重要であり、安全性が確保できる摩擦係数の限界値を下回らないことを照査する。路面の摩擦係数は湿潤状態で低下するので、靴と湿潤状態の路面との摩擦係数を実験的に評価するとともに、摩擦係数と歩行安全性との関係を実験的に評価して限界値を定めることが望ましい。

(2) について 歩行時の振動は歩行者の不快感を与える可能性があるため、構造物の振動による速度あるいは加速度がある限界値を超えないことを照査する。構造物の振動には車両走行にともなう振動、歩行者の歩行にともなう振動および風による振動が考えられる。これらの振動に対する速度および加速度の限界値は実験的に求められた値を用いることを原則とする。また、歩行時の速度あるいは加速度の評価については、道路橋では車両走行を、人道橋では歩行者の歩行をモデル化した構造物の動的解析に基づくことを基本とする。このような解析をもとに限界値と活荷重たわみおよび振動数の関係が設定されている場合は、活荷重たわみおよび振動数により間接的に照査してもよい。風による振動に関しては風洞試験により推定された振幅より算定すればよい。

人道橋における加速度の評価方法およびその限界値については、立体横断施設技術基準・同解説⁵⁾、カナダ・オンタリオ州道路橋設計基準⁹⁾ およびイギリス BS5400¹⁰⁾ が参考となる。

立体横断施設技術基準・同解説では活荷重による主桁の振動が利用者に不快感を与えないことを要求しており、歩行者の歩調 (2Hz) との共振を防ぐため、1次固有振動数が2Hz付近になることを避けるように解説している。また、共振域が避けた場合でもたわみ振動が歩行者に不快感を与えないようにするために、1m²あたりに1人という通常の利用状況で2Hzの強制周期力による最大加速度が100gal以下とすることが望ましいとされている。

カナダ・オンタリオ州道路橋設計基準 (第2版) とイギリス BS5400 では、Blanchardらによって提案された方法により加速度を評価し、その加速度が限界値を超えないように規定されている。以下に概要を述べる¹¹⁾。

時刻 t (sec)における歩行外力は次式より求める。

$$\text{歩行外力 } F=180 \sin(2 \pi f t) \text{ (N)}$$

$$\text{移動速度 } V=0.9 f \text{ (m/s)}$$

ここで、 f は橋の固有振動数と同じ歩調 (Hz) である。

このような外力を歩道橋に作用させ、鉛直方向の最大加速度を求めることを提案している。簡単な桁橋については下記の最大加速度の簡易計算式を与えている。

$$\text{最大加速度 } a=4 \pi^2 f_1^2 w K \phi \text{ (m/s}^2\text{)}$$

ここに、 f_1 : 1次固有振動数(Hz), w : 700Nの鉛直集中荷重による上部構造の静的最大たわみ(m),

K : 構造形式に関する形状係数, ϕ : 減衰定数 h をパラメータとした動的応答係数

上記により求めた最大加速度が上部構造の固有振動数との関係で示された加速度限界値以内であることを確認する。

(3) について 歩行時の視界は構造物を快適に利用するための要求性能と考えられ、構造物の設置目的、位置および重要度に応じ歩行時の視界に関する要求性能を設定するのが合理的と考えられる。したがって、歩行時の視界の照査は、前方の視界あるいは路面の明るさが構造物に応じて設定された限界値を満足していることを照査する。

参考文献

- 1) 日本鋼構造協会：土木構造物の性能設計ガイドライン 2001年10月
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編 2002年3月
- 3) 運輸省鉄道局監修，鉄道総合研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 鋼・合成構造，2000年7月
- 4) 日本道路協会：道路構造令の解説と運用 1983年2月（その後一部改正有り）
- 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) 日本道路協会：道路橋耐風設計便覧 1991年7月
- 7) 本州四国連絡橋公団：本州四国連絡橋耐風設計基準(2001)・同解説 2001年8月
- 8) 土木学会：鋼構造物設計指針 PART A 一般構造物 1997年度版
- 9) コンクリート構造物の補強設計・施工の将来像 性能照査型補強設計指針(試案)
- 10) 九州橋梁・構造工学研究会：カナダ・オンタリオ州道路橋設計基準 1983年版（共通編，鋼橋編）1985年3月
- 11) BSI：Steel, Concrete and Composite Bridge, Part 2. Specification for Loads, 7.1.5 Vibration Serviceability, BS5400 1978年
- 12) 土木学会：橋梁振動モニタリングのガイドライン 2000年10月
- 13) 土木学会：道路橋床版の新技术と性能照査型設計 2000年10月
- 14) 前田節雄：全身振動評価の国際動向，騒音制御 Vol.21, No.1 1997年

第7章 耐久性に対する要求性能および照査

7.1 一般

(1) 鋼構造物は、想定される作用のもとで設計供用期間中継続して必要なレベルの性能が保持されなければならない。

(2) 鋼構造物の耐久性に関する性能項目として、耐疲労性、耐腐食性、材料耐久性および維持管理性を考慮するものとする。

(3) 耐疲労性、耐腐食性、材料耐久性および維持管理性に対する照査は、性能を表現しうる適切な指標を設定し、それぞれの指標ごとに設定された事項を満足することを確認することにより行ってよい。

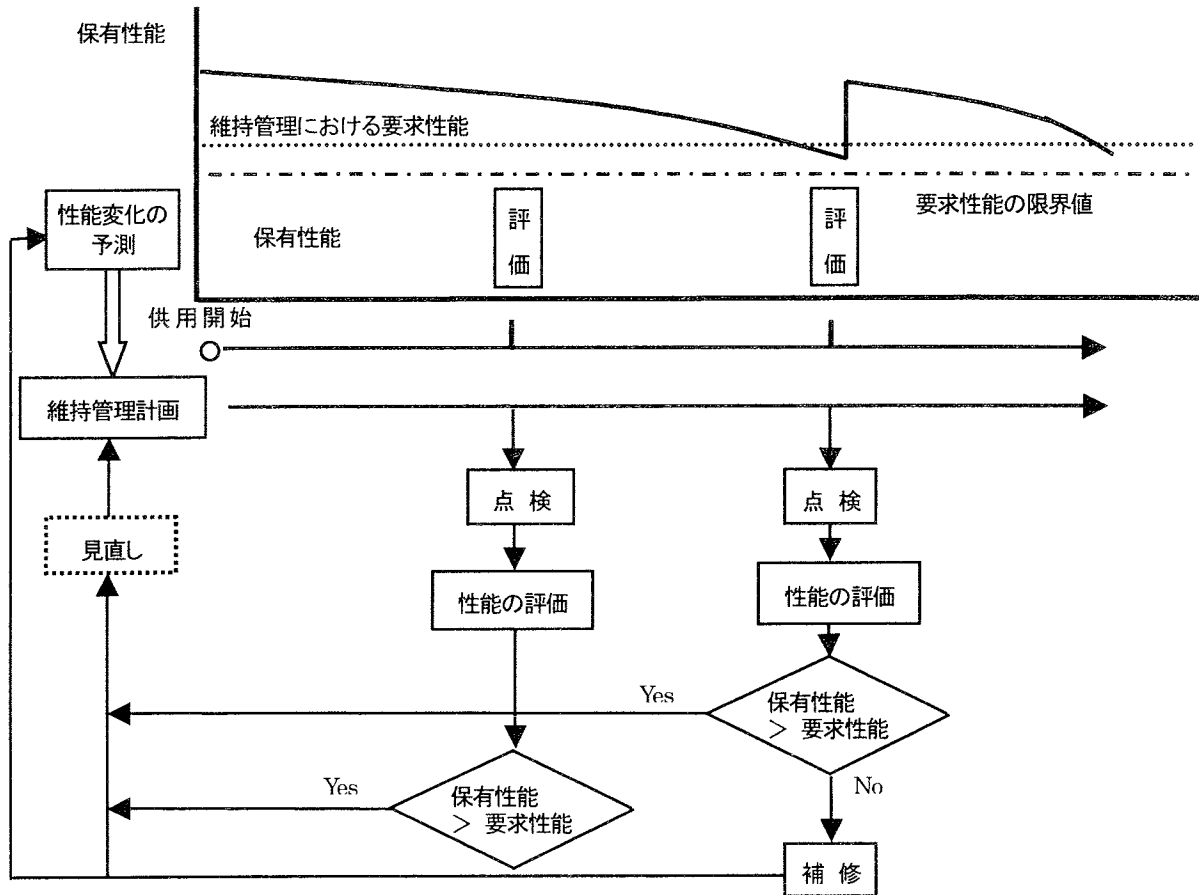
【解説】

鋼構造物を含む全ての構造物は、作用によって経年とともに性能が低下する。構造物の耐久性は、構造物本体あるいは構造物を構成する部材の性能低下に対して抵抗する能力と定義される。したがって、想定される作用のもとで、設計供用期間中継続して必要なレベルの性能（安全性、使用性等）を確保することが耐久性能を満足させることになる。

設計供用期間中の性能を低下させる要因には損傷、材料劣化等がある。例えば鋼橋では、これまでの損傷事例、取り替え事例等から、変動作用による疲労（耐疲労性）、腐食（耐腐食性）、床版等のコンクリート材料の劣化（材料耐久性）が考えられる。すなわち、耐久性能を満足させるためには、これらの損傷や材料劣化をコントロールすることが極めて重要である。

また、構造物の耐久性を満足させるためには、設計・施工とリンクした適切な維持管理を行うことが不可避である。具体的には、対象構造物に対してどのような維持管理を行うかを定めた維持管理計画を設計時に明示し、供用開始後それに基づいて実施していくが、維持管理の各段階で構造物の状態を勘案しながら維持管理の方法に修正を加えていくといったことが考えられる。図Ⅲ-7.1.1 にその概念図、すなわち、供用開始後、時間の経過とともに保有性能が低下していく様子、維持管理計画に基づいて点検、性能の評価を行い、保有性能が維持管理における要求性能を下回る場合には補修を行うことによって、供用期間中保有性能が要求性能の限界値以上を確保していく様子を示す。このように、本指針（試案）は、これまで設計と別のもので扱われる傾向にあった維持管理を、設計時から取替えに至る鋼構造物のライフサイクル全般にわたって組み込み、耐久性を実現していく体系として捉えようとするものである。したがって、点検用足場、塗装用金具等の維持管理用設備を設けるなど維持管理を容易にすることも耐久性を満足させる重要な要因となる（維持管理性）。

なお、耐久性は基本的には安全性の照査であるとして、安全性の中に含める考え方がある²⁾。この場合、建設後ある時間経過時の強度や損傷度を予測することによって照査を行うものとしている。本指針（試案）では、上述したように、維持管理も含めた体系の中で耐久性を実現すべきと考えておりその意味を明確にするため、また建設後は安全性以外の性能も常に満足させなければならないことから、耐久性を性能の一つとして独立して考えている。



図Ⅲ-7.1.1 鋼橋の耐久性と維持管理の概念

7.2 耐久性に対する要求性能

7.2.1 耐疲労性

鋼構造物は、設計供用期間中、繰返し生じる作用のもとで、疲労破壊が生じないように維持されなければならない。

【解説】

鋼構造物には、交通荷重や風荷重のように、応力変動が繰返し生じると、疲労き裂が発生・進展し、大きな損傷に至ることがある。そのため、鋼構造物は、疲労損傷が生じないように配慮されなければならない。鋼構造物を健全に維持するためには、適切な疲労損傷を防止する処置を講じておく必要がある。鋼構造物の疲労損傷の防止には、一般に、部材の板厚を大きくしたり剛性を高めたりすることにより、発生する応力を小さくする方法と、部材の接合方法や構造詳細を工夫することにより、局部的な応力集中を少なくする方法がある。例えば、橋梁の場合には、補剛材や横リブの板厚を大きくしてウェブやフランジの面外変形を抑えて発生応力を小さくしたり、溶接ビードの止端部形状を滑らかに仕上げて応力集中を小さくすることが行われる。

鋼構造物の耐疲労性は、構造物を構成する部材の疲労に対する耐久性であり、設計供用期間中の性能をどの程度に保つかといった観点から、例えば表Ⅲ-7.2.1 に示すようないくつかのレベルを設定することが

できる。

表Ⅲ-7.2.1 耐疲労性性能レベルの例

	耐疲労性性能レベルⅠ	耐疲労性性能レベルⅡ	耐疲労性性能レベルⅢ
耐久性能	設計供用期間中、疲労き裂の発生を許容せず、供用開始時の状態を維持する。	設計供用期間中に主要部材は疲労き裂の発生を許容せず、供用開始時の状態を維持する。二次部材は疲労き裂の発生を許容する。	疲労き裂の発生を許容し、点検管理により確認後に補修・補強を行う。
照査指標	応力範囲		
維持管理のレベル	・定期的な点検	・定期的な点検 ・必要に応じて疲労き裂の補修	・定期的な点検 ・詳細な調査（疲労き裂が発生した場合） ・必要に応じて補修・補強

これまでの疲労損傷の事例から、繰返し生じる作用として考慮すべきものとして、交通荷重および風荷重がある。構造物によっては、他にも考慮しなければならないものもあり得るので留意しなければならない。なお、疲労は一般に安全性の一つとして扱われるが、本指針（試案）では、耐久性を要求性能の一つと考えており、疲労を構造物あるいは部材の性能を低下させる要因としてとらえている。そのため、安全性ではなく、耐久性の中の性能項目として扱っている。

7.2.2 耐腐食性

鋼構造物は、設計供用期間中、想定される作用（環境）のもとで、鋼材の腐食レベルが供用開始時と同程度に維持されるか、あるいは、腐食による断面減少がある限度内に収まるように維持されなければならない。また、コンクリート内部の鋼材についても、腐食がある限度内に収まるように維持されなければならない。

【解説】

鋼材は自然環境中において不可逆的にさび化あるいは腐食していくため、鋼構造物は、腐食があるレベル以上進行しないように維持されなければならない。鋼構造物を健全な状態に維持するためには、適切な防せい防食の処置を講じておく必要がある。鋼構造物の防せい防食は一般に鋼材表面に施されるが、鋼材の表面性状は鋼構造物の景観に影響するため、色彩等の景観要求がある場合はこれに配慮する必要がある。鋼材の腐食は水と酸素が存在する環境で発生し、塩化物やいおう酸化物等の介在によって促進される。このような腐食の発生や促進の要因は建設地点によって異なり、例えば橋梁のように複雑な形状をした構造物では、雨水や結露水による濡れ時間や腐食の原因となる物質の付着量は部位によっても異なる。例えば、飛来塩分の影響を受ける海岸部や水はげが悪く滞水しやすい箇所では腐食が促進される¹⁾。

鋼材の耐腐食性は、構造物に用いられる鋼材の腐食に対する耐久性であり、設計供用期間中の性能をどの程度に保つかといった観点から、例えば表Ⅲ-7.2.2に示すようないくつかのレベルを設定することができる²⁾。

表Ⅲ-7.2.2 耐腐食性性能レベルの例

	耐腐食性性能レベルⅠ	耐腐食性性能レベルⅡ	耐腐食性性能レベルⅢ
耐久性	設計供用期間中、わずかな断面減少を許容するが、供用開始時と同程度の耐荷力を維持する。	設計供用期間中の腐食による断面減少およびそれに伴う耐荷力の減少を許容する。ただし、部材の取替え、補強は行わない。	設計供用期間中の腐食による断面減少およびそれに伴う耐荷力の減少を許容する。補修・補強、設計供用期間中の部材取り替えを許容する。
照査指標	腐食減量, 耐荷力		
維持管理のレベル	<ul style="list-style-type: none"> 定期的な点検 定期的な塗替え等 	<ul style="list-style-type: none"> 定期的な点検 必要に応じて補修塗装等 	<ul style="list-style-type: none"> 定期的な点検 詳細な調査（腐食が進行した場合） 必要に応じて補修・補強
備考			架設用仮橋等に適用

塗装鋼構造物で、耐腐食性性能レベルⅠを目標とする場合には、その実現方法として定期的に塗替えを行うこと等が考えられる。例えば新幹線の鋼橋では、建設以来、腐食させないことを目標に定期的（7～8年）に塗替えが行われている。通常の鋼構造物は塗膜の状況に応じて塗替えが行われることが多いが、この場合には耐腐食性性能レベルⅡを満足させることが目標になる。

また、耐候性鋼材を用いた無塗装鋼構造物は、環境の良好な個所では良好な使用状態にあり、耐腐食性性能レベルⅠを確保することが目標になる。しかし、海岸に近い場所に架設された橋梁や、融雪のために塩が散布される橋梁等、環境によってはある特定の部材・部位にちみつなさびが生成しにくく、一部補修が必要になるものもある。そのような場所に無塗装鋼構造物を用いる場合には、耐腐食性性能レベルⅡを確保することが目標になると考えられる。なお、無塗装鋼構造物に関して、従来は安定化したさびによって腐食は発生しないと考えられることも多かった。しかし、最近では、腐食は発生するが、それを限度内に制御することによって耐久性を実現するものと理解されている¹²⁾。

床版等、コンクリート部材内部の鋼材についても腐食がある限度内に収まるよう、コンクリートの中性化や塩害に対して配慮されなければならない。中性化とは、大気中の二酸化炭素がコンクリート内に浸入し、水酸化カルシウム等のセメント水和物と炭酸化反応を起こすことにより細孔溶液のpHを低下させる現象である。これにより、内部の鋼材表面の不動態被膜が失われ、酸素と水分の供給により腐食が進行する。鋼材の腐食により、ひび割れの発生、かぶりのはく落、耐荷力の低下等が起こる。また、炭酸化によってC-S-Hを含めた全ての水和物に変質することに加えて、セメント硬化体の空隙構造の変化が生じることにより、強度の変化や炭酸化収縮と呼ばれる収縮現象も併せて起きることが知られている。一方、塩害とは、コンクリート中の鋼材の腐食が塩化物イオンの存在により促進され、腐食生成物の体積膨張がコンクリートにひび割れやはく離をひき起こしたり、鋼材の断面減少等をひき起こすことにより、構造物の性能が低下する現象である。塩化物イオンは海水や凍結防止剤等のように構造物の外部環境から供給される場合と、コンクリート製造時に材料から供給される場合がある¹⁸⁾。なお、ひび割れが存在する場合のコンクリート構造物の耐久性に関しては、発生するひび割れが、構造物の使用目的、環境条件、部材の条件等を考慮して定められた許容ひび割れ幅¹⁵⁾以下であれば、本章で示される照査と組み合わせることで所要の耐久性が確保されると考えてよい¹⁷⁾。

以上、設計供用期間中、構造物に用いられる鋼材が十分な防食性能あるいは防せい性能を保有すること、および、コンクリート内部の鋼材の腐食がある限度内に収まることを、耐腐食性に対する要求性能とした。

7.2.3 材料耐久性

鋼構造物は、設計供用期間中、使用されるコンクリートの劣化レベルがある限度内に収まるように維持されなければならない。

【解説】

材料耐久性は、鋼構造物に用いられるコンクリート材料の劣化に対する耐久性であり、床版等のコンクリート部材については、これを考慮する必要があり、鋼部材と別途の扱いが必要である。コンクリートの材料劣化に関しては、主として、凍害及びアルカリ骨材反応に関する配慮が必要である。

凍害とは、コンクリート中の水分の凍結膨張によって発生するものであり、長年にわたる凍結と融解の繰り返しによってコンクリートが徐々に劣化する現象である。凍害を受けた構造物では、コンクリート表面にスケーリング、微細ひび割れ等の形で劣化が顕在化するのが一般的である。微細ひび割れ、スケーリングは、コンクリートのペースト部分が劣化するものであり、コンクリートの品質が劣る場合や適切な空気泡が連行されていない場合に多く発生する。凍害による劣化の程度は、コンクリートの配合（単位セメント量、水セメント比、空気量等）、骨材の品質等のコンクリートに関する要因、部材の断面形状、鋼材量等の構造体に関する要因、及び水の供給程度、日射の影響、外気温（最低温度）、凍結融解回数等の構造物が供用される環境条件に関するもの等多くの要因によって決まることが知られている。

セメントに含有されるアルカリは、セメントの水和反応の過程でコンクリートの空隙内の水溶液に溶け出し、水酸化アルカリを主成分とする、強アルカリ性の水溶液となる。ある種のシリカ鉱物や炭酸塩岩を含有する骨材は、コンクリート中の高いアルカリ性の水溶液と反応して、コンクリートに異常な膨張及びそれにとまなうひび割れを発生させることがある。これがアルカリ骨材反応と呼ばれるものである。アルカリ骨材反応にはアルカリシリカ反応（以下、ASR）とアルカリ炭酸塩岩反応との2種類があり、わが国で被害が主に報告されているのはASRである。わが国では、昭和50年代前半に関西、中国及び北陸の各地域において、主として安山岩砕石を使用した構造物でASRによる損傷が発見された。その後、種々の調査により、ASRによる損傷を受けた構造物は全国の幅広い地域に分布し、反応性骨材も安山岩、流紋岩等の火山岩系やチャート、硬質砂岩等の堆積岩系等、多種多様なものが存在することが分かってきた¹⁸⁾。

7.2.4 維持管理性

鋼構造物は、設計供用期間中の維持管理計画が作成されていなければならない。また、維持管理計画に定められた点検や使用材料の状態の調査、損傷が発見された場合の調査等が容易になるように配慮されていなければならない。

【解説】

耐久性を満足させるためには、どんな構造物に対しても常に適切な維持管理を行うことが極めて大事である。これまでは、ほとんどの場合設計と維持管理は別のものとして扱われていたが、本指針（試案）では、構造計画から維持管理に至る構造物のライフスパン全体にわたって構造物の性能を満たすような設計体系を目指しており、そのために適宜適切な維持管理を行うことを前提としている。

維持管理性は、維持管理が確実にかつ容易にできるかどうかを表す性能で、具体的には維持管理計画が作成されているとともに、維持管理計画に基づいた損傷や材料状態の調査等が実施し易くなるよう配慮されているかどうかを表すものである。

（1）維持管理計画

維持管理計画では、構造物が供用開始されてから設計供用期間中の点検方法、点検周期、補修・補強の具体的な維持管理のレベル等を事前に具体的に定めるものである。ただし、維持管理計画は、供用開始後の実際の維持管理によって、必要の都度修正が加えられることが重要である。

(2)維持管理設備の設置

維持管理を容易に行なうためには、設計時から、点検足場、塗装用金具等の維持管理用の設備を設けるなどの配慮をすることが重要である。

7.3 耐疲労性に対する照査

7.3.1 交通荷重による疲労に対する照査

交通荷重による疲労の照査は、以下に示す方法によって行ってよい。

- (1)過去に疲労損傷が発生し構造上の問題が指摘されている構造、品質管理が困難な継手が採用されていないことを確認する。
- (2)繰返しの影響を評価した応力変動が、疲労強度を上回らないことを確認する。

【解説】

鋼構造物の交通荷重による疲労を照査するにあたっては、疲労強度が著しく劣る継手や、過去に疲労損傷が多く報告されているかあるいはそれに類似する構造の採用を避けるとともに(第10章構造細目参照)、活荷重等によって部材に生じる応力変動の影響を評価して必要な耐久性をもつことを確認する。継手形式や継手位置、構造ディテールの決定にあっても、設計時のモデル化と実構造との違いによる二次応力の発生や、応力集中の程度等について配慮することが重要である。

(1)について 構造の選定にあたっては、疲労強度が著しく劣る継手や過去に疲労損傷が多数報告され問題点が指摘されている構造の採用を避けなければならない。プレートガーダーの支承ソールプレートの取付溶接部、主桁端部の切欠き部での下フランジとウェブとの溶接部、横構ガセットプレート取付部、アーチ垂直材の上下端接合部、床組部材の交差接合部、鋼床版の横リブウェブと縦リブとの交差部、橋脚の柱とはりの溶接部などは、これまでに疲労き裂の発生が報告されており、その設計にあたっては十分留意する必要がある。代表的な疲労損傷については、文献³⁾が参考になる。

部材の連結にあたっては、裏当て金付き溶接、荷重伝達型十字継手でのすみ肉溶接や部分溶込みすみ肉溶接、重ね継手、主板貫通型ガセット継手、鋼管の割込み継手など、疲労強度が著しく低い継手や品質確保が困難な継手については使わないのが望ましい。

(2)について 基本的には活荷重等によって部材に生じる応力変動の影響を評価して、疲労耐久性が確保できる継手や構造となるようにすることが必要である。例えば道路橋の場合、疲労設計荷重を車線に対して移動載荷して応力範囲を求め、それが事前に定められた各継手の応力範囲の打ち切り限界以下に収まるかどうかを確認し、これを満足しない場合には設計で考慮する期間(概ね100年)の繰返し載荷の影響を考慮して線形累積被害則の考え方に基づく照査を行う。鉄道橋の場合も同様に、載荷される列車荷重の大きさと載荷頻度に応じて定められた荷重の特性値により最大作用応力範囲を求め、それが各継手の疲労限以下に収まるかどうかを確認し、これを満足しない場合には設計供用期間(60年または70年)の繰返し載荷の影響を考慮して、道路橋と同様、線形累積被害則の考え方に基づく照査を行う。

このような照査では、鋼構造物の疲労設計指針・同解説⁵⁾、鋼道路橋の疲労設計指針⁴⁾、鉄道構造物等設計標準・同解説⁶⁾を参考にするとよい。

7.3.2 風荷重による疲労に対する照査

風荷重による疲労の照査は、渦励振などの発現する風速が照査風速より大きいか、振幅が許容振幅より小さいことを確認することにより行ってよい。

【解説】

鋼構造物の風荷重による疲労を考慮するにあたり、最も重要な動的対風応答現象は渦励振である。渦励振は、風速域・振幅ともに限定的な現象ではあるが、比較的低風速で発生するために疲労の検討が重要である。渦励振は、橋桁、吊形式橋梁の主塔やケーブル、ランガー橋などの吊材、さらには照明柱や高欄などの付属物にも生じることが報告されている。

このような、鋼構造物の動的対風応答現象の予測は、風洞実験に基づいて行うのが現在の技術レベルにおいては最も確実とされている。一方、風洞実験は風洞といった特殊な実験設備を必要とし、費用や手間がかかることから、簡便な照査に用いるには必ずしも適当でない場合がある。そこで、特に動的応答に対する耐風性の照査を簡便に行えるようにするために、道路橋示方書と同じスパン 200m 程度以下の橋梁を主な対象とし、既往の実験結果などを整理することによって、現象の発生風速やさらに詳細な検討の必要性の有無について安全側の推定式を与えたのが、道路橋耐風設計便覧⁸⁾である。

これらの手法により渦励振の発生風速や振幅の予測ができれば、渦励振の発現する風速が照査風速より大きいか、振幅が許容振幅より小さいことを確認することにより、疲労に対する照査を行うことができる。なお、照査風速や許容振幅についても、道路橋耐風設計便覧⁸⁾を参考にするのがよい。

ランガー橋などの吊材、さらには照明柱や高欄などの付属物については、一般に発現する風速の見当は付くものの、振幅を精度良く予測することは難しい。したがって、架設時からの注意深い監視によって、予想される風速で振動が発生するのかわからないのかを確かめ、その後に必要があれば制振対策を講じる方法が有効と考えられる。

鋼構造物の風作用による疲労を考慮するにあたって、渦励振以外に問題となる現象として、ガスト応答と、ケーブル特有の振動現象としてのレインバイブレーションが挙げられる。ガスト応答は気流の乱れに起因する不規則な振動現象であり、風速の増加とともに振幅が漸増するという特徴を持つ。しかしながら、ガスト応答については、規模が非常に大きく変形しやすい吊橋や斜張橋のような、非常に特殊な例を除いては問題にならないとされている。また、レインバイブレーションは、降雨・強風時に斜張橋のケーブルに生じる振動現象であり、最近では、非降雨時においても、風がケーブルに対して斜めに作用することにより動的な応答が生じるとする研究結果もあるので注意が必要である。ただし、今まで我が国で用いられてきたケーブルで、レインバイブレーションにより疲労破断を生じた事例は報告されていない。

7.4 耐腐食性に対する照査

鋼材の耐腐食性の照査は、以下に示す方法によって行ってよい。

- (1) 塗装の場合には、腐食環境に対応した塗装仕様が選定されていることを確認する。
- (2) 耐候性鋼材、その他の防食方法を用いる場合には、腐食環境に対応した防せい防食仕様が選定されていることを確認する。
- (3) コンクリート内部の鋼材の腐食については、コンクリートの中性化が鋼材の位置まで進まないことや、塩化物イオン濃度が鋼材の位置で制限値以下であることを確認する。

【解説】

鋼材の防せい防食法は使用される環境条件に対して必要な耐久性が得られるものでなければならないが、方法ごとに適用できる部材の規模、形状等の条件が制約されることや、防せい防食性能の維持に必要な点検の難易度や補修の作業性についても方法ごとに条件が異なる。したがって、鋼構造物の防せい防食法の選定にあたっては、耐久性や景観等の要求に応じて、環境条件、点検と補修に関する維持管理計画、経済性を考慮しなければならない。

鋼材の防せい防食法には表面被覆、表面改質、電気防食、鋼材自体の改質等多くの方法があるが、一般的には鋼材表面に何らかの被覆を形成することによって、鋼材自体の腐食を防止又は一定の限度内に抑制しようとするものである。これら被覆の性能は、通常、時間の経過とともに徐々に低下していくため、その機能を一定の水準以上に維持するためには、適切かつ効果的な維持管理計画を立て、それに基づいた計画的な維持管理(点検、調査、補修等)を行う必要がある。そのためには、建設地点の環境条件や維持管理の条件を反映した適切な暴露試験や促進試験等により、採用する方法の防せい防食原理および耐久性が何らかの形で明らかにされていることが前提となる。これが明らかでないものは、効果的かつ実効性のある点検、調査、維持管理をすることができないので、鋼構造物の防せい防食法として用いる場合には充分注意する必要がある。

なお、鋼材の代表的な防せい防食法である、塗装、耐候性鋼材の使用、亜鉛めっき、金属溶射についてはこれまでの使用実績から、適切に設計および維持管理が行なわれた場合には、一般には要求性能を満足させることができると考えられる。これらの防せい防食原理、機能低下形態及び機能喪失時の補修方法を表Ⅲ-7.4.1に示す¹⁾。

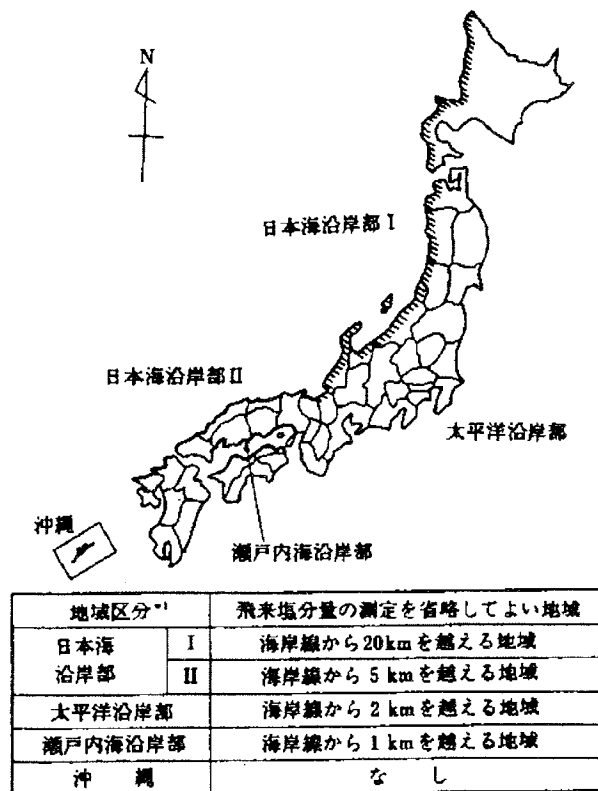
(1)について 塗装は鋼部材の防せい防食方法として現在最も一般的に用いられる方法であり、鋼材表面に保護被膜を形成して腐食を防止する。構造上の制約が少なく、色彩選択の自由度が大きい等の特徴があるが、環境中では種々の因子で塗膜が劣化するため周期的な塗替えによる機能の維持が必要である。塗膜が劣化する速さは、塗膜の防せい機能の強さと、構造物のおかれた環境での飛来塩分量などの腐食因子の強さとの関係から決まる。そのため、構造物が建設される場所・部位による腐食環境の相違を考慮に入れて塗装仕様を決定していること^{9), 10)}、および適切な塗替え時期の設定を行っていることを確認することにより耐腐食性の照査を行う。塗替え時期の判定については、例えば、さびの発生面積が0.3%を上回ったときを塗替え時期とする方法がある¹¹⁾。塗替え時期は、早すぎても不経済であり、また遅すぎて劣化が進んでからでは、構造物の耐用年数への影響や、素地調整費用が高くなるため、経済上有利な時期を選び施工することが望ましい¹¹⁾。

表Ⅲ-7.4.1 鋼構造物の代表的な防せい防食法

	主たる防せい防食原理	機能低下形態 (予想外の劣化進行を含む)	機能喪失時の補修方法
①塗装	塗膜による大気環境遮断	塗膜の劣化	塗替え
②耐候性鋼材	ちみつなさびの発生による腐食の制御	層状剥離さびの発生とそれにとまなう断面減少	塗装等
③亜鉛めっき	亜鉛酸化物による保護被膜及び亜鉛による犠牲防食	亜鉛層の減少	溶射又は塗装
④金属溶射	溶射金属の保護被膜及び溶射金属(アルミ、亜鉛等)による犠牲防食	溶射金属層(アルミ、亜鉛等)の減少	溶射又は塗装

(2)について 耐候性鋼材は鋼材に適量の合金元素を添加することで、鋼材表面にちみつなさを発生させ、これが鋼材の表面を保護することで以降のさびの進展が抑制され、腐食速度が普通鋼に比べ低下する。すなわち、耐候性鋼材は腐食の進行が緩やかになるように制御することによって設計供用期間中の性能の低下を抑えようとするものである。ただし、飛来塩分の多い場合や凍結防止剤を散布する場合、また凍結防止剤を散布する橋に隣接する場合など、塩化物の影響を受ける橋梁や、適度な乾湿繰返しとならない環境のもとでは、均一なちみつなさび層が形成しにくく腐食速度が想定以上になる等の問題があるため、材料に応じた適切な条件で用いなければならない¹⁾。

たとえば、JISG3114に規定する溶接構造用耐候性熱間圧延鋼材については、原則として所定の方法で計測した飛来塩分量が0.05mdd (NaCl : mg/100cm²/day)を超えない地域、あるいは図III-7.4.1に示す地域では一般に無塗装で用いることができるとされている²⁾。ここで、長期の観測を行う代わりに、数値流体力学的手法等の方法により飛来塩分量を推定する手法等が提案されつつあるが、このときには、手法自体の推定精度を十分に検証しておく必要がある。その他、文献²⁾には耐候性鋼材をトラス橋、アーチ橋、ラーメン橋等に適用する場合の設計施工上の留意点についても具体的な内容が記述されているので参考にするとよい。また、最近、流れさび防止やちみつなさびの形成促進、景観への配慮を持った表面処理方法や、耐塩性能を向上させた耐候性鋼材（ニッケル系高耐候性鋼材）が開発され³⁾、鋼構造物への適用実績が増えているが、これらの適用にあたっては、腐食環境と防せい防食仕様を十分に考慮に入れて耐腐食性の照査を行うことが必要である。



図III-7.4.1 耐候性鋼材を無塗装で使用する場合の適用地域

溶融亜鉛めっきは440℃前後の溶融した亜鉛中に鋼材を浸せきし、その表面に鉄と亜鉛の合金層と純亜鉛層からなる被膜を形成し、環境中で表面に形成される酸化被膜による保護効果と犠牲防食効果

により鋼材の腐食を抑制するものである。亜鉛めっきの長期的な耐久性については今後の追跡調査結果を待たねばならないが、海岸など潮風や海水の影響を受ける場合には保護被膜が形成されにくく、腐食により亜鉛層および合金が消耗してゆくと、将来的には塗装による補修が必要となる。また、設計にあたっては、亜鉛めっき槽による部材寸法の制限や、めっき時のやけ、変形に対する材料や構造上の配慮等が必要である¹⁾。具体的な内容は文献¹⁾を参考にするのがよい。

金属溶射は、ブラスト処理等の表面処理を施した鋼材面に溶融した金属を圧縮空気で吹き付けて被膜層を形成させる方法である。溶射金属としては亜鉛、アルミニウム、亜鉛アルミニウム合金等が使用され、溶融亜鉛めっきと異なり、鋼材表面に金属被膜を得る方法として、構造物の大きさや形に対する制約が少ない。金属溶射面は凹凸が多く、塗料の付着性が良いことから塗装の下地として用いられることもある¹⁾。

防せい防食法の機能を発揮させるためには、例えば部材コバ面の面取りを行う等、それぞれの方法に応じて構造の細部についても十分な配慮を行うことが必要である。また、溶接やボルト接合を行う場合等で異種の金属が接触する場合には、電位差に応じてより電位の低い材料の腐食が著しく促進されるいわゆる異種金属間腐食が生じることがあるので、このような場合には両者を絶縁する等の注意が必要である¹⁾。

(3)について コンクリート内部の鋼材はコンクリートの強アルカリ性に保護されている。しかしながら、一方においては塩素イオンが存在すると鉄(Fe)は容易にイオン化し、強アルカリ性の中でも腐食が始まり、進行していく。腐食が始まると割合早い時期にひび割れが生じ、さらに腐食の進行を早める。一方で、コンクリートは空気中の二酸化炭素によって中性化していく。これは、コンクリートの水密性(通気性)と時間に関係している。このため、原則的には設計供用期間中、鋼材の位置までコンクリートの中性化が進まないこと、外部から浸入する塩化物イオン濃度が鋼材の位置で制限値以下であることが望まれる。1975年頃までは鋼材の腐食は単にかぶり量だけで対応していたが、その後水密性及び通気性を配慮して水セメント比でも対応している。かぶり量を大きくとることは死荷重の増大をもたらすため、表面被覆、鉄筋被覆(コーティング、メッキ)等の方法も用いられている²⁾。

中性化のモデルはいくつか提案されているが、中性化時間が水セメント比に逆比例し、深さに比例する式がよく用いられる。このため、現在では水セメント比とかぶり量で中性化対策を行なっている。一方、コンクリート中の塩化物イオンはあらかじめ細骨材に付着して存在する場合、あるいは混和材の一部として存在する場合もあるが、ほとんどの場合、設計供用期間中に外部から浸入してくる。主として、海岸近くの構造物に飛来塩分として、あるいは橋梁の場合には凍結防止剤として路面に散布されたものが水と共に浸入する。塩化物イオンはそれ自体は鋼材と反応するわけではないが、イオンの存在は鋼材周辺に電池作用を生じ、酸素との反応を助けることになる。設計供用期間中の鋼材位置での塩化物イオン濃度の算定には今後の研究が必要である。現在は、水セメント比を小さく取り、透水係数の小さいコンクリートを打設するとともに、かぶり量を大きく取ることで対応している。さらに、鋼材を被覆することにより防ぐこともできる²⁾。コンクリート内部の鋼材の防せい防食の具体的な内容については、文献^{5), 16), 17)}を参考にするるとよい。また、維持管理にあたっての標準的な方法については文献¹⁸⁾を、補修・補強工法の詳細については文献^{19), 20)}を参考にするるとよい。

7.5 材料耐久性に対する照査

コンクリート材料耐久性の照査は、以下に示す方法によって行ってよい。

- (1)凍結・融解の促進試験を行い、動弾性係数と質量を調べることにより、コンクリートの凍結・融解に対する抵抗性が充分であることを確認する。
- (2)コンクリートが所要の耐アルカリ骨材反応性を満足することを確認する。
- (3)コンクリート表面の被覆を行う。その場合、維持管理計画を考慮した上で、表面被覆による防水効果を適切な方法により確認する。

【解説】

(1)について コンクリート自体の劣化には、主として凍害、およびアルカリ骨材反応によるものがある。凍害によるコンクリートの劣化は、北国のみならず山間地でも見られる。現在、凍害は、凍結・融解の促進試験を行い、動弾性係数と質量を調べることにより評価されている。すなわち、凍結、融解の繰り返し回数と動弾性係数の減少でコンクリートの凍結・融解に対する抵抗性を評価している。これには、動弾性係数が60%となる繰り返し回数（サイクル）を基準値（ASTMでは300、JISでは200）で除した、耐久性指数という指標が用いられている。なお、凍害による劣化は、AEコンクリートを用い、水セメント比の低いコンクリートを用いることでかなり防ぐことができる。凍害の可能性のある地域では、コンクリートの設計の際に注意する必要がある²⁾。

(2)について アルカリ骨材反応は、セメント中のアルカリ分（ Na_2O 、 K_2O 等）と骨材のシリカ（ SiO_2 ）が反応し、大量の水を吸着してゲル状態になる反応である。これは一般に水ガラスと呼ばれるが、この水ガラスが膨張し、コンクリートにひび割れが生じる。このひび割れは応力の自由境界に沿ったものとなる。骨材中のシリカでも、トリジマイト、クリストバライト、オパール等の結晶構造の時、反応が生じやすい²⁾。アルカリ骨材反応に対しては、国土交通省からの通達（アルカリ骨材反応抑制対策（土木構造物）あるいは、JISA5308附属書6に示されている対策を講じれば、抑制することができるとされている¹⁰⁾。具体的には、次の対策の一つを講じればよい。

- ① 安全と認められる骨材の使用 骨材のアルカリシリカ反応性試験（化学法又はモルタルバー法^{*}）の結果で無害と確認された骨材を使用する。
*）JIS A 5308の附属書7.8によるものとする。
- ② 低アルカリ形セメントの使用 JISR5210ポルトランドセメントに規定された低アルカリ形セメントに適合したセメントを使用する。
- ③ 抑制効果のある混合セメント等の使用 JISR5211高炉セメントに適合するセメント（B種又はC種）あるいはJISR5213フライアッシュセメント（B種又はC種）、もしくは混和材を混合したセメントでアルカリ骨材反応抑制効果の確認されたものを使用する。
- ④ コンクリート中のアルカリ総量の抑制 アルカリ量が表示されたポルトランドセメント等を使用し、コンクリート 1m^3 に含まれるアルカリ総量を Na_2O 換算で 3.0kg 以下にする。

なお、海水あるいは潮風の影響を著しく受ける海岸付近等において、②、③又は④のいずれかの対策をとり、アルカリ骨材反応による損傷が構造物の安全性に重大な影響を及ぼすと考えられる場合には、塩分の浸透を防止するための塗装等の措置を講ずることが望ましい。

(3)について 一般のコンクリート構造物においてアルカリ骨材反応が問題となるのは、セメント中のアルカリ分（ Na_2O 、 K_2O 等）と骨材のシリカ（ SiO_2 ）が反応し、大量の水を吸着して膨張し、コンクリートにひび割れが発生する場合である。したがって、水分の供給を遮断してその膨張を防ぐことにより、コン

クリート構造物の性能を保持することも可能である。こうした対策の一つとして、構造物中のコンクリートへの水分の浸透を抑制するコンクリート表面被覆などが考えられる。コンクリートの表面被覆を行う場合の留意点については、文献¹⁷⁾を参考にするとよい。

コンクリート自体の劣化防止の具体的な内容については、文献^{15), 16), 17)}を参考にするとよい。また、維持管理にあたっての標準的な方法については文献¹⁸⁾が、補修・補強工法の詳細については文献^{19), 20)}が参考になる。

7.6 維持管理性に対する照査

維持管理性の照査は、一般に下記の項目を確認することによって行なうとよい。

- (1) 維持管理計画の作成の有無とその内容
- (2) 維持管理計画に基づく維持管理方法に対する配慮

【解説】

維持管理性は、7.2.4 に述べたように、維持管理が容易にできるかどうかを表すもので、照査は維持管理計画が作成されていること、損傷や材料状態等の維持管理計画に基づいた調査を実施し易いか等を確認することにより行う。

(1) について 維持管理計画が作成されていること、および供用後に維持管理を行なう上で適切なものになっていることを確認することによって照査を行ってよい。例えば、下記のような内容が定められていることを確認する。

- ・ 検査方法 : (例) 目視等
- ・ 検査周期等 : (例) 1回/2年 (鉄道構造物の例)
- ・ 損傷や劣化に対する健全度の評価方法
- ・ 補修・補強のレベル : (例) 腐食一部分塗装 1回/設計供用期間, . . .
き裂一あて板補強 1回/設計供用期間, . . .

(2) について 維持管理計画に基づく維持管理が容易に行えるように配慮されているかを確認することにより照査を行う。例えば、点検管理の容易さとは、点検用足場、塗装用金具等の維持管理用の設備が設けられている等、点検がし易い配慮がなされていることを確認するとともに、材料の劣化の状態が外部からモニターできる構造になっていることなどを確認する。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編，平成14年3月。
- 2) 日本鋼構造協会「土木鋼構造物の性能設計に関する調査研究小委員会」：土木鋼構造物の性能設計ガイドライン，JSSCテクニカルレポート，No. 49，2001年。
- 3) 日本道路協会：鋼橋の疲労，1997年5月。
- 4) 日本道路協会：鋼道路橋の疲労設計指針，2002年3月。
- 5) 日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説，1993年。
- 6) 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，2000年。
- 7) 市川篤司：鋼橋の耐久性及び腐食鋼橋の耐荷性能の実験・解析，第132回腐食防食シンポジウム，平成13年6月25日。
- 8) 日本道路協会：道路橋耐風設計便覧，平成3年7月。

- 9) 日本道路協会：鋼道路橋塗装便覧，1990年6月.
- 10) 日本橋梁建設協会：橋梁技術者のための塗装ガイドブック，1996年4月.
- 11) 日本鋼構造協会：鋼橋塗膜調査マニュアルJSSIV03-1993，1993年9月.
- 12) 建設省土木研究所，(社)鋼材倶楽部，(社)日本橋梁建設協会「耐候性鋼材の橋梁への適用に関する研究委員会」：耐候性鋼材の橋梁への適用に関する共同研究報告書(XX)－無塗装耐候性橋梁の設計・施工要領（改定案）－，1993年3月.
- 13) 加納勇，渡辺祐一：橋梁用新耐候性鋼，土木学会誌Vol. 87，2002年4月.
- 14) 日本鋼構造協会：溶融亜鉛めっき橋の設計・施工指針，平成8年1月.
- 15) 土木学会：コンクリート標準示方書 設計編，平成8年.
- 16) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 III コンクリート橋編，平成14年3月.
- 17) 土木学会：コンクリート標準示方書－耐久性照査型－〔施工編〕，平成11年.
- 18) 土木学会：コンクリート標準示方書 維持管理編，平成13年.
- 19) 土木学会：コンクリート構造物の補強指針（案）（コンクリートライブラリー，No. 95），1999年.
- 20) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物のリハビリテーション研究委員会報告書，1998年.

第8章 耐震性に対する要求性能および照査

8.1 一般

- (1) 鋼構造物は、設計供用期間中に想定される地震動の影響に対して、安全かつ、地震後に要求される機能を保持していなければならない。
- (2) 鋼構造物の耐震性に対する性能項目は、構造安全性、使用性および復旧性を考慮するものとする。
- (3) 要求性能に対する照査は、想定される地震動と構造物の重要度および解析手法に応じて、性能を表現しうる適切な照査指標を設定し、それぞれの項目ごとに算定された応答値が限界値を超えないことを確認することにより行うものとする。

【解説】

(1) について 公共性の高い鋼構造物が、設計供用期間中に想定された地震の影響により大きな損傷を受けて崩壊した場合、利用者のみならず周辺住民を含めて社会・生産活動、個人の生命や生活に大きな影響を及ぼすことから、安全性の確保が最低限の要求である。また、当該構造物が避難路や救助・救急医療・消化活動および緊急物資の輸送路として指定されている場合には、地震後においてもその機能を保持していなければならない。

(2) について 構造物全体、また部材に対する耐震性の要求性能として、本指針（試案）では構造安全性、使用性および復旧性を考慮することとした¹⁾。要求性能の具体的な内容については 8.4 を参照されたい。

8.2 想定地震動

鋼構造物の耐震設計に用いる地震動は、建設地点の地形、地盤状況、地震の活動状況、活断層の有無および過去に発生した地震などを総合的に判断して定めるものとする。

【解説】

鋼構造物の耐震設計に用いる地震動は、建設地点の地形、地盤状況、地震の活動状況、活断層の有無および過去に発生した地震などを総合的に判断し、その発生確率あるいは強度特性などについて定め、設計供用期間中に発生すると想定される地震動を定めることを標準とした。

我が国の道路橋¹⁾では考慮すべき地震動として、橋の設計供用期間中に発生する確率が高い地震動（レベル1地震動）と、橋の設計供用期間中に発生する確率は低い大きな強度をもつ地震動（レベル2地震動）の2段階、さらにレベル2地震動はプレート境界型の大規模な地震を想定したタイプⅠの地震動と内陸直下型地震を想定したタイプⅡの地震動の2種類、合計3種類の地震動を地盤の種別に応じて用いることにしている。また、我が国の鉄道橋²⁾では、構造物の設計供用期間中に数回程度発生する確率を有する地震動（L1地震動）と、構造物の設計供用期間中に発生する確率は低い非常に強い地震動（L2地震動）の2段階、さらにL2地震動は海洋型地震を対象としたスペクトルⅠと内陸型地震を対象としたスペクトルⅡ、さらに断層モデルにより算定したスペクトルⅢの3種類、合計4種類の地震動を地盤の種別に応じて用いることにしている。

本指針（試案）では、鋼構造物の耐震設計に用いる想定地震動として、以下に示すレベル1地震動と

レベル2地震動の2種類を考慮することとした。

レベル1地震動：橋の設計供用期間中に発生する確率が高い地震動

レベル2地震動：橋の設計供用期間中に発生する確率は低いが大きな強度をもつ地震動
以下に道路橋および鉄道橋の地震動の例を示す。

1) 道路橋¹⁾

表Ⅲ-8.2.1 設計地震動：レベル1

	I種地盤	II種地盤	III種地盤
標準加速度応答スペクトル最大値	200gal	250gal	300gal
設計水平震度の最大値	0.20	0.25	0.30

表Ⅲ-8.2.2 設計地震動：レベル2・タイプI

	I種地盤	II種地盤	III種地盤
標準加速度応答スペクトル最大値	700gal	850gal	1000gal
設計水平震度の標準値の最大値	0.70	0.85	1.00

表Ⅲ-8.2.3 設計地震動：レベル2・タイプII

	I種地盤	II種地盤	III種地盤
標準加速度応答スペクトル最大値	2000gal	1750gal	1500gal
設計水平震度の標準値の最大値	2.00	1.75	1.50

表Ⅲ-8.2.4 動的解析に用いる地震波形

タイプ	タイプI								
地盤種別	I種地盤			II種地盤			III種地盤		
記録位置	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
最大加速度	319	346	323	363	385	365	424	433	439
タイプ	タイプII								
地盤種別	I種地盤			II種地盤			III種地盤		
記録位置	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)	(18)
最大加速度	812	766	780	687	673	736	591	557	619

(1) (2) 開北橋・(3) 七峰橋 (4) (5) 板橋橋・(6) 温根沼大橋

(7) (8) 津軽大橋・(9) 釧路川堤防

(10) (11) 神戸海洋気象台・(12) 猪名川架橋予定地・

(13) (14) JR西日本鷹取駅構内・(15) 大阪ガス葺合供給所構

(16) 東神戸大橋周辺・(17) (18) ポートアイランド内

2) 鉄道橋²⁾

- ・設計地震動：L1地震動・弾性加速度応答スペクトルの最大値：250gal
- ・設計地震動：L2地震動・スペクトルI・弾性加速度応答スペクトルの最大値：1,100gal
スペクトルII・弾性加速度応答スペクトルの最大値：1,700gal
スペクトルIII・断層モデルを設定し、算定した地震動
- ・時刻歴動的解析に用いる地震波形
 - L1地震動適合波（基盤地震動波形）・最大加速度：137gal
 - スペクトルI適合波（基盤地震動波形）・最大加速度：322gal

8.3 耐震性能レベル

- (1) 鋼構造物の耐震性能は、その重要度および想定地震動のレベルに応じて、構造安全性、使用性および復旧性について、そのレベルを適切に定めるものとする。
- (2) 鋼構造物の耐震性能は、部材等の損傷の程度によって表現し、損傷の程度は耐震性能レベルに応じて定めてよい。
- (3) 部材等の損傷の程度は、補修・補強の難易度を考慮して定めてよい。

【解説】

(1) について 鋼構造物の耐震性は、主に地震後の使用性と復旧性に対する性能であるが、要求性能である構造安全性、使用性および復旧性の3項目の性能を表す指標として、耐震性能レベルを定めるものとした。耐震性能レベルの例を表Ⅲ-8.3.1に示す。

表Ⅲ-8.3.1 耐震性能レベルの例

耐震性能レベル	要求性能	内 容
耐震性能Ⅰ	構造安全性	地震後に構造物は崩壊しない
	使用性	地震後に車両走行に支障しない
	復旧性	地震後に無損傷で、補修を必要としない
耐震性能Ⅱ	構造安全性	地震後に構造物は崩壊しない
	使用性	地震後に車両は制限走行が可能である
	復旧性	地震により損傷を受け、補修を必要とするが、短期間に機能が回復可能である
耐震性能Ⅲ	構造安全性	地震後に構造物は崩壊しない
	使用性	地震後に緊急車両のみ制限走行が可能である
	復旧性	地震により中程度の損傷を受け、補修や補強を必要とし、機能回復には比較的長期間必要とする
耐震性能Ⅳ	構造安全性	地震後に構造物全体は崩壊しない
	使用性	地震後に車両は走行不可能である
	復旧性	地震により大損傷を受け、機能回復に必要な補修や補強に長期間必要、あるいは再建設を必要とする

耐震性能Ⅰは、地震後に鋼構造物が無損傷の状態にとどまり、鋼構造物の耐荷力などに対する補修を行わずに供用可能な状態を想定している。

耐震性能Ⅱは、地震後に鋼構造物の機能が短期間で回復できる状態を想定している。したがって、鋼構造物の残留変形や部材の損傷が補修の許容限度内にある状態である。

耐震性能Ⅲは、地震後に鋼構造物の機能回復に比較的長期間必要とする状態を想定している。したがって、鋼構造物の残留変形や部材の損傷が補修や補強の許容限度内にある状態である。

耐震性能Ⅳは、地震後においても、鋼構造物の自重および負重量などによって鋼構造物全体系が崩壊しない状態を想定している。この時、修復が不可能な場合もある。

上文の中で、「補修」とは復旧に際して原形に回復する程度の工事である。「補強」とは、強度および変形性能などの構造特性を原形の耐震性能以上に向上させるような比較的規模の大きな工事を示している²⁾。

重要度は、土木学会の第二次提言⁹⁾でも述べられているように、i) 構造物が損傷を受けた場合、人命・生存に与える影響の度合い、ii) 避難・救済・救援活動と二次災害防止活動に与える影響の度合い、iii) 地域の生活機能と経済活動に与える影響の度合い、iv) 都市機能の早期復旧に与える影響の度合い、および復旧の難易度等を総合して決定されるものである^{9) 3)}。

重要度と想定地震動および耐震性能レベルとの関係の例を表Ⅲ-8.3.2に示す。

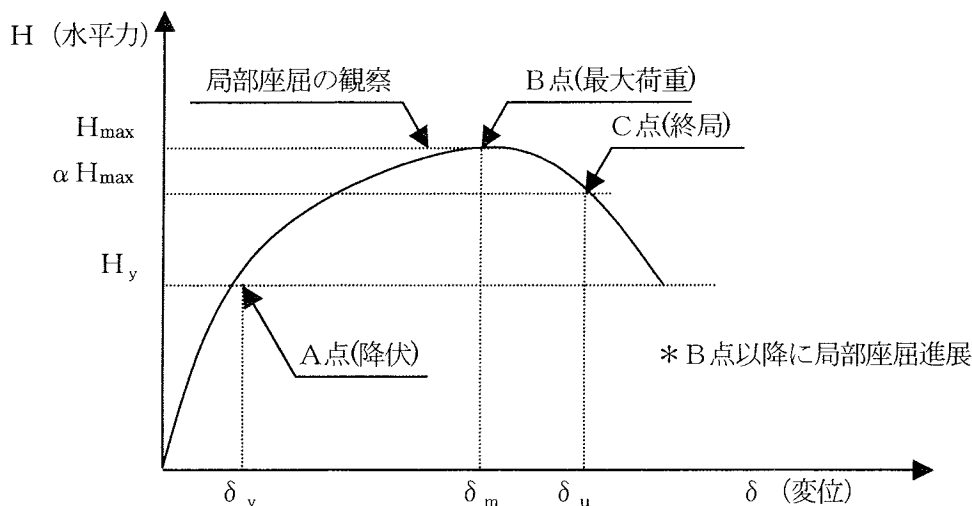
表Ⅲ-8.3.2 重要度と想定地震動および耐震性能レベル

重要度	最重要構造物 重要度Ⅰ	重要構造物 重要度Ⅱ	普通構造物 重要度Ⅲ
レベル1地震動	耐震性能Ⅰ	耐震性能Ⅰ	耐震性能Ⅰ
レベル2地震動	耐震性能Ⅱ	耐震性能Ⅲ	耐震性能Ⅳ

(2) について (1) で設定した耐震性能を得るためには、部材・支承部等の損傷の程度を適切に定める必要がある。鋼構造物は種々の部材で構成されており、部材の耐震設計上の役割を考慮して個々の損傷の程度を合理的に設定することを標準とした。

(3) について 部材・支承部等の損傷の程度は、それらを構成する材料特性と損傷による復旧の難易度を考慮して適切に定めるのを標準とした。

部材の損傷の程度为例として、鋼製柱に水平力を作用させた時の荷重—変位曲線の模式図を図Ⅲ-8.3.1に示し、損傷状況と補修・補強の程度を関連付けた表Ⅲ-8.3.3と表Ⅲ-8.3.4を示した²⁾。



図Ⅲ-8.3.1 荷重—変位曲線の模式図

表Ⅲ-8.3.3 鋼部材の特性、損傷状況および補修・補強

位置	荷重—変位曲線の特性	損傷の状況	補修・補強
A点	部材最外縁の降伏	無損傷	無補修
B点	最大荷重を保持できる最大変位	局部座屈の発生 小損傷	場合により局部座屈の補修
C点	最大荷重のα%を保持できる変位	局部座屈進展 中損傷	局部座屈の補修や補強
C点以降		局部座屈進展 亀裂発生 大損傷	局部座屈の補強あるいは部材の交換

表Ⅲ-8.3.4 損傷のレベルと荷重—変位曲線

損傷レベル	荷重—変位曲線	損傷の状況
損傷レベルⅠ	A点まで	無損傷
損傷レベルⅡ	A点～B点	小損傷
損傷レベルⅢ	B点～C点	中損傷
損傷レベルⅣ	C点以降	大損傷 崩壊

以上、要求性能と地震動に関して、縦軸に地震動を、横軸に要求性能・照査指標・耐震性能レベルをとり、構造物の重要度をパラメーターにとって表される耐震性能マトリックスの例を表Ⅲ-8.3.5に示す³⁾。

表Ⅲ-8.3.5 耐震性能マトリックス

要求性能		耐震性能レベル				
		耐震性能Ⅰ	耐震性能Ⅱ	耐震性能Ⅲ	耐震性能Ⅳ	
地震動		無損傷	小損傷	中損傷	大損傷	崩壊
		構造安全性				
		安全				破壊
		地震後の使用性				
		車両普通走行	車両制限走行	緊急車両制限走行	走行不可	走行不可
		復旧性（機能回復に必要とする期間）				
		補修不要	短期間	比較的長期期間	長期間	長期間（再建設）
		レベル1地震動		■ ▲ ●	容認不可	容認不可
レベル2地震動	タイプⅠ		▲ ●	■	容認不可	
	タイプⅡ		●	▲	■	

重要度・Ⅰ（最重要）：●
 重要度・Ⅱ（重要）：▲
 重要度・Ⅲ（普通）：■

8.4 耐震性に対する要求性能

8.4.1 構造安全性

鋼構造物は、地震動のレベルに応じて、構造物全体および部材のそれぞれが、予め設定された限界状態の中におさまらなければならない。

【解説】

構造安全性に対する要求性能としては、地震動のレベルに応じ、構造物全体および部材のそれぞれの限界状態について定めるものとした。ただし、鋼構造物が設計供用期間中に想定される地震動（レベル

2) の影響を受けた場合、たとえ修復不可能となったとしても、すくなくとも余震、構造物の自重、負載重量などにより構造物全体系が崩壊しない状態を保持する性能を考えている^{1) 2) 3)}。

我が国の設計基準^{1) 2)}では、レベル1地震動の影響に対しては、その応答値が弾性範囲内であることが要求されている。本指針（試案）においても構造物全体としては降伏しない、座屈しない、転倒・滑動に対して安定していること、および部材としても降伏しない、座屈しないことを標準とした。

同様に、レベル2地震動の影響に対しては、その応答値が塑性領域に入ることを想定しており、ある程度の損傷を許容している。構造物全体と塑性変形によりエネルギー吸収を期待する部材は破壊しない、塑性変形によりエネルギー吸収を期待できない部材は降伏限界を超えないことが要求されている³⁾。本指針（試案）においても、構造物全体としては変形の限界を超えない、座屈崩壊しない、転倒・滑動に対して安定している、塑性変形によりエネルギー吸収を期待する部材としては変形の限界を超えない、低サイクル疲労を起こさない、塑性変形によりエネルギー吸収を期待できない部材としては座屈崩壊しない、破断しないことを標準とした。塑性変形によりエネルギー吸収を期待できない部材とは、一般に橋脚、免震支査・制震ダンパーなどであり、塑性変形によりエネルギー吸収を期待できない部材とは、一般に上部構造、鋼製橋脚アンカー部、金属支査などである。以上を表Ⅲ-8.4.1にまとめた³⁾。

表Ⅲ-8.4.1 構造安全性

性能項目	地震動	小項目	照査項目
構造安全性	レベル1	構造物全体：降伏しない	降伏限界状態
		構造物全体：座屈しない	座屈耐荷力
		構造物全体：転倒・滑動安定動	安定性能
		部材：降伏しない	降伏限界状態
		部材：座屈しない	座屈耐荷力
	レベル2	構造物全体：変形の限界を超えない	変形性能
		構造物全体：座屈崩壊しない	座屈耐荷力
		構造物全体：転倒・滑動安定動	安定性能
		エネルギー吸収部材：変形の限界を超えない	変形性能
		エネルギー吸収部材：低サイクル疲労を起こさない	疲労限界
		非エネルギー吸収部材：座屈崩壊しない	座屈耐荷力
		非エネルギー吸収部材：破断しない	引張耐力

8.4.2 使用性

鋼構造物は、重要度および地震動のレベルに応じて、地震後に予め設定された車両走行状態が確保されなければならない。

【解説】

使用性として、本指針（試案）では、鋼構造物が設計供用期間中に想定される地震動の影響を受けた後に車両が原則的に走行可能な状態を保持する性能を考えている。そこで、使用性に対する要求性能として、重要度と地震動のレベルに応じて、地震後の車両走行状態について定めるものとした。

我が国の設計基準^{1) 2)}では、レベル1地震動の影響に対しては、その応答値が弾性範囲内であることが要求されている。本指針（試案）においても地震後に車両の走行に支障が無いことを標準とした。

同様に、レベル2地震動の影響に対しては、その応答値が塑性領域に入ること想定しており、ある程度の損傷を許容している。本指針（試案）においても、重要度あるいは当該構造物に要求される地震後の機能に応じて、①車両が制限走行可能な状態である、②緊急車両が制限走行可能な状態である、③車両走行は不可能である、の中から選定することを標準とした。また、①・②・③を損傷の程度で表現すれば、①主要構造部材は小程度の損傷を受けているが、機能保持されており、補修しながら車両走行可能である、②主要部材構造は中程度の損傷を受けており、荷重制限があつて緊急車両のみ制限走行可能である、③構造部材は大損傷を受けるか崩壊しており、車両は走行不可能である、となる³⁾。以上を表Ⅲ-8.4.2にまとめた。

表Ⅲ-8.4.2 使用性

性能項目	地震動	小項目	照査項目
使用性	レベル1	車両走行に支障しない	降伏限界状態
	レベル2	車両が制限走行可能	残留変位
		緊急車両のみ制限走行可能	残留変位
		車両走行は不可能	残留変位

なお、本指針（試案）では考慮していないが、地震の影響を受けている最中における使用性（車両の走行性）を考慮することが考えられる。その場合、路面（軌道面）における鋼構造物の応答加速度・変形と車両の関係、運転者の体感震度と恐怖感、それに伴う運転の誤操作などが関係すると考えられるが、これらについての研究資料がなく不明であり、今後の研究に期待するところが大きい。ただし、鉄道橋ではレベル1地震動に対して走行中の車両が脱線しないように、変位の制限値が設定されている⁶⁾。

8.4.3 復旧性

鋼構造物は、重要度と地震動のレベルに応じて、構造物全体および部材のそれぞれについて、予め設定された損傷の範囲内におさまらなければならない。

【解説】

復旧性として本指針（試案）では、地震動を受けて発生した損傷が補修・補強を行うことにより回復可能な損傷状態に留める性能を考えている。損傷の程度が8.4.2の使用性を満足していても、完全に機能を回復するためには補修、補強、部材の交換、再建設工事が必要となる場合がある。そこで、復旧性に対する要求性能として、重要度と地震動のレベルに応じて、構造物全体および部材のそれぞれについて、損傷の程度とその補修・補強に必要とする目標期間について定めるものとした³⁾。

我が国の設計基準^{1) 2)}では、レベル1地震動の影響に対しては、その応答値が弾性範囲内であることが要求されている。本指針（試案）においても、地震後の構造物点検に要する時間を除き、無損傷でただちに走行可能であることを標準とした。

同様に、レベル2地震動の影響に対しては、その応答値が塑性領域に入ること想定しており、ある程度の損傷を許容している。本指針（試案）では、その損傷の程度と機能回復までに必要とする期間を①小損傷（短期間）、②中損傷（比較的長期間）、③大損傷（長期間）、④崩壊（長期間）の4個のレベルの損傷度（補修・補強期間）の中から選定するものとした³⁾。以上を表Ⅲ-8.4.3にまとめた。

表Ⅲ-8.4.3 復旧性

性能項目	地震動	小項目	照査項目
復旧性	レベル1	無損傷・補修期間不要	降伏限界状態
	レベル2	小損傷・短期間で機能回復	損傷限界
		中損傷・機能回復に比較的長期間必要	損傷限界
		大損傷・機能回復に長期間必要	損傷限界
		崩壊・効能回復に長期間必要、あるいは復旧不可能として再建設	損傷限界

鋼構造物は、それが位置する路線をも含めて、その重要度および社会的な要因により、地震後の復旧に要する期間が決定される。そこで、表Ⅲ-8.4.3 では損傷の程度と補修・補強のための目標期間をリンクさせている。

一方、社会的な要求として、鋼構造物が地震後に完全に機能を回復するまでに必要とされる目標工事期間が要求されることも考えられる。この場合は、構造物全体および部材の損傷の補修・補強工事期間のみならず、鋼構造物が建設されている地理的地形的条件や地域状況（周辺環境）も含めて目標工事期間を設定する必要がある。これらについての研究資料がなく不明であり、今後の研究に期待するところが多い。

8.5 耐震性の照査に用いる応答値の算定

鋼構造物の耐震性能性の照査に用いる応答値の算定は、入力地震動のレベルに応じて、適切な解析モデルおよび解析方法を用い、地震の影響を作用させて行うものとする。

【解説】

耐震性能の照査では「8.2 想定地震動」の入力値に対応して、材料と部材特性を的確に表現したモデルを用いて応答値を算定する。また、構造解析手法としては、構造物の動的特性が適切な応答値として算定される方法を選定する必要がある。耐震性能照査のための構造解析法を4種類に分類し、線形・非線形と解析目的および解析法の概要を表Ⅲ-8.5.2⁴⁾に示す。また、表Ⅲ-8.5.2⁴⁾中の応答値(S)と限界値(R)の内容を表Ⅲ-8.5.1に示す。

表Ⅲ-8.5.1 S (応答値)・R (限界値) の内容

S0	応力・変形(震度法)	R0	許容応力・許容変形(震度法)
S1	$K_h \cdot W/Z$ (等価水平力)	R1	H_y (降伏水平耐力)
S2	$\Delta_{max} \cdot \phi_{max}$ (変位)	R2	$\Delta_u \cdot \phi_u$ (変位)
S3	E_{max} (ひずみ)	R3	E_u (ひずみ)
S4	δ_R (変位)	R4	Δ_R (変位)
S5	応答局部ひずみ	R5	低サイクル疲労強度 (ひずみ)

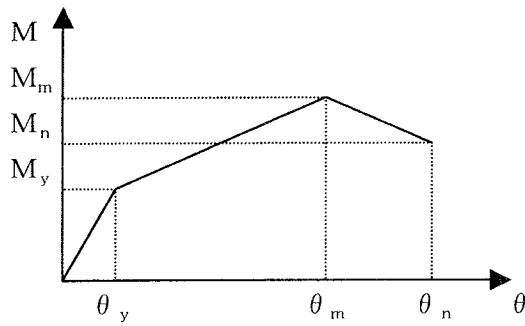
表Ⅲ-8.5.1 耐震性能照査のための構造解析法の分類⁴⁾

解析方法	特性	主たる解析目的		解析法の概要
		応答値	限界値	
静的解析	線形	S0		弾性1次解析 (弾性微小変位解析)
	線形	S0		弾性2次解析 (弾性有限変位解析・幾何学的非線形) スレンダーな構造物に対する震度法
	非線形		R1 R2	弾塑性1次解析 (弾塑性微小変位解析) 保有耐力・変形能の計算のための Pushover 解析
			R1 R2	弾塑性2次解析 (複合非線形解析) スレンダーな構造物の保有耐力・変形能の計算のための Pushover 解析
	非線形		R1, R2 R3	弾塑性3次解析 局部座屈を考慮した Pushover 解析
静的繰返し解析	非線形		R1 R2	繰返し弾塑性2次解析 局部座屈を考慮しない繰返し解析 復元力特性・保有耐力・変形能の計算
	非線形		R1 R2 R3	繰返し弾塑性3次解析 局部座屈を考慮した繰返し解析 復元力特性・保有耐力・変形能の計算
応答スペクトル解析	線形	S0 S1 S2		モーダル解析による加速度応答スペクトル解析 エネルギー一定則・非弾性応答スペクトルあるいは等価線形法により非弾性応答の近似値が求まる
時刻歴応答解析	線形			動的弾性1次解析 (動的弾性微小変位解析) 多くの場合、静的繰返し解析で代用可能
	線形			動的弾性2次解析 (動的弾性微小変位解析) 多くの場合、静的繰返し解析で代用可能
	非線形	S2, S3 S4		動的弾塑性1次解析 (動的弾塑性微小変位解析)
	非線形	S2, S3 S4		動的弾塑性2次解析 (動的複合非線形解析) スレンダーな構造物に適用
	非線形	S2, S3 S4, S5		動的弾塑性3次解析 局部座屈を考慮した動的解析

鋼部材の非線型特性は、簡単には棒部材に作用する曲げモーメントと部材角の関係 ($M-\theta$)、あるいは作用する曲げモーメントと曲率の関係 ($M-\phi$) でモデル化することができる。鉄道橋の例を図Ⅲ-8.5.1²⁾ に、道路橋の例を図Ⅲ-8.5.2¹⁾ および図Ⅲ-8.5.3¹⁾ に示す。

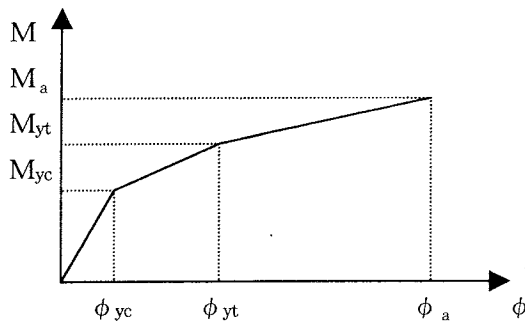
大きな軸力変動があり2軸まわりの曲げモーメントや捻れモーメントが作用する場合には、軸力一定の下で応力度—ひずみ ($\sigma-\epsilon$) 関係を積分して得られる $M-\phi$ モデルを適用して解析を行うのは困難になる。このような場合は、断面を小領域に分割し、各小領域ごとに応力状態を求め、応力度とひずみ ($\sigma-\epsilon$) で表される構成則を適用するファイバー要素を用いてモデル化すれば、より精度のよい解析が可能となる^{4) 5)}。この解析に用いる鋼部材の応力度—ひずみ関係の例を図Ⅲ-8.5.4¹⁾ に示す。

さらに精度のよい解析を行う場合には、シェル要素による非線形有限要素法を用いればよい。その際に組み込む鋼部材の構成則として、既存の等硬化則や移動硬化則、これらを組合せた混合硬化則を改良した多曲面モデル、修正二曲面モデル、三曲面モデル、単調載荷曲線によるBMCモデルなどが提案されている^{3) 5)}。



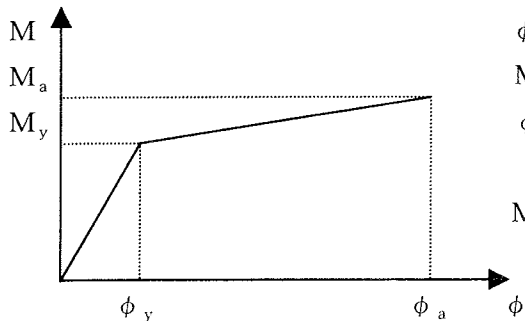
M_y : 降伏点の曲げモーメント
 M_m : 最大曲げモーメント
 M_n : 最大曲げモーメントの 95%
 θ_y : 降伏時の部材角
 θ_m : M_m を維持できる最大の部材角
 θ_n : M_n を維持できる最大の部材角

図Ⅲ-8.5.1 鉄道橋の例²⁾ : 部材端部の曲げモーメントと部材角の関係



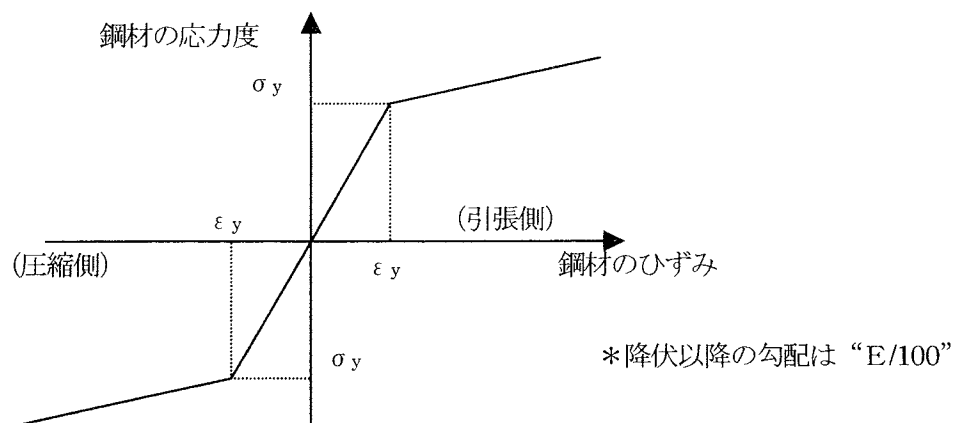
ϕ_a : 許容ひずみに達する時の曲率
 M_a : 許容ひずみに達する時の曲げモーメント
 ϕ_{yt} : 引張縁が降伏ひずみに達する時の曲率
 M_{yt} : 引張縁が降伏ひずみに達する時の曲げモーメント
 ϕ_{yc} : 圧縮縁が降伏ひずみに達する時の曲率
 M_{yc} : 圧縮縁が降伏ひずみに達する時の曲げモーメント

図Ⅲ-8.5.2 道路橋の例¹⁾ : 塑性化を考慮するコンクリートを充填しない鋼断面のM-φ関係



ϕ_a : 許容ひずみに達する時の曲率
 M_a : 許容ひずみに達する時の曲げモーメント
 ϕ_y : 降伏ひずみに達する時の曲率で引張縁及び圧縮縁のうち小さい方の値
 M_y : 降伏ひずみに達する時の曲げモーメントで引張縁及び圧縮縁のうち小さい方の値

図Ⅲ-8.5.3 道路橋の例¹⁾ : 塑性化を考慮するコンクリートを充填した鋼断面のM-φ関係



図Ⅲ-8.5.4 鋼材の応力度—ひずみ曲線の例¹⁾

8.6 耐震性の照査

8.6.1 構造安全性に対する照査

構造安全性に対する照査は、モデル化した鋼構造物に想定地震動の影響を作用させて得られる応答値（慣性力・断面力・変形・ひずみ・曲率など）が、予め設定された限界値を超えないことを確認することにより行う。

【解説】

構造安全性能に対する照査は、主に耐荷力と変形および安定に関する照査であり、モデル化した鋼構造物に想定地震動の影響を作用させて得られる応答値（慣性力・断面力・変形・ひずみ・曲率など）が、予め設定された限界値を超えないことを確認する。

レベル1地震動の影響を受けた場合、照査に用いる応答値は断面力（曲げモーメント・軸方向力・せん断力・捻りモーメント）となり、限界値は部材の降伏耐力および座屈耐荷力を用いればよい。

レベル2地震動の影響を受けた場合、その主たる解析目的に対応して得られる応答値は慣性力（等価水平力）、変位、ひずみ、部材角などであり、限界値も応答値に対応したものをを用いればよい。

以下に部分安全係数法を用いた照査方法の例を示す。詳細については「第5章 安全性に対する要求性能および照査 5.3 安全性に対する照査」を参照されたい。

$$\gamma_i \frac{S_{\max}}{R_y} \leq 1$$

ここに、 γ_i : 構造物係数
 S_{\max} : 最大応答値
 R_y : 限界値

8.6.2 使用性に対する照査

使用性に対する照査は、モデル化した鋼構造物に想定地震動の影響を作用させて得られる応答値のうち、地震後の残留変位が、予め設定された限界残留変位を超えないことを確認することにより行う。

【解説】

使用性に対する照査は、地震後の走行性が主な照査目的であることから、モデル化した鋼構造物に想定地震動の影響を作用させて得られる応答値から地震後の残留変位を算定し、その残留変位が、予め設定された限界残留変位を超えないことを確認する。しかし、残留変位の推定が難しい場合で、残留変位と降伏変位、残留変位と最大応答変位、残留変位と最大応答ひずみ、残留変位と最大応答角等の間に相関関係が明確に推定できるならばそれらを用いて照査してもよい^{3) 4)}。

レベル1地震動の影響を受けた場合には、応答残留変位は存在せず、限界残留変位を設定する必要はない。以下に、最大応答変位、最大応答角で照査する場合で、部分安全係数法を用いる照査方法の例を示す。

$$\gamma_i \frac{\delta_{\max}}{\delta_y} \leq 1 \qquad \gamma_i \frac{\theta_{\max}}{\theta_y} \leq 1$$

ここに、 γ_i : 構造物係数
 δ_{\max} : 最大応答変位
 θ_{\max} : 最大応答角

δ_y : 降伏変位

θ_y : 降伏角

レベル2地震動の影響を受けた場合、応答値として算定された残留変位が限界残留変位を超えないことを確認する。なお、照査に用いる限界残留変位は耐震性能レベルにより変化する。以下に部分安全係数法を用いる照査方法の例を示す。

$$\gamma_i \frac{S_{\max}}{S_R} \leq 1$$

ここに、 γ_i : 構造物係数

S_{\max} : 最大応答残留変位

S_R : 限界残留変位

残留変位の影響は、伸縮装置部の段差と過大な遊間量、平面および縦断線形の変化、横断勾配の変化などに現れる。したがって、この照査指標は走行車両の種類と走行速度から定められると考えられる。現在のところこの分野の研究は少なく不明な点が多々ある。参考文献7)を参照されたい。

本指針(試案)では、鋼構造物の残留変位の照査指標を車両走行の観点から設定したが、損傷の程度を照査指標とすることもできる。鋼製橋脚の損傷の程度と残留変位を定義した例を表Ⅲ-8.6.1に示す。表中のhは橋脚高さである。また、残留変位制限値を降伏変位で除して無次元化したものを表Ⅲ-8.6.2に、最大応答ひずみ制限値で使用性を表現したものを表Ⅲ-8.6.3に示す³⁾。

表Ⅲ-8.6.1 損傷の定義と残留変位制限値³⁾ 「土木学会 1996」

損傷レベル (供用性)	無損傷	小損傷	中損傷	大損傷	崩壊
残留変位制限値 δ_{\lim}	$h/1000$	$h/300$	$h/200$	$h/150$	$h/100$

表Ⅲ-8.6.2 残留変位制限値と最大応答変位制限値³⁾ 「土木学会・JSSC, 2000」

損傷レベル (供用性)		小損傷	中損傷	大損傷	崩壊
残留変位制限値	コンクリート無充填	2.80	3.39	4.01	5.31
δ_{\lim}/δ_y	コンクリート充填	2.95	4.35	5.91	9.41

表Ⅲ-8.6.3 最大応答ひずみ制限値³⁾ 「Duan et al, 2000」

損傷レベル (供用性)	微小	補修可能	重大
最大応答ひずみの制限値	Larger (0.003, 1.5 ϵ_y)	Larger (0.003, 1.5 ϵ_y)	E_{st}

注) ϵ_{st} : 鋼のひずみ硬化開始点ひずみ

Larger (a, b) : aとbの大きい方

8.6.3 復旧性に対する照査

復旧性に対する照査は、モデル化した鋼構造物に想定地震動の影響を作用させて得られる地震後の損傷の程度が、予め設定された損傷限界を超えないことを確認することにより行う。

【解説】

復旧性に対する照査は、地震後の損傷の程度が主な照査項目であることから、モデル化した鋼構造物に想定地震動の影響を作用させて得られる応答値の中で変位と部材角等の関係から損傷状態を推定し、その損傷の程度が、予め設定された限界損傷状態を超えないことを確認する。

レベル1地震動の影響を受けた場合、無損傷であり、限界損傷状態を設定する必要はない。

レベル2地震動の影響を受けた場合、応答値として算定された損傷状態が限界損傷状態を超えないことを確認する。確認は、「応答値としての損傷状態 \leq 限界損傷状態」となるが、以下に、部分安全係数を用いた変位と部材角の照査方法の例を示す。なお、照査に用いる限界損傷状態は耐震性能レベルにより変化する。

$$\gamma_i \frac{\delta_{\max}}{\delta_R} \leq 1 \qquad \gamma_i \frac{\phi_{\max}}{\phi_R} \leq 1$$

ここに、 γ_i : 構造物係数

δ_{\max} : 最大応答変位

δ_R : 限界応答変位

ϕ_{\max} : 最大応答部材角

ϕ_R : 限界部材角

8.4.3で述べたように、完全に機能回復するまでの目標工事期間を設定すれば以下のようなになる。目標工事期としての提案値³⁾を表Ⅲ-8.6.3に示す。

$$\frac{T_{\text{smax}}}{T_R} \leq 1$$

ここに、 T_{smax} : 完全に機能回復するまでに必要な工事期間

T_R : 設定された目標工事期間

表Ⅲ-8.6.3 損傷の程度と目標工事期間³⁾

損傷の程度	目標工事期間
小損傷	2週間以内
中損傷	2週間以上
大損傷	2週間以上
崩壊	再建設と同程度の期間あるいは撤去、再建設に要する期間

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，V耐震設計編，2002年3月
- 2) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物設計標準・同解説，耐震設計，1998年11月
- 3) 日本鋼構造協会：JSSC テクニカルレポート，土木鋼構造物の性能設計ガイドライン，2001年10月
- 4) 土木学会，日本鋼構造協会：鋼構造物の耐震解析用ベンチマークと耐震設計法の高度化，2000年4月
- 5) 土木学会，日本鋼構造協会：橋梁システムの動的解析と耐震性，2000年4月
- 6) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物設計標準・同解説，鋼・合成構造物，2000年7月
- 7) 新堀大祐，阿部雅人，藤野陽三：通行可能性を考慮した高架道路橋の耐震性能，2001年3月，第5回土木鋼構造物研究シンポジウム
- 8) 土木学会：鋼橋の耐震設計指針と耐震設計のための新技術，1996年7月
- 9) 土木学会：土木構造物の耐震基準等に関する提言「第二次提言」，1996年1月10日
阪神・淡路大震災対応技術特別委員会

第9章 社会・環境適合性に対する要求性能および照査

9.1 一般

- (1) 鋼構造物は、設計供用期間を通じて、社会・環境適合性が保持されなければならない。
- (2) 鋼構造物の社会・環境適合性に対する性能項目として、景観性および低公害性を考慮するものとする。
- (3) 景観性および低公害性に対する照査は、性能を表現しうる適切な指標を設定し、それぞれの項目ごとに設定された事項を満足することを確認することにより行ってよい。

【解説】

鋼構造物は、供用期間を通じて、周辺の社会・環境、自然環境に及ぼす悪影響を最小限にしなければならない(社会・環境適合性)。すなわち、鋼構造物の設計に際しては、安全性、施工性、経済性等の性能などを満足するとともに、構造物そのライフサイクルを通じて、社会・環境に調和しその負荷が最少となるように考慮されなければならない。構造物の設置による社会・環境への影響には、住民の視覚に関する景観性、公害(車両の走行などによる騒音・振動の発生、日照権の阻害、電波障害、夜間照明、地盤沈下など)の発生、鋼材の生産・使用に伴う資源の消費やCO₂の発生などの地球規模での自然・生態系等に関するものなどがある。

本指針(試案)では、これらの多岐にわたる社会・環境適合性に関する事項のうち、少なくとも構造物設置地域住民の方への視覚的・聴覚的・体感的な負荷が少なくなるように、景観性と最も一般的な公害である騒音・振動の低減(低公害性)を性能項目として照査することとした。

構造計画に際しては、社会・環境の適合性に対する要求性能を満足すべく、景観性・低公害性に優れた構造物となるように構造形状、色彩、騒音・振動対策等の大略が決定される(第2編構造計画編)。設計では、構造計画で決定された構造、色彩、騒音・振動対策工などが、その性能を十分に発揮できるように構造詳細が決定されなければならない。

9.2 社会・環境適合性に対する要求性能

9.2.1 景観性

鋼構造物は、供用期間を通して、周辺の自然・他の構造物と調和していなければならない。

【解説】

景観性に対して、構造計画時および設計時において配慮すべき事項には表Ⅲ-9.2.1に示すようなものがあげられる。

表Ⅲ-9.2.1 環境性、低公害性に関する要求性能事例

性能項目	構造計画段階での検討項目	設計段階で考慮する性能
景観性	[構造形状] ・力学的に明快で、安定感・バランスのある構造 ・周辺の状況にマッチした構造 ・統一性ある構造形式 [色彩, 色調] ・環境と調和した色彩・色調	[構造形状] ・構造物が、構造計画時における景観に対する考え方を実現していること [色彩, 色調] ・構造計画時に考慮した色彩・色調が長期にわたって保持され、劣化がある限界内に収まり、維持管理のし易いこと

これらのうち、景観性に関わる構造形式や色彩は、概ね構造計画時に決定される。設計に際しては、構造計画時における景観に対する考え方を実現し、構造形式や塗装仕様の詳細を、付属設備等も含めて決定していくこととなる。

9.2.2 低公害性

鋼構造物は、供用期間を通じて、車両の走行や風などにより発生する騒音・振動が少ない構造でなければならない。

【解説】

騒音・振動、日照阻害などに対する環境保全に関わる法令に示される基準を満足しなければならないことは基本要件であり、当然のことである。このような法令の適用を受けない場合においても、低公害性に優れた構造への考慮が必要である。また、設置された騒音・振動対策工が、供用期間を通じてその機能を十分に発揮し、落下などの無い安全な構造であることが大切である。

低公害性に対する構造計画時および設計時において考慮すべき性能等には表Ⅲ-9.2.2 に示すようなものがあげられる。このうち、騒音・振動に配慮した構造や対策は、概ね構造計画時に決定される。設計に際しては、構造計画で設定された騒音・振動対策工等の詳細を決定していくこととなる。

表Ⅲ-9.2.2 低公害性に関する要求性能事例

要求性能	構造計画段階での検討項目	設計段階での性能
低公害性	環境保全に係る関連法令による環境基準値等の法規制を満足する騒音・振動、日照阻害の少ない構造形式	騒音・振動があるレベル以下に収まり、安全な構造であること

なお、低公害性に関わる道路、鉄道および土地区画整理事業や、自然公園内の大規模事業開発などは「環境影響評価法」（平成9年6月13日公布）に基づき各々評価項目が設定されている。このうち、道路設計にあたって考慮すべき環境保全項目を表Ⅲ-9.2.3 に示す²⁾。

表Ⅲ-9.23 環境保全に係わる関連法令⁴⁾

項目	内容	法律等の名称
全般	環境の保全について基本理念を定めた施工の基本となる事項	●環境基本法
	21世紀半ばを展望した環境施策の基本的な考え方と長期的な目標および21世紀初頭までの施策の方向	▲環境基本計画
騒音	騒音に係る環境基準	▲騒音に係る環境基準について
	騒音環境基準の地域の類型の指定	△環境に係る環境基準の地域の類型の指定
	騒音に関する規制等	●騒音規制法
	道路交通騒音の要請限度	▲指定地域内における自動車騒音の限度を定める命令
	騒音要請限度の区域の区分, 時間の区分の指定	△騒音要請限度の地域指定等を定める条例
	特定建設作業の規制基準	▲特定建設作業に伴って発生する騒音の規制に関する基準
	自動車騒音の許容限度	▲自動車騒音の大きさの許容限度
	沿道整備道路 環境施設帯の設置	●幹線道路の沿道の整備に関する法律 ▲環境保全のための道路用地の取得及び管理に対する基準
振動	振動に関する規制等	●振動規制法
	道路交通振動の要請限度 特定建設作業の規制基準	○振動規制法施工規則
	振動規制基準の地域の指定, 区域の区分, 時間の区分	△振動規制基準の地域指定等を定める条例

(注)※条約●法律◎令○規則▲通達等△条例等

9.3 景観性に対する照査

景観性に対する照査は, 以下に示す方法によって行ってよい。

- (1) 構造詳細が, 構造計画における景観に対する考え方と矛盾しないかを確認する。
- (2) 色彩・色調の保持, 劣化対策については, 7.4 耐腐食性に対する照査により行う。

【解説】

景観性は, 主観的かつ感覚的要素の強いものであり, 定量的に扱うことが難しいため, その照査は, 構造計画時における景観に対する考え方を実現した構造詳細となっていること, 色彩・色調の保持と劣化対策が考慮されているかを確認することにより行うこととした。

このうち, 構造詳細については, 特に, 構造計画時に決定しきれない構造詳細や付属設備等についても, 構造計画時に考慮した構造形状に関わる景観性を損なうことなく, 構造全体と調和していることが大切である。

色彩・色調については, 7.4 耐腐食性の照査にあるように, 色彩・色調が長期間にわたって保持され, 劣化してもある限界内に収まるように, 防錆・防食性に優れた方法を選定する必要がある。また, 設置環境とコストを考慮した塗装仕様(一般的な塗装仕様, 長期防錆塗装仕様など), 塗料の性能が発揮できる構造, 塗替塗装など維持管理を配慮した構造, 無塗装橋の錆汁対策等に配慮することも重要である。

設計時に考慮すべき景観性として, 9.2.1 の解説に示したような事項が考えられる。これらに対する

照査項目の例を表Ⅲ-9.3.1に示す。

表Ⅲ-9.3.1 景観性に対する照査項目の例

性能項目	照査項目	照査指標
景観性(構造計画時における景観に対する考え方を実現した構造詳細)	見る者に違和感・不安感をあたえない、バランスのとれた安定感ある構造	<ul style="list-style-type: none"> 下部工の安定感はどうか 上部工と下部工のバランスはどうか
	周囲に重圧感・威圧感を与えない構造	<ul style="list-style-type: none"> 明るく開放感がある効果下空間となっているか 下部工はスリムな形状か 上部工は軽快感のある形状か
	視覚的連続性への配慮をした構造	<ul style="list-style-type: none"> 桁高の連続性はどうか 桁高の変化が円滑か 桁外側面の整合はどうか 橋脚形式の統一性はどうか 材質・色彩の連続性はどうか
	上下部工共にすっきりとした煩雑感を緩和した構造	<ul style="list-style-type: none"> 桁裏の処理はどうか 橋脚の並びはどうか 上下部工取り合い部はどうか
	構造全体と調和した付属設備	<ul style="list-style-type: none"> 排水設備、支承部点検設備、非常階段等の付属設備が構造全体との調和を考慮しているか
景観性(構造計画において設定した色彩・色調が、設計供用期間通じて保持され劣化の少ないこと)	建造物の設置環境を考慮した塗装系	<ul style="list-style-type: none"> 環境に適合した塗装系の選択となっているか
	塗料性能の発揮できる構造	<ul style="list-style-type: none"> シェーブエッジ、凹凸の少ない構造か
	色彩などの塗装性能が保持できる塗替塗装の簡単な構造、	<ul style="list-style-type: none"> 桁下空頭は充分か、 足場用治具は必要ないか
	無塗装橋梁における安定錆の生成できる鋼材、構造	<ul style="list-style-type: none"> 設置環境(山間地、都市部、海浜地域等)に適合した鋼種か 裸使用 or 化成処理の要否 水が溜まりやすい構造となっていないか
無塗装橋梁における錆汁対策	<ul style="list-style-type: none"> 化成処理の要否 橋脚・橋台への排水処理はどうか 	

9.4 低公害性(騒音・振動)に対する照査

低公害性に対する照査は、低騒音・低振動を考慮した構造、材料であることを確認することにより行ってよい。

【解説】

車両の走行により発生する騒音・振動は、道路橋と鉄道橋では異なるものの、自動車のタイヤと路面あるいは車輪とレールの接触による振動と振動により放射される騒音、構造物に振動が伝わって発生する騒音、自動車や列車の風切り音に概ね区分できる。

騒音対策方法には、いったん放射された音进行处理する「間接的な対策」と音の発生源となる振動を抑制する「直接的な対策」とがある。「間接的な対策」はしゃ音、吸音、音波の干渉の利用などであり、構造物で行なう「直接的な対策」は騒音の発生が少ない路面材料の使用、ノージョイント化(桁の連続化)・

床版延長工法、構造物の制振処理、路面や軌道から構造物に伝わる振動の遮断などである。

受音位置における騒音値の推定方法には、これまでに報告されている種々の方法により解析して求める方法や、類似構造物での測定結果から推定する方法等がある。このうち、走行音による騒音推定の一例として、文献 2) に記載の文献 4) のものを紹介する。

<新しい音響学会式 ASJ Model 1998>

1) 騒音伝播計算として、A 法、B 法の 2 つがある

A 法：波動音響理論に基づく精密計算方法（周波数別計算，フレシネ積分等により，一般的にはなじみにくい計算）

B 法：幾何音響的な取合いに基づく簡易計算方法（実験的・経験的手法による補正値を適用した計算方法。実用的で一般に用いられる）

2) 予測精度

- a. 仮想車線：計算の簡略のため，2 車線以上の道路を上下各 1 車線に置き換えるケースで，遮音壁がある場合にその背後近距離を予測するにはさらなる検討必要。
- b. 車種別交通量と速度：騒音の大きな大型車と速度について正確な予想が必要。
- c. 走行騒音パワーレベル：自動車を 4 種類に分類し，速度の関数で設定。多くの実測データを回帰分析して統計的に整理したもの。
- d. 路面性状：タイヤ/路面騒音について，路面状況で変化する可能性あり。舗装打ち換え 1 年は，パワーレベルが若干低下し報告はある。

表Ⅲ-9.4.1 走行音による騒音推定法の一例²⁾

設計対象	照査レベル	荷重モデル	解析モデル	
			応答値 S	限界値 R
走行音予測	高度 or 準高度	代表的な自動車一台の騒音ユニットパターンに諸条件ファクターも付加	波動音響理論に基づくシュミレーション解析 (A 法) をベースに算出した等価騒音レベル	環境標準値
	標準	代表的な自動車一台の騒音ユニットパターン	幾何音響的扱いに基づく簡易計算 (B 法) をベースに算出した等価騒音レベル	環境標準値

騒音対策の実施に際しては、各騒音源から受音点に達する騒音の各々全ての値を、構造計画や環境保全に係る関連法令等において設定された騒音値より下げるようにしなければならない。騒音対策を効果的に行なうためには、騒音対策工を適材適所にかつ適量の対策を行うことが重要であり、いくつかの騒音対策工を組み合わせることでバランス良く対策することが大切である。

騒音対策をどのように行なうのかは、道路橋と鉄道橋では異なるが、構造計画時（コンクリート構造、鋼構造、プレートガーダー、トラス、アーチ、合成桁、上路式、下路式、軌道構造等）にその大略は決定される。設計では、構造計画において決定された構造形式を基本に、具体的な騒音対策を詳細に設計していくこととなる。したがって、設計時の照査として、各対策工がその性能を発揮できる構造・材料であるか、また騒音対策工自体が騒音源とならないように取付けられているか、ボルト等により取付けられた対策工が振動により緩んだりしないかなどを確認することにより行うこととした。この時、対策工自体が部材振動による疲労損傷が発生しない構造となっていないことを確認することも重要である。

振動に関しては、車両の走行により構造物に発生する振動が少なくなるように、また、振動が下部工から近隣に伝播しないように、部材の制振と構造物に発生した振動の遮断対策工が適切かを構造・材料の面から確認する。

これらの照査項目事例を表Ⅲ-9.4.2 に示す。

表Ⅲ-9.4.2 低公害性に対する照査項目の例

性能	照査項目
部材振動発生が少ない構造	<ul style="list-style-type: none"> ・路面材料は適切か ・制振対策を行なっているか ・制振材の取付け方法は適切か
防音工に振動が伝わらない構造 防音工が騒音源とならない構造・材料	<ul style="list-style-type: none"> ・構造物と防音工とは防振支持されているか ・防音工の材料の制振性はどうか
しゃ音性能の良い材料	<ul style="list-style-type: none"> ・透過損失
防音工の安全性	<ul style="list-style-type: none"> ・振動によりボルトが弛緩しない構造になっているか ・部材振動に対する耐疲労性の高い構造・材料か
振動の少ない構造物	<ul style="list-style-type: none"> ・振動遮断工が設置されているか

参考文献

- 1) 土木学会：環境負荷低減型土木構造物設計ガイドライン，平成 13 年 4 月
- 2) 日本鋼構造協会：土木鋼構造物の性能設計ガイドライン，平成 13 年 10 月
- 3) 阪神高速道路公団：景観を考慮した都市高速道路設計の手引き，昭和 58 年 10 月
- 4) 日本音響学会：道路交通騒音の新たな予測法-ASJModel1998-，第 10 回音響技術セミナー，pp.9-17，1999 年 6 月

第10章 構造細目

10.1 一般

鋼構造物の各部材は、鋼構造物に対する要求性能を確実に確保できるように、適切に構成されなければならない。

【解説】

性能照査型設計体系では、構造物が要求される性能を有していることの照査・確認方法を一律に規定するものではなく、原則自由としている。設計実務における照査・確認方法には、詳細な解析による照査や実験等により確認する方法、これまでの道路橋示方書、鉄道構造物等設計標準などの仕様規定された設計基準により行う方法などがある。

このような方法による構造性能の照査は、構造と材料の力学理論や工学的な判断に立脚したものであるが、材料特性、解析モデル、部材間の一体性（連続性）、局所的な応力状態、既往の設計式や実験結果には、適用範囲や仮定条件が設けられている。したがって、各構造部材が照査された性能を十分に発揮するためには、各構造部材が照査の前提条件となるこれらの適用範囲や条件を満足して構成されていなければならない。本指針（試案）の解説等に示された設計計算式等を適用して照査する場合は、その設計計算式等の適用範囲・条件等を十分に吟味・確認して照査しなければならない。

また、構造細目（構造詳細）として、これまでの損傷事例や実験等、これまでの経験や研究成果を踏まえると設計に反映すべき、あるいは反映した方がいいと考えられるものもある。中でも、近年耐震性能や耐疲労性能の向上については、種々の事項が提案されており、これらの構造を用いることで、特別の照査を行わなくても要求性能を確保できる場合がある。

10.2 照査の前提となる構造細目

鋼構造物の設計にあたって、要求性能の照査の前提になる構造細目がある場合には、その構造細目を用いなければならない。

【解説】

照査の前提となる構造細目として、例えば、仕様規定化された設計基準等を用いて部材を設計する場合、構造解析結果の応答値や設計計算式等により決定される断面形状のほか、適用構造物の特徴に応じた以下に示すような、各種の構造細目により、各構造部材の断面形状が決定される場合がある。

- ・使用鋼材の最小厚さ
- ・部材の細長比（ l/r ）や板の幅厚比（ b/t ）
- ・ボルトの配置（最小間隔，最大間隔，最小縁端距離，最大縁端距離，本数等）
- ・ラーメン隅角の部材構成、
- ・防錆対策上の細目
- ・溶接ビード形状の仕上げ

これらの構造細目は、計算・解析の省略による設計の簡便化、発生した損傷等の補修・補強などの経験、基準制定時点での不明な事項への対処、適用構造物毎の特徴に応じた安全性、耐久性、使用性、耐震性等の確保に対する設計の考え方などより規定されているものと考えられる。したがって、これらの構造細目規定が、必ずしも解析や実験等で確認された明確な性能を示す事項とは言えないものや、設計式の適用条件として規定されている構造細目などがあり、各々の設計基準間で共通のものもあれば異なる

るものもある。このため、各種の設計基準を用いて性能を照査・確認する場合は、各設計基準に示されている構造細目についてもその意味を十分に吟味する必要がある。

各設計基準に示されている規定を混用することは、適用構造物特有の要求性能が満足されないことや過大設計となることがあるので、注意しなければならない。

10.3 経験等から得られた構造細目

鋼構造物の設計にあたって、経験等から得られ要求性能を満足させると考えられる構造細目を用いてよい。ただし、その場合には、十分な検討を行うものとする。

【解説】

これまでの損傷事例や実験・解析等の研究成果から耐震性能や耐疲労性の向上に結びついた構造等が提案されているが、その中には、要求性能を満たすと考えられるものがある。これらの構造細目（構造詳細）を用いる場合には、下記のような点に留意する必要がある。

(1) 耐震性に優れた構造²⁾

耐震設計の方法には、構造物の所有する強度を評価する方法や、構造物の変形性能を評価する方法などが考えられ、設計方法によっては各構造部材の構成が異なってくる。性能照査型設計体系では、どの方法によるかを特定するものではないので、適用構造物の特徴やコストパフォーマンス等の点から検討され適宜選択されればよいが、一般には各構造部材は変形性能の向上を図れる構造とすることが大切である。

橋梁においては、耐震性能が問題となるのは一般に支承部や橋脚である。このうち、橋脚の変形性能を向上させるための方法として、次のようなことが上げられるが、これらの構造の適用や設計にあたっては、各種の設計基準や最近の研究事例を十分に吟味の上、性能を照査・確認する必要がある。

- ・柱の断面板圧変化をできるだけ避け、また、変化させる場合も急激な変化はしないこと
- ・コンクリート充填構造の採用
- ・矩形断面鋼管柱においては、

補剛板の幅厚比を小さく、剛性の高い補剛材の配置

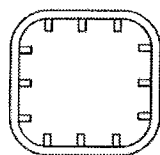
部材が局部座屈を生じないような板要素 (b/t)₀ の適用

角部は円弧状として角溶接を無くした構造の採用 (図Ⅲ-10.3.1)

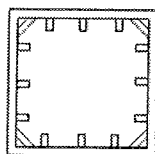
角部にコーナープレートのをあてて補強した構造の採用 (図Ⅲ-10.3.2)

角部溶接を行う場合は十分な溶込み溶接構造 (図Ⅲ-10.3.3)

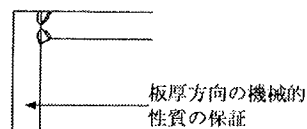
板厚方向の機械的性質の保証された鋼材使用 (図Ⅲ-10.3.3)



図Ⅲ-10.3.1
角部を円弧状とした構造

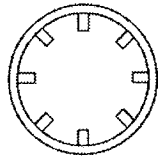


図Ⅲ-10.3.2
角部を補強した構造



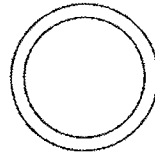
図Ⅲ-10.3.3
角部溶接を十分溶込みを確保した構造

- ・円形断面鋼管柱においては、
鋼管を縦リブによる補強 (図Ⅲ-10.3.4)
鋼管径厚比の制限 (図Ⅲ-10.3.5)



図Ⅲ-10.3.4

鋼管を縦リブ補強した構造



図Ⅲ-10.3.5

鋼管径厚比の制限した構造

(2) 疲労耐久性に優れた構造

疲労耐久性については、これまでは鉄道構造物の問題とされていたが、近年、道路構造物においても過重な車両の通行や、交通量の増加などのために、主桁および主桁への部材取り付け部、橋脚隅角部などさまざまな部材・部位での疲労きれつが発生している。

一般的な疲労耐久性の照査は7.3の「耐疲労性に対する照査」によればよいが、次のような点に留意することにより、疲労耐久性に優れた構造詳細とすることができる。

- ① 応力集中が生じやすい構造ではないこと
- ② 過去に疲労損傷が多々報告され、対策が明示されている構造ではないこと
- ③ 製作が困難で、検査による品質確認ができてにくい構造ではないこと
- ④ 最近の知見から、より疲労耐久性に優れた構造はないか

また、実橋に発生する応力を設計時に精度良く評価することが困難であるような場合は、製作仕様書も含めた各種基準に示された構造細目規定を満足していることを確認することにより、照査するのが良い。例えば、「鋼道路橋の疲労設計指針」(平成14年3月、日本道路橋会)の「第5章 構造詳細による疲労設計」では、鋼床版構造を対象として疲労耐久性に関する構造細目が規定されており、これを満足すれば疲労耐久性が確保されているとみなして照査を不要としている。

参考文献

- 1) 日本道路橋会：道路橋示方書・同解説，Ⅰ共通編 Ⅱ鋼橋編，平成14年3月
- 2) 日本道路橋会：道路橋示方書・同解説，Ⅴ耐震設計編，平成14年3月
- 3) 日本道路橋会：道路橋の疲労設計指針，平成14年3月
- 4) 鉄道総合研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説，平成4年10月