

土木学会構造工学委員会

構造設計国際標準研究小委員会・荷重WG 報告書

土木構造物荷重指針作成に向けて  
－ 枠組みとガイドライン －

平成 12 年 6 月

# 目 次

- 第 1 章 まえがき
  - 第 2 章 土木構造物荷重指針の目的と基本方針
    - 2.1 目的
    - 2.2 基本方針
  - 第 3 章 現行設計法における荷重の考え方
    - 3.1 荷重の種類
    - 3.2 荷重の規定
    - 3.3 荷重と影響
    - 3.4 荷重組み合わせ
    - 3.5 地震の影響
    - 3.6 その他
  - 第 4 章 土木構造物荷重指針で取り扱う荷重
    - 4.1 荷重因子の種類・区分
    - 4.2 荷重因子の確率量基本値
  - 第 5 章 設計荷重の設定法
    - 5.1 限界状態の定義
    - 5.2 荷重効果と荷重因子の関係
    - 5.3 荷重組み合わせ
    - 5.4 安全性の照査
  - 第 6 章 土木構造物荷重指針の目次案
  - 第 7 章 あとがき
- 
- 付録 1 国際標準に基づいた設計コード作成に向けて
    - (1) 海外先行コードの調査
    - (2) ISO2394 および ISO3010 を考える上で考慮すべき事項
    - (3) 性能設計への対応
  - 付録 2 荷重データの統計的処理法
  - 付録 3 荷重組み合わせの方法

## 荷重 WG 委員の名簿

主査	白木 渡	(香川大学工学部 信頼性情報システム工学科)
幹事	佐藤尚次	(中央大学理工学部 土木工学科)
	香月 智	(防衛大学校 土木工学科)
	鈴木 誠	(清水建設(株) 泉研究室)
	安田 登	(東京電力(株) 電力技術研究所 土木グループ)
委員	大塚久哲	(九州大学大学院工学研究科 建設システム工学専攻)
	川谷充郎	(神戸大学工学部 建設工学科(土木系))
	高田 毅	(東京大学大学院 工学系研究科 建築学専攻)
	田村敬一	(建設省 土木研究所)
	堂垣正博	(関西大学工学部 土木工学科)
	中山隆弘	(広島工業大学工学部 建設工学科)
	本城勇介	(岐阜大学工学部 土木工学科)
	松井謙二	((株)建設技術研究)
	皆川 勝	(武蔵工業大学工学部 土木工学科)
	横山功一	(茨城大学工学部 都市システム工学科)

## 執筆者

本報告書は、上記の荷重WG委員の熱心な議論を経て得られた結果をまとめたものであるが、まとめに際しては以下の委員の方々にお世話になった。

第1章 まえがき：白木 渡

第2章 土木構造物荷重指針の目的と基本方針：白木 渡，香月 智，本城勇介

第3章 現行設計法における荷重の考え方：横山巧一

第4章 土木構造物荷重指針で取り扱う荷重：白木 渡，香月 智，佐藤尚次

第5章 設計荷重の設定方法：白木 渡，香月 智，佐藤尚次

第6章 土木構造物荷重指針の目次案：香月 智

第7章 あとがき：白木 渡

付録1 国際標準に基づいた設計コード作成に向けて

(1) 海外先行コードの調査：鈴木 誠，松井謙二

(2) IS02394 および IS03010 を考える上で考慮すべき事項：鈴木 誠，松井謙二

(3) 性能設計への対応：大塚久哲

付録2 荷重データの統計的処理方法：本城勇介

付録3 荷重組み合わせの方法：白木 渡

## 第1章 はじめに

我々が対象としている土木構造物はその用途・使命を考えると、機能遂行上の確実性、すなわち安全性、使用性が重要視されなければならない。理想的には、絶対に安全な構造物を設計することが目標であるが、これはほとんど不可能に近い。その理由は、構造物の設計段階で必然的に多くの不確実性を考慮しなければならないからである。もし、すべての不確実性がなく、荷重、抵抗強度、構造モデルなどが明確に確定的な形で評価できるのであれば、現在設計示方書で安全性確保のために用いられている安全率、部分安全係数、荷重係数や抵抗係数など全く不要となる。

絶対安全な構造物を設計することが困難であるということは、裏を返せば構造物は破壊等により機能不全に陥り、使用不能になる可能性があることを意味している。つまり、構造物に生ずる応力は弾性限界を越えて構造物の終局限界状態に至り崩壊する可能性があることになる。しかし、許容応力度設計法では、一般に構造材料の降伏点を基準にして設計するため、例えば材料安全率が同一であっても、終局状態に対する安全率（構造安全率）は構造物ごとに異なる可能性がある。許容応力度設計法に内在するこのような欠点を除去するための設計法として塑性設計法（荷重係数設計法）がある。終局状態（塑性崩壊メカニズム形成状態）に対して定められる荷重係数（安全率）を用いて設計された構造物は、終局状態に対して同一の安全率を有することになる<sup>1)</sup>。

ところで、許容応力度設計法、塑性設計法のいずれにしても、これらは材料強度や荷重の大きさ、構造解析の不完全さに起因する不確定要因あるいは曖昧さを、材料安全率あるいは荷重係数というただ一つの安全係数によってカバーしようとしている。構造物によっては、材料強度の不確定要因が大きいもの、荷重の不確定要因が大きいもの、構造解析の不完全さが支配的な場合などが考えられる。各不確定さの程度により当然安全率や荷重係数によって確保される安全性の余裕の度合いが異なってくる。これは、両設計法に共通する欠点である。材料強度や荷重に関する不確定要因は、別々の安全係数によって考慮するのが好ましく、さらに荷重についても、死荷重、活荷重、地震荷重など異なる種類の荷重に対しても、別々の安全係数を用いるのが合理的である。

アメリカ、カナダ、ヨーロッパ諸国では、1980年代に入って許容応力度設計法に代わって新しい設計法として限界状態設計法を採用するようになった。この設計法は、従来の設計法の欠点を補い、利点を吸収し、実設計への適用性を重視する形で発展してきた。この設計法は、構造物が限界状態へ移行する現象をあらゆる面から追求するという立場をとっている。ここに、限界状態とは、構造物が外力に抵抗する能力（耐荷能力）を喪失するか、あるいは荷重による過大な変形、ひび割れ、振動などのため、構造物が正常な使用が不可能になる状態を意味している。限界状態設計では、構造物が破壊や損傷を受けて使用不能になる可能性を認識し、できる限り信頼性理論の助けを借りてその可能性を一定水準（許容破壊確率）以下に抑えるように工夫されている。周知の通りヨーロッパでは、ヨーロッ

パ統一規準<sup>2)</sup>(Eurocodes)を国際標準化機構(ISO)によって定められたISO2394「土木・建築構造物の設計に関する一般原則」<sup>3)</sup>に従って、現在まで何度かの改訂を経て、限界状態設計法を使いやすく信頼できる設計法として定着しつつある。

既に述べたように、材料や荷重の値は、不確定量である。限界状態設計法では、これらの量を確率量と考へて構造物の安全性を確率論的に評価し、また構造設計も確率論的観点に立って行おうとする考へ方、すなわち信頼性設計法に基づいている。限界状態設計法では、一般に設計で用いられる材料強度および荷重に確率論的に定義された特性値並びにそれに乗ずる形で強度係数、荷重係数と呼ばれる部分安全係数を用いるとともに、その他の種々の不確定要因に対しても部分安全係数を用いて、構造物の安全性照査を実施しようというものである。これらの部分安全係数は、予め規定された許容破壊確率以下あるいは目標信頼度(目標安全性指標)以上となるように信頼性理論に基づいて決定される。従って、この設計法によって設計された構造物はその規模や部材の種類、各荷重の特性及びそれらの組み合わせに仕方に関わらず規定された一定の目標信頼度を保有することになる。

信頼性設計法には、ここで説明した限界状態設計法(レベル Ⅰの信頼性設計法)以外に、構造物の信頼性指標  $R$  が目標信頼性指標  $R_T$  以上になるように設計を行うレベル Ⅱの信頼性設計法、構造物の破壊確率  $P_f$  が許容破壊確率  $P_{fa}$  以下になるように設計を行うレベル Ⅲの信頼性設計法がある。レベル Ⅱ、Ⅲの設計法が実設計段階において導入されるまでにはまだ時間がかかりそうである<sup>1),4),5)</sup>。

以上示したように、構造物の設計を確率的に評価するためには、まず荷重や部材強度の確率モデルを明らかにする必要がある。しかし、土木構造物の設計基準策定に際してこの最も重要となる荷重や部材強度の確率統計モデルについて、これまでほとんど議論されず明確に示してこなかった。建築学会においては、1993年に「建築物荷重指針・同解説」<sup>6)</sup>が発行され、その内容は、意識して荷重の確率分布モデルの特性を与えることを目指した内容となっており、1999年に改定された建築基準法の性能規定型設計法を支え得るよう準備が整えられていたことが分かる。

このような周辺状況を鑑みて、構造設計国際標準研究小委員会ではISO2394に基づいた土木構造物の性能規定型設計基準策定のために、まず荷重WGを設置して土木構造物荷重指針作成の枠組みとガイドラインを検討することになった。その結果をまとめたものが本報告書である。2章以降の内容は次の通りである。第2章では土木構造物荷重指針の目的並びに基本方針、第3章では現行設計法における荷重の考へ方、第4章では土木構造物荷重指針で取り扱う荷重の考へ方やその種類、第5章では荷重因子を用いて設計荷重を設定する方法、第6章では土木構造物荷重指針の目次案についてそれぞれ述べ、第7章で本報告書のまとめをする。また、本報告書では付録1として、本報告書で提案する土木構造物の荷重指針をもとに我が国の構造設計基準をISO2394に基づいて策定するために必要な項目についてまとめている。さらに、付録2で荷重データの統計的処理方法について、また付録3で荷重組み合わせの方法について、それぞれまとめている。

#### 参考文献

- 1 ) 尾坂芳夫・高岡宣善・星谷勝：土木構造設計法、新体系土木工学 12、技法堂出版、1981-6 .
- 2 ) CEN : Draft EN 1990 Eurocode 0 Basis of design, 1999 .
- 3 ) ISO : International Standard ISO/DIN 2394, General principles on reliability for structures, 1998 .
- 4 ) 星谷勝・石井清：構造物の信頼性設計、鹿島出版、1995 .
- 5 ) 古田均・白木渡：信頼性設計と保守点検、新信頼性講座（A コース）4、日刊工業新聞社、1996 .
- 6 ) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説、丸善、1993 .

## 第2章 土木構造物荷重指針の目的・基本方針

### 2.1 目的

ヨーロッパでは ISO2394 に基づいてヨーロッパ統一基準(Eurocodes)が整備されつつあり、一方アメリカでは、耐震設計を中心に性能規定型設計法の導入が図られている。構造設計基準についてもグローバルスタンダードの波が日本にも押し寄せてきている。

ISO2394 などを見ても分かるように、このような構造設計法のグローバルスタンダードが設計基準に要求している事項は、設計法の詳細に至るまでの統一などではなく、限界状態設計法のコンセプトの導入、設計照査式のフォーマットの規定や、用語や記号の統一といったことを通じての各設計基準の説明性(accountability)や透明性(transparency)の増大である。従って、このような動きは基準の統一ではなく、基準間の調和(harmonization)と認識すべきであろう。基準の調和を通じて、設計基準が通商貿易の非関税障壁とならないことが、そのもっとも重要な要件である。

このような目で我が国の主要な土木構造物の設計基準を見ると、これらが歴史的な経緯により分化し、それぞれの行政機関/事業主体によりばらばらに発展してきたことは、やむをえない諸般の事情があったとはいえ、説明性と透明性を欠いた極めて不満足な状態にあるといわざるをえない。外国から「日本の構造物設計基準の基本的なコンセプトを説明して欲しい」と問われたとき、個々の主要な基準別々に異なった説明をするというような事態では、上記の状況にまったく対応できないことになる。我が国の主要な設計基準の調和を図ることがまず重要であり、これを single voice で世界に発信してこそ、我が国の優れた設計技術の国外への展開が図られ、また ISO 等への積極的な対応も可能になる。

このような国内基準の調和の必要性を、あたかも黒船の圧力により開国させられるかのように受身の姿勢で、否定的に考える必要はまったくない。土木構造物全般、さらには土木・建築構造物の調和した設計法のコンセプトの確立は、工学知識の体系化による効率の向上、後継技術者養成のための教育においても極めて好ましく、工学者自身が率先して実施すべき理想像の追求である。

Eurocodes などを見ても明らかなように、構造設計基準のもっとも基本的な部分は、構造物に作用する荷重を規定する荷重指針である。周知のように日本建築学会では、1993年に限界状態設計法を念頭に置いた確率・統計モデルを全面的に採用した「建築物荷重指針・同解説」<sup>1)</sup>に改訂した。この指針はその後の同学会における各種構造物(S造、RC造、SRC造、木質造、基礎など)の限界状態設計法への展開に多大な貢献をなし、さらに結果的に1999年の建築基準法の改訂に伴う性能規定型設計法への移行へも大きく寄与しようとしている。

土木構造物については、建築構造物と異なりその種類は多岐にわたり、またその構造物を所轄する事業主体が別々に存在するという特殊事情もあり、これまで統一した荷重指針が作成された例はない。事業主体ごとに設計基準が作成され、その中で設計荷重並びに荷重組み合わせの規則が定められ、指定された設計方法で構造物が設計されてきた。しかし、

以上述べてきたような背景により、このような状態を放置しておける状態ではなくなってきている。

本報告書の目的は、土木構造物を対象とした我が国共通の荷重指針作成の提案である。この提案を行うに当たり、次のような諸点に特に留意した。

- ( 1 ) 土木構造物全般についての荷重指針を提案し、これを主要な各設計基準と調和させて行くためには、これら設計基準と同じレベルに立ったもう一つの荷重指針を作成しようとしても、目的を達成できないし、それほどの意味もない。ここで提案する荷重指針は次節の「基本方針」で述べるように、従来の荷重指針とは異なるコンセプトをとった。すなわち、ここで提案する荷重指針では、荷重因子についてのデータの蓄積と共有化に主眼をおき、本来荷重指針で設定される限界状態設計法で用いる荷重の基本値や設計値についてはその決定方法のみを述べ、各構造物の荷重効果についても個別の設計基準に譲っている点が従来の荷重指針にない特徴である。
- ( 2 ) 計基準には階層がある事を意識した。日本の荷重指針の最上位に立つことを意図したこの指針では、限界状態設計法で荷重を扱う場合の確率・統計的な扱いに力点を置き、また用語や記号の統一について提案する。

## 2.2 基本方針

荷重WGでは、当初「建築物荷重指針・同解説」<sup>1)</sup>の土木構造物バージョンを作成する方針で作業に入った。しかし、上述のように土木構造物は建築構造物と違い多様性および公共性の特質を有しており、この作業は非常に困難なものであることが明らかになってきた。例えば、建築物荷重指針・同解説には、地震荷重の算出式として、次式のようなものが与えられている。

$$Q_{Ei} = D_S \sqrt{\sum_{m=1}^k \left[ \left( \sum_{j=i}^n w_j \beta_m u_{jm} \right) S_A(T_m, h_m) / g \right]^2} \quad (2.1)$$

ここで、

$Q_{Ei}$  :  $i$ 層の地震層せん断力

$D_S$  : 構造特性係数

$w_j$  :  $j$ 層の重量

$\beta_m$  :  $m$ 次刺激係数

$u_{jm}$  :  $j$ 層の $m$ 次振動形



$S(T, h)$  : 固有周期  $T$  , 減衰定数  $h$  を持つ 1 質点系の加速応答スペクトル値

$T_m$  :  $m$  次固有周期

$h_m$  :  $m$  次減衰定数

$k$  : 考慮する固有振動形の次数の最大値

$n$  : 層数

$g$  : 重力加速度

これは、明らかに建築構造物として多層階のビルを想定することによって可能であり、土木構造物のように橋梁もあればダムや埋設管もあるものを、建築物荷重指針のように単純に地震荷重を求める式を統一することは、極めて困難である。荷重算定式を統一できない状況でその求める荷重の確率モデルを統一して定めることは、無意味なことであり、また、それを求めることもできない。

次に、現行設計法を性能規定型の設計法に移行したとしても、公共構造物の安全性に関する責任は事業主体の手から離れて議論することは困難であろうとの意見も強く残ったことである。現状において各事業主体の定める設計示方書や設計方法では、極めてプリミティブな形で荷重が与えられることになっているが、その荷重設定と抵抗力算定法は、分離することのできないバランスを保って、現状の安全性を与えているものである。従って、これを切り離して、別物として定義することが、設計全体での安全性照査のバランスを崩すことになるという意見は、実に具体性と現実性をもったものであり、これを無視することはできない。

このような熱い議論を経て、われわれがたどり着いた結論は、

- (1) 木学会は、荷重算定の主因子となる物理量の確率モデルを与える。
- (2) 事業主体は、この物理量から算定される設計荷重モデルを定義して、設計荷重モデルによって得られる荷重効果を用いて、構造物の安全性をチェックする手法を定める。

との 2 段階方式を採用することである。

この基本方針に従えば、各事業主体の自主性も確保され、かつ、ISO2394 が求める確率的評価への変換も可能である。さらに、事業主体ごとに定義してきた荷重の相互関係も明確になる。また、一方で、多くの事業主体や構造物にまたがって採取される荷重データに逆変換をかけて統一された荷重因子として比較・集計できるため、大量のデータを統計分析可能な仕組みが得られ、荷重因子に関しては、極めて信頼性の高い確率モデルを構築することが将来的に可能になる。

#### 参考文献

- 1) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説、丸善、1993 .

### 第3章 現行設計法における荷重の考え方

土木構造物荷重指針を考える上で、現行の基準類に規定されている荷重の考え方を整理しておくことが必要だと思われる。土木構造物は河川、海岸、砂防、ダム、道路、橋梁、基礎など多くの種類があり、全てを網羅して検討することは困難なことと思われる。ここでは、代表的な基準について荷重の考え方を整理した。注目した項目は以下のとおりである。

- (1) 荷重は、いろいろな基準などで、どのように規定されているのか？
- (2) 荷重を決めた根拠が示されているか？
- (3) 再現期間、設計耐用年数などの統計的情報が含まれているか？

荷重規定は単独であるのではなく、設計照査法と切り離すことが出来ない。それぞれの設計基準では、設計照査法に対応した荷重規定になっているとも言えよう。最近の動向として許容応力度設計法から限界状態設計法、性能規定型設計体系に移行する動きにあり、この動きを考慮しなければならない。

#### 3.1 荷重の種類

限界状態設計法に移行した代表例として、鉄道構造物等設計標準（鋼・合成構造物）を取り上げよう。「鉄道構造物等設計標準・同解説（鋼・合成構造物）」<sup>1)</sup>は平成4年10月に制定されたものであり、新たに限界状態設計法を採用している。設計の基本として、構造物の供用期間と設計耐用年数を規定しており、また、限界状態を終局、使用、疲労の3限界状態に区分した。荷重は作用する頻度、持続性および変動の程度によって、

- (1) 永久荷重
- (2) 変動荷重
- (3) 偶発荷重
- (4) その他の荷重

に分類し、設計荷重は荷重の特性値に荷重係数を乗じて定めるものとしている。鉄道橋の設計に用いられる荷重を表3-1に示す。

解説によると、永久荷重は持続的に作用する荷重であり、死荷重がこれに該当する。変動荷重は変動が頻繁あるいは持続的に起こる荷重であり、列車に関係した荷重、風荷重、温度変化があげられる。偶発荷重は耐用期間中に作用する頻度がきわめて小さいが、作用するとその影響が非常に大きい荷重であり、地震の影響、衝突荷重、架設荷重がある。その他の荷重としては、添架物、雪荷重、支点沈下などである。

鉄道構造物等設計標準の設計の基本的な考え方は、ISO2394 や Eurocode Part 1 に沿ったものといえる。

「鉄道構造物等設計標準（鋼・合成構造物）」と対比するのに適当な「道路橋示方書（特

に鋼橋編)』<sup>2)</sup>は、今後、性能規定型設計法、限界状態設計法への移行が検討されているが、現在は許容応力度法に基づく設計体系をとっている。設計に用いる荷重は表3-2に示すように、20種類の荷重を考慮することとしている。荷重の区分は、(1)主荷重、(2)従荷重、(3)主荷重に相当する特殊荷重、(4)特殊荷重となっており、荷重組み合わせと許容応力度の割り増しに関連している。すなわち、まれにしか起こらない性質を持つ荷重に対しては許容応力度を割増しても良いとしている。荷重の区分について、表3-1及び表3-2と比較すると、鉄道構造物等設計標準が生起頻度により区分しているのに対して、道路橋示方書ではそれに加えて荷重の影響度も加味しているように見受けられる。道路橋示方書は戦前からの示方書を数次にわたる改訂を経て現在のような形になっているものであり、多くのデータ、実績を踏まえて規定ができあがっていると考えられる。

### 3.2 荷重の規定

「鉄道構造物等設計標準(鋼・合成構造物)」をもとに、荷重の特性値をもう少し詳細に見ていくと、荷重の特性値の規定としては、

- a. 具体的な数値、算定式、算定方法を示す
- b. 設計で規定する
- c. 事業者が規定する

という違いが見られる。

a. に該当するものが多い中で、b. に該当するものは、例えば架設荷重であり、架設方法、架設中の重量等を考慮するものとしており、設計の中で決められることになる。c. に該当するものは例えば列車荷重であり、当該線区に使用する列車または車両の実重量、積載重量、軸配置等を考慮して、各鉄道事業者において定めるのを原則とするものである。

大多数の具体的な算定方法が規定されているa.の荷重についてみると、死荷重のようにデータがたくさんあり、それを基に特性値が規定されているもの、衝突荷重のように信頼できるデータがなく現実にはもっと大きな荷重になることも想定されるが判断として決められているものがある。雪荷重および風荷重については、統計データも多く、統計モデルを用いた特性値の表現も可能であると考えられるが、除雪が行われることから詳細な規定にしていなかったり、最大風速が想定した風速を超えた記録があるにもかかわらず強風により実際に鉄道橋が被害を受けたことがないことなどから風速として確定値を用いることで問題なしとしている。すなわち、設計基準としてとりまとめる際にはある種の見極め、判断が加わっている。

なお、設計基準の中には、港湾構造物のように、荷重を明確に規定していないものがあることも認識しておく必要がある。

### 3.3 荷重と影響

鉄道構造物等設計標準と道路橋示方書の荷重規定をみると、「荷重」と「影響」が含まれ

ていることが分かる。影響は、(1)クリープの影響、(2)乾燥収縮の影響、(3)地盤変動の影響、(4)支点移動の影響、(5)地震の影響、(6)温度変化の影響などであり、荷重という表記が適切ではないケースである。(3)(4)に対しては「影響を設計で考慮すること」という規定になっており、具体的な照査法は記述されていない。

### 3.4 荷重組み合わせ

荷重組み合わせについては、鉄道構造物等設計標準では、終局、使用、疲労の3限界状態に対して規定しており、終局限界状態の照査に用いる荷重の組み合わせで、変動荷重を主たる変動荷重と従たる変動荷重に区分けして、それぞれの荷重係数を変えることにより発生頻度の影響を考慮している。道路橋示方書の荷重組み合わせについては、既に述べたとおりであり、生起頻度が考慮されている。なお、コンクリート部材に対する設計では、設計荷重作用時とは別に終局荷重作用時の荷重組み合わせが規定されている。

### 3.5 地震の影響

地震については、1995年の兵庫県南部地震以降、各分野で活発な研究が進められてきており、設計で考慮すべき地震動がより詳細に規定されるようになってきている。1996年に改訂された「道路橋示方書」、1997年に改訂された「下水道施設の耐震対策指針と解説」では、構造物・施設等の重要度に応じて目標とする耐震性能を設定し、それに対応した地震動を規定している。

道路橋示方書では、設計で考慮する地震動として橋の供用期間中に発生する確率が高い地震動と発生する確率は低いが大きな強度を持つ地震動（タイプⅠの地震動：プレート境界型の大規模な地震による地震動、タイプⅡの地震動：内陸直下型地震による地震動）とに仕分けし、それぞれに、目標とする耐震性能と耐震計算法を規定している。

地震動の規定に用いられる荷重因子としては、照査対象に応じて、埋設管のような地中構造物では地盤の変形の影響が大きいので地盤内に発生する相対変位、下水の処理池（水槽構造物）のような地表面付近の地震動の影響を大きく受ける構造物では地表面における最大加速度、そして慣性力が問題となるような地上構造物に対しては加速度応答スペクトルがベースになっている。

### 3.6 その他

下水道施設のように、全てを自分の基準に規定せず、建築基準法、電気事業法など他の分野の基準に依るように規定しているものもある。

### 参考文献

- 1) 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）、丸善、1992.
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説（ 共通編、 鋼橋編）丸善、1996.

表 3 1 鉄道橋の荷重の種類

鉄道構造物等設計標準 (鋼・合成、コンクリート構造物ノ一部)	
永久荷重	死荷重 プレストレスカ クリープの影響 乾燥収縮の影響
変動荷重	列車荷重 衝撃 遠心荷重 ロングレール縦荷重 車両横荷重・車輪横圧荷重 制動荷重・始動荷重 風荷重 温度変化の影響
偶発荷重	地震の影響 衝突荷重 架設荷重
その他の荷重	

表 3 2 道路橋の荷重の種類

道路橋示方書	
主荷重	死荷重 活荷重 衝撃 プレストレスカ クリープの影響 乾燥収縮の影響 土圧 浮力または揚圧力
従荷重	風荷重 温度変化の影響 地震の影響
主荷重に相当する特殊荷重	雪荷重 地盤変動の影響 支点移動の影響 波圧 遠心荷重
特殊荷重	制動荷重 施工時荷重 衝突荷重 その他

## 第4章 土木構造物荷重指針で取り扱う荷重

### 4.1 荷重因子の種類・区分

本指針では、構造物に作用する荷重を時間変動特性によって永久荷重、変動荷重、偶発荷重、環境作用およびその他の荷重に区分して考える。

永久荷重とは、荷重の大きさに不確定性はあるが構造物の施工後は時間変動が極めて小さいものをいう。例えば、死荷重（自重）、水圧荷重、土圧荷重などがある。

変動荷重とは、荷重の大きさが時間的に変動するものをいう。例えば、活荷重（交通荷重）、雪荷重、風荷重、地震荷重、波浪荷重、温度荷重などがある。

偶発荷重とは、その大きさや発生頻度に時間依存性が見られないものをいう。例えば、爆発、火災、衝突荷重（落石、土石流）などをいう。

環境作用とは、力学的、化学的あるいは生化学的に構造材料を劣化させたり、安全性や使用性に悪影響を及ぼす要因となるものをいう。例えば、湿度、塩分、酸などがある。

### 4.2 荷重因子の確率量基本値

設計荷重の代表的荷重因子として、以下に掲げるものを確率量基本値としてその分布等を与えることにより確率モデル化する。ただし、偶発荷重については別途考慮する。

#### (1) 永久荷重

- a. 死荷重：鋼、コンクリートなどの代表的構造材料の単位体積重量、代表的地盤材料の単位体積重量
- b. 水圧荷重：水の単位体積重量
- c. 土圧荷重：地盤材料の単位体積重量、主働・受働土圧係数
- d. 間接作用：

#### (2) 変動荷重

- a. 活荷重（交通荷重）：車両重量、軸重
- b. 地震荷重：最大加速度、加速度応答スペクトル
- c. 風荷重：地表面 10mにおける 10 分間平均風速、年最大瞬間風速
- d. 雪荷重：積雪量、雪の単位体積重量
- e. 波浪荷重：最大有義波高
- f. 温度荷重：温度変化

#### (3) 偶発荷重

- a. 地震荷重：
- b. 爆発：
- c. 火災：
- d. 衝突（落石、土石流）：

#### (4) 環境作用

#### (5) その他の荷重

## 第5章 設計荷重の設定法

本章では、土木構造物荷重指針で与えられる荷重因子の確率モデルを用いて、土木構造物の設計に用いる設計荷重を設定する方法について述べる。

なお、設計荷重の設定は、土木構造物の多種・多様性および公共性の観点から、その構造物を管理する事業主体において具体的に行われるものであるため、ここでは、原則的な考え方について述べる。

### 5.1 荷重に関する用語の定義

まず、荷重に関する定義について述べる。

#### (1) 荷重因子

土木構造物荷重指針で取り扱う設計荷重算定のための主因子となる物理量であり、土木構造物荷重指針では、その確率分布モデルが与えられる。たとえば、地震荷重では、最大加速度であり、風荷重では、最大瞬間風速等である。

#### (2) 設計荷重

荷重効果を算定するために構造物に作用させる荷重である。その内容は、安全性照査のための限界状態に適切に対応させるために構造物に作用させる分布形状などのモデル化が行われている。たとえば、橋梁に作用する分布活荷重(L荷重)は、その作用形状は実在しない理想化された分布形状が与えられており、桁に生ずる弾性限界状態の最悪荷重状態を算定するためのモデルである。

#### (3) 荷重効果

設計荷重を構造解析モデルに与えて得られる応答値であり、限界状態の定義に基づいて、応力、ひずみ、断面力、部材変形等がある。

#### (4) 荷重作用

荷重作用とは、構造物に作用している集中あるいは分布した力学的な力の集合(直接作用)をいう。ここでは、荷重作用を単に荷重と表現する場合もある。

#### (5) 間接作用

構造物内に生じる変形や強制変形の原因になるものをいう。3章で示したように現行設計法では、「影響」という用語が用いられている。つまり、クリープの影響、乾燥収縮の影響、地盤変動の影響、支点移動の影響、地震の影響、温度変化の影響などにより構造物に力が作用する場合であり、荷重という表記が適切ではないケースに用いる。

#### (6) 環境作用

力学的、化学的あるいは生化学的に構造材料を劣化させたり、安全性や使用性に悪影響を及ぼす要因となるものをいう。例えば、湿度、塩分、酸などがある。

(7) 荷重因子の確率量基本値

本指針では、設計荷重の代表的荷重因子を確率モデル化するが、その確率モデル化する物理量を確率量基本値という。地震荷重においては、最大加速度、加速度応答スペクトル、風荷重では、年最大瞬間風速等である。

(8) 主荷重

構造物の限界状態において支配的となる荷重を主荷重という。

(9) 従荷重

構造物の限界状態において支配的となる主荷重に付加して組み合わせられる荷重を従荷重という。

5.2 荷重因子、設計荷重および荷重効果の関係

5.1で定義した荷重因子、設計荷重および荷重効果の関係を模式的に示すと図5-1のようになる。このように、設計荷重は、荷重因子を意識しつつ荷重効果を簡易に算定するためのモデル化が行われているので、荷重効果を算定するための便宜性が確保されるとともに、荷重因子の確率モデルとの関係付けが明確に示されており、ISO2394の求める構造物の信頼性に関する説明が可能であることの2点を同時に満足できるものである必要がある。この必要条件を満足する手法はいく通りか考えられるが、本章では、その原則的事項を忠実に反映させた一つの方法について述べる。

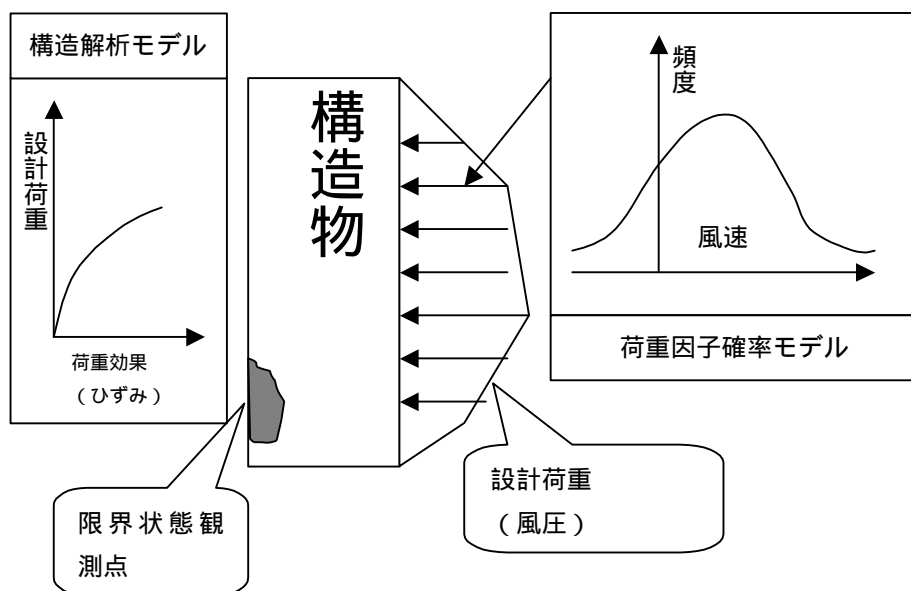


図5-1 荷重因子、設計荷重および荷重効果の関係



### 5.3 限界状態の定義

設計荷重を具体的に定義するには、その設計荷重を用いて算定する限界状態を明確に定義しておく必要がある。限界状態とは、例えば、「部材の弾塑性回転角が回転角容量に達した場合」などと表現できる。限界状態は、一般に次のような限界状態式として数式表現される。

$$g = R - S \quad (5.1)$$

ここで、 $g$ ：限界状態式であり、正值は安全側を、負値は限界状態が満たされない危険側の状態を表す、 $R$ ：抵抗量の限界値であり、弾塑性回転容量などをいう、 $S$ ：荷重効果であり、弾塑性回転角などをいう。

### 5.4 荷重効果と荷重因子の関係

先に定義した限界状態を生じさせる荷重状態を定義し、同時に構造解析モデルを定義する。例えば、先に述べた「部材の弾塑性回転角が回転角容量に達した場合」についても、「大地震時において、……」とすることにより、荷重が大地震の荷重であることが明示される。これは、荷重組み合わせにおいて主荷重が地震荷重であり、他の変動荷重は従荷重であることを明確にすることになる。続いて、部材の弾塑性回転角を求めるための構造解析モデルを定義する。たとえば、静的弾塑性解析によるものであるならば、荷重は静的荷重モデル（震度法によるモデルなど）である必要があり、動的弾塑性解析によるものであるならば、当然荷重の時刻歴を表現できるモデル（スペクトルを与える方法や、モデル地震動を与えるなどの方法）である必要がある。

また、構造設計では、一般に最悪荷重状態を想定することが行われるが、定義された構造解析のために、使用される荷重の最悪載荷状態について定義がなされなければならない。本指針では、この最悪荷重状態を定義する際に3.2節で述べた現行の設計基準で行われているある種の見極めや工学的判断を加味できるように、荷重因子の確率モデルの作成しておくことを考えている。

これらの設計荷重モデルおよび構造解析モデルおよび限界状態の荷重効果がセットとして定義された後に、設計荷重モデルへの変換が行われる。

ここで、定義された関係を次のようにあらわすものとする。

$$S = f_s (P_d (I_d)) \quad (5.2)$$

ここで、 $S$ ：荷重効果、 $f_s$ ：構造解析モデル、 $P_d$ ：設計荷重モデル、 $I_d$ ：設計荷重モデルの中の荷重因子である。

一般に荷重因子と設計荷重との物理的な因果関係は明らかであるが、その定量的因果関

係は完全に表現することが困難である。たとえば、風圧荷重は、荷重因子の物理量である風速の2乗に比例し、受圧面積と抗力係数が与えられれば容易に算出できることはよく知られている。しかし、設計荷重モデルが長い距離に渡って等分布荷重モデル化されている場合には、一点で計測された最大風速 ( $I_p$ ) と設計荷重モデル全体での最大値に相当する風速 ( $I_d$ ) とはズレがある。そこで、設計モデルに使用される荷重因子と土木構造物設計指針で与えられる荷重因子との関係を、次のような変換関数によって関係付けるものとする。

$$I_d = F_f (I_p) \quad (5.3)$$

ここで、 $F_f$  : 変換関数である。

このように考えると、式(5.3)に示す関係によって、土木構造物荷重指針で与えられる荷重因子と設計荷重モデルの関係が明らかになるので、設計荷重モデルの確率分布および超過確率(非超過確率)の定義が可能となる。

#### 5.5 荷重組合せ

5.2節において示したように、評価すべき限界状態の主荷重状態が定義されているので、その主荷重状態に付加して他の荷重をどのように組み合わせるかについては、式(5.2)で得られる荷重効果の確率モデルを用いて荷重組み合わせ解析を確率的に行う必要がある。例えば、極めて稀な地震荷重に対する限界状態のチェックを行う際に、同時に数百年に一度の積雪荷重が作用している可能性は無視し得るほどに小さいことを表現するための処置である。

荷重区分に定義される永久荷重は、時間変動を伴わないものであるので、主荷重と同時に作用させる必要があり、その際には、荷重低減は考慮しない。しかし、変動荷重の従荷重については、超過確率が大きい低い荷重状態を設定する。一般的にも用いられる手法としては、Turkstra 則が有名である。その詳細は、付録3に示す。

#### 5.6 安全性の照査

安全性の照査を行う方法には、信頼性指標を用いて直接評価を行うレベル2の方法と部分係数を用いるレベル1の方法がある。

##### (1) レベル2による照査

式(5.3)を式(5.2)に代入すると、確率分布モデルを持つ荷重因子  $I_p$  から荷重効果  $S$  を求める関係式が得られるので、 $S$  の確率分布モデルを導くことができる。また、式(5.1)の抵抗力の確率モデルが与えられるものとする、式(5.1)の限界状態式の量  $g$  自体も確率量となる。適当な分布モデルの変換が行われ、これらの確率変数が正規確率分布によって与えられるものとする、信頼性指標は次式によって与えられる。

$$= \Phi^{-1}(P(g < 0)) \quad (5.4)$$

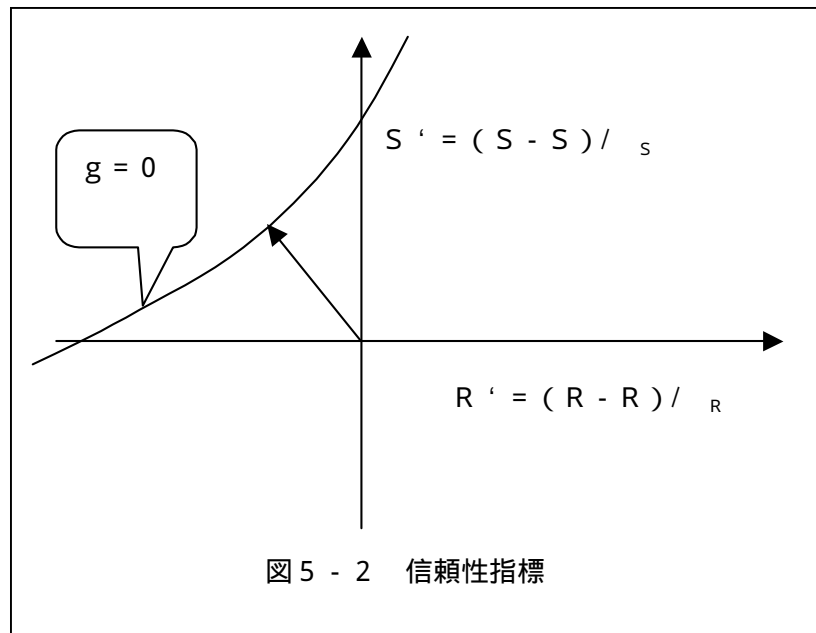
ここで、 $\Phi^{-1}$  : 標準正規累積確率分布関数の逆関数、 $P(g < 0)$  : 破壊確率である。

一般に、限界状態式は非線形関数となる場合が多いので、これを線形近似化して求める手法としてFORMが用いられ、この場合は、図5-2に示すように、標準化された正規確率変数空間における破壊限界線と平均値(原点)との最短距離によって与えられる。このようにして求められた信頼性指標を用いて、安全性照査は次式によって求められる。

$$\beta > \beta_t \quad (\text{安全}) \quad (5.5a)$$

$$\beta < \beta_t \quad (\text{危険}) \quad (5.5b)$$

ここで、 $\beta_t$  : 目標信頼性指標である。



## (2) レベル1による照査

式(5.5)による評価に代えて、部分係数による評価を行う場合もある。この場合の評価式は、次式ようになる。

$$S_d < R_d \quad (\text{安全}) \quad (5.6a)$$

$$S_d > R_d \quad (\text{危険}) \quad (5.6b)$$

ここで、 $S_d$  : 部分係数法によって求められる荷重効果値であり、確率変量  $I_p$  の平均値を代入して得られる  $S$  よりも大きくなるように部分係数を設定する。 $R_d$  : 部分係数法によって求められる抵抗値であり、確率変量の平均値よりも小さな値となるように部分係数が設定される。

## 第6章 土木構造物荷重指針の目次案

以上のような、検討を踏まえた上での来るべき土木構造物荷重指針の構成(目次)案は、以下のようである。

### 第1章 総則

- 1.1 適用範囲
- 1.2 基本条件
  - 1.2.1 安全性照査の考え方
  - 1.2.2 限界状態
  - 1.2.3 構造解析
  - 1.2.4 その他

### 第2章 一般事項

- 2.1 用語
- 2.2 荷重因子と設計荷重
- 2.3 荷重因子の確率量基本値
- 2.4 荷重組み合わせ
- 2.5 極値統計手法

### 第3章 永久荷重

死荷重、水圧荷重、土圧荷重、間接作用  
の各荷重因子

### 第4章 変動荷重

活荷重、地震荷重、風荷重、雪荷重、波浪荷重、温度荷重  
の各荷重因子

### 第5章 偶発荷重

地震荷重、爆発、火災、衝突の各荷重因子

### 第6章 環境作用

### 第7章 その他の荷重

## 第7章 あとがき

本報告書は、種々の土木構造物を設計する際に共通に用いることができ、またそれを用いて設計された構造物が国際設計標準（ISO2394）が要求している信頼性評価を可能とする荷重指針作成のための基本方針並びに枠組みについてまとめたものである。従って、ここでは、まだ具体的な荷重因子を設定し、その確率分布モデルを提案している訳ではない。つまり、現時点では本報告書でまとめられている事柄だけで、具体的な構造物を設計することもできないし、その信頼性を評価することもできない。今後は、ここで提案した基本方針並びに枠組みに従って各荷重の荷重因子を設定し、これまで得られているデータを整理あるいは不足しているデータについてはそれらを収集・整理し、そのデータをもと荷重因子の確率モデルを作成することが必要である。これらの作業は、この報告書の執筆が済み次第開始したいと考えている。

本報告書は、第1章のまえがきにも述べたが、土木学会構造工学委員会に設置された「構造設計国際標準研究小委員会（委員長：古田均）」の荷重WGにおける検討結果をまとめたものである。研究小委員会は、平成12年4月24日の最終委員会をもって終了し、現在は荷重WGと例題WGが報告書のまとめを行っている。研究小委員会では、これらの報告書をもとに平成12年8月1日（東京）、8月3日（大阪）で構造設計の国際標準に関する講習会を開催する予定である。一人でも多くの設計技術者が本報告書で述べた主旨をご理解いただき、我が国においても国際的に通用する土木構造物の設計を可能とするための荷重指針作成にご協力いただければと考えている。