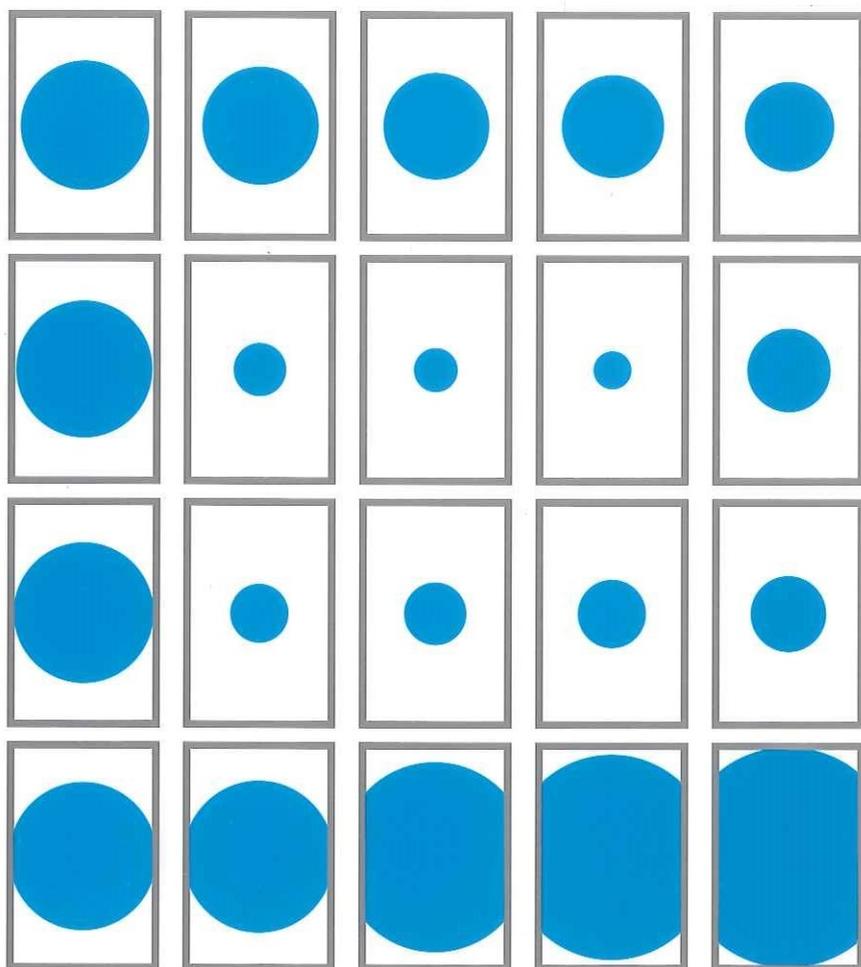


機能保全における性能設計入門

機能保全における性能設計入門編集委員会 編



まえがき

「性能設計」という言葉が、農業土木の分野で聞かれるようになったのはWTOが大詰めとなってきた平成12～13年頃であったと思う。

農業土木の分野で、その中身と必要性を組織的に説き、先頭に立ち様々な活動を行ったのは、(財)日本水土総合研究所と農林水産省である。

特に日本水土総合研究所(当時は日本農業土木総合研究所)は、先駆的にこの問題に取り組み、関係者への啓発のための勉強会、講習会を開催するとともに、成果を「水土の知を語る」Vol.6(性能設計を考える)農業水利の明日に向けて(2003)、Vol.7(性能設計を考える-その2)水利資産を次代に引き継ぐ(2004)、Vol.11(性能設計を考える-その3)水利施設の機能評価(2006)、として刊行し斯界に大きな貢献をしてきた。

農業土木学会は材料・施工研究部会が中心になり、平成16年2月鳥取市で、「性能照査型設計とは何か? -各方面からみた性能照査型設計の考え方-」を開催し、この問題への学会としての組織的取組みが始まった。

その後、若い研究者の参加も増し、平成18年2月には、神戸市において「性能設計チュートリアル「農業水利施設・道路土工に関する性能設計の動向」」が開催されるとともに、有志の協力を得てテキスト「農業水利施設の性能設計」を作成し、学会の「水土技術セミナー」を2回にわたり実施してきた。水土技術セミナーは、参加者も多く、これらの内容を、学生を中心とした初学者に平易に解説する教科書として、広く会員・学生会員に広めてほし

いとの意見が寄せられた。

学会はシリーズ「学会選書」としての出版が可能かどうか、「水土技術セミナー」を支えた講師を中心として、検討に入ることとした。「水土技術セミナー」「農業水利施設の性能設計」の主任講師を努めていただいた野中教授を委員長として、出版検討委員会、機能保全における性能設計入門編集委員会を組織し、平成19年から執筆を開始し、精力的に内容の検討、分担執筆者の内容の閲読を行ってもらった。執筆、編集委員の努力は大きなものであった。会長として、心より感謝するとともに、その努力に敬意を表するものである。

ここに、出版することとなり、学生や若い技術者の人達が学んでいく、テキストあるいは、座右の書となるとともに、技術者の間で「性能設計」に対する理解が深まることに役立てば誠に幸いである。

農業農村工学会長

青山 咸康

2007年12月吉日

目 次

第1章 性能設計の現状	1
1.1 はじめに	1
1.2 包括設計コード	3
1.2.1 ISO2394	3
1.2.2 土木・建築にかかる設計の基本	4
1.2.3 土木学会「包括設計コード」	4
1.3 性能設計の技術論的特徴	5
1.3.1 要求性能の階層化	5
1.3.2 性能の照査	7
1.3.3 性能の保証	8
1.4 他分野の状況	9
1.4.1 基礎構造物関係	9
1.4.2 鉄道構造物関係	10
1.4.3 港湾構造物関係	11
1.5 農業・農村整備事業と性能設計	12
1.6 性能設計とストックマネジメント（マクロマネジメント）	14
1.7 補修・補強と性能規定化（マイクロマネジメント）	16
1.8 性能設計の到達点	20
第2章 信頼性の照査	26
2.1 施設の信頼性	26
2.1.1 要求性能と限界状態	27
2.1.2 性能余裕の決定方法	27
2.1.3 信頼性設計法の考え方	29
2.2 部分安全係数法の理念と現状	30
2.2.1 部分安全係数の現状	31

2.2.2	信頼性設計法としての部分安全係数法	32
2.3	レベルⅡ信頼性設計法	33
2.3.1	耐力や作用力の期待値，標準偏差と超過・非超過確率	33
2.3.2	性能関数とその統計量	34
2.3.3	許容安全性指標	35
2.3.4	変動要因の分離と感度係数	37
2.4	レベルⅠ信頼性設計法	37
2.4.1	部分安全係数と安全性指標	38
2.4.2	期待値と特性値	38
2.5	感度係数とその意味	39
2.5.1	感度係数の計算例	40
2.5.2	感度係数の意味	42
2.6	水利構造物に適した部分安全係数の値	43
2.6.1	許容破壊確率の決定	44
2.6.2	部分安全係数の値の再検討	45
2.7	開水路側壁基部の安全性に関する信頼性設計例	47
2.7.1	解析の条件	47
2.7.2	耐力と作用力に関する検討	49
2.7.3	感度係数を用いた検討	50
2.7.4	部分安全係数の決定	51
2.8	信頼性設計法の今後	52
第3章 安全性の照査		54
3.1	限界状態設計法の概要	54
3.1.1	限界状態の種類	54
3.1.2	安全係数および特性値	55
3.1.3	設計に用いる材料特性	56
3.1.4	荷重作用と構造解析	60
3.2	構造物における安全性の照査	62
3.2.1	断面破壊に対する安全性の照査	63
3.2.2	剛体安定に対する安全性の照査	63

3.3	曲げモーメントおよび軸方向力に対する安全性の照査	64
3.3.1	断面耐力の算定における仮定	64
3.3.2	釣合鉄筋比	65
3.3.3	曲げモーメントを受ける部材	67
3.3.4	曲げモーメントと軸方向力を受ける部材	68
3.4	せん断力に対する安全性の照査	71
3.4.1	せん断補強鉄筋を用いない棒部材の設計せん断耐力	72
3.4.2	せん断補強鉄筋による設計せん断耐力	72
3.4.3	腹部コンクリートの設計斜め圧縮破壊耐力	73
3.5	終局限界状態の照査例	73
3.5.1	照査の対象と条件	73
3.5.2	荷重組合せと安全係数	74
3.5.3	開水路の断面モデルと設計条件	77
3.5.4	剛体安定に対する安全性の照査	78
3.5.5	断面破壊に対する安全性の照査	81
第4章	使用性の照査	89
4.1	使用限界状態の検討	89
4.2	断面力および応力度の算定法	90
4.2.1	曲げモーメントを受ける部材	90
4.2.2	偏心軸方向圧縮力を受ける部材	92
4.3	曲げひび割れ発生の照査	95
4.4	曲げひび割れ幅の照査	96
4.4.1	構造性能照査編の許容ひび割れ幅	96
4.4.2	RC開水路に適した許容ひび割れ幅	97
4.4.3	曲げひび割れ幅の推定と照査	98
4.5	曲げひび割れの使用限界状態の照査例	99
4.6	今後の課題	102
第5章	耐久性の照査	104
5.1	長期構造性能の照査	104

5.1.1	農業水利構造物における長期構造性能	104
5.1.2	長期構造性能の照査の基本	105
5.2	農業水利構造物の耐久性設計	106
5.2.1	耐久性設計の基本と実際	106
5.2.2	耐久性の照査方法	109
5.3	性能照査型のコンクリートの配合設計	123
5.3.1	配合設計の基本と実際	123
5.3.2	コンクリートの発注	124
5.3.3	コンクリート材料の規制緩和	125
5.4	鉄筋コンクリート開水路の耐久性設計例	126
5.4.1	強度に関する照査	127
5.4.2	中性化に関する照査	128
5.4.3	塩化物イオンの侵入に伴う鋼材腐食に関する照査	130
5.4.4	凍結融解作用に関する照査	133
5.4.5	水密性に関する照査	134
第6章	機能保全	139
6.1	農業水利施設の機能保全	139
6.1.1	維持管理の現状	139
6.1.2	機能保全の基本	142
6.1.3	機能保全計画の策定	147
6.2	農業水利施設の機能診断	151
6.2.1	診断する機能と性能	151
6.2.2	機能診断の方法	152
6.2.3	農業水利施設の変状例	159
6.2.4	劣化の調査・診断・予測手法	166
第7章	施工および補修・補強	178
7.1	RC開水路の施工	178
7.1.1	RC開水路の施工における留意点	179
7.1.2	施工後の性能照査の基本	185

7.2 RC 開水路の補修・補強	187
7.2.1 補修・補強の基本	188
7.2.2 補修・補強工法	195
7.2.3 補修・補強対策後の性能照査	203
7.2.4 RC 開水路の補修・補強工法の課題	204

機能保全における性能設計入門編集委員会

(2008年2月現在)

委員長	島根大学生物資源科学部	野中資博
委員	島根大学生物資源科学部	石井将幸
〃	鳥取大学農学部	緒方英彦
〃	農林水産省農村振興局整備部 設計課施工企画調整室	瀬戸太郎
〃	日技クラウン(株)	立石卓彦

執筆者	所属	執筆章
石井将幸	島根大学生物資源科学部	(第2,4章)
石黒覚	三重大学大学院生物資源学研究科	(第3章)
緒方英彦	鳥取大学農学部	(第5章)
佐藤周之	高知大学農学部	(第7章)
渡嘉敷勝	(独)農業・食品産業技術総合研究機構 農村工学研究所	(第6章)
野中資博	島根大学生物資源科学部	(第1章)
森丈久	(独)農業・食品産業技術総合研究機構 農村工学研究所	(第6章)
森充広	(独)農業・食品産業技術総合研究機構 農村工学研究所	(第6章)

(2008年2月現在)

第 1 章

性能設計の現状

1.1 はじめに

世界貿易機関 (the World Trade Organization, WTO) での協議において発効した「政府調達協定」と「貿易の技術的障壁に関する協定 (Agreement on Technical Barriers to Trade, TBT 協定)」により、世界的に国際標準化機構 (International Organization for Standardization, ISO) 規格の遵守が求められている。その内容は、わが国をはじめ WTO 加盟国は、国内における任意規格を定めるときに ISO 規格を尊重しなければならないことと、規格を定める際に“デザインまたは記述的に示された特性よりその性能ⁱに着目して定める”ように規定されている。そのうち、構造物設計法としては ISO2394 により規定されており、いわゆる性能照査型設計法 (performance based design) を採用することを原則としている。この性能照査型設計法は、理念的には設計された構造物が要求性能さえ満足すれば、それを実現する構造形式・材料、設計手法・工法は何でもよいとする設計法であり、単に性能設計法とも呼ばれている。また具体的には、ISO2394¹⁾ は“構造物の信頼性ⁱⁱに関する一般原則”を示すものであり、その性能照査の理論背景は信頼性設計法 (reliability based design) にあるが、移行段階における計算法としては限界状態ⁱⁱⁱ設計法 (limit state design) を用いるものである。ISO2394 では、その点を超えると構造物がもはや設計での要求性能を満足しなくなる限界状態として、終局限界状態^{iv}と使用限界状態^vのみを規定しており、耐震設計については別の ISO3010²⁾ で規定している。このように構造物の設計法として、国際標準である性能照査型設計法を用いるようにすることは、技術の国際化対応として 20 世紀からの国家の課題となっていた。

脚注：初学者のためにできるだけ汎用的な意味のものをローマ数字で示し章末にまとめた。

ではそれだけがいまわが国で性能照査型設計法^{vi}の採用がすすめられている唯一の理由なのか？それは、WTOの「政府調達協定」と「TBT協定」による技術基準の性能規定化、およびISO規格の尊重という国際化対応と同等程度に、設計論やそれに付随した社会システムの見直しに対する時代の要請としての内発的要因も大きい。すなわち、性能照査型設計法は、従来使用されてきた各種基準などに見られる構造物の詳細や使用材料などを細かく規定した「仕様規定型^{vii}」とは異なり、構造物に必要とされる性能のみを規定し、その実現方法は原則的に自由とする「性能規定型」設計法であり、技術革新に応じた多種多様な製品の選択や経済性の追及、および市場の国際化などに対応できる設計法であるといわれている理念によっている。マニュアルエンジニアリングとも揶揄されたこの間の仕様設計は、構造物設計論の空洞化を招いてきた。その結果、この性能設計はまったく新規な設計法と見なされ、特にその技術論としての信頼性設計法および限界状態設計法は、従来の許容応力度設計法と比較して難解な設計理論と考えられ、技術者には不評をかってきた。しかし本当にそうなのであろうか。

本章でははじめに、性能設計の基本概念を構成している包括設計コードを紹介し、性能規定化と性能照査の方法論が共通化されつつあることを示す。その後、それらの理論背景について簡単に述べ、基礎構造や鉄道構造、および港湾構造にかかる性能設計導入の仕方について紹介する。さらにそれらを題材として、農業農村整備事業での性能設計の有り様を展望してみる。特に、今後の農業水利施設の設計施工・維持管理に関して、性能設計が技術の国際化対応以外に、①公共工事に対する国民への説明責任、②コスト縮減、③既存施設の改修や改築・更新などストックマネジメント、さらに④環境配慮など要求の多様化に答える枠組みなのかどうかについて考えてみる。かかる課題は、設計の自由度の拡大、新工法・新材料の適用など性能設計の理念が十分に発揮されるときに真に実現される（この概念を以後、広義の性能設計という）。そのためには、構造物の信頼性に関する照査という技術論を吟味しておく必要がある（本来の概念であり、以後狭義の性能設計とも表記する）。また、各種の土地改良事業計画設計規準を性能規定化するための課題についても検討する。

1.2 包括設計コード

ここでは、性能設計の基本概念を捉えるために、国際・国内における代表的な包括設計コード^{vi}の要約と構成を紹介し、今後、各種の土地改良事業計画設計規準を性能規定化するための規範となることを示す。表 1.1 に ISO2394 と国土交通省「土木・建築にかかる設計の基本」³⁾の章立て、および地盤工学会「地盤コード 21」⁴⁾が下敷きとなった土木学会「包括設計コード」の章立て⁵⁾を示した。

表 1.1 包括設計コードの比較

ISO2394	土木・建築にかかる設計の基本	土木学会「包括設計コード」	
1. 適用範囲	1. 総則	1. 用語の定義	
2. 用語の定義	2. 限界状態	2. 一般	2.1 適用範囲
3. 記号	3. 作用		2.2 設計コードの枠組み
4. 要求事項および概念	4. 耐震設計	3. 構造物の目的・要求性能・性能規定	3.1 目的
5. 限界状態設計の原則	5. 性能の検証法		3.2 要求性能
6. 基本変数		4. 照査の方法	3.3 性能規定
7. 解析モデル			4.1 許容される照査方法
8. 確率に基づく設計の原則			4.2 照査アプローチ A
9. 部分係数による設計法		5. 構造物設計報告書	4.3 照査アプローチ B
10. 既存構造物の評価			

1.2.1 ISO2394

前述したように、ISO 規格では、構造物設計法としてその性能を照査することを原則としており、それは ISO2394 により規定されている。ただし、ISO2394 は構造物の信頼性に関する照査の一般原則を示すものであり、理論背景は信頼性設計法にあるが、現行で採用されている計算法としては限界状態設計法を用いるものである。具体的には信頼性に基づく部分係数法^{ix}と定義されている。ISO2394 規格では、終局限界状態と使用限界状態のみを規定しており、耐震設計と維持管理については別の ISO3010 と ISO13822⁶⁾にゆだねられている。

1.2.2 土木・建築にかかる設計の基本

一方、国内でも国土交通省は、ISO2394の考え方との整合性を図り、土木分野と建築分野の設計を同一の包括設計コードで扱うために、平成14年10月に「土木・建築にかかる設計の基本」を公表している。これは、各種の構造物の設計に当たっての、いわゆる国内における“コード作成者のためのコード”を想定したものであり、信頼性設計を考え方基礎とし、その性能照査法としては部分安全係数を用いた限界状態設計法^xを推奨している。照査すべき限界状態としては、終局限界状態、使用限界状態、修復限界状態^{xi}の3つである。なお、ISO2394とは異なり、これには耐震設計が含まれており、土木・建築といった分野の違いや鋼・コンクリートといった構造種別の違いに関係なく共通する事項が扱われている。

1.2.3 土木学会「包括設計コード」

国土交通省が土木学会に委託し、地盤工学会の「性能設計概念に基づいた基礎構造物等に関する設計原則（いわゆる、地盤コード21）」の考え方を鋼、コンクリートなどの他の構造物に拡張することを目的として編まれたもので

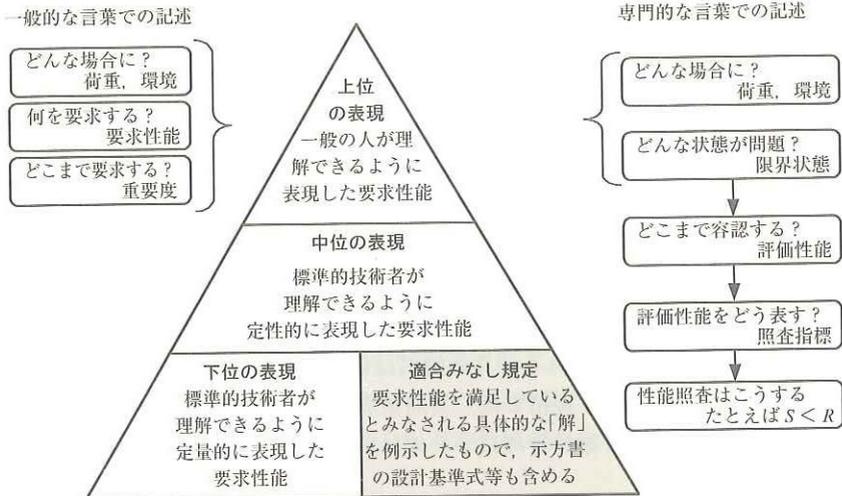


図 1.1 要求性能の上・中・下位の表現⁷⁾

ある。ISO2394, 日本鋼構造協会「土木鋼構造物の性能設計ガイドライン」⁷⁾, 「土木・建築にかかる設計の基本」, ISO13822 などの定義を参考とし, 地盤コード21の0章の概念を拡張し, code platform ver.1ともいわれている。

1.3 性能設計の技術論的特徴

上記したのは, 性能設計の国際・国内的動向といわば理念・概念的な側面であった。一方, 性能設計の技術論的な側面からみた特徴は, 要求性能の階層化, 性能の照査, 性能の保証に特に顕著である。以下, “何故, いま性能設計なのか?” を別途理解してもらうために, その技術論の背景を説明する。

1.3.1 要求性能の階層化

要求性能の階層化とは, 表1.2の性能設計のあり方の基本原則⁸⁾にあったように, 達成すべき要求性能を一般市民でも解るように情報開示するための階層分析①②と③④の各種限界状態の要求性能マトリクス表示を指す。図1.1に示すように, 関係文書は, 上位の一般概念から専門用語を介して表現

表1.2 性能設計のあり方

性能設計のあり方の基本原則	農業農村整備事業の新たな展開方向
①達成すべき要求性能が, 一般市民でもわかる言葉で示されていること	①事業実施方式の抜本的改革 ①-1 徹底した工期管理を行う時間管理原則の導入
②要求性能を設計時に具体的に技術化した目標性能として明示すること	①-2 弾力的な整備への転換を図るオーダーメイド原則の導入
③個々の構造物が持つ重要性等の観点から要求性能または目標性能レベルを選択するシステムとなっていること	①-3 計画・実施・管理の各段階で地域の発想や創意工夫を重視
④荷重の発生頻度に応じた多階層の荷重値と構造物の応答状態を組み合わせた多段階な限界状態を指定できること	①-4 国民の参加を促進するため, 事業プロセスの徹底した公開
⑤限界状態の照査については解析や技術レベルに応じた広範な選択を可能にすること, また, 仕様規定をなるべくなくすこと	②ソフト施策と一体となった事業の展開
⑥目標性能の達成に関して明示し, その際, 限界状態の指定や抵抗力の評価において含まれていた不確定性も含めて表すことが望ましいこと	③新たな役割を發揮する土地改良区への改革