

コンクリート構造物の設計に関する国際標準導入への対応に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 16～平 18

担当チーム：構造物マネジメント技術チーム

研究担当者：渡辺 博志，古賀 裕久，
中村英佑

【要旨】

ISO 19338 は、コンクリート構造物の設計規準が明記すべき要求性能や照査項目を規定し、限界状態設計法に基づいた設計体系を推奨している。国内の実務的なコンクリート構造物の設計規準は、ISO 19338 の推奨する設計体系とは異なるため、必ずしも国際的な整合性がとれた状態にない。本研究は、コンクリート構造物の設計に関する国際標準の導入時の影響を把握し、その対応方針を検討した。このため、諸外国のコンクリート構造物の設計規準における要求性能や限界状態の規定内容を比較した。また、許容ひび割れ幅の取り扱いやせん断耐力算定式の精度、鉄筋の曲げ内半径の規定値の妥当性について実験データ等を交えて考察し、対応方針を提示した。
キーワード：国際標準，ISO 19338，限界状態設計法，許容ひび割れ幅，せん断耐力算定式，構造細目

1. はじめに

近年、ISO 2394「構造物の信頼性に関する一般原則」¹⁾や ISO 19338「構造体コンクリートに関する国家規格の認証のための性能および評価要求事項」²⁾など、構造物の設計に関する国際標準の策定が進められている。ISO 19338 は、コンクリート構造物の設計規準が明記すべき要求性能や照査項目を示し、限界状態設計法に基づいた設計体系を推奨している。一方、我が国におけるコンクリート構造物の実務レベルの設計規準は、こうした国際的に策定が進められている設計規準の体系に必ずしも整合していない。このため、国際標準の導入時の問題点を明らかにし、その際に生じる混乱を最小限に抑えるための対応方針を示すことが急務となっている。

本研究は、コンクリート構造物の設計規準に着目し、国際標準導入時の影響を把握するため設計規準間の相違点を明確にし、対応方針を示すことを目的とした。本研究の検討内容の概要を図-1 に示す。まず、国際標準の策定状況を整理し、各設計規準の要求性能や設計・照査の前提条件、限界状態の定義を比較・整理した。次いで、具体的な照査項目である許容ひび割れ幅やせん断耐力算定式の取り扱い、構造細目の一つである鉄筋の曲げ内半径を対象として、設計規準間の相違点や実験データ等による妥当性の検証を行い、これらへの対応方針を考察した。

なお、ここで対象とした設計規準は、我が国の土木学会コンクリート標準示方書³⁾と道路橋示方書⁴⁾、

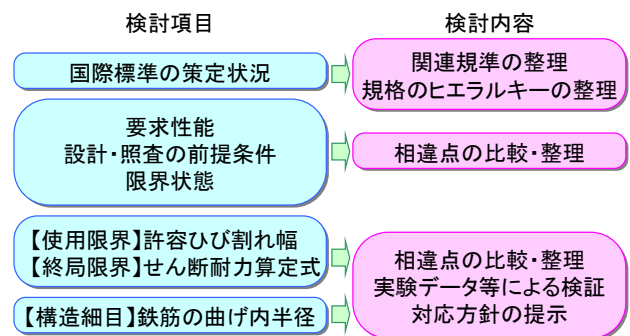


図-1 検討内容の概要

米国の ACI 318⁵⁾と AASHTO LRFD⁶⁾、欧州の EN 1992-1-1⁷⁾である。コンクリート標準示方書と ACI 318、EN 1992-1-1 はコンクリート構造物全般を対象とし、道路橋示方書と AASHTO LRFD は道路構造物を対象とした各国の実務レベルの設計規準である。

2. 国際標準の策定状況⁸⁾

2.1 コンクリート構造物の設計に関する国際標準

コンクリート構造物に関連する ISO の検討は、ISO/TC71(国際標準化機構第 71 専門委員会:コンクリート、鉄筋コンクリートおよびプレストレストコンクリート)において行われてきた。ここでは、7つの SC(分科委員会)が組織され、コンクリート構造物の設計規準については主に SC4 で検討が行われ、2003 年に ISO 19338 が制定された。これは、各国・機関が作成しているコンクリート構造物の設計・施

工に関連する設計規準が規定すべき要求性能と原則的標準を定めたものであり、これに適合するとみなされる設計規準をリスト化して示す、いわゆるアンブレラコードの体系を採用している。また、新たに設計規準を追加する際の手続きも明示し、ISO加盟国から追加申請が行われた場合には、ISO/TC71での審査を経た後の投票によって承認の可否が決定される。ISO 19338は2004年に一部修正され⁹⁾、現時点でリストに示されているのは、米国のACI 318とACI 432、欧州のEN 1992-1-1、我が国の土木学会のコンクリート標準示方書(構造性能照査編, 耐震設計編, 施工編)、日本建築学会の鉄筋コンクリート構造計算規準とプレストレストコンクリート設計施工規準(構造性能照査編, 耐震性能照査編, 施工編)、オーストラリアのAS 3600である。

上記の設計規準は、ISO 19338の掲げる原則的標準を満たすものであり、いずれもコンクリート構造物の設計に支障なく使用できると考えられる。ところが、ISO 19338は各設計規準が規定すべき要求性能や照査項目を示しているものの、具体的な照査方法や耐力照査の前提となる構造細目の内容までは明記していない。すなわち、仮に各設計規準の耐力算定式の精度が大きく異なるような場合には、同一形状の構造物であっても安全性の照査結果が異なるといった問題が生じることも起こり得る。また、ISO 19338は信頼性設計に基づく限界状態設計法を推奨しているが、国内の実務レベルの設計規準である道路橋示方書は許容応力度法を採用している。このため、コンクリート構造物の設計に関する国際標準の導入によって生じる問題点を整理することは、将来的な道路橋示方書の設計体系を検討する際にも役立つものと考えられる。

2.2 規格のヒエラルキー

図-2は、コンクリート構造物の設計に関する設計規準の関係を整理したものである。これらは策定主体により、国際規格、地域・国家規格、団体規格に分類することができ、上位規格が下位規格に影響を及ぼしている。例えば、ISO 2394は、信頼性理論に基づいた限界状態設計法を提示しており、この下位に位置するISO 19338でも限界状態設計法を推奨している。この結果、国際整合性の観点から、国内の実務レベルの設計規準も限界状態設計法を導入することが求められることとなる。

一方、設計規準の策定作業における国際的な動向として、分野や構造種別に関係なく構造物全般の共通事項を共通に定め、構造種別の特性に依存するも

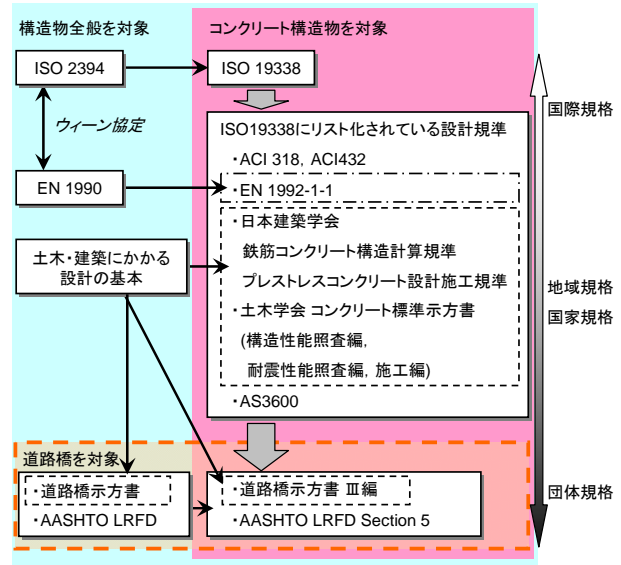


図-2 規格のヒエラルキー

のを構造種別ごとに示す動きがある。この典型例が、欧州のENである。ENでは設計の基本原則をEN 1990¹⁰⁾に共通事項として定め、作用や耐震設計以外の構造種別に依存する部分を個別に定めている。ただし、EU加盟国が即座にENに対応することが困難なため、各国がNational Annex(付属文書)でENの規定値に代わる独自案を示すことを認めている。

国内では、これまで土木・建築分野において構造種別ごとに設計体系が構築されてきた。これに対する反省から、分野や構造種別の区別にかかわらず構造物全般に適用できる設計規準のあり方を示すため、「土木・建築にかかる設計の基本」¹¹⁾が策定された。

3. 要求性能、設計・照査の前提条件と限界状態⁸⁾

表-1に、各設計規準の規定する要求性能、設計・照査の前提条件と限界状態の概要を示す。ISO 19338、土木・建築にかかる設計の基本、土木学会コンクリート標準示方書、EN 1990、EN 1992-1-1、道路橋示方書、AASHTO LRFDを対象とする。なお、ACI 318には明確な形で要求性能や限界状態の定義が示されていないため、ここでは取り上げていない。

3.1 要求性能の比較

各設計規準は、いずれも複数の要求性能を明記している。これらのうち、安全性と使用性(もしくは、供用性)は全ての設計規準で記載されている。これは、構造物の安全性と構造物が適切に機能することで得られる使用性を確保することが、構造物の設計作業において考慮すべき最も重要な要求性能であることを反映したためと考えられる。安全性と使用性以外

表-1 要求性能, 設計・照査の前提条件, 限界状態の概要

	要求性能, 設計・照査の前提条件	限界状態の定義
ISO19338	<ul style="list-style-type: none"> ・構造物全体の質は, 厳格な品質管理と専門知識を有する技術者の注意によって決まる。構造物のシステム, 最大荷重や頻度の大きな荷重を載荷した際の耐荷性能, 材料とその組み合わせ, 施工性, コスト, 環境側面や美観を考慮する。 ・構造ロバスト性を直接・間接的に考慮し, 部分的な損傷や劣化が構造物全体の機能を損ねないものとする。 ・設計は, 安全性, 使用性, 修復性, 構造ロバスト性, 環境との整合性, 耐久性を考慮する。必要な場合には, 疲労, 火災, 爆発, 衝撃, 希な偶発作用, 他の厳しい作用などに対する限界状態も考慮する。 ・完成後の構造物の性能を設計・計画段階の要求性能や前提条件と一致させるために品質保証や施工計画を検討し, 適切な品質管理検査を行う。 	<ul style="list-style-type: none"> (1)終局限界状態 (2)使用限界状態 ・たわみ・ひび割れ限界状態 ・振動限界状態 (3)耐久限界状態 (4)耐火限界状態 (5)疲労限界状態
土木・建築にかかる設計の基本	<ul style="list-style-type: none"> ・設計対象とする構造物の設計供用期間を定め, 設定した期間において安全性, 使用性, 修復性の基本的要求性能を確保することを基本とする。 ・これら以外に景観, 自然環境に与える影響, 経済性等にも配慮するが, ここでは安全性, 使用性, 修復性等を考慮した構造設計に限定する。 ・構造ロバスト性の確保については, 安全性, 修復性に含めて考慮する。 	<ul style="list-style-type: none"> (1)終局限界状態 ・疲労限界状態 ・耐久限界状態 ・耐火限界状態 (2)使用限界状態 ・疲労限界状態 ・耐久限界状態 ・耐火限界状態 (3)修復限界状態
土木学会 コンクリート標準示方書	<ul style="list-style-type: none"> ・施工法, 維持管理手法等は, 経済性を考慮して設定する。設計耐用期間を通じて, 構造物が安全性, 使用性, 環境との整合性や景観等に関して, 要求された性能を満足することを確認しなければならない。 ・性能照査は, [構造性能照査編]で規定する一般構造細目, [施工編]の耐久性照査を満足し, [施工編]による標準的な施工方法とコンクリートの標準的な施工性能を満たすことを前提とする。 ・安全性と使用性の照査では, 設計耐用期間に発生する性能の経時変化を考慮するのが原則であるが, [施工編]の耐久性照査を満足すれば, 設計耐用期間中の構成材料の劣化を考慮しないで安全性と使用性を照査することができる。 	<ul style="list-style-type: none"> (1)終局限界状態 ・断面破壊, 剛体安定, 変位, 変形, メカニズムの終局限界状態 (2)使用限界状態 ・ひび割れ, 変形, 変位, 損傷, 振動, 有害振動発生の使用限界状態 (3)疲労限界状態
EN1990 EN1992-1-1	<ul style="list-style-type: none"> ・構造物は, 施工・設計耐用期間中に生じると考えられる全ての作用や影響に耐え, 使用目的と整合し, 十分な信頼性と経済性を有するように, 設計・施工される。 ・構造物は, 構造的な抵抗性, 使用性, 耐久性を有するように設計され, 爆発や衝撃, 人的ミスの影響によって損傷を受けないように設計・施工される。 ・設計は次の前提条件のもとで行われる。(1)適切な技術と経験を有する技術者による設計と構造システムの選択, (2)適切な技術と経験を有する技術者による施工, (3)施工時における適切な監督と品質管理, (4)ENおよびその他の関連規準で規定された材料と製品の使用, (5)構造物の適切な維持管理, (6)設計の使用目的に一致した構造物の使用, (7)ENV13670Iに規定された施工と施工技術の必要条件。 	<ul style="list-style-type: none"> (1)終局限界状態 (2)使用限界状態
道路橋示方書 コンクリート橋編	<ul style="list-style-type: none"> ・橋の設計にあたっては, 使用目的との整合性, 構造物の安全性, 耐久性, 施工品質の確保, 維持管理の容易さ, 環境との調和, 経済性を考慮しなければならない。 ・施工の確実性, 安全性, 維持管理の容易さ, 環境との調和及び経済性については, 構造設計, 耐久性の検討を行う際に常に念頭におくものとし, 最適なものとなるよう検討しなければならない。 ・コンクリート橋の設計にあたっては, 施工の条件を適切に考慮しなければならない。コンクリート橋は, その施工が安全性, 耐久性等を大きく左右するため, 設計にあたっては施工の条件を満足し, さらに施工のしやすさに配慮することが重要である。施工の条件が満たされない場合には, 試験等を別途行い, 構造物を設計しなければならない。 	<ul style="list-style-type: none"> (1)許容応力度法により設計荷重作用時の照査を実施 (2)別途, 終局荷重作用時の照査を実施
AASHTO LRFD	<ul style="list-style-type: none"> ・橋梁は, 規定した限界状態に対して, 検査性, 経済性, 美観を十分に考慮し, 施工性, 安全性(耐久性, 検査性, 維持管理性, 走行性, 公共性, 変形), 使用性の目的を達成するように設計される。 	<ul style="list-style-type: none"> (1)使用限界状態 (2)疲労・損傷限界状態 (3)強度限界状態 (4)非常時限界状態

では, 修復性, 経済性(コスト), 環境との整合性(調和), 耐久性, 使用目的との整合性, 景観(美観)など, 異なる項目が記載されている。

ISO 19338 と EN は, 火災や爆発, 衝撃など他の設計規準では指摘されていない作用の影響について触れている。この理由は, 土木学会コンクリート標準示方書や道路橋示方書, AASHTO LRFD と異なり, ISO 19338 と EN が土木分野以外の構造物も対象としているためと考えられる。また, AASHTO LRFD は, 最も多くの要求性能を記述し, 使用性の具体的な項目として, 検査や維持管理, 走行, 公共性などについても記載している。ISO 19338 と土木・建築

にかかる設計の基本は, 構造ロバスト性の確保 (Structural Integrity)について触れている。構造ロバスト性の確保とは, 構造物の局所的な破壊もしくは損傷が全体に致命的な影響を及ぼすことなど, 原因に対して不釣り合いな破壊を招くことがないように設計を行うという概念である。

これらのことから, 各設計規準は, いずれも安全性や使用性といった重要な項目については共通して要求性能として明示し, これ以外の項目については各設計規準独自の内容を記載していると考えられる。

3. 2 設計・照査の前提条件の比較

ISO 19338 は, 構造物の品質が, 品質管理や技術

者の注意によって決まるとしている。土木学会コンクリート標準示方書は、性能照査の前提条件として、一般構造細目の遵守、耐久性の照査、標準的な施工方法とコンクリートの施工性能を満たすことを挙げている。設計耐用期間内の安全性と使用性の照査では、コンクリート標準示方書(施工編)の耐久性の照査を満足すれば、構成材料の劣化を考慮せずに安全性と使用性を照査できるとしている。また、安全余裕度は、標準的な施工方法とコンクリートの標準的な施工性能を前提として設定することとしている。一方、EN は、設計と施工が適切な技術と経験を有する技術者によって行われること、適切な構成材料の選択、適切な維持管理、設計時の使用目的と一致した構造物の使用、施工と施工技術の必要条件などを設計・性能照査の前提条件としている。道路橋示方書では、設計にあたって施工の条件を満足し、施工のしやすさに配慮することとしている。

以上から、各設計規準における設計・性能照査の前提条件は、施工の条件のみとするものから、適切な維持管理や耐久性の照査までを記載するものまで、かなり大きな違いがあることがわかる。

3. 3 限界状態の比較

構造物の設計規準の国際的な潮流は、考慮すべき要求性能に対応する限界状態を定義し、これに対する性能を照査する限界状態設計法へと向かいつつある。ISO 19338 とこれに適合するとみなされる設計規準は、いずれも限界状態設計法を基本とした設計体系を有している。なお、現行の道路橋示方書は許容応力度法による設計体系に基礎を置いたため、ここでは相互比較することが困難であった。

各設計規準は、それぞれ複数の限界状態を定義している。ISO 19338 は、終局限界、使用限界、耐久限界、耐火限界、疲労限界の5つの限界状態を設定している。これらは、それぞれ構造物の安全性、使用性、耐久性、耐火性、疲労に対する抵抗を念頭に置いて定義されたものと考えられ、先に示した要求性能の項目とも概ね一致する。すなわち、ISO 19338 は、各要求性能に対応した限界状態を定義している。

一方、他の設計規準は、ISO 19338 の5種類の限界状態をそのまま明記していないが、共通して終局限界(AASHTO LRFD では強度限界)と使用限界を定義している。終局限界では構造物の破壊を防ぎ安全性を照査することを示し、使用限界では構造物の使用性を確保するために、たわみ、変形、応力、ひび割れなどを照査することを示している。供用期間中

に生じる作用に対する安全性と使用性を照査する点は、いずれの設計規準においても等しい。

これら以外の限界状態としては、土木・建築にかかる設計の基本が修復限界、AASHTO LRFD が疲労・損傷限界と非常時限界を定義している。土木・建築にかかる設計の基本における修復限界は、損傷後の構造物に一定範囲の費用内で修復を行うことで使用を継続することができる状態を意味し、地震作用を念頭に置いたものである。また、AASHTO LRFD の非常時限界は、地震作用だけでなく、洪水や船、車両、流氷の衝突など再現期間の比較的大きい作用に対する限界状態である。

設計規準を策定あるいは改訂する際に参照することを意図して定められた ISO 19338 や土木・建築にかかる設計の基本は、複数の限界状態を定義しているものの、これを照査するための具体的な照査方法については触れていない。土木・建築にかかる設計の基本では、耐久性に関しては、現時点では、構造細目により仕様規定として扱われることが多く明示的な取り扱いとなっていないことを理由として、要求性能として明示しながらも耐久性に関連する限界状態を定義していない。これは、構造物の設計にあたって考慮する要求性能に対応する形で限界状態を定義したとしても、限界状態を明示的に照査する方法が確立されていなければ、限界状態設計法を採用する意義は薄れることを反映したためと思われる。これに対して、土木学会コンクリート標準示方書、EN、AASHTO LRFD は、終局限界状態と使用限界状態を照査するための照査方法を具体的に示している。ただし、環境との整合性や景観、橋梁の美観、経済性などについては具体的な照査方法が明確でないことから、要求性能として記載されているものの、限界状態としては定義せず、設計段階で考慮すべき留意事項との位置づけにあると考えられる。

4. 使用限界状態におけるひび割れ幅の取り扱い⁸⁾

コンクリート構造物の表面には様々な原因によってひび割れが生じることがあり、構造物の耐久性能を低下させる主な要因と考えられてきた。ひび割れ幅については主に使用限界状態の照査項目として記載されていることが多いが、許容ひび割れ幅や曲げひび割れ幅の算定方法は規準間で大きく異なる。表-2 に、各設計規準のひび割れの規定内容を示す。

4. 1 許容ひび割れ幅の比較

ISO 19338 は、構造物の使用性を損ねないように、

表-2 ひび割れに関する規定内容の概要

ISO 19338	・構造物の使用性を損ねないように、コンクリートのひび割れを制御する。
土木学会 コンクリート標準示方書	・コンクリートに発生するひび割れが、構造物の機能、耐久性および美観等その使用目的を損なわないことを、適切な方法によって検討しなければならない。 ・鋼材の腐食に対する許容ひび割れ幅は、環境条件(一般の環境、腐食性環境、特に厳しい腐食環境)と鋼材の種類(異形鉄筋、普通丸鋼、PC鋼材)に応じて、かぶりの関数(0.0035c~0.005c(c:かぶり(mm)))で設定。
EN 1992-1-1	・ひび割れは、構造物の機能や耐久性を損ねず外観上支障が生じない範囲に制限する。 ・許容ひび割れ幅は、EN 206の環境条件区分に対応して0.2~0.4mmの範囲で設定。National Annexで各国が独自に設定可。 ・曲げひび割れ幅の算定式、およびひび割れ幅を制御するための鉄筋径と鉄筋間隔を定めるための簡易法を記載。 ・厳しい腐食環境で供用される場合には、PC部材のコンクリートの引張応力の発生を認めていない。
ACI 318	・曲げひび割れ幅を制御するための鉄筋間隔の算定式を記載。 ・最大ひび割れ幅が屋外で0.33mm、屋内で0.41mmを超えないように鉄筋を配置することとしていたが、ひび割れ幅は構造物によって大きくなることがあることから、現在では実務上許容できる範囲にひび割れ幅を抑えるための鉄筋間隔の算定式を記載。 ・PC部材では、ひび割れを許容するもの、許容しないもの、両者の移行状態にあるものの3つの状態を設定し、供用される環境等に応じて使い分ける。
道路橋示方書	・コンクリート表面のひび割れ幅が0.2mm程度以下となることを目安として、鉄筋の許容応力度を設定。 ・PC部材では、コンクリートの引張応力の発生を許容しているが引張強度以下に制限し、事実上ひび割れの発生を認めていない。
AASHTO LRFD	・曲げひび割れ幅を制御するための鉄筋間隔の算定式を記載。 ・橋梁管理者が部分係数を設定することにより、許容ひび割れ幅を必要に応じて設定可。 ・PC部材では、供用される環境条件などに応じて、コンクリートの引張応力の制限値を設定。

ひび割れ幅を制御することを明記している。

コンクリート標準示方書は、かぶりの関数として許容ひび割れ幅を示し、EN 1992-1-1は、具体的な許容ひび割れ幅の値を示している。いずれも環境条件ごとに許容ひび割れ幅は異なり、コンクリート標準示方書は定性的な環境条件区分を採用しているのに対し、EN 1992-1-1はEN 206¹²⁾の環境条件区分に対応する形で許容ひび割れ幅を示している。ただし、EN 1992-1-1は、National Annexにおいて各国が独自に許容ひび割れ幅を示すことを認めている。

一方、ACI 318とAASHTO LRFDは、構造物ごとにひび割れの発生状況が異なることやひび割れと鉄筋腐食の関係が必ずしも明確でないことなどから、具体的な許容ひび割れ幅を示すのではなく、概ね許容できるひび割れ幅に制御するための鉄筋間隔の算定式を記載するに留めている。

道路橋示方書も、具体的な許容ひび割れ幅の規定は行わず、コンクリート表面のひび割れ幅が概ね0.2mm程度以下となることを目安とした鉄筋の許容応力度を示している。PC部材では、コンクリートの引張応力の発生を認めているものの、引張強度以下に制限し、事実上ひび割れの発生を認めていない。

このように各設計規準における許容ひび割れ幅の規定内容は大きく異なるが、実際の規定値は概ね等しく、およそ0.2~0.4mmの範囲にある。

4. 2 曲げひび割れ幅の算定式の比較

コンクリート標準示方書、EN 1992、ACI 318の旧版¹³⁾の曲げひび割れ幅の算定式は、それぞれ異なるものが採用されている。いずれの算定式もひび割れ間隔に相当する項とひずみに相当する項の積の形で著される点は共通している。しかし、ひび割れの発生メカニズムが複雑なこと、実験データのばらつきが大きいことなどから、各設計規準では異なる曲げひび割れ幅の算定式が採用されている。

5. 終局限界状態におけるせん断耐力の照査^{8), 14)}

せん断破壊は、極めて脆性的な破壊挙動を示すため、終局限界状態の照査では作用せん断力に対する安全性を確認することが求められる。しかし、せん断破壊は、曲げ破壊と異なり、未だに理論的な耐力算定方法が確立されていない。ISO 19338は、工学的原理に基づき、かつ実験結果との整合性のとれたせん断耐力の算定方法を示すことを明記しているが、具体的な算定方法までは記述しておらず、各設計規準は異なるせん断耐力算定式を採用している。このため、各設計規準のせん断耐力算定式の特徴を把握し、その精度を検証する必要がある。

5. 1 せん断耐力算定式の比較

図-3に示すように、各設計規準で採用されているせん断耐力算定式は、修正トラス理論、可変角トラ

ス理論，修正圧縮場理論の3つの理論に基礎を置くものに大きく分類することができる。

修正トラス理論は，コンクリート標準示方書，ACI 318，道路橋示方書で採用され，コンクリート負担分のせん断耐力 V_c とせん断補強鉄筋負担分のせん断耐力 V_s の和をせん断耐力とする。 V_c は既存のせん断補強鉄筋のない供試体の実験データから導かれた経験式， V_s は圧縮斜材角を45度に固定したトラス理論から得られた値とする。修正トラス理論は，国内外で広く採用されているが，安全側の評価を与える傾向にあることが指摘されている。

可変角トラス理論は，修正トラス理論のように圧縮斜材角を45度に固定することなく，設計者が一定の範囲で自由に設定することを認めている。ただし， V_c を無視し， V_s の計算値のみをせん断耐力とするため，圧縮斜材角のとり方により，算定結果が大きく変化するという特徴を有する。なお，圧縮斜材角は，National Annex 内で各国が独自に設定することが可能であり，EN 1992-1-1における推奨値は修正トラス理論よりも若干小さい角度が採用されている。

修正圧縮場理論は，ひび割れの生じている鉄筋コンクリート要素を様な性質を持つ連続的な要素としてとらえ，要素内の力の釣合条件と変形の適合条件を用いることでせん断耐荷機構を評価しようとするものである。 V_c と V_s を個別に算定する点は修正トラス理論と共通であるが， V_c をひび割れ面のかみ合わせにより発揮される引張応力とし， V_s 算定時の圧縮斜材角を対象とする部材の諸条件により設定することとしている。ただし，修正圧縮場理論を用いると，計算過程が煩雑となるなどの問題点もある。

このように，各設計規準で採用されているせん断耐力算定式は，異なる設計思想に基づくものである。

5. 2 各せん断耐力算定式の精度検証

既存の載荷実験データを用いて，上述した各せん断耐力算定式の精度を検証する。ここでは，矩形断面を有し，せん断破壊に至った計219体の実験データを用いた。せん断スパン比の小さい供試体では，アーチ作用が卓越して耐荷機構が異なってくるため，せん断スパン比2.3~5の供試体を対象とした。

各せん断耐力算定式の精度の概要を表-3に示す。(実験値)/(計算値)の平均値を比較すると，道路橋示方書の値が最も大きく，安全側の評価を行う傾向が強い。道路橋示方書による算定値が危険側の評価となったものは，219体中1体のみであり，せん断耐力算定式自体にかなりの安全余裕度を見込んでいる

修正トラス理論 ($V_c + V_s$ で算定)

土木学会コンクリート標準示方書，ACI 318，道路橋示方書

- ・ V_c : せん断補強鉄筋のないRCはりの実験による経験式から算定
- ・ V_s : 圧縮斜材角を45度と仮定したトラス理論から算定

可変角トラス理論 (V_s のみで算定)

EN 1992-1-1

- ・ V_s : 圧縮斜材角を一定範囲内で自由に設定したトラス理論から算定 ($1 \leq \cot \theta \leq 2.5$ を推奨)

修正圧縮場理論 ($V_c + V_s$ で算定)

AASHTO LRFD

- ・ V_c : ひび割れの生じたコンクリートによる引張伝達力として算定
- ・ V_s : 圧縮斜材角を部材の諸条件により算定したトラス理論から算定

V_c : コンクリート負担分のせん断耐力， V_s : せん断補強鉄筋負担分のせん断耐力
 θ : 圧縮斜材角

図-3 各せん断耐力算定式の概要

表-3 各せん断耐力算定式の(実験値)/(計算値)

	平均値	変動係数
土木学会コンクリート標準示方書	1.28	21.1%
EN 1992-1-1	1.34	43.3%
ACI 318	1.24	23.6%
道路橋示方書	1.93	27.3%
AASHTO LRFD	1.09	20.7%

ことが読み取れる。(実験値)/(計算値)の平均値が最も小さいのはAASHTO LRFDの算定式であり，次いでACI 318，土木学会コンクリート標準示方書となった。一方，(実験値)/(計算値)の変動係数に着目すると，EN 1992-1-1のばらつきが大きい。この原因は，今回の検証で可変角トラス理論の算定式の圧縮斜材角を $\cot \theta = 2.5$ と仮定したため， V_s を過大に評価したことが原因と考えられる。修正トラス理論は， V_c と V_s それぞれの計算過程で保守的な仮定を設けているため安全側の評価を与える傾向が強いが，可変角トラス理論では圧縮斜材角の取り方により算定結果のばらつきが大きく危険側の評価も増える。このため，せん断耐力算定式は計算過程も平易な修正トラス理論に基づいた算定式を用いることが望ましく，可変角トラス理論を採用する際には圧縮斜材角の設定方法を入念に検討する必要があると考えられる。

6. 鉄筋の曲げ内半径の規定内容^{8), 15)}

各設計規準は，要求性能に対応した限界状態を定義し，ひび割れ幅やせん断耐力などの具体的な照査方法を記載している。しかしながら，明確な照査方

法が確立されていない事項もあり、これらは構造細目としてみなし仕様の形で規定され、経験工学的に導かれたものが少なくない。

ISO 19338 では、コンクリート構造物の設計規準が明記すべき構造細目として 10 項目を示している。ここでは、これらのうち鉄筋の曲げ内半径に着目し、材料実験を通じて各設計規準における曲げ内半径の規定値の妥当性を検討する。

6. 1 鉄筋の曲げ内半径の規定値の比較

鉄筋の曲げ内半径の取り方は、曲げ加工部の引張強度や定着に影響を及ぼすものであり、コンクリートと鉄筋の一体性に関わる重要な項目である。表-4～6 に、各設計規準における鉄筋の曲げ内半径の規定値を示す。土木学会コンクリート標準示方書は、鉄筋の形状と降伏強度により鉄筋の曲げ内半径の最小値が異なるのに対し、EN 1992-1-1 と AC 318 は鉄筋径に応じて曲げ内半径の規定値を示している。ただし、ACI 318 は 3 つの鉄筋径の範囲に対して 3～5 φ としているのに対して、EN 1992-1-1 は鉄筋径 16mm を閾値として 2 φ と 3.5 φ の 2 種類としている。なお、EN 1992-1-1 の規定値は、National Annex において各国が独自の値を設定することが可能である。

このように、各設計規準における鉄筋の曲げ内半径の規定値には異なる値が採用されているが、その目的が曲げ内半径を過小に加工することで鉄筋自身もしくは鉄筋内側のコンクリートの損傷を防ぎ、曲げ部が適切に機能するためであることは一致している。しかしながら、これらの根拠は必ずしも明確でないため、異なる曲げ内半径で加工した複数の鉄筋の材料実験を実施し、曲げ内半径の規定値の妥当性について検討する。

6. 2 材料実験の概要

国内で入手可能な異形鉄筋 SD390, SD490, SD785, SD1275 を用いて実験を行った。SD390 と SD490 にはネジ状の節があり、SD785 と SD 1275 の表面には比較的小さい節があった。表-7 に、使用した鉄筋の機械的性質を示す。

各鉄筋の曲げ加工性能を検討するため、まず鉄筋を数種類の曲げ内半径(1.5, 2, 2.5, 3 φ)で各 3 本を 90°に曲げ加工し、90°曲げ部の内側と外側における亀裂の有無を目視と磁粉探傷試験により確認した。次に、曲げ加工した鉄筋の引張試験を行い、引張強度および破断状況、破断位置を記録した。

6. 3 材料実験の結果および考察

図-4 に、1.5 φ と 2 φ の曲げ内半径で曲げ加工した

表-4 土木学会コンクリート標準示方書の鉄筋の曲げ内半径の規定値

種類		曲げ内半径	
		フック	スターラップ
丸鋼	SR235	2.0 φ	1.0 φ
	SR295	2.5 φ	2.0 φ
異形棒鋼	SD295A, B	2.5 φ	2.0 φ
	SD345	2.5 φ	2.0 φ
	SD390	3.0 φ	2.5 φ
	SD490	3.5 φ	3.0 φ

表-5 EN 1992-1-1 の鉄筋の曲げ内半径の規定値

鉄筋径	最小曲げ内半径
φ ≤ 16mm	2 φ
φ > 16mm	3.5 φ

表-6 ACI 318 の鉄筋の曲げ内半径の規定値

鉄筋寸法	鉄筋径(mm)	最小曲げ内半径
No.3 ~ No.8	9.5 ~ 25.4	3 φ
No.9, No.10, No.11	28.7 ~ 35.8	4 φ
No.14 ~ No.18	43.0 ~ 57.3	5 φ

表-7 使用した鉄筋の機械的性質

鋼種	鉄筋径 (mm)	公称断面積 (mm ²)	降伏点 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
SD390	16	198.6	463	650
SD490	16	198.6	557	743
SD785	10	71.3	939	992
SD1275	10.7	90.05	1388	1477

鉄筋の引張強度の降伏点に対する割合、破断面の絞りの有無、鉄筋表面の亀裂の有無を示す。曲げ内半径を小さく加工した鉄筋には、磁粉探傷試験で亀裂発生疑いの有ると判定されたものと、十分な強度を発揮できずに破断に至ったものが多く存在した。SD390 と SD490 は降伏点以上の強度を確保できているものが比較的多いが、曲げ内半径を小さくすると強度が降伏点を大幅に下回り脆性破断に至った事例もある。また、破断面を観察すると、SD390 と SD490 では、曲げ内半径が小さいものほど、鉄筋断面に絞りがなく脆性的な破断が起きるケースが多く、破断箇所周辺に数本の亀裂も確認された。この傾向は、磁粉探傷試験で亀裂と疑われる傷が観察された鉄筋で多く発生していた。これに対して SD785 と SD1275 では、脆性的な破断はなく概ね降伏点に近い強度を確保できている。

以上のことから、SD390 と SD490 は、曲げ内半径を 2 φ 以下で加工すると、何らかの損傷が鉄筋に生じ、十分な強度を発揮できずに 90° 曲げ部で脆性的な破断を起こす可能性が高くなるものと推察される。また、強度が降伏点以下に大幅に低下することもあり、鉄筋コンクリート部材での試験等で確認を要す

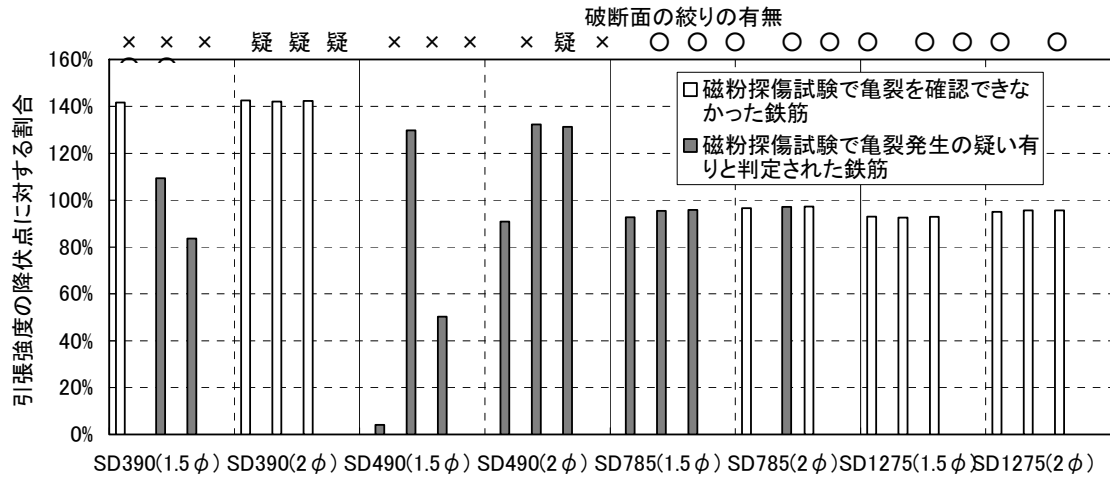


表-4 引張強度の降伏点に対する割合，破断面の絞りの有無，鉄筋表面の亀裂の有無の比較

るものの，構造物の設計上十分な強度を確保できないといった問題も懸念される。

ここで使用した鉄筋径 16mm の SD390 と SD490 の曲げ内半径の最小値は，土木学会コンクリート標準示方書では 2.5 もしくは 3φ，3 もしくは 3.5 φ，ACI 318 では 3 φ，EN 1992-1-1 では 2φ となる。すなわち，EN 1992-1-1 に準拠すれば，曲げ内半径は最も厳しい 2φ で曲げ加工されることも起こり得る。しかし，曲げ内半径 2φ で曲げ加工した場合，今回の実験結果の範囲では，曲げ部の脆性的な破断や強度低下など鉄筋コンクリート用鋼材として望ましくない事態が生じる可能性がある。このため，鉄筋の曲げ内半径の取り方としては，2.5 φ 以上を確保することが望ましいと考えられる。

なお，今回実施した鉄筋の曲げ加工性能に関する材料試験の結果には，鉄筋の表面形状，特に節の形状が与える影響が大きいと思われる。ここでは国内で普及しているやや強度の高い鉄筋を用いて材料試験を行ったため，諸外国で一般に普及している鉄筋を用いた場合には，これとは異なる実験結果が得られることも起こり得る。今後は，国外で実際に使用されている鉄筋で材料実験を行うことも必要である。

7. まとめ

本研究では，コンクリート構造物の設計に関する国際標準の導入時の影響について把握するため，各設計標準の要求性能，設計・照査の前提条件や限界状態の規定内容を比較した。また，実験データ等を交えて，具体的な照査項目であるひび割れ幅の取り扱いやせん断耐力算定式の精度，構造細目である鉄

筋の曲げ内半径の規定値の妥当性について検証した。本研究の範囲内で得られた知見を，以下にまとめる。

7. 1 国際標準の策定状況と導入時の影響

- 1) ISO19338 の制定に伴い，これに適合するコンクリート構造物の設計標準の多くは限界状態設計法を採用していた。また，EN のように，分野・構造種別の区別に関わらず共通的な項目を共通事項として定め，構造種別に依存する部分のみを個別にパッケージとして示す設計体系が，今後，主流になると思われた。
- 2) 各設計標準は，安全性と使用性を共通して要求性能として示し，これ以外については独自の内容を明記していた。限界状態はこれに対応する形で終局限界と使用限界が定義され，環境との整合性や景観，橋梁の美観，経済性は設計において考慮すべき留意事項の位置づけにあると考えられた。設計・性能照査の前提条件は，施工の条件のみとするものから，適切な維持管理や耐久性の照査を記載するものまで，大きな違いがあった。
- 3) 許容ひび割れ幅の規定と曲げひび割れ幅の算定式は，各設計標準で異なる内容が示されていた。曲げひび割れ幅の算定式は，現時点でも理論的な定式化が困難となっているものであり，各国・機関独自の設計思想に基づいたためと考えられる。しかしながら，耐久性，特に鉄筋腐食と外観上の美観の面を考慮して設定される許容ひび割れ幅の制限値は，いずれの設計標準においても概ね 0.2 ～ 0.4mm の範囲に収まっていた。
- 4) せん断耐力算定式は，修正トラス理論，可変角トラス理論，修正圧縮場理論など異なる理論に基づ

くものが採用されていた。過去の実験データを用いてこれらの精度を検証すると、可変角トラス理論による計算値は危険側の評価となる場合が多くなったのに対し、修正トラス理論と修正圧縮場理論による算定値は安全側の評価を行う傾向があるものの比較的良い精度でせん断耐力を算定できることを確認した。この原因は、今回の試算で可変角トラス理論の算定式で仮定した圧縮斜材角の設定値が過大であったためと考えられる。

- 5) 鉄筋の曲げ内半径の規定値は、鉄筋自身および鉄筋内側のコンクリートの損傷を防ぎ、鉄筋の曲げ加工部が適切に機能することを目的とした点は同一であるが、各設計規準では異なる値が示されていた。今回の実験結果の範囲では、用いた鉄筋の節形状による影響があるものの、EN 1992-1-1 の規定値に準拠した場合に、脆性破断や強度低下などの望ましくない性状を示すことを確認した。

7. 2 国際標準の導入時の対応方針

- 1) 各設計規準は異なる許容ひび割れ幅の規定値を示していたが、これらは概ね 0.2~0.4mm の範囲にあった。すなわち、いずれの設計規準を採用しても、許容ひび割れ幅の規定値は同程度に収まる。ただし、安全側の設計を行うためには、道路橋示方書のように 0.2mm 程度を目安とすることや土木学会コンクリート標準示方書のようにかぶりの関数として示すことが望ましいと考えられる。また、ひび割れ幅が許容される荷重状態についても検討を深める必要があると考えられる。
- 2) EN 1992-1-1 の可変角トラス理論によるせん断耐力算定式は、圧縮斜材角の取り方によって危険側の評価が多くなることを確認した。このため、せん断耐力算定式は、土木学会コンクリート標準示方書や道路橋示方書、ACI 318 で採用されている修正トラス理論による算定式を採用することが望ましいと考えられる。万一、可変角トラス理論を採用する場合には、圧縮斜材角の取り方について入念な検討を行う必要がある。
- 3) 今回の材料実験の範囲内では、脆性破断や強度低下など悪影響が懸念されるため、EN 1992-1-1 の鉄筋の曲げ内半径の規定値は過小と考えられる。国内で実際に使用されている鉄筋を使用する際には、これよりも大きい 2.5φ 以上を確保することが望ましい。鋼材の製品規格が日欧間で異なっている可能性があるため、鉄筋の曲げ内半径のような加工方法に関する規定値は他国の規定値をそのまま

準用することができない。このため、加工時の施工の影響を評価する検証方法の確立が重要である。

参考文献

- 1) ISO: ISO 2394 General principles on reliability for structures, p.73, 1998
- 2) ISO: ISO 19338 Performance and assessment requirements for design standards on structural concrete, p.12, 2003
- 3) 土木学会: コンクリート標準示方書(構造性能照査編), p.280, 2002
- 4) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 I 共通編・III コンクリート橋編, p.368, 2002
- 5) American Concrete Institute: Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-05) and Commentary (ACI 318R-05), p.430, 2005
- 6) American Association of State Highway and Transportation Officials: AASHTO LRFD Bridge Design Specifications SI Units Third Edition 2004, 2004
- 7) British Standard Institution : Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, BS EN1992-1-1:2004, p.225, 2004
- 8) 渡辺博志, 古賀裕久, 中村英佑: コンクリート構造物の設計に関する国際標準導入による影響とその対応, 土木研究所資料第 4044 号, p.53, 2007
- 9) ISO: ISO 19338:2003 Performance and assessment requirements for design standards on structural concrete TECHNICAL CORRIGENDUM 1, p.1, 2004
- 10) British Standard Institution: Eurocode - Basis of structural design, BS EN 1990:2002, p.87, 2002
- 11) 国土交通省: 土木・建築にかかる設計の基本, p.31, 2002
- 12) British Standard Institution: Concrete - Part 1 : Specification, performance, production and conformity, BS EN 206-1:2000, p.69, 2000
- 13) American Concrete Institute: Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-95) and Commentary (ACI 318R-95), p.369, 1995
- 14) 中村英佑, 渡辺博志: コンクリート構造物のせん断耐力算定式に関する国際比較検討, 土木技術資料, Vol.48, No.1, pp.60-65, 2006
- 15) 中村英佑, 渡辺博志, 古賀裕久: 高強度鉄筋の曲げ加工性能に関する基礎的検討, 土木技術資料, Vol.47, No.6, pp.64-69, 2005

【英文要旨】

ISO 19338 provides the performance and assessment requirements for design standards on structural concrete and employs the limit state design. The Japanese design specifications for concrete highway bridges are not necessarily consistent with ISO and other countries' specifications. This research project clarified the differences among these design specifications and obstacles to introduce ISO standards to the Japanese design specifications. Also, the limitation of the crack width, the shear equation for RC beams with stirrups and the details of the bent corner for reinforcement steels were compared and verified with the experimental data.