

論文 コンクリート構造のせん断力に対する包括的照査技術研究委員会

渡辺 忠朋*1・倉本 洋*2・斉藤 成彦*3・長井 宏平*4・西村康志郎*5・牧 剛史*6

要旨：鉄筋コンクリート構造物のせん断破壊は、安全かつ合理的な構造物を設計する上で極めて重要な破壊形態であるため、せん断耐荷機構の解明やせん断耐力算定法の精度向上は、コンクリート構造分野における主要な研究課題として扱われてきた。本研究委員会では、せん断問題に関する近年の研究成果を整理した上で、鉄筋コンクリート構造物のせん断に対する照査法の高度化に資する情報を提供することを目的に調査研究を行った。特に、土木・建築におけるせん断力に対する設計・照査式の整理と新たな照査式構築の可能性を探るとともに、非線形数値解析技術を利用してコンクリート構造物のせん断破壊挙動の評価を試みた。

キーワード：せん断力, せん断破壊, 設計・照査式, 非線形数値解析, 損傷評価

1. はじめに

1899年にRitterによってトラス理論が提唱されて以来、鉄筋コンクリート構造のせん断破壊に関する研究が国内外を問わず活発に行われ、いくつもの実験式や半理論式が提案されるとともに、数値解析的な検討が実施されてきた。日本においては、1982年6月に日本コンクリート工学協会で「RC構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム」が開催されて以降、建築および土木の両分野において精力的な研究が行われ、1983年10月には「第2回RC構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム」が、1984年12月には「RC構造の有限要素解析に関するコロキウム」が開催された。それらの集大成として、土木学会では1986年10月に「コンクリート標準示方書〔設計編〕」が制定され、実験に基づき寸法効果の影響を取り入れた棒部材のせん断耐力算定法が提案された。一方、建築学会では1988年11月に「鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針(案)」がまとめられ、塑性理論に基づいて、RC部材のせん断抵抗機構をコンクリートのアーチ機構とせん断補強鉄筋のトラス機構に分けて考えるせん断設計法が提案された。その後も日本コンクリート工学協会では、1989年10月に「RC構造のせん断設計法に関する解析的研究」が開催されるなど、せん断設計・照査式いわゆるマクロモデルに関する検討と、有限要素法を利用した数値解析に基づく検討が行われてきた。1993年10月には、日本コンクリート工学協会において破壊力学の応用研究委員会による報告会が行われ、部材強度の寸法効果に関する検討や、破壊力学の概念を取り入れた非線形数値解析による検討が報告された。

1995年の兵庫県南部地震以降、度重なる震災によって、耐震設計および補強法に関する研究が精力的に行われ、

また、近年では老朽化した構造物の性能評価に関する研究が活発化したことにより、鉄筋コンクリート構造のせん断問題に関する研究成果を包括的に議論する機会が少ない状況にあった。そこで本研究委員会では、鉄筋コンクリート構造のせん断設計法および照査法の高度化に資する情報を提供することを目的に、土木・建築におけるせん断力に対するマクロモデルに関する調査研究と、非

表-1.1 委員会構成

委員長：	渡辺忠朋 (北武コンサルタント)
副委員長：	倉本 洋 (大阪大学)
幹事長：	斉藤成彦 (山梨大学)
幹事：	長井宏平 (東京大学)
	西村康志郎 (北海道大学)
	牧 剛史 (埼玉大学)

マクロ式WG	
主査：	西村康志郎 (北海道大学)
委員：	貞末和史 (広島工業大学)
	佐藤靖彦 (北海道大学)
	島 弘 (高知工科大学)
	長井宏平 (東京大学)
	中村 光 (名古屋大学)
	日比野 陽 (広島大学)
	渡辺 健 (鉄道総合技術研究所)

FEM-WG	
主査：	牧 剛史 (埼玉大学)
委員：	櫻井真人 (秋田県立大学)
	鈴木 卓 (大阪大学)
通信委員：	土屋智史 (コムスエンジニアリング)

*1 北武コンサルタント (株) 工博 (正会員)

*2 大阪大学 工博 (正会員)

*3 山梨大学 工博 (正会員)

*4 東京大学 工博 (正会員)

*5 北海道大学 工博 (正会員)

*6 埼玉大学 工博 (正会員)

線形有限要素解析 (FEM) に基づく調査研究を行った。

2. 研究委員会の活動概要

本研究委員会では、土木・建築分野において使用材料、構造形式、破壊形態、作用種別ごとに乱立したせん断耐力算定法を理論的根拠に基づき整理することで、適用方法および適用範囲を明確にした統一的なせん断に対する照査法の構築を目標とした。また、コンピュータの処理技術の向上と相まって解析技術の進歩した最新の非線形解析手法を利用した「材料損傷に基づく高度な評価法」の開発に取り組むことにより、複雑な作用または境界条件を有する構造物や、3次元的な応答を示す構造物など、従来のせん断耐力算定法では評価が困難な問題に対して、合理的な評価を試みた。これらの課題に取り組むにあたり、土木・建築分野の各種せん断耐力算定法を整理し、合理的な設計および照査法を検討するマクロ式 WG と、非線形解析技術を用いて構造物のせん断破壊挙動の解明を試みる FEM-WG を編成して活動を行うこととした。

マクロ式 WG では、既往の土木・建築のマクロ式をその理論的背景や適用範囲を明らかにすることで、設計・照査方法の整理に取り組んだ。特に、断面寸法、境界条件、破壊形態、せん断補強法等の各種パラメータの影響を調査し、マクロ式の適用範囲の拡大を検討した。また、非線形数値解析を利用することでメカニズムに立脚した新たなマクロ式構築の可能性について検討を行った。

FEM-WG では、非線形有限要素解析を利用したせん断破壊挙動のメカニズム解明に取り組んだ。特に、材料損傷を定量化できる新たな損傷指標を用いて、壁部材や接合部の耐荷挙動の評価を試みた。非線形数値解析を利用することにより、複雑な形状や作用のモデル化、損傷の種類や進展過程の把握等が容易となり、照査法の高度化と新たな構造形式の創造が可能になるものと期待される。

本研究委員会では、これら 2 つの WG 活動を通して、鉄筋コンクリート構造のせん断問題について包括的な議論を行った。以下に、両 WG の活動成果の概要を示す。

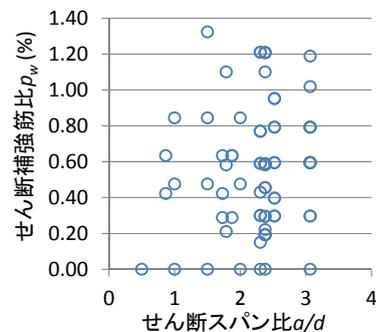
3. マクロ式 WG の検討概要

3.1 概要

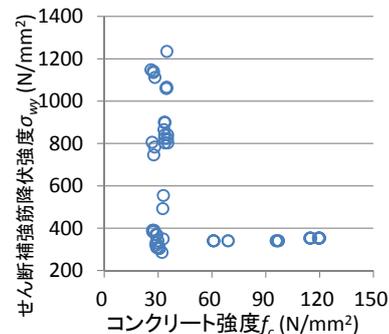
マクロ式 WG では、土木・建築に依らない算定式の提案を目的として議論し、検討を進めている。WG では主に以下の話題について議論された。

- ✓ 土木分野と建築分野の設計式の現状
- ✓ 建築分野における補強筋比
- ✓ 土木構造物の種類と用いられる設計式について
- ✓ 単純支持条件下における矩形断面 RC 試験体の諸元
- ✓ 日本建築学会・SRC 規準¹⁾のせん断耐力式
- ✓ 建築物の耐震壁の構造性能と性能評価

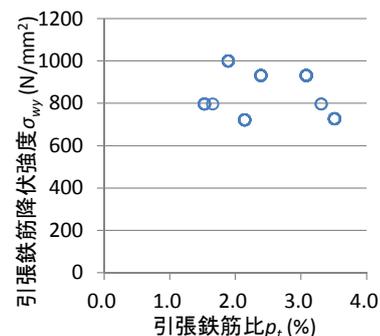
- ✓ アーチ・ビーム (トラス) 機構の貢献度に関する FEM による研究
 - ✓ 日本建築学会・終局強度型指針²⁾のせん断強度式の修正について
 - ✓ 実験資料の選定 (梁部材, 柱部材, 壁部材)
 - ✓ 実験データの諸元とそれを用いた検証
 - ✓ 棒部材の耐荷メカニズムとそのモデル化について
- 土木構造物と建築構造物の部材を比較すると、土木構造物では部材の高さが数メートルになることもあり建築構造物よりも大断面であること、建築構造物では引張鉄筋比が 1.5% を超えるケースも多く土木構造物よりも鉄筋量が多いこと、などが主な相違点となる。異なるモデル間についても議論されている。また、土木分野と建築分野での用語の違いなどもある。これらに配慮し、マクロ式の構築を議論している。



(a) せん断スパン比とせん断補強筋比の関係

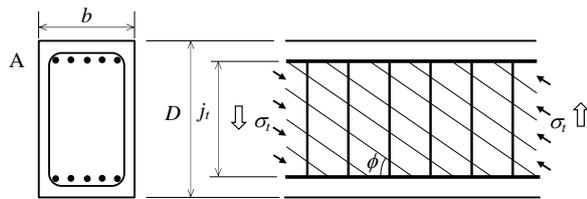


(b) コンクリート強度とせん断補強筋強度の関係

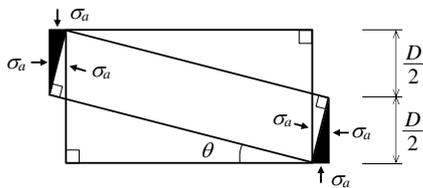


(c) 引張鉄筋比と引張強度の関係

図-3.1 マクロ式構築に用いる実験資料 (梁部材)



(a) トラス機構



(b) アーチ機構

図-3.2 日本建築学会指針のせん断抵抗機構

3.2 両端剛接された部材のせん断耐力のマクロ式

まず、両端が剛接された部材で逆対称曲げを受けるものを標準部材とし、せん断耐力のマクロ式を構築するために検討を進めている。梁部材を対象にマクロ式を構築し、実験データを用いて柱部材や壁部材への適用方法を検討している。

マクロ式の構築のために、これまでの論文から実験資料を収集した。土木分野では単純支持梁の実験が多いため、実験資料のほとんどは建築分野の研究報告のものである。実験資料は、梁部材、柱部材、壁部材（無開口）に区別し、現在までにそれぞれ100体前後の数を収集した。図-3.1は、梁試験体のパラメータの分布である。梁試験体では、せん断補強筋比とせん断スパン比のパラメータがある程度均等に分布するように収集し、それにコンクリート強度のパラメータを加えた。柱試験体では、せん断スパン比が2前後となり、せん断補強筋比とコンクリート強度のパラメータがある程度均等に分布している。また、壁試験体では高強度コンクリートの試験体は限られている。

せん断終局耐力の評価方法については、いくつかの視点からアプローチしている。一つは、日本建築学会の指針で採用されている塑性論モデルで、これは図-3.2に示すトラス機構とアーチ機構の足し合わせでせん断強度を算定するものである。本WGでは、同学会の「鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針」²⁾のモデルに付着強度式を準用し、多段配筋にも精度よく評価し得る算定方法を目指している。これは図-3.2のトラス機構の主筋軸方向の“降伏”を意図したものであり、この現象が必ずしも付着破壊とは限らない、FEMで得られる応力分布との関係と比較できるようにモデルで想定している応力伝達機構を明確にする必要がある、などWG

では活発な議論がなされている。柱部材に対しては軸力の効果を出る限り理論的に考慮する方法や、壁部材に対する適用方法などを検討している。

3.3 FEMによる耐荷メカニズムと棒部材の耐力算定法

これまでも、一部のマクロ式は、棒部材の耐力力を発揮する際の応力状態（耐荷メカニズム）について検討されて、提案された経緯がある。一方で、この耐荷メカニズムについて、非線形解析や実験技術の発達により、従来と比較して、より明確に示すことが可能となっている。そこで、対象を棒部材に絞り、最新の知見に基づき、耐力力をアーチ機構、ビーム機構、トラス機構により負担するとして定量化した。その結果、軸力やせん断補強鉄筋量の増加に伴いトラス機構のみならずアーチ機構の負担割合が増加する状況や、この効果はせん断スパン比にも依存するが、建築・土木分野の主な適用条件である単純支持・両端固定のいずれの条件においても傾向が同様であることを確認した。こうして得た知見を基に、耐荷メカニズムに対する共通点と相違点を明確にし、支持条件に依存しない棒部材の耐力算定のマクロ式を導くための、モデル化の考え方について検討を行っている。

4. FEM-WGの検討概要

4.1 概要

RC 構造物および RC 部材のせん断破壊のメカニズム解明と損傷評価に用いる手法として、非線形 FEM は有効と考えられる。FEM-WG では、非線形 FEM を用いて各種 RC 部材のせん断破壊を評価するための損傷指標の構築と、それを用いた損傷評価法の検討を行っている。具体的には、現行の土木学会コンクリート標準示方書[設計編]³⁾および複合構造標準示方書[設計編]⁴⁾に示されているコンクリートの平均化損傷指標の、建築部材に対する適用可能性の検討と、それを用いたより合理的な照査手法、設計への適用に関する検討を行った。

4.2 コンクリートの平均化損傷指標

コンクリートの損傷を数値的に表現する指標として、偏差ひずみ第2不変量と正規化累加ひずみエネルギーが挙げられる⁵⁾。前者は、ひび割れ等コンクリートの引張に起因する損傷を表現する指標であり、後者はコンクリートの圧縮による損傷を評価する指標である。ただしこれらの指標値は、有限要素の積分点における局所的な応力・ひずみより算出されるものであり、要素寸法依存性を含んでいる。ここで、各積分点での局所の指標値を算定した後に、ある領域内（二次元モデルでは円、三次元モデルでは球）で重み付き平均化処理を施す（図-4.1）ことにより、要素寸法依存性を低減した普遍的な指標値として用いることが可能となる。上述した二つの指標は、部材軸方向ひずみや主ひずみのような方向性を有するベ

クトル量（テンソル量）と異なり，方向性を持たないスカラー量であることに大きな特徴があり，重み付き平均化した指標値が明確な物理的意味を有するという点で，非常に重要な意味を持っているのである。

4.3 平均化損傷指標を用いた損傷評価

以上の平均化損傷指標は，土木構造物におけるはり，壁，柱，骨組み構造への適用性がすでに確認されている（図-4.2）が，適用する材料構成則が異なる場合や，対象が建築部材である場合の検討はまだ行われていない。FEM-WG では，耐震壁（JCI 選定試験体）⁶⁾，有開口耐震壁，柱-梁接合部等の建築構造を対象とした実験供試体を題材として，二種類の非線形 FEM 解析コードを用いた解析的検討を行い，上述した平均化損傷指標の適用性について検討を行った。その結果，いずれの解析対象についても，異なる解析コードで概ね同様の評価が可能であることが確認された。

4.4 平均化損傷指標の設計・照査への適用

本損傷指標を用いれば，各部材内部における耐荷機構を明確に表現可能であるとともに，不静定構造物の構成部材の損傷順序を明示することが可能となる⁵⁾。また，例えば地震を受けた後の修復行為に鑑みれば，部材あるいは構造物のどの部位のどの範囲がどの程度損傷しているかを定量的に評価することが可能である。そのような観点の下，今後は，平均化損傷指標の推移と分布を部材の損傷領域と関連付けることで，構造物の耐荷機構の解明や修復性の照査への展開を図る。さらには，それを設計段階で把握することによって，より効果的・合理的な鉄筋配置なども可能となると考えられ，そのスキームについても検討を行っている。

5. おわりに

鉄筋コンクリート構造のせん断破壊は，安全かつ合理的な構造物を設計する上で極めて重要な破壊形態である。我が国の鉄筋コンクリート構造物のせん断耐荷機構の解明やせん断耐力算定法の精度向上は，1982年に開催された「RC構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム」に始まり，1980年代にはせん断問題に関するコロキウムが頻繁に開催され，それらの成果が，現在の多くの技術基準に反映された。その後，新たな技術基準で設計し建設された構造物が，地震によって甚大な被災を回避できていることは，当時の成果の有用性を物語る事実である。しかし，当時の成果がきわめて即効性や有効性がある成果であったがために，せん断問題は解決したかのような錯覚を招き，その後，革新的な検討が体系だてて実施されてきているとは言い難い現状が続いていることも事実である。そこで，本小委員会は，せん断問題に関する近年の研究成果を整理した上で，当時の課題

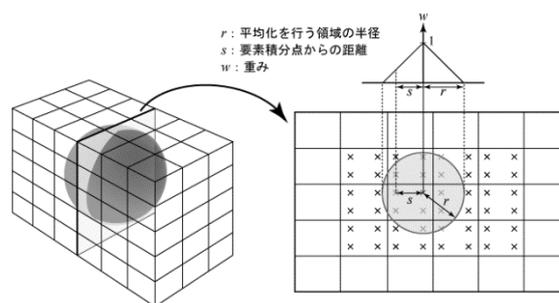


図-4.1 局所損傷指標の重み付き平均化イメージ⁴⁾

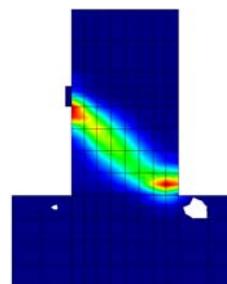


図-4.2 水平力を受ける壁状構造物の平均化正規化累加ひずみエネルギーの分布例

を解決し，かつ，この間の解析技術の進化などを考慮して，新たに鉄筋コンクリート構造物のせん断に対する照査法の高度化をめざし活動を行った。

本小委員会の成果は，本稿でその概要を示したとおり，過去からの課題に対して一定の成果をとりまとめ，かつ，今後進むべき方向性についてもとりまとめた。

これらの成果は，せん断問題コロキウム（2016年9月30日開催予定）にて公表し，かつ，せん断問題に特化した議論を行う予定である。

参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説—許容応力度設計と保有水平耐力—，2014
- 2) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説，1990
- 3) 土木学会：2012年制定 コンクリート標準示方書〔設計編〕，2012
- 4) 土木学会：2014年制定 複合構造標準示方書〔設計編〕，2015
- 5) 斉藤成彦他：土木学会コンクリート標準示方書に基づいた有限要素解析による性能照査とその高度化に向けた取り組み，コンクリート工学，Vol.54，No.3，pp.246-252，2016.3
- 6) 日本コンクリート工学協会：第2回 RC 構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム・解析モデル検証用試験体の実験データ集，1983