

# 建築分野におけるせん断耐力算定式の発展 —実験式からトラス・アーチ理論式へ—

前田 匡 樹\*

## 1. はじめに

我が国における鉄筋コンクリート造建築物の地震被害と耐震設計法の発展の歴史の中で、部材のせん断破壊は、建物の崩壊を引き起こす要因となるので、そのメカニズムの解明と設計法の開発は、最も重要な課題のひとつであった。本稿では、建築分野におけるせん断耐力式の発展について述べる。その歴史の中で重要な研究として、部材実験結果に基づいて1970年に提案され、現在も構造設計などの実務に幅広く用いられている実用的せん断強度式である荒川式について紹介する。またその後、1980年代にかけてのトラス・アーチ機構と塑性理論の下界定理などを応用した理論の発展と、日本建築学会の終局強度型耐震設計指針に採用された倉本・南による提案式、市之瀬による提案式を紹介する。

## 2. 部材実験に基づくせん断耐力評価式（荒川式）

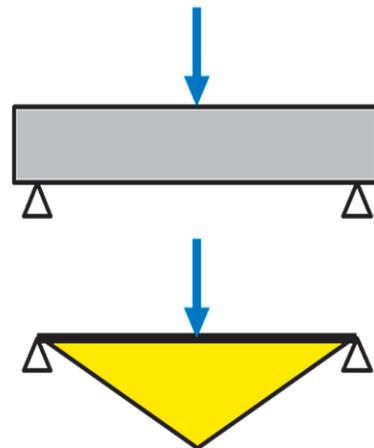
### 2.1 はじめに

鉄筋コンクリート造建築物のせん断耐力の評価に関する研究は、梁部材の載荷実験の分析に基づいて発展してきた。これらの研究の中から、本章では、荒川卓先生による研究を紹介する。荒川先生のRC梁のせん断耐力に関する研究は、北海道大学における大野和男先生の“大野式載荷”と呼ばれる新しい載荷方式を用いた梁部材の実験（文献1）、1957年）、耐力に及ぼす影響の検討に基づく耐力式の提案（文献2）、1960年）、さらに、実験データを追加した再検討（文献3）、1970年）と長い年月をかけた多くの検討により構成されている。この提案式は、荒川式と呼ばれ、現在のRC造建築物の設計や耐震診断の実務に用いられているせん断終局強度式の多くは、荒川式を基にいくつかの修正を加えて導かれたものである。

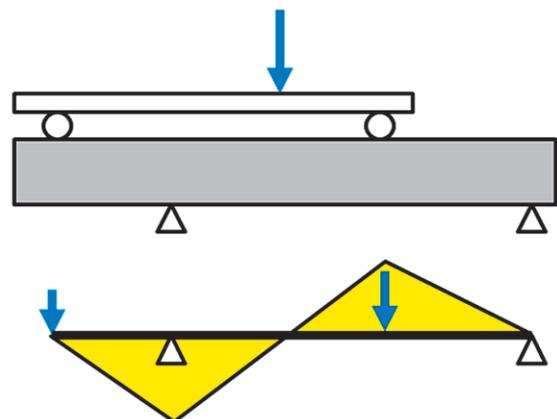
他にも、構造設計の実務に広く用いられている「鉄筋コンクリート構造計算規準」<sup>4)</sup>の、長期・短期許容せん断力の式も、荒川式をベースに簡略化して開発されたものである。最近の若い実務者・研究者には、これらの背景があまり知られていないところもあろうかと思われるので、筆者の知る範囲で説明をしたい。

### 2.2 大野式加力による梁の実験

かつて、梁部材の載荷実験は、図-1に示すように、両端をピン・ローラー支点で支持して梁の中央に集中荷重を加える単純梁形式の載荷により行われることが多かった。この載荷方式によると、梁の両端の曲げモーメントは0で、中央に最大曲げモーメントが生じる。これは、地震力のような水平力を受ける建物内の梁の曲げモーメントの状態を再現することができない。そこで、荒川・大野は、図-2に示すように梁の2点に載荷して、梁の中央部分に、逆対称曲げモーメントを生じさせる載



曲げモーメント分布  
図-1 単純梁式の載荷



曲げモーメント分布  
図-2 大野式の載荷

\* まえだ・まさき／東北大学大学院 教授（正会員）

荷方法を開発して実験を行った<sup>1)</sup>。この載荷方式は大野式加力と呼ばれ、必要な装置や治具は単純梁方式とほとんど同じもので良いことから、その後の梁の実験で多く採用されるようになった。大野式加力は、正負繰返し載荷をするのが煩雑（除荷時に支点を移動しなければならぬ）なことや、軸力を導入することが難しいこと、大変形になると反曲点左右のスパンの変形を同一に維持できないことなどから、その後、建研式加力が開発され、現在では柱・梁の実験の主流となっている。しかしながら、筆者が大学院生であった1990年代には、研究室での梁の実験を大野式加力で行っていたと記憶している。

荒川・大野は、文献1)で大野式加力法を用いて、90体の梁の実験を行い、せん断ひび割れ強度、せん断終局強度に及ぼす、せん断スパン比  $a/d$  ( $a$ :せん断スパン,  $d$ :有効せい)、コンクリート強度  $F_c$ 、あばら筋比、試験体寸法などの影響を検討した。

### 2.3 せん断ひび割れ強度とせん断終局強度式（荒川式）

荒川は、これらの実験結果を分析し、1960年にせん断ひび割れ強度（式（1））、および、せん断終局強度（式（2））の実験式を提案している<sup>2)</sup>。

$$\frac{Q_c}{b \cdot j} = \tau_c = k_c (500 + F_c) \frac{0.17}{a/d + 3.4} \quad (1)$$

$$\frac{Q_u}{b \cdot j} = \tau_u = k_u \cdot k_p \frac{0.23}{a/d + 0.23} (180 + F_c) + 2.7 \sqrt{p_w \cdot \sigma_{wy}} \quad (2)$$

ただし、 $b$ :梁の幅、 $j$ :応力中心間距離、 $d$ :有効せい、 $a$ :せん断スパン、 $F_c$ :コンクリート強度、 $k_c$ 、 $k_u$ :試験体の寸法による補正係数、 $k_p = p_t^{0.23}$ 、 $p_t$ :引張鉄筋比、 $p_w$ :せん断補強筋比、 $\sigma_{wy}$ :せん断補強筋の降伏強度（単位は、kgf, cm。以下、同様）

これらの評価式は、現在良く用いられているせん断強度評価式と一部の係数などが異なっているが、式の構成や考慮しているパラメータはほぼ同じで、現在の式の原型となるものは、1960年には提案されていたことが分かる。また、文献2)では式（1）、式（2）に基づいた許容せん断力の評価に関する検討も行われており、後の日本建築学会の鉄筋コンクリート構造計算規準<sup>4)</sup>の許容せん断力の評価式へとつながっている。

1970年には文献3)において、20年間の国内外の実験データを収集して検証を行い、パラメータの一部修正が行われている。文献3)の冒頭には、以下のような記述がある。

- ・「(前略)～内外の研究者によって広く利用されている大野式加力法により、鉄筋コンクリートばりのせん断抵抗に関する一連の研究を行い～(後略)」
- ・「(前略)～地震時における交番繰返し力を受ける部材のせん断性状に関する～(中略)～実験資料も極めて少ない。」



写真-1 1968年十勝沖地震で倒壊したRC造建物



写真-2 1968年十勝沖地震で柱がせん断破壊したRC造建物



写真-3 上の写真でせん断破壊した柱のアップ  
(写真-1～写真-3は岡田恒男先生提供)

- ・「(前略)～先般の十勝沖地震で、鉄筋コンクリート構造物の一部が、せん断破壊により顕著な被害を受けて注目され、現行の耐震設計法を早急に再検討する必要性～(後略)」

これを読むと、当時の研究状況や背景が分かるが、特に、1968年に発生した十勝沖地震で、写真-1～写真-3に示すように鉄筋コンクリート造建物で柱のせん断破壊や、それによる倒壊などの被害事例が多く見られ、せん断破壊を防止するための設計法の開発が重要な研究課題であった状況が分かる。

文献3)では、国内外の部材実験結果について1499

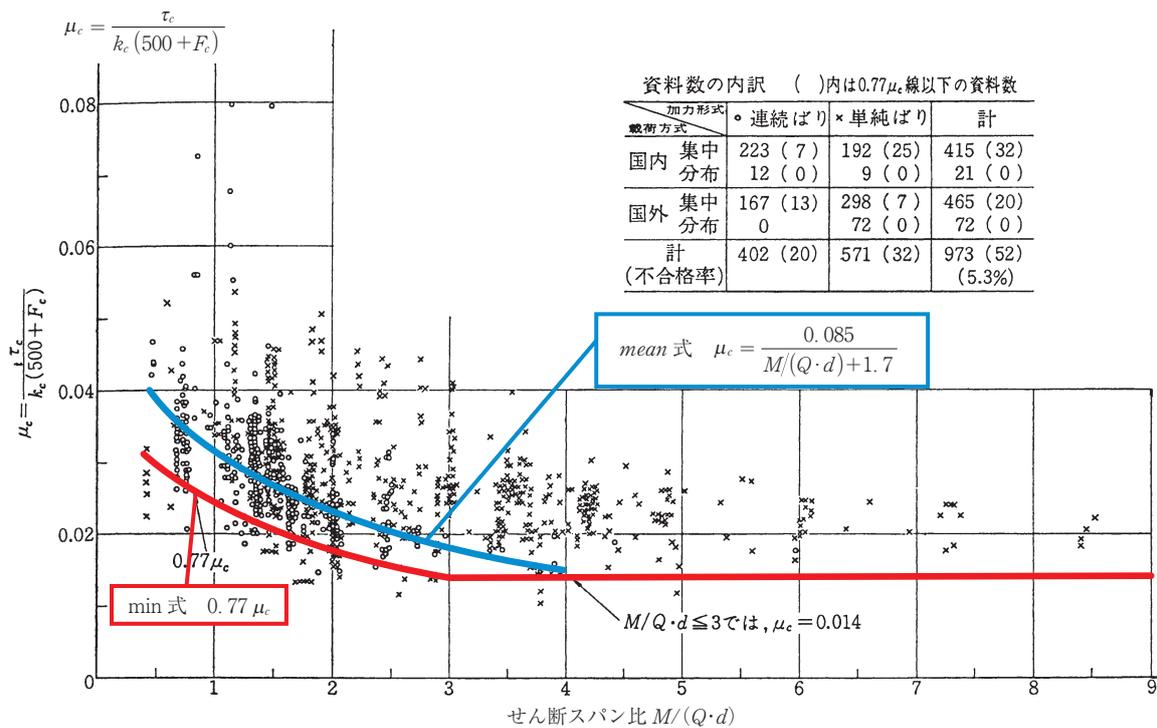


図-3 セン断ひび割れ強度の検証結果 (文献3) より引用し加筆

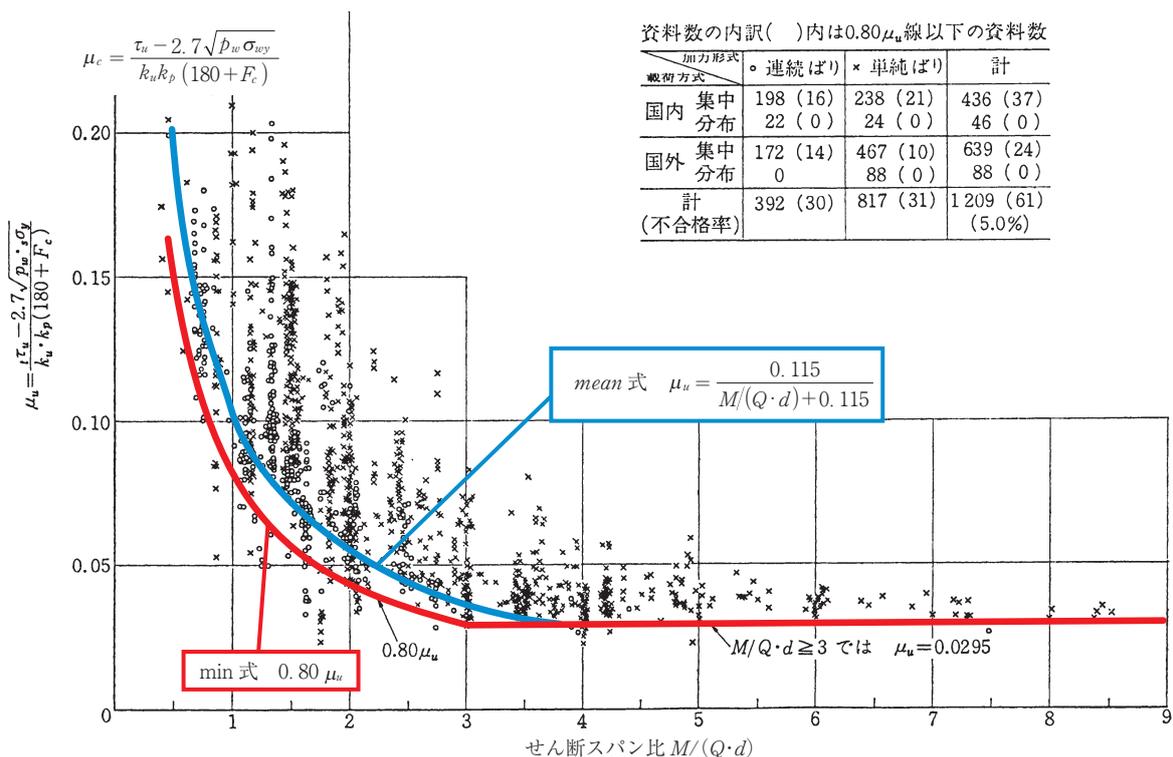


図-4 セン断終局強度の検証結果 (文献3) より引用し加筆

体という膨大なデータを収集し、文献1)で提案したせん断ひび割れ強度、せん断終局強度式の検証を行い、実験結果の下限値を与える式を提案している。ここでは、原式(式(1)、式(2))におけるせん断スパン比を求める際のせん断スパン $a$ を曲げモーメント $M$ とせん断力 $Q$ の比 $M/Q$ に置き換え、式中の係数 $k_c$ 、 $k_u$ を有効せい $d > 40$  cmの梁では0.72として一部簡略化し、以下

の式が提案されている。

$$\frac{Q_c}{b \cdot j} = \tau_c = \frac{\alpha \cdot k_c (500 + F_c)}{M/(Q \cdot d) + 1.7} \quad (3)$$

$$\frac{Q_u}{b \cdot j} = \tau_u = \frac{\beta \cdot k_u \cdot k_p (180 + F_c)}{M/(Q \cdot d) + 0.115} + 2.7 \sqrt{p_w \cdot \sigma_{wy}} \quad (4)$$

図-3および図-4は、実験データによる式(3)および

式(4)の検証結果である。式中の $\alpha$ および $\beta$ は実験結果より求めた係数であり、平均値を推定する場合(mean式)と不合格率5%の下限値を推定する場合(min式)それぞれについて、以下としている。

(mean式)

$$\alpha = 0.085, \beta = 0.115$$

(min式)

$$\alpha = 0.085 \times 0.77 = 0.065, \beta = 0.115 \times 0.80 = 0.092$$

## 2.4 現行の構造設計規準等における式

荒川式は、我が国における現行の構造設計基・規準の諸式に採用され、幅広く実務に活用されている。

### a) 日本建築学会 RC 規準<sup>4)</sup>(許容応力度設計)

耐震設計の1次設計(許容応力度設計)では、日本建築学会の鉄筋コンクリート構造計算規準(以下、RC規準<sup>4)</sup>)が用いられる。RC規準における梁の許容せん断応力の評価式は以下である。

長期許容せん断力

$$Q_{AL} = b \cdot j \cdot \alpha \cdot f_s \quad (5)$$

短期許容せん断力

$$Q_{AS} = b \cdot j \{ \alpha \cdot f_s + 0.5 \cdot w \cdot f_t (p_w - 0.002) \} \quad (6)$$

ここで、 $\alpha = \frac{4}{M/(Q \cdot d) + 1}$  かつ  $1 \leq \alpha \leq 2$

$f_s$ : コンクリートの許容せん断応力度

長期許容せん断力の式(5)は、ひび割れ防止の観点からせん断補強筋の効果に期待せず、式(4)のコンクリート負担分である第1項を簡略化することで導かれている。また、短期許容せん断力の式(6)では、式(4)のせん断補強筋の効果である第2項  $2.7 \sqrt{p_w \cdot \sigma_{wy}}$  を簡略化して累加することで導かれている。

### b) 技術基準解説書<sup>5)</sup>(保有水平耐力)

耐震設計における2次設計(保有水平耐力の確認)で用いられるせん断強度式も、式(4)に  $k_w$ ,  $k_p$ ,  $b$  などの数値を代入して、単位を N, mm となるように係数を修正した式が用いられ、荒川 min 式(式(7))、荒川 mean 式(式(8))と呼ばれている。

$$Q_{su} = \left\{ \frac{0.053 p_t^{0.23} (F_c + 18)}{M/(Q \cdot d) + 0.12} + 0.85 \sqrt{p_w \cdot \sigma_{wy}} \right\} b \cdot j \quad (7)$$

$$Q_{su} = \left\{ \frac{0.068 p_t^{0.23} (F_c + 18)}{M/(Q \cdot d) + 0.12} + 0.85 \sqrt{p_w \cdot \sigma_{wy}} \right\} b \cdot j \quad (8)$$

※注: 単位を N, mm とするため第2項の係数は原式の2.7から0.85に修正されている。

圧縮軸力が作用する柱では、軸力の効果でせん断耐力が上昇することが知られており、梁部材実験結果から導かれた式(7)または式(8)によるせん断耐力  $Q_b$  に軸力の効果  $0.1 \sigma_0 b j$  を累加した式(9)が広沢雅也博士により提案されている。また、耐震壁のせん断耐力式として、式(8)を一部修正した式(10)なども提案されている。

$$Q_c = Q_b + 0.1 \sigma_0 \cdot b \cdot j \quad (9)$$

$\sigma_0$ : 平均軸応力度

$$Q_w = \left\{ \frac{0.068 p_w^{0.23} (F_c + 18)}{\sqrt{M/(Q \cdot d) + 0.12}} + 0.85 \sqrt{p_w \cdot \sigma_{wy}} + 0.1 \sigma_0 \right\} t_c \cdot j_c \quad (10)$$

### c) 耐震診断基準<sup>6)</sup>

また、既存建築物の耐震診断基準<sup>6)</sup>や耐震改修設計指針でも柱・梁のせん断強度式として、式(7)が採用されている。

以上のように、荒川式は現在も鉄筋コンクリート部材のせん断耐力の評価やせん断設計など構造設計・耐震診断などの実務に広く用いられている。

## 3. トラス・アーチ理論に基づくせん断耐力評価式

### 3.1 はじめに

2章で述べたように、建築分野の鉄筋コンクリート部材のせん断設計は、荒川式を中心とした実験式に基づいて行われており、現在でもこれらの実験式が実務で用いられている。一方で、鉄筋コンクリート部材のせん断破壊を解析的なアプローチで扱う研究も古くから行われてきた。1970年代後半ごろからは、Thurlimann<sup>7)</sup>やNielsen<sup>8)</sup>による極限解析のせん断強度への適用、Collins<sup>9)</sup>によるコンクリートの圧縮場理論などの研究、我が国においては、加藤・称原<sup>10)</sup>、若林・南<sup>11)</sup>による圧縮場理論を適用したトラス・アーチ理論式の研究など、多くの研究が行われてきた。

このような背景の中、日本建築学会では、新しい鉄筋コンクリート造建物の耐震設計法として、終局強度型耐震設計指針(以下、終局強度指針。1988年に指針(案)が刊行)<sup>12)</sup>の開発が行われた。この中で、せん断強度式には、従来から慣用されていた実験式に変わり、理論式を採用するための検討が行われ、いずれもトラス・アーチ理論に基づくA法およびB法と呼ばれる2つの設計法が採用された。これらのせん断耐力式は、力学モデルに基づいて式が構成されているため、各パラメータの物理的な意味が明確で理解がしやすいという点がメリットである。本章では、この終局強度指針に採用されたせん断強度理論式について紹介をする。

### 3.2 倉本・南の研究(終局強度指針B法)

倉本・南は文献13)において、若林・南が提案したせん断強度理論(以下、若林・南理論)に基づいてせん断強度式を提案し、その精度や適用範囲および有効性を示した。このせん断強度式は、終局強度指針のせん断設計法の中でB法として採用されている。

若林・南理論では、梁のせん断抵抗機構として図-5のように“はり機構”と“アーチ機構”の2つを考慮し、極限解析の下界定理に基づいて、力のつり合いと材料の降伏条件からそれぞれの機構が負担する軸力  $N$ 、せん断力  $Q$  および曲げモーメント  $M$  を求め、それらを累加する

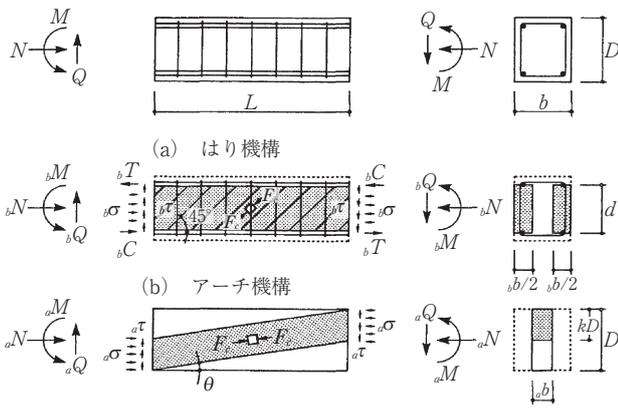


図-5 若林・南式によるせん断抵抗機構 (文献13)より引用

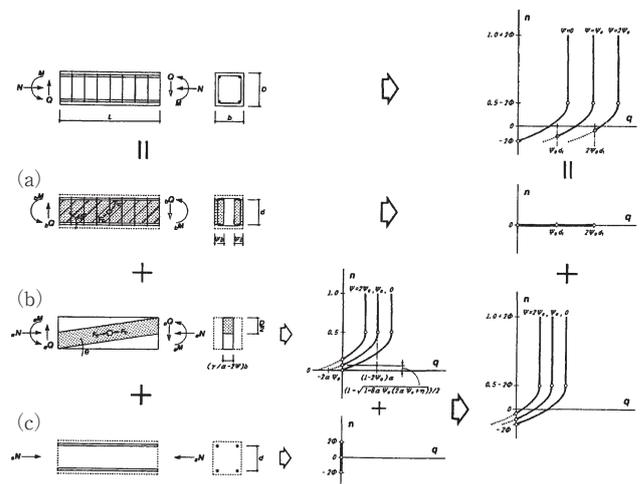


図-7 修正南式によるせん断抵抗機構 (文献13)より引用

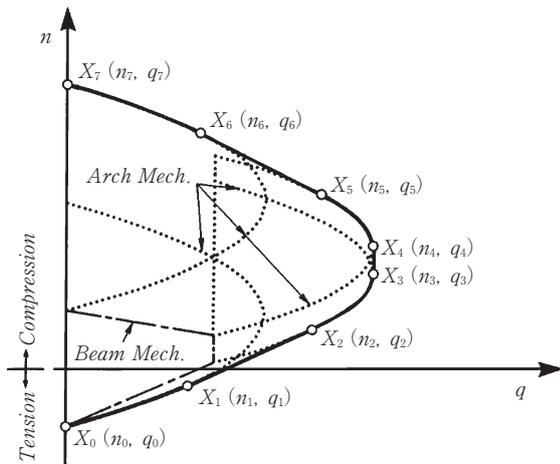


図-6 若林・南式による  $n$ - $q$  相関曲線 (文献13)より引用

ここで部材耐力を求める。軸力  $N$ 、せん断力  $Q$  を部材断面積とコンクリート強度の積 ( $b \cdot D \cdot F_c$ ) で基準化した基準化軸力  $n$  と基準化せん断力  $q$  の相関曲線が図-6のように示されている。なお、これらの式の詳細な導出過程については、文献13)を参照されたい。若林・南式では、図-6中の  $X_0 \sim X_2$  および  $X_5 \sim X_7$  の領域は主筋の引張または圧縮強度で決まる曲げ強度で部材耐力が決定されることになり、曲げ破壊とせん断破壊のいずれかで部材耐力が決定される部材が対象の耐力評価となる。

終局強度指針<sup>12)</sup>など、部材の靱性を確保する設計法では、まず部材の曲げ耐力を決定した後、せん断破壊を防止し靱性を保証するというように、曲げ設計とせん断設計を分離して行うのが一般的である。そこで、倉本・南は、若林・南理式を修正し、曲げ強度とは独立したせん断強度を評価する実用的なせん断強度式を提案した。

$$Q_{su} = b \cdot d \cdot p_w \cdot \sigma_{wy} + (\gamma - 2\alpha \cdot \psi) b \cdot D \cdot F_c \quad (11)$$

ここで、

$$\gamma = \begin{cases} \left\{ \sqrt{4(n+2\Phi)(1-n-2\Phi) + \eta^2} - \eta \right\} / 2 & (n \leq 0.5 - 2\Phi) \\ \alpha = \left( \sqrt{1 + \eta^2} - \eta \right) / 2 & (n > 0.5 - 2\Phi) \end{cases}$$

$$\Phi = p_t \cdot \sigma_y / F_c$$

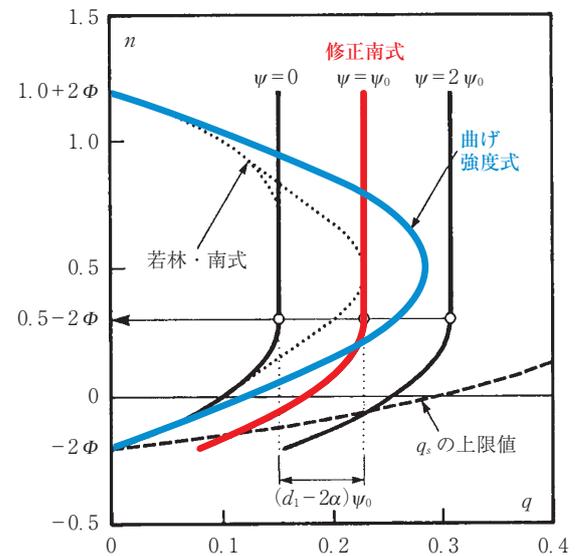


図-8 修正南式による  $n$ - $q$  相関曲線 (文献13)より引用し加筆

$$\psi = p_w \cdot \sigma_{wy} / F_c$$

$$\eta = L/D$$

$\sigma_y$ : 主筋の降伏強度,  $L$ : 部材の内法スパン,  $D$ : 部材せい

文献13)では、このせん断強度式を修正南式と呼んでいる。修正南式では、せん断抵抗機構を図-7のように修正している。すなわち、はり機構(図-7(a))では、主筋は無限に強いと仮定して、曲げとせん断力のみを負担すると仮定する。アーチ機構(図-7(b)および(c))は、曲げ・せん断・軸力を負担するコンクリートの斜め圧縮束材(同図(b))および軸力のみを負担する主筋(同図(c))を仮定することで、曲げ降伏強度とは独立なせん断強度式を導いた。図-8に修正南式による基準化軸力  $n$  - 基準化せん断力  $q$  の相関曲線を示す。これにより、曲げ設計が終了した部材に対するせん断設計が可能となった。

### 3.3 市之瀬の研究 (終局強度指針 A 法)

市之瀬は文献14)において、倉本・南の研究と時期を同じくして、加藤・称原<sup>10)</sup>、若林・南<sup>11)</sup>の塑性理論に

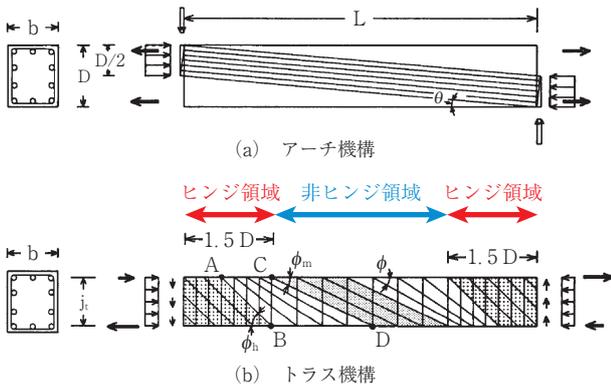


図-9 両端ヒンジ部材でのせん断抵抗機構  
(文献14)より引用し加筆)

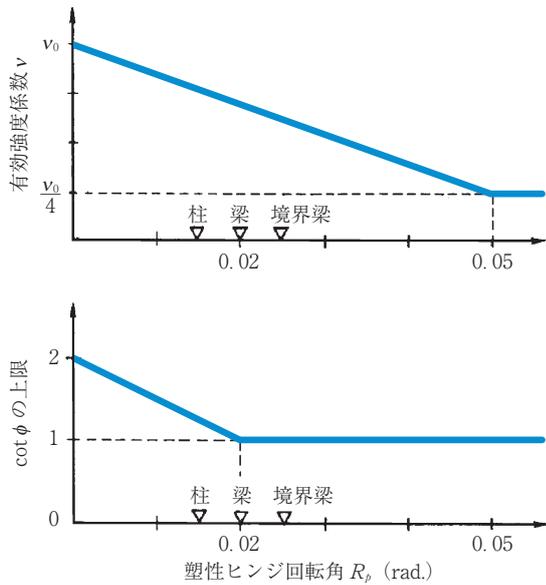


図-10 ヒンジ領域における有効強度係数  $v$  と  $\cot \phi$  の上限  
(文献14)より引用し加筆)

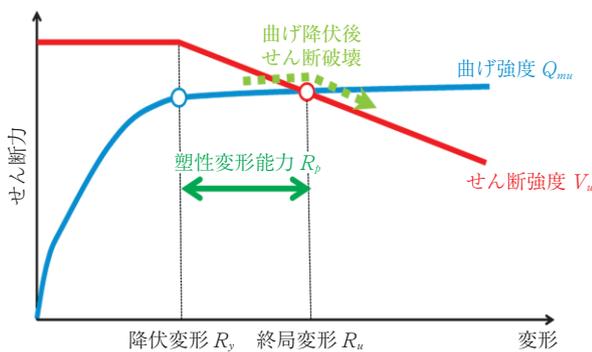


図-11 部材変形と曲げ強度・せん断強度の関係

基づくせん断強度式を提案している。

市之瀬の提案したせん断強度式は、トラス機構（はり機構）とアーチ機構に基づき、主筋の降伏を無視して曲げ設計とせん断設計を分離できるようにした点は、倉本・南の提案と概ね同様である。市之瀬の提案式の特徴は、以下である。

まず第一に、トラス機構の角度  $\phi$  を  $45^\circ$  に固定せず

Thurlimann<sup>7)</sup> の研究に基づき  $26.5^\circ \sim 45^\circ$  ( $1 \leq \cot \phi \leq 2$ ) の間で変化させることにした。次に、Nielsen<sup>8)</sup> の研究に基づき次式のコンクリートの有効強度係数  $v$  を導入した。

さらに、図-9のように、曲げ降伏する部材に対して、ヒンジ領域と非ヒンジ領域という概念を導入し、図-10のようにコンクリート強度の有効係数やトラス機構の角度  $\cot \phi$  を部材の塑性ヒンジ変形角  $R_p$  の関数として低下させるという新しい概念を導入した。その結果として、図-11に示すように、曲げ降伏後の塑性変形の進展に従い強度低下するせん断強度式が導かれ、曲げ強度  $Q_{mu}$  = せん断強度  $Q_{su}$  となる点を曲げ降伏後のせん断破壊の発生点とみなして、部材の塑性変形能力を陽な形で評価できるせん断設計法が提案された。市之瀬の提案式を以下に示す。

$$Q_s = b \cdot j_i \cdot p_w \cdot \sigma_{wy} \cdot \cot \phi + \tan \theta (1 - \beta) b \cdot D \cdot v \cdot \sigma_B / 2 \quad (12)$$

ここで、

$$\tan \theta = \sqrt{(L/D)^2 + 1} - L/D$$

$$\beta = \frac{(1 + \cot^2 \phi) p_w \sigma_{wy}}{v \cdot \sigma_B}$$

$j_i$ : 主筋中心間距離,  $\sigma_B$ : コンクリート圧縮強度 (単位は  $\text{kgf/cm}^2$ )

降伏ヒンジを計画しない部材では、

$$v = v_0 = 0.7 - \frac{\sigma_B}{2000}$$

$$\cot \phi = \min \left\{ 2, j_i / (D \cdot \tan \theta), \sqrt{v \sigma_B / (p_w \sigma_{wy})} - 1 \right\}$$

降伏ヒンジを計画する部材では、

$$v = \begin{cases} (1 - 15R_p)v_0 & (0 < R_p \leq 0.05) \\ 0.25v_0 & (0.05 < R_p) \end{cases}$$

$$\cot \phi = \begin{cases} 2 - 50R_p & (0 < R_p \leq 0.02) \\ 1 & (0.02 < R_p) \end{cases}$$

### 3.4 終局強度指針における A 法・B 法の比較と位置付け

日本建築学会の終局強度指針<sup>12)</sup> では「6章 せん断と付着に対する設計」において、市之瀬の提案式が A 法、倉本・南の提案式が B 法として採用されている。この指針 6 章では、塑性理論の下界定理に基づく 2 つの案が提案され、種々の検討が加えられたこと、また、両案の比較などの詳細が解説されている。

図-12 は、A 法・B 法の 2 案によるせん断強度と横補強量  $p_w \sigma_{wy}$  の関係を示したものである。B 法はトラス機構の角度を  $45^\circ$  で一定値としているため、せん断強度が直線的に増加するのに対して、A 法は  $\cot \phi$  が変化するため、部分的に曲線的に増加する。また、コンクリート強度有効係数が異なることから、A 法と B 法の大小関係は一定ではないが、おおむね同程度のせん断強度を与えることが示されている。

A 法と B 法によるせん断強度式の実験結果の推定精

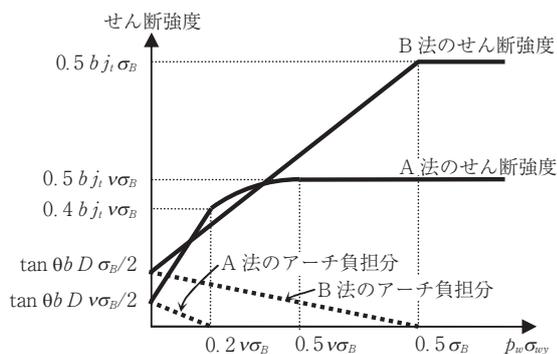


図-12 A法とB法によるせん断強度の比較

度は同程度であり<sup>12)</sup>、いずれもせん断強度の実験値の概ね下限値を評価することができる式であるが、終局強度指針<sup>12)</sup>では、横補強量  $\rho_w \sigma_{wy}$  が小さい範囲で安全側（小さめ）の強度を与えることなどからA法をせん断設計の本文に採用し、解説でA法・B法の両者を紹介している。

構造設計の実務では、過去の設計慣行からの連続性や、式の構成が簡単で計算しやすいなどの理由から、現在でも荒川式（実験式）が用いられることも多いが、高層RC造建物の設計などでは、トラス・アーチ理論式も幅広く用いられている。また、鉄筋コンクリート梁・柱部材のせん断破壊のメカニズムやせん断抵抗機構の解明や技術者に対する普及に大きく貢献をした研究であるとも位置付けることができる。

#### 4. ま と め

本稿では、我が国の建築分野における鉄筋コンクリート部材のせん断強度式について、現在の耐震設計などで用いられている耐力評価式を中心にその発展に大きく貢献した研究を紹介した。1960年から1970年にかけての部材実験結果の分析や統計処理に基づく実験式、そして、1980年代のせん断抵抗機構であるトラス機構・アーチ機構に塑性理論を適用した理論式へと発展してきた。最近では、鉄筋コンクリート構造の研究に、この当時ほどの熱気が感じられないように筆者には感じられることがある。これは、裏を返せば、本稿で紹介した研究成果のためにRC分野が大いに発展し、重要な研究課題があ

まり残っていない、ということが言えるのかもしれない。しかしながら、2011年東日本大震災による被災建物の事例を見ても、まだまだ解明されていない被害や防止すべき被害がたくさん残っている。また、部材の降伏変形や終局変形、付着割裂破壊強度など力学モデルに基づく評価法、ひび割れ量などの損傷評価など、未解明の研究テーマも残されていると思われる。将来を担う若手の技術者・研究者には、新たな研究課題に積極的にチャレンジし新しい時代を切り開いて頂くことを期待する。

末筆ながら、本稿で紹介させていただいた諸先生方の研究業績に敬意を表する。なお、本稿の内容の一部は、筆者の大学院生時代の記憶や第三者からの伝聞も含まれている。筆者の理解不足や記憶違いがあれば、ご寛容いただくとともにご指摘・ご指導いただければ幸いである。

#### 参考文献

- 1) 荒川 卓・大野和男：新載荷方式による鉄筋コンクリート梁の剪断抵抗について、日本建築学会論文報告集、第57号、pp.581～584、1957.7
- 2) 荒川 卓：鉄筋コンクリート梁のせん断抵抗に関する研究（実験結果の総括）、日本建築学会論文報告集、第66号、pp.437～440、1960.10
- 3) 荒川 卓：鉄筋コンクリートばりの許容せん断応力度とせん断補強について—実験結果による再検討—、コンクリート・ジャーナル、Vol.8、No.7、pp.11～20、1970.7
- 4) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説、1971
- 5) 日本建築防災協会・日本建築センター：2007年版 建築物の構造関係技術基準解説書、2007
- 6) 日本建築防災協会：2001年改訂版 既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準・同解説、2001
- 7) Thurlimann, B.: Plastic Analysis of reinforced Concrete Beams, Introductory Report of IABSE COLLOQUIUM KOPENHAGEN 1979, Plasticity in Reinforced Concrete, pp.71-90, 1979
- 8) Nielsen, M. P.: Limit Analysis and Concrete Plasticity, Prentice-Hall, pp.205-215, 1983
- 9) Collins, M. P.: Toward a Rational Theory for RC Members in Shear, Proceedings ASCE, Vol.104, No.ST 4, pp.649-666, 1978
- 10) 加藤 勉・称原良一：鉄骨鉄筋コンクリート部材の耐力、日本建築学会論文報告集、第266号、pp.19～26、1978.4
- 11) 若林 實・南 宏一：コンクリート系構造部材のせん断強度について、京都大学防災研究所年報、第24号B-1、pp.245～277、1981.4
- 12) 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
- 13) 倉本 洋・南 宏一：塑性理論を応用した鉄筋コンクリート部材の実用せん断設計式、日本建築学会構造系論文報告集、第417号、pp.31～45、1990.11
- 14) 市之瀬敏勝：変形能力を考慮したRC部材のせん断設計法、日本建築学会構造系論文報告集、第415号、pp.53～62、1990.9