

大断面 RC 基礎部材と寸法効果

寺井雅和*

Scale Effect of Large-Scaled Reinforced Concrete Foundation Members

Masakazu TERAI*

ABSTRACT

As appeared in fracture phenomena of compression, flexural and shear failure, the scale effect is probably the most important manifestation in view of the structural safety. So, many experiments about the scale effect of RC structures have so far been carried out. However, since load devices have little capacity for testing large-scale specimens, the experiments of large dimension RC columns similar to actual load conditions have been seldom carried out. This paper presents the experimental and analytical work on elasto-plastic behavior of the full scale RC column. Moreover, it compares these experimental results with the experimental ones of the scaled model, and the scale effect on the ultimate strength of RC column is studied. Using of test data of monotonic compression strength of plane concrete, the equation for the shear strength of reinforced concrete members is proposed. As a result of calculating the ultimate strength by the existing equations, it turned out that the equation proposed in this study is in better agreement.

キーワード：鉄筋コンクリート，寸法効果，せん断強度

Keywords : Reinforce Concrete, Scale Effect, Shear Strength

1. はじめに

一般に、鉄筋コンクリート（以下、RC）部材などのコンクリート系構造物では、部材の寸法が大きくなるにしたがって、その強度が低下する場合が多く、この現象を寸法効果という。寸法効果は圧縮・曲げ・せん断等のそれぞれの破壊現象に現れるが、原因やメカニズムについては不明な点が多く、現象の解明や、これを考慮した算定式の確立が求められている。耐震設計法を含めた設計法の開発過程において、問題となる一つの点は、せん断設計式をどのような形で定式化するかである。この設計法の確立にあたって、せん断の問題をどの程度の範囲まで理論的に使えるかが、設計法の成否のキーポイントとなる。

RC 構造運営委員会内の「RC 基礎部材の構造性能検討小委員会」では、大断面基礎部材を有する建築物の設計に際しての検討項目の一つとして、『耐力・変形性

能に及ぼす寸法効果の検討』をあげている。寸法効果そのものは古くから知られていたが、建築構造物の構造設計体系においては、既存の手法で寸法効果については深く検討されずにきた。なぜなら、建築部材の断面はせいぜい 1000mm であるため、これまでの設計式においてはこの程度の断面寸法では、それほど強度低下はないと考えられた。また大断面となる基礎梁については、剛強に設計すればよかったので、寸法効果は特に問題にしなくとも、十分安全側に設計することができた。しかしながら、近年、建築物の大規模化・大型化・高層化が進められており、建築構造物でも、1000mm を超える大断面部材が使用されている。

本稿では、RC 構造物の大断面部材について、耐力・変形性能に及ぼす寸法効果の検討を行う。はじめに、寸法効果に関する国内外の研究の現状をレビューする。次に、各種耐力評価式において、寸法効果がどのよう

*建築学科

※本稿は、2006 年度日本建築学会大会におけるパネルディスカッション資料をもとに、レイアウトしなおしたものである。

に扱われているかについて検討し、大断面部材を有する建築物の設計に際して、何を今後検討しなければならないかを述べることにする。

2. 寸法効果の研究

寸法効果は古くから知られていたが、日本で積極的に研究が行われ、体系的にまとめられたのは、1990年代であろう。(社)日本コンクリート工学協会の研究委員会の中に、「コンクリートの破壊力学研究委員会」「破壊力学の応用研究委員会」が設けられ、この中で寸法効果に対する評価が体系的に整理された。コンクリート構造物の大型化、高強度化が進み、寸法効果を実験によって確認することは、試験装置の能力から難しくなってくる。そこで、1990年以降、コンクリートの破壊力学によって、この問題を解決する動きが活発となる。破壊力学によると、コンクリート構造物の寸法効果は、破壊の局所化と、破壊領域でのエネルギー消費によって説明される。

この破壊力学に関しては、数多くの委員会報告¹⁾²⁾、雑誌のレビュー^{3)~8)}、単行本^{10)~12)}がでている。また、「コンクリート構造の破壊の力学国際会議」(FRAMCOS)が3年に一度開催されているが、破壊力学の応用の一つとして、寸法効果への適用が検討されており、数多くの研究成果が報告されている¹³⁾。なお、今回の会議は、第6回が2007年6月にイタリアで開催予定となっている。

寸法効果を直接的にまとめたものとしては、委員会報告¹⁴⁾、雑誌のレビュー¹⁵⁾¹⁶⁾がある。また、直接的ではないが、寸法効果に触れ、体系的にまとめられている文献^{17~20)}も参考になる。文献¹⁷⁾と¹⁸⁾は、コンクリート構造物の構造実験の手法および評価法に関する話がまとめられているが、試験体を製作するに当たり、モデル化とスケール、加力装置および計測方法などの様々な要因が実験結果に及ぼす影響について、検討される必要がある。そのことについて、文献¹⁷⁾では、第9章「Size Effects, Accuracy, and Reliability in Materials Systems and Models」と題して、寸法効果について50ページにわたり簡潔に紹介されている。また、文献¹⁸⁾では、第3章「静的構造実験の手法」のうち十数ページにわたり、寸法効果について触れられている。さらに、文献²⁰⁾では、第12章で「せん断耐力と変形能の算定比較」として、現行のせん断設計法において、寸法効果がどのように扱われているかを、国内外の土木、建築分野からいくつかの設計式を使い、その違いを定量的に比較検討している。

3. 構造規準に用いられている寸法効果

建築以外の既往のせん断設計法において寸法効果の

影響がどのように考慮されているかを確認するとともに、建築・土木両分野のせん断耐力評価式を比較することにより、その違いを定量的に比較し検討した。

3.1 せん断耐力評価式と寸法効果

従来、わが国で用いられてきた鉄筋コンクリート部材の実用的なせん断設計式は建築および土木のいずれの分野においても実験式に基づいたものである。建築では大野・荒川式、土木では岡村・檜貝式がそれぞれの基礎になっている。両分野の設計法では、かなりの違いがある。図1に示すように建築の分野では、せん断耐力を算定する場合に、大野・荒川式を用いる際には寸法効果に関係する因子である k_u という変数が含まれている。この変数は図1に示すように部材寸法が大きくなるに従って小さくなるが、その値は有効せい d が160mmで1.0、有効せい d が400mmで0.72となるように与えられている。この数値は当時の実験データに基づいて定められているものであるが、 $d=400\text{mm}$ 以上になればその低下の程度は一定になると述べている所が特色と言える。それに対して、土木の分野においてコンクリート標準示方書(土木学会式)を用いた場合、寸法効果に関係する因子である、部材有効高さの影響を調整する係数 β_d は1000mmのとき1.0で、それ以上の寸法に対して低下し、3000mmに対しては0.7となると述べていることが特色といえる。このように、同一の構造材料を取り扱っているにもかかわらず、両分野において、着眼している寸法効果の影響が異なっており算定式も異なっている²¹⁾。

世界に目を向けると、文献¹⁷⁾で紹介される寸法効果の影響を示したものが、表1であり、横軸を部材寸法 d にしてプロットしたのが図2である。この図では、部材の寸法が増大するにつれて、構造部材の相対的な強度は減少し、例えば $d=200\text{mm}$ の試験体の強度を1.0としたときには、 $d=1600\text{mm}$ のときには、その強度が半分(0.5)に低下することを示しているものである。

日本建築学会で出版している各種構造規準では、この寸法効果を陽な形で表現したものはなく、したがって、このような寸法効果に強度低下係数の導入が必要となるのであれば、何らかの検討を踏まえ、より合理的な設計法を提案するべきである。

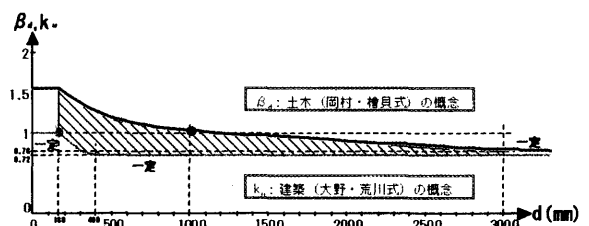


図1 日本の構造規準における寸法効果係数の違い

表 1 寸法効果に関する係数の一覧 17)

Code	Size Factor for Shear	Comment
CEB/FIP MC 90	$k = 1 + \sqrt{200/d}$	d in mm
Eurocode	$k = 1.6 - d > 1$	d in m
NEN (6720) (Netherlands)	$k = 1.6 - d > 1$	d in m
NS 3473 (Norway)	$k = 1.5 - d > 1$	d in m
BS 8110 (England)	$k = (400/d)^{0.25} > 1$	d in mm
DIN 1045 (Germany)	$k = \frac{0.2}{d} - 0.33 > 0.5 < 1.0$	d in m
BBK 79 (Sweden)	$k = 1$ $k = 1.6 - d$ $k = 1.3 - 0.4d$	For $d < 200$ mm For $200 < d < 500$ mm For $d > 500$ mm
Can. Std. '84	—	—
ACI	—	—
SIA (Switzerland)	—	—
DSA 411 (Denmark)	—	—

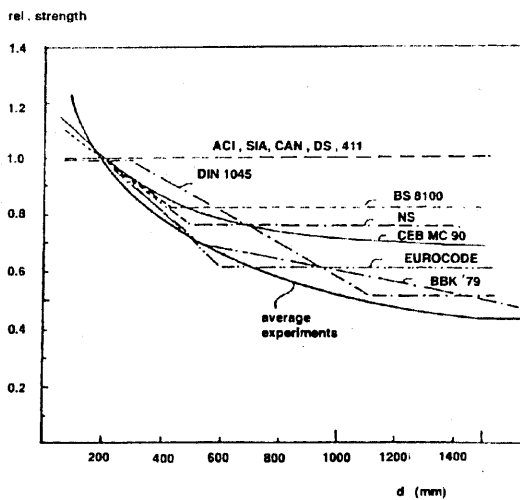


図 2 各国の構造規準に用いられている寸法効果の影響 17)

3.2 せん断耐力評価式

本節では、国内外におけるせん断耐力評価式を示す。a)から k)の 11 式を示すが、この中で寸法効果を考慮していないのは、日本では、b), c), g), 海外では k)である。その他の評価式では、何らかの形で寸法効果を考慮しており、個々の記号の説明は紙面の都合で省略するが、寸法効果の影響を考慮した係数部分だけ特記することにした。

a), i), j)は、寸法効果を考慮はしているものの、 $d=400$ mm ないしは 600 mm 以上では、強度低減を打ち止めしている。 1000 mm 以上の部材寸法に対して寸法効果を考慮しているのは、d), e), f), h)の 4 式である。a)大野・荒川式 22)

$$Q_{su} = \left\{ \frac{0.092k_u k_p (\sigma_B + 18)}{M/(Q \cdot d) + 0.12} + 0.85 \sqrt{p_w \cdot \sigma_{wy}} \right\} b \cdot j$$

k_u : 断面寸法による補正係数

b)建築センター構造計算指針 (修正荒川式) 23)

$$Q_{su} = \left\{ \frac{0.068 p_t^{0.23} (F_c + 18)}{M/(Q \cdot d) + 0.12} + 2.7 \sqrt{p_w \cdot \sigma_{wy}} + 0.1 \sigma_0 \right\} b \cdot j$$

c)建築学会終局強度型耐震設計指針(終局強度型 A 法)24)

$$V_u = V_a + V_t$$

$$\text{アーチ負担分: } V_a = \tan \theta (1 - \beta) b D v \sigma_B / 2$$

$$\text{トラス負担分: } V_t = b j_t p_w \sigma_{wy} \cot \phi$$

d)コンクリート標準示方書 (土木学会式) 25)

$$V_{yd} = V_{cd} + V_{sd}$$

V_{cd} : せん断補鋼強材を用いない棒部材の設計せん断耐力

$$V_{cd} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_n \cdot f_{vcd} \cdot b_w \cdot d / \gamma_b$$

$$\beta_d : \sqrt[4]{1000/d} \leq 1.5 \quad d: \text{mm}$$

V_{sd} : せん断補強により受け持たれる設計せん断耐力

$$V_{sd} = A_w f_{wyd} (\sin \alpha + \cos \alpha) \cdot z / s / \gamma_b$$

e)岡村・檜貝式 26)

$$V_{yd} = V_c + V_{wcd}$$

V_c : せん断補鋼強材を用いない棒部材の設計せん断耐力

$$V_c = 0.94 (f'_c)^{1/3} (0.75 + 1.40 d/a) (1 + \beta_d + \beta_p + \beta_n) b_w d$$

$$\beta_d : \sqrt[4]{1000/d} \quad d: \text{mm}$$

V_{wcd} : 斜め圧縮力によるウェブコンクリートの圧縮破壊耐力の設計用値

$$V_{wcd} = 0.3 f'_c b_w d / \gamma_b$$

f)道路橋示方書耐震設計編 27)

$$P_s = S_c + S_s$$

S_c : コンクリートが負担するせん断耐力

$$S_c = 10 C_c C_e C_{pt} \tau_c b d$$

C_e : 橋脚断面の有効高さ d に関する補正係数

$$d=1000\text{mm 以下} : C_e = 1.0$$

$$d=3000\text{mm} : C_e = 0.7$$

$$d=5000\text{mm} : C_e = 0.6$$

$$d=10000\text{mm 以上} : C_e = 0.5$$

S_s : 帯鉄筋が負担するせん断耐力

$$S_s = A_w \sigma_{sy} d (\sin \alpha + \cos \alpha) / 10 / 1.15 a$$

g)道路橋示方書コンクリート橋編 28)

$$S_{us} = S_c + S_s + S_p$$

S_c : コンクリートが負担できるせん断耐力

$$S_c = k \cdot \tau_c \cdot b_w \cdot d$$

S_s : 主方向に設計におけるせん断力に対して配置したともなせる斜引張鉄筋が負担できるせん断耐力

$$S_s = \Sigma (A_w \sigma_{sy} d (\sin \theta + \cos \theta) / 1.15 a)$$

S_p : PC 鋼材の引張力のせん断力作用方向の分力

$$S_p = 0 \text{ or } A_p \cdot \sigma_{pe} \cdot \sin \alpha$$

h)CEB-FIP モデルコード 29)

$$V_{cr} = 0.15(3d/a)^{1/3} \left(1 + \sqrt{200/d}\right) (100 \rho f_{ck})^{1/3} b \cdot d \quad d: \text{mm}$$

i) BS8110³⁰⁾

$$V_{cr} = 0.79(\rho f_{cu})^{1/3} (400/d)^{1/4} / \gamma_m \quad d \leq 400 \text{mm}$$

j) EUROCODE³¹⁾

$$V_{cr} = 0.0525 f_{ck}^{2/3} (1.2 + 0.4 \rho) (1.6 - d/100) / \gamma_m \quad d \leq 600 \text{mm}$$

k) ACI³²⁾

$$V_c = \left\{ 1.9 \sqrt{f'_c} + 2500 \rho_w \left(\frac{V_u d}{M_u} \right) \right\} b_w d < 3.5 \sqrt{f'_c} b_w d$$

3.3 せん断耐力評価式の比較

次に、せん断耐力評価式について、部材寸法を変化させたときのせん断耐力の変化を算出し、部材寸法がRC部材のせん断耐力に及ぼす影響を比較検討した。また、せん断耐力算定式の精度を検討するために、実験から得られたせん断耐力値を示し、各設計式から得られる耐力値を比較検討した。なお、この計算で用いた評価式は、大野・荒川式、土木学会式、そして、本稿5章で紹介する終局強度型A法を修正した3式である。修正A法とは、建築学会終局強度型耐震設計指針式におけるA法について、寸法効果を考慮に入れる形で修正した算定式である。

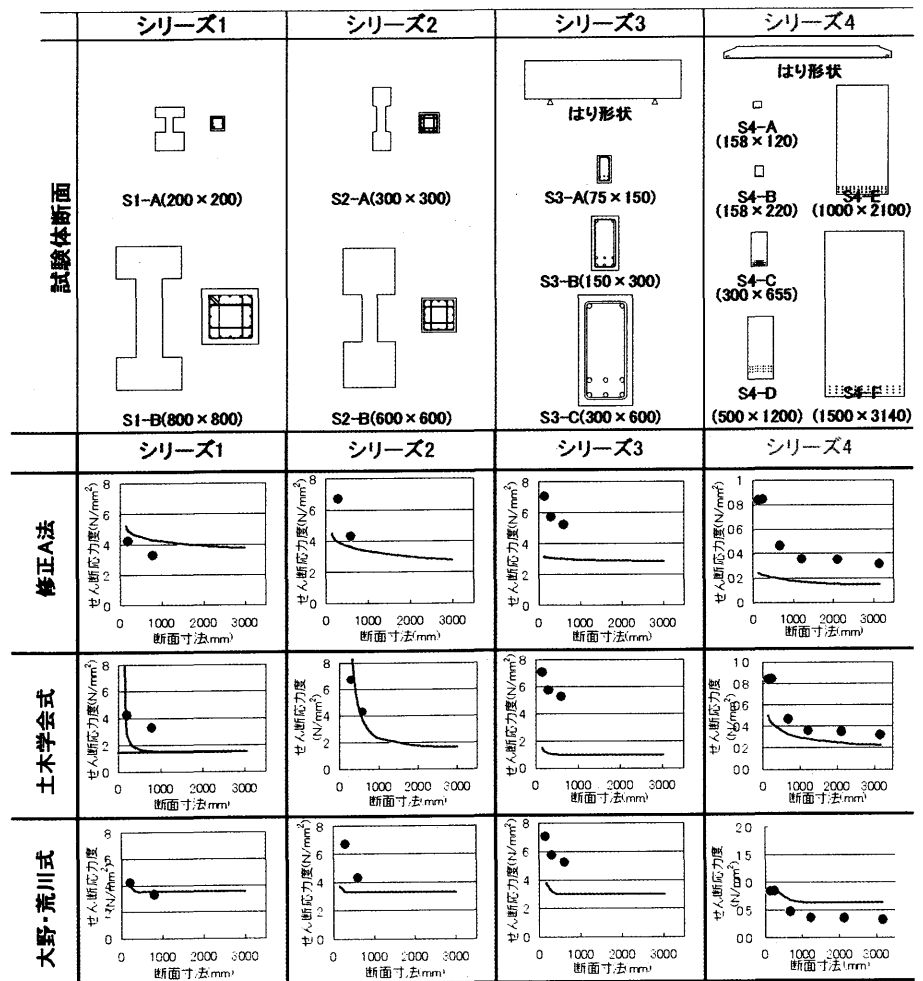
計算の対象とする実験供試体データは、実験諸元が入手できた4研究のものを利用した。試験体のシルエット、および断面内の配筋概要を、図3の上を示す。実験シリーズ1は、断面200×200mm(S1-A)、800×800mm(S1-B)のRC柱2体を取り上げる。200×200mmの試験体では、せん断破壊先行型、800×800mmの試験体では、曲げ降伏先行型で設計している。両試験体の荷重は、建研式二軸荷重装置で行った。実験シリーズ2は、試験体は断面300×300mm(S2-A)、600×600mm(S2-B)の2体を取り上げる。600×600mmの荷重は、実構造物が受けるものを模擬するため、変動軸力としている。両試験体の荷重は、建研式二軸荷重装置で行った。実験シリーズ3は、試験体は断面75×150mm(S3-A)、150×300mm(S3-B)、300×600mm(S3-C)のRC梁3体である。荷重は200tアムスラー試験機による単純支持はり形式の一方二点集中単調荷重とし、制御は荷重増分により行っている。実験シリーズ4は、

断面158×120mm(S4-A)、158×220mm(S4-B)、300×655mm(S4-C)、500×1200mm(S4-D)、1000×2100mm(S4-E)、1500×3140mm(S4-F)の6体である。支持条件は単純支持とし、ゴムバッグに水圧をかけパスカルの原理により等分布荷重を与えている。

図3の下に、今回検討したせん断耐力式3式における実験値/計算値を縦軸に、断面寸法を横軸にプロットしたものを示す。いずれの式においても、すべての実験値とよい適合を示しているものではなく、それぞれの試験体のもつ特性や実験要因をよく検討して、適用範囲や係数の修正が必要であると言える。

4. 寸法効果の原因と影響

文献18によれば、RC部材の強度において寸法効果が生じる要因には、①断面の長尺化に直接起因するものと、②縮小模型に用いた材料や配筋条件が実部材のそれらを完全にスケールダウンしたものとはなっていないことに起因するものの、大きく分けて2つあるとされる。このほかに、③模型実験時における、支持・拘束条件の違いや、④模型製作における施工環境の違い



●実験値 ———— 耐力評価式による算定値

図3 RC部材の各実験シリーズにおける断面寸法に関する検討

い、なども寸法効果を引き起こすと考えられ、これらの要因のいくつかが混在した形で、試験体の変形性能、ひび割れ特性に違いが現れることになり、これを寸法効果と解釈しているということが出来る。純粋に、①の要因だけを切り離して考えることが出来ればよいが、現実的には様々な要因が複雑に、相互に影響を与えているので、実験条件や試験体緒元をしっかりと見極めて、実験結果を解析しなければならない。なお、③と④の要因については、文献 17, 18 に詳しいので、本稿では割愛する。

寸法効果を引き起こすと考えられる要因は、文献 2, 14, 17, 18 などでもまとめられているが、各種要因のほかに、圧縮強度、引張強度、曲げ強度、せん断強度など、対象とする強度によっても、その影響要因は様々であり、また、プレーンコンクリート、RC、SRC、CFT など、構造形式によっても寸法効果を引き起こすとされる要因は異なっていると考えてよい。表 2 は、文献 2 や 14 などでもまとめられている、各種強度の寸法効果と主な原因である。次の 4.1 から 4.3 では、RC 部材のせん断強度について、比較的新しい知見を引用しながら、寸法効果を引き起こすと考えられる要因を整理する。

表 2 コンクリートの各種強度の寸法効果と主な原因²⁾

寸法効果の原因	強度の寸法効果			
	圧縮強度	引張強度	曲げ強度	RCはりのせん断強度
欠陥の確率分布	○	◎	○	○
エネルギー変換機構	◎	◎	○	○
コンクリートに特有な原因	引張軟化		◎	◎
	乾燥収縮		◎	
	骨材寸法	○	○	◎
	材料の偏り	○	○	○
水和熱	○	○	○	
載荷速度	○	○	○	◎

◎：特に強い関係あり ○：関係あり

4.1 骨材寸法と部材寸法の比と寸法効果

このコンクリート強度に及ぼす骨材寸法の影響については、1950年代以前から多くの実験が行われており、「骨材寸法が大きいほど強度が低下する」との結論が一般的となっており、現象論的な観点に基づく、実用上の資料はほぼ整っていると云える³³⁾。

RC 構造物の縮小模型における縮小化に伴う寸法効果を検討するためには、相似則に従う最大骨材粒径の縮小化と供試体寸法の縮小化がなされる必要がある。しかしながら、これまでの多くの研究では、RC 梁のせん断実験に用いられて試験体を対象にまとめた図 3 に示すように、供試体の有効高さが大きくなるにつれて、明らかに骨材の相対的な寸法が小さくなっている傾向があることを指摘している³⁴⁾。

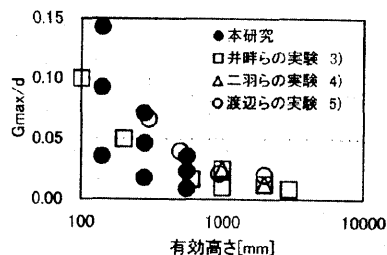


図 4 最大粗骨材寸法/有効高さとの関係³⁴⁾

林ら³⁴⁾は、骨材の最大寸法におけるせん断強度の最大値と比較すると差はあまりないが、最大粗骨材寸法と有効高さの比が小さくなると、せん断強度が低下するという傾向があることを指摘している。また、同一有効高さの供試体であれば、骨材の最大寸法が大きくなるにつれてせん断強度が上昇する傾向があることしている。

粗骨材寸法の影響を、耐力評価式の中で定量的に取り入れたものは数少ないが、Bazant ら³⁵⁾は、RC 部材に対する寸法効果則として、ひび割れ面のかみ合いによる粗骨材の影響を考慮し、次式を提案している。

$$V_u = V_s + V_c$$

$$= A_v f_{yv} / bs (\sin \alpha + \cos \alpha) + V_c^0 (1 + \sqrt{C_0/d_a}) / \sqrt{1 + d/\lambda_0 d_a}$$

d_a : 骨材最大径

また、CEB-FIP モデルコード²⁹⁾では、コンクリートの破壊エネルギー、引張軟化曲線を標準化している。破壊エネルギー G_F は、粗骨材の最大寸法に依存した算定式で表現されており、下式において α_F は粗骨材の最大寸法が大きいほど大きな値になっている。その結果、破壊エネルギーは粗骨材の最大寸法が大きいほど大きくなる。

$$G_F = \alpha_F (f_{cm}/f_{cm0})^{0.7}$$

4.2 せん断補強筋と寸法効果

基準強度 390N/mm² を超える高強度せん断補強筋の評定基準では、構造性能を実験による確認する場合の条件として、『試験体を用いた実験では、寸法効果の影響を除くため、出来る限り実大に近い部材寸法の試験体について実験を行うのが望ましく、試験体の大きさは、少なくとも 1/3 モデル程度以上とする。柱断面では 300×300mm 程度、はり断面では 200×400mm 程度が最小断面の大きさの目安となる。』と規定しているように、寸法効果の影響を建築構造物の性能評価の中で無視できない状況になってきている³⁶⁾。

柴田ら³⁷⁾による、RC 梁に関する実験では、高層建物の基礎梁を想定した応力場を対象にしており、本稿のテーマに最も関連ある研究の一つである。この一連

の研究では、加力方式、シアスパン比、コンクリート強度など数多くの影響要因が検討されているが、寸法効果についても検討されている。この中で、寸法効果の影響を見るために、断面寸法を100×300mm、150×450mm、200×600mmとした試験体を製作し、比較している。図5に示すように、ゆるやかなせん断強度の低下が確認できる。

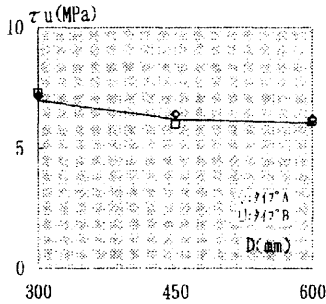


図5 せん断応力度と梁せいの関係³⁷⁾

4.3 コンクリート強度と寸法効果

近年の建築構造物の大型化ともなっており、使用材料の高強度化、高性能化も盛んに行われている。RC部材に超高強度コンクリートや超高強度鉄筋を使用することは、部材強度の増加や鉄筋量の節約による施工の合理化、省力化期待できるため、ここ数年の開発・研究トピックの一つと言える。このような中、高強度材料を使用することで、現行の各耐力評価式の適用範囲を超えるRC部材や構造物へのこれらの評価式の適用性について、検討する必要が出てきた。

阿部ら³⁸⁾は、せん断補強筋のないRCはり部材に対して、コンクリート強度100N/mm²、引張鉄筋にSD685を使用した、有効高さ150~650mmの試験体を作製して、実験をした。その結果、コンクリートが高強度となるにつれて、寸法効果の影響が強く現れることが確認されている。

藤田ら³⁹⁾は、コンクリート圧縮強度35~100N/mm²、有効高さ250~1000mmのせん断補強筋のないRC単純梁におけるせん断強度(せん断スパン比3)の寸法効果に関する検討を行った。その結果、せん断強度の寸法効果は、高強度コンクリートと中低強度コンクリートでは異なった。せん断強度の有効高さに対して、圧縮強度60N/mm²以下の中低強度コンクリートでは、有効高さの-1/4乗に、圧縮強度100N/mm²程度の高強度コンクリートでは、-1/2乗に比例する傾向があった。

5. 設計式の提案と適用・効果⁴⁸⁾

日本建築学会において「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」²⁴⁾(以下、終局強度指針)のA法、B法や「鉄筋コンクリート造建物の

靱性保証型耐震設計指針・同解説」⁴⁰⁾のせん断設計法などは、いずれも塑性理論の下界定理を展開したものであるが、実用的なせん断強度算定式として今日のわが国の設計法として取り入れられている。また、実験式による大野・荒川式もまた、RC部材の実用的なせん断耐力評価式として活用されている。しかしながら、これらいずれの式も寸法効果については考慮されていない。

既往の式を検証して寸法効果を考慮した修正式を提案している研究がいくつかある。佐藤ら⁴¹⁾は、せん断補強筋がないRCはり部材のせん断強度を破壊力学的アプローチに基づき、寸法効果は有効高さの1/2乗に比例するとしたせん断強度算定式を提案している。また、白井ら⁴²⁾は、せん断補強したRCはりの実験から寸法効果を評価する場合、ひび割れ面の破壊エネルギー(G_F)により評価することを確認し、破壊力学の概念を用いて建築学会の終局強度式A法を修正したせん断強度算定式を提案している。

これら二つの研究による提案式は、いずれもアーチ・トラス理論に基づいて導かれたものであるが、アーチ機構負担分に対して寸法の影響を考慮した形の算定式となっている。しかしながら、終局強度指針によれば、せん断強度は基本的にはトラス機構が主であり、補強筋が少ない場合のみにアーチ機構が付加的に成り立つとされている。そのため、補強筋量が多いRC部材においては寸法効果が考慮されないことになる。

以下では、筆者らが、終局強度式A法に対して提案した1つの研究事例を紹介する。

5.1 終局強度指針A法の修正

建築学会終局指針A法によると、部材のせん断強度(V_u)は、アーチ機構(V_a)とトラス機構(V_t)で計算される強度の和で表される。

$$V_u = V_a + V_t \quad (5-1)$$

$$\text{ここに、} V_a = \tan \theta (1 - \beta) b D v \sigma_B / 2 \quad (5-2)$$

$$V_t = b j_t p_w \sigma_{wy} \cot \phi \quad (5-3)$$

$$\tan \theta = \{ \sqrt{[(L/D)^2 + 1]} - L/D \} \quad (5-4)$$

$$\beta = \{ (1 + \cot^2 \phi) p_w \sigma_{wy} \} / (v \sigma_B) \quad (5-5)$$

ただし、 $p_w \sigma_{wy}$ が $v \sigma_B / 2$ を超える場合は、 $p_w \sigma_{wy} = v \sigma_B / 2$ とする。 σ_B はコンクリート強度、 σ_{wy} はせん断補強筋の強度で、 σ_{wy} が $25 \sigma_B$ を超える場合には $25 \sigma_B$ とする。 b, j_t, D, L は、それぞれ部材の幅、主筋中心間距離、全せい、内法長さで、 p_w は、せん断補強筋比である。また、 v はコンクリート圧縮強度の有効係数、 ϕ はトラス機構のコンクリート圧縮束の角度で、A法では以下による。

$$v = 0.7 - \sigma_B / 200 \quad (5-6)$$

$$\cot \phi = \min \{ 2.0, j_t / (D \tan \theta), \sqrt{v \sigma_B / (p_w \sigma_{wy})} - 1.0 \} \quad (5-7)$$

寸法効果を考慮するに当たって、白井ら⁴²⁾がRC

はりのせん断強度算定式で示したように、既往の強度式において、コンクリート強度を部材寸法に応じて低減補正する方法を考える。アーチ機構およびトラス機構におけるコンクリートの圧縮束の角度の違いを無視して、トラスおよびアーチのいずれかの機構に対して、部材幅が有効に寄与するものとして、塑性条件を導入する。そして、コンクリートの圧縮強度に対して寸法効果を考慮し、 λ を導入したコンクリートの公称強度を用いると、次式の関係が成り立つ。

$$\sigma_N = \lambda(v \cdot \sigma_B) \quad (5-8)$$

ここで、 λ は寸法効果に対する補正係数で、筆者らが行ったプレーンコンクリートの一軸圧縮強度の寸法効果実験より⁴³⁾より、次式で与える。

$$\lambda = -0.11 \ln(d) + 1.48 \quad (5-9)$$

トラス機構については、せん断補強筋が降伏していると仮定すると、トラス機構におけるコンクリート圧縮束の応力 σ_t (図6)は次式で与えられる。

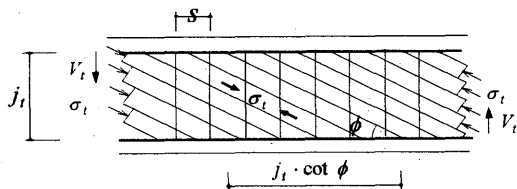


図6 トラス機構における釣合い²⁴⁾

$$\sigma_t = (1 + \cot^2 \phi) p_w \cdot \sigma_{wy} \quad (5-10)$$

(5-8)式と(5-10)式より $\sigma_N = \sigma_t$ とすると、次の関係が導かれ、

$$(1 + \cot^2 \phi) p_w \cdot \sigma_{wy} = \lambda(v \cdot \sigma_B) \quad (5-11)$$

これを(5-3)式に戻して整理すると、コンクリート強度をパラメータとした次式で表される。

$$V'_t = b \cdot j_t \cdot \lambda(v \cdot \sigma_B) \cot \phi / (1 + \cot^2 \phi) \quad (5-12)$$

一方、アーチ機構については、(5-2)式に(5-8)式を直接適用して次式で表す。

$$V'_a = \tan \theta (1 - \beta) b D \lambda (v \sigma_B) / 2 \quad (5-13)$$

以上より、修正した終局強度指針A法(以下、修正A法)は、次式で表される。

$$V'_u = V'_a + V'_t \quad (5-14)$$

$$V'_t = b \cdot j_t \cdot \sigma_N \cot \phi / (1 + \cot^2 \phi) \quad (5-15)$$

$$V'_a = \tan \theta (1 - \beta) b D \sigma_N / 2 \quad (5-16)$$

ここに、

$$\sigma_N = \lambda(v \cdot \sigma_B) \quad (5-17)$$

$p_w \sigma_{wy} > \sigma_N / 2$ の時は、 $p_w \sigma_{wy} = \sigma_N / 2$ とする。

$$\cot \phi = \min \{ 2.0, j_t / (D \tan \theta), \sqrt{\sigma_N / (p_w \sigma_{wy}) - 1.0} \} \quad (5-18)$$

$$\beta = \{ (1 + \cot^2 \phi) p_w \sigma_{wy} \} / \sigma_N \quad (5-19)$$

その他の記号や条件については、終局強度指針A法に準ずるものとする。

5.2 せん断強度の算定比較

提案した修正式について、部材寸法を変化させたときのせん断強度の変化を算出し、この要因がRC部材

のせん断強度に及ぼす影響を検討する。また、修正式の適用性を確認するために、既往の実験を用いた計算を行う。

提案した修正A法の妥当性に関して、文献41),42),44)-47)の実験結果を用いて検証する。ここで選定した試験体は、矩形断面の部材幅が75-800mmで、せん断破壊をしたRC部材27体である。ただし、このうち4体は曲げ破壊が先行したものが含まれている。また、軸力が作用したもの、せん断補強筋がないものも含まれている。

これら試験体の実験結果(せん断応力度; $\exp V_u / (b j_t)$)とせん断補強率($p_w \sigma_{wy}$)の関係を図7に示す。図中の●がせん断破壊したもの、○が曲げ破壊が先行したものである。また、図中の実線は終局強度指針A法によるアーチ機構負担分(網掛け部分)とトラス機構負担分を表したものであり、せん断補強率が0.2以上の場合に、アーチ機構負担分がゼロになるが、この領域に含まれる試験体は5体、またせん断補強筋がない場合、トラス機構負担分がゼロになるが、この試験体は9体である。なお、断面寸法が正方形でない部材については、式(5-8)による λ 値は部材高さ(長辺)を部材寸法 d として計算した。

図8に、土木学会式、終局強度指針A法、修正荒川式、修正A法によるせん断強度の計算結果と実験結果の比較を示す。土木学会式や修正荒川式は、計算値が安全側に評価されることがわかる。終局強度指針A法はおおむね実験結果を適切に評価しているが、そのばらつきはやや大きい。しかし、提案した修正A法によると、曲げ破壊が先行した3体を除けば、修正前のA法と比較して、概ね実験結果を適切に評価できることが確認できる。ただし、寸法効果を考慮し、低減修正している修正A法の方が終局強度指針A法よりも高い計算値を与えている場合がある。これは、トラス機構負担分の境界条件の検討が不十分であり、これを過大評価しているためと考えられるが、この問題に関する詳細な検討は今後あらためて行うこととした。

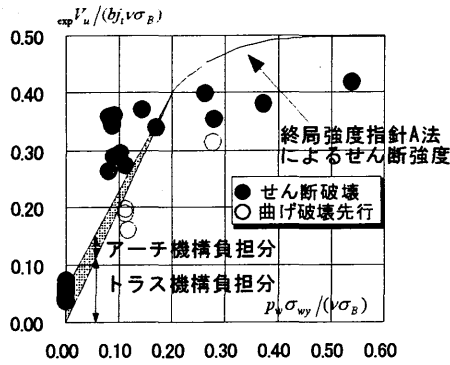


図7 検討対象試験体のせん断応力度とせん断補強率の関係

6. おわりに

本稿では、鉄筋コンクリート部材における寸法効果の検討を行った。はじめに、既往の寸法効果の文献について、まとめられているものをレビューした。次に、国内外のせん断設計法において、寸法効果がどのように考慮されているかを、具体的にせん断耐力算定式を示すとともに、建築・土木分野を代表する算定式を用いて、実験値と比較した簡単な評価を行った。さらに、RC部材のせん断強度に及ぼす寸法効果の原因を整理し、中でも、特に注意すべき、1)骨材寸法と部材寸法の比、2)せん断補強筋の影響、3)コンクリート強度の影響、の3点について、既往の研究例を引用しながら、寸法効果に影響を与える要因としてまとめた。最後に、日本建築学会の終局強度指針では、寸法効果の影響が考慮されていないが、簡単な概念と手法を用いて、アーチ機構とトラス機構それぞれの項に寸法効果を考慮に入れた修正式を提案した。既往式の修正に当たって、コンクリートの一軸圧縮強度の実験結果から部材寸法とコンクリート強度の関係を求め、この関係式をもとにせん断強度が部材寸法に依存して低減するという式を誘導した。提案した修正式の妥当性について、部材寸法がRC部材のせん断強度に及ぼす影響を検討し、実験結果との適合性について調べた結果、この式は従来から用いられている算定式よりも、実験結果を適切に評価できることが確認できた。

【参考文献】

- 1) 日本コンクリート工学協会：コンクリート破壊力学研究委員会報告，1990年
- 2) 日本コンクリート工学協会：破壊力学の応用研究委員会報告書，1993年
- 3) 三橋博三：委員会報告 コンクリートの破壊力学研究委員会報告，コンクリート工学年次論文報告集，12-1，1990
- 4) 三橋博三，白井伸明，六郷恵哲：解説 コンクリ

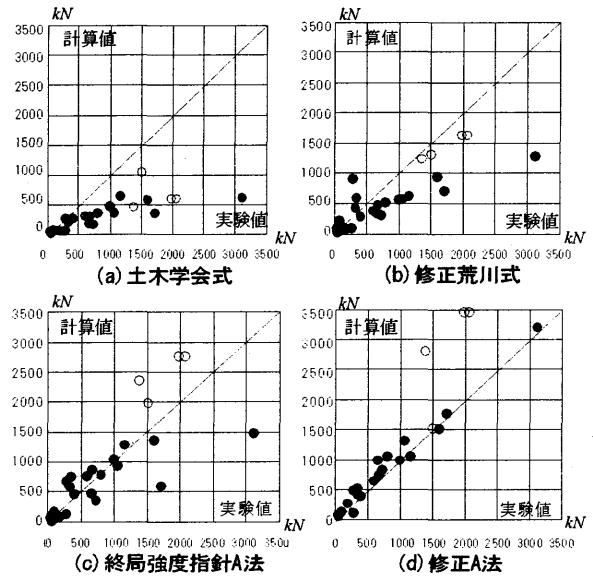


図8 せん断強度の計算値と実験値の関係

ート構造への破壊力学の応用，コンクリート工学，Vol.30，No.6，1992

- 5) 三橋博三：委員会報告 コンクリート構造への破壊力学の応用，コンクリート工学年次論文報告集，15-2，1993
- 6) 六郷恵哲，白井伸明，内田裕市：解説 コンクリートの破壊の数値解析の現状と課題，コンクリート工学，Vol.32，No.12，1994
- 7) コンクリート工学編集委員会：特集 コンクリート構造物のための破壊の力学の現状，コンクリート工学，Vol.37，No.9，1999
- 8) 下野一行：文献調査 コンクリートへの破壊力学の応用に関する研究の動向，コンクリート工学，Vol.39，No.4，2001
- 9)
- 10) H.Mihashi, H.Okamura and Z.P.Bazant : Size Effect in Concrete Structures, E & FN Spon, 1994
- 11) Z.P.Bazant and J.Planas : Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quasibrittle Materials, CRC Press, 1998
- 12) Z.P.Bazant : Scaling of Structural Strength, HERMES PENTON SCIENCE, 2002
- 13) 例えば，Ed. by H.Mihashi and K.Rokugo : Fracture Mechanics of Concrete Structures (FRAMCOS-3) , Vol.1-3 , AEDIFICATIO Publishers, 1998
- 14) 土木学会コンクリート委員会寸法効果小委員会：コンクリートの寸法効果と引張軟化曲線，コンクリート技術シリーズ，No.18，1997

- 15) 塩屋俊幸, 長谷川俊昭: 解説 コンクリート構造物の寸法効果, コンクリート工学, Vol.30, No.8, 1992
- 16) 二羽淳一郎: コンクリート部材の破壊と寸法効果, コンクリート工学, Vol.37, No.9, 1999
- 17) H.G.Harris, G.M.Sabnis: Structural Modeling and Experimental Techniques, Second Edition, CRC Press, 1999
- 18) 日本コンクリート工学協会: コンクリート構造物の構造実験評価研究委員会報告書, 2004
- 19) 日本コンクリート工学協会: 建築・土木におけるコンクリート構造物の設計・施工法の統一 研究委員会報告書, 2001
- 20) コンクリート工学編集委員会: 特集 コンクリート構造物の実験, コンクリート工学, Vol.39, No.9, 1999
- 21) 前川晴郁, 寺井雅和, 南宏一: RC 部材の既往の実験データに基づく寸法効果に関する一考察, 日本建築学会中国支部研究報告集, 第 27 巻, pp.405-408, 2004
- 22) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 1991
- 23) 日本建築センター出版部編: 構造計算指針・同解説 1991 年版, 1993
- 24) 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
- 25) 土木学会, コンクリート標準仕様書 [構造性能照査編], 丸善(株), 2002
- 26) Okamura, H. and Higai, T.: Proposed Design Equation for Shear Strength of Reinforced Concrete Beams without Web Reinforcement, Proc. of JSCE, No.300, 1980.
- 27) 日本道路協会: 道路橋示方書 (V耐震設計編) 同解説, 2002
- 28) 日本道路協会: 道路橋示方書 (I 共通編, III コンクリート橋編) 同解説, 2002
- 29) CEB: CEB-FIP Model Code 1990, Final Draft, Comite Euro-International du Beton, Bulletin D'Information, No.203-205, Lausanne, 1991
- 30) British Standards: BS8110-3:1985, 1985
- 31) A.W.Beeby and R.S.Narayanan, Designers Handbook to Eurocode2, Thomas Telford, 1995
- 32) ACI-ASCE Committee 426, The Shear Strength of Reinforced Concrete Members, ASCE St.Div. Vol.99, ST6, 1973
- 33) 谷川恭雄, 山田和夫: コンクリートの圧縮強度の寸法効果について, 日本建築学会論文報告集, 第 262 号, pp.13-21, 1977.12
- 34) 林和彦, 織地啓, 山口隆裕, 池田尚治: 鉄筋コンクリート部材のせん断挙動に及ぼす寸法効果について, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.3, pp.973-978, 2001
- 35) Z.P.Bazant and H.-H.Sun: Size Effect in Diagonal Shear Failure: Influence of Aggregate Size and Stirrups, ACI Material Journal, pp.259-272, 1987.7-8
- 36) (財)日本建築センター評定部: 基準強度 $4,000\text{kg/cm}^2$ を超える高強度せん断補強筋の評定基準(案), ビルディングレター, 6月号, pp.15-19, 1996
- 37) 柴田拓二, 城攻, 後藤康明, 佐藤武: 斜張力が支配的となる鉄筋コンクリート梁のせん断抵抗性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.18, No.2, pp.659-664, 1996
- 38) 阿部祐規, 伊藤堅生, 松原一美, 鈴木基行: 超高強度材料を用いたせん断補強鉄筋のない RC はり部材のせん断耐力に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.21, No.3, pp.181-186, 1999
- 39) 藤田学, 大館武彦, 松元香保里: RC 梁のせん断強度の寸法効果に及ぼす破壊エネルギーの影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.3, pp.751-756, 2001
- 40) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説, 1999
- 41) 藤田学, 佐藤良一ほか: 高強度コンクリートを用いた RC はりのせん断強度と寸法効果, 土木学会論文集 No.711/V-56, pp.161-172, 2002.8
- 42) 白井信明, 森泉和人ほか: 超大型寸法を考慮した RC 梁のせん断強度の寸法効果 (その 2) 破壊力学概念を用いたせん断強度式, 日本建築学会 1997 年度大会 (関東) 学術講演梗概集, 構造 IV, pp.285-286, 1997.9
- 43) 永富泰宏, 寺井雅和, 南宏一: 無筋コンクリートの圧縮破壊性状に及ぼす寸法効果に関する実験的研究, 日本建築学会中国支部研究報告集, 第 24 巻, pp.45-52, 2001.3
- 44) 寺井雅和, 永富泰宏, 爰河知紀, 南宏一: 変動軸力を受ける実大 RC 柱の弾塑性挙動に関する実験的研究 (その 1, 2, 3), 日本建築学会 2001 年度大会 (関東), pp.381-386, 2001.9
- 45) 山下祐司, 桑田祐次, 南宏一ほか: 8000kgf/cm^2 級の高強度せん断補強筋を用いた鉄筋コンクリート柱のせん断破壊性状に関する実験的研究 (その 1~5), 日本建築学会学術講演梗概集, C-2, pp.1-10, 1997.9

- 46) Alcantara Primo Allan and Hiroshi Imai: Failure Mode Classification of RC Columns by the Analysis of the Main Bar Strain Distribution Based on the Truss and Arch Model, Concrete Research and Technology, Vol.10, No.2, pp.13-28, 1999.5
- 47) 中谷誠, 荒木秀夫ほか: 石炭灰を使用した実大鉄筋コンクリート柱の耐震性能 その 1. 実験概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北陸), C-2, pp.343-345, 2002.8
- 48) 寺井雅和, 南宏一: 鉄筋コンクリート部材のせん断強度と寸法効果に関する一研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.2, pp.1201-1206, 2003