

RC 部材のせん断強度の寸法効果に関する一研究

前川 晴郁* 寺井 雅和** 南 宏一***

Study on Scale Effect of Shear Stress of Reinforced Concrete Members

Haruka MAEGAWA*, Masakazu TERAI** and Koichi MINAMI***

ABSTRACT

In architecture and engineering works, there are differences of the concept of the reduced factor to the shearing. Then, in this paper, the size effect of architecture and engineering works is examined based on the study in the past. In addition, the examination policy in the future for the establishments of a common shear design method in architecture and engineering works is described. Three expressions of Terai and Minami expression, the Civil Engineering academy expression, and Ono and Arakawa expression were used to know the difference of the experiment value and the theory value. The relation between the shear strength and the section size of each experiment series was shown, reduced factor k_u concerning the size effect of Ono and Arakawa expression was substituted for the Civil Engineering academy expression βd , and the relation was examined. As a result, the Civil Engineering academy expression has adaptability with the experiment value, and It was able to be confirmed that the examination was necessary about Ono, Arakawa expression, and Terai, Minami expression. The decrease in shearing unit stress will be forecast to the section of about 3000mm in the future. Therefore, it is necessary that the correction of the reduced factor etc. of Ono and Arakawa expression is considered of the influence of the size effect.

キーワード：せん断強度，鉄筋コンクリート，寸法効果，終局強度

Keywords: Shear Strength, Reinforced Concrete, Scale Effect, Ultimate Strength

1. はじめに

一般的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ケースが多く、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。

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 [1]、土木では岡村・檜貝式 [2] 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 [3]。図 1 に示すように建築の分野では、せん断

* 大学院建築学専攻 ** 建築学科 *** 建築学科

耐力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で1.0で、それ以上の寸法に対しても低下し、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。

本論文では、せん断に対し建築と土木の分野における設計法の違いや、既往の研究論文を元に、寸法効果がどのように扱われているかについて検討し、土木および建築の両分野を含んで統一された、せん断設計法の確立について、何を今後検討しなければならないかを述べるものである。

2. 寸法効果について

寸法効果の現象は実験的に1900年代の初期から知られており、理論的研究も進んできている。理論的考察に基づいた一般解の提案としては、Bazantの寸法効果則とCarpinteriの寸法効果則等がある(図2)[4]。寸法効果には様々な因子が関係しており、材料欠陥の確率分布・破壊領域の局所化・コンクリート特有の不均質性が挙げられる。コンクリート構造体強度の寸法効果に関する研究の多くは、現在では、コンクリートの破壊力学に基づいて、解析的あるいは数値的に取り扱われるようになってきているが、せん断破壊を純粹に理論的に取り扱うことは、かなり困難である。コンクリートの破壊力学に関する研究の中で、最も期待されている応用分野が、コンクリート構造体強度の寸法効果の予測である。実験結果による解析において、既往の実験データでは、小さい試験体のデータがほとんどで、実大に近い寸法で行われたデータが少ないことが問題である。原因としては、実験を行える試験機が少ないことや、これまでの考えでは30cm程度の断面で充分評価できると考えられていたからである。それをふまえ、実用的な算定式や低減係数の確立が必要である。

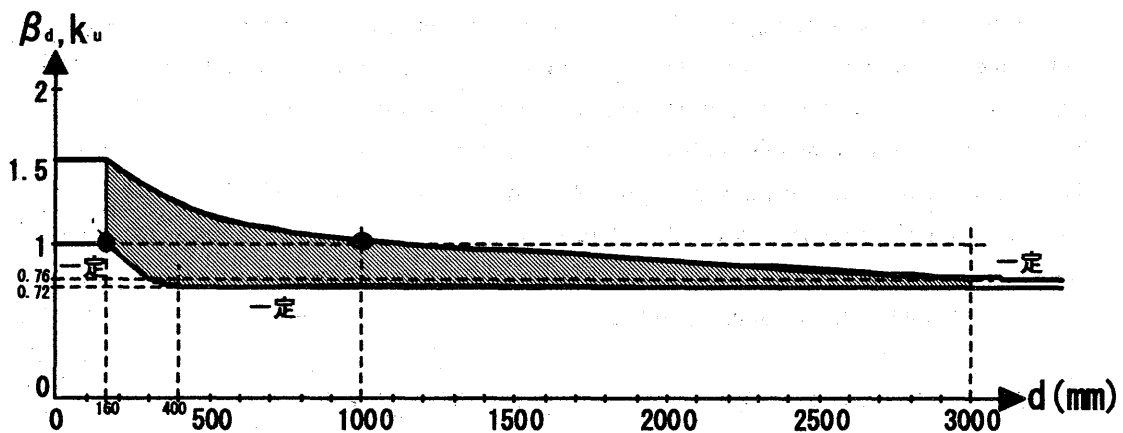
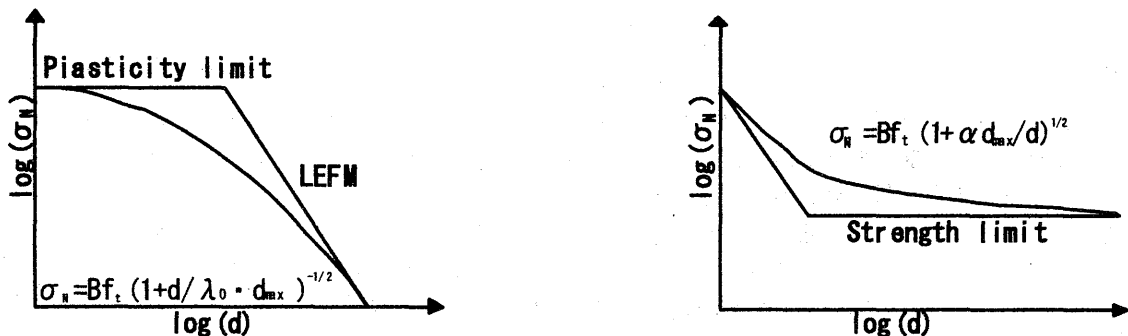


図1 建築と土木の寸法効果に基づく低減係数



(a) Bazantの寸法効果

(b) Carpinteriの寸法効果

(B, λ_0 : 実験定数, f_t : 強度パラメータ, d_{max} : 最大骨材寸法, d : 部材の代表寸法, α : 比例定数)

図2 理論に基づく寸法効果則

3. 既往の実験

既往の実験の結果において寸法効果の影響がどのように現れているかを知るために、これまでに発表されている論文から4つの実験の結果を取り上げて検討する。RC柱の実験を2編、RCはりの実験を2編取り上げる。図3に試験体形状の比較、表1に試験体の諸元を示す。

3.1 RC柱実験: シリーズ1(文献[5])

試験体は断面200×200mm(S1-A)、800×800mm(S1-B)の柱と固定用のスタブからなる、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。載荷は、建研式二軸載荷装置で行った。載荷の制御方法は、鉛直方向は荷重制御、水平方向は変位制御とし、水平方向に逆対称加力方式で正負漸増繰返し載荷とした。

3.2 RC柱実験: シリーズ2(文献[6])

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の載荷は、実構造物が受けるものを模擬するため、変動軸力とした。両試験体の載荷は、建研式二軸載荷装置で行った。鉛直

荷重は10MNの油圧ジャッキにより、一方水平荷重はL型反力梁を介して、柱せいの中央位置に高さを調節した5MNの油圧ジャッキにより、それぞれ載荷した。載荷の制御方法は自動制御油圧装置を用いて行い、鉛直方向・水平方向については荷重・変位制御とした。

3.3 RCはり実験: シリーズ3(文献[7])

試験体は断面75×150mm(S3-A)、150×300mm(S3-B)、300×600mm(S3-C)の3体を取り上げる。載荷は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載荷とし、制御は荷重増分により行った。荷重の検力は、アムスラー載荷ヘッドと加力用鋼材の間に挿入した容量200tのロードセルにより行った。

3.4 RCはり実験: シリーズ4(文献[8])

試験体は断面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体を取り上げる。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た。

また実験時は水圧計とロードセルの2系統により荷重を測定し所定の荷重が作用していることを確認しつつ実験を行った。

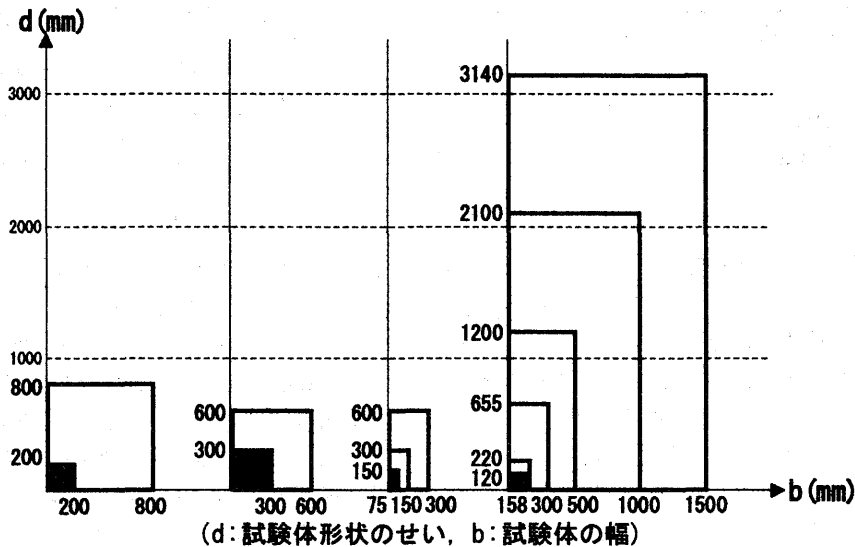


図3 試験体形状の比較

表1 試験体諸元

		シリーズ1		シリーズ2		シリーズ3			シリーズ4						単位	
		S1-A	S1-B	S2-A	S2-B	S3-A	S3-B	S3-C	S4-A	S4-B	S4-C	S4-D	S4-E	S4-F		
寸法	試験体断面	200×200	800×800	300×300	600×600	75×150	150×300	300×600	158×120	158×220	300×655	500×1200	1000×2100	1500×3140	mm	
	せいの幅	200	800	300	600	150	300	600	120	220	655	1200	2100	3140	mm	
	部材の幅	200	800	300	600	75	150	300	158	158	300	500	1000	1500	mm	
	有効高さ	180	720	270	570	135	270	540	100	200	635	1050	2050	3060	mm	
	かぶり厚さ	20	80	30	30	15	30	60	20	20	20	150	50	80	mm	
	断面積	A	40000	640000	90000	360000	11250	45000	180000	18960	34760	196500	600000	2100000	4710000	mm ²
	主筋中心間距離	jt	175	700	262.5	525	131.25	262.5	525	105	192.5	573.125	1050	1837.5	2747.5	mm
	せん断スパン比	L/2D	1	1.5	1.5	1.5	1	1	1	12	12	12	12	12	-	
	部材長さ比	L/D	2	3	3	3	2	2	2	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	
	内法高さ	L	400	2400	900	1800	750	1200	1800	120	240	678	1140	2340	3528	mm
コンクリート	設計強度	F _o	36	48	36	30	24	24	24	23.5	23.5	23.5	23.5	23.5	23.5	N/mm ²
	圧縮強度	σ _B	42.66	33.3	39.8	27.2	29.4	29.4	29.4	20.6	19.7	21.1	27.2	28.5	24.3	N/mm ²
鉄筋	主筋	-	3-D10	7-D25	D16	D25	6-D6	6-D13	6-D25	2-D6	4-D6	24-D6	28-D10	40-D16	36-D25	-
	帯筋	-	2-4φ	4-U10.7	4-D13	4-S10	2-D3	2-D6	2-D13	-	-	-	-	-	-	-
	せん断補強鉄筋強度	σ _{sy}	316	1275	929.6	904.1	377.5	420	383.7	-	-	-	-	-	-	N/mm ²
	引張鉄筋比	p _t	0.0059	0.0054	0.0103	0.0095	0.0151	0.0177	0.0164	-	-	-	-	-	-	-
	帯筋比	p _w	0.0025	0.003	0.004	0.005	0.0035	0.0035	0.0035	-	-	-	-	-	-	-
	帯筋間隔	s	50	150	50	100	150	200	200	-	-	-	-	-	-	mm

4. 算定式の検討

実験結果と既往の算定式から得られる値とに、どのような違いがあるのかを知るために、以下に示す3つの式を用いて検討する。

4.1 寺井・南式(文献[9])

この評価式は、建築学会指針A法に基づいて寸法効果の影響を述べたものである。建築学会指針A法によると、部材のせん断強度は、アーチ機構とトラス機構で計算される強度の和で表される。トラス機構における釣合いを図4に示す。

$$V_u = V_a + V_t \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$V_t = b \cdot j_t \cdot \sigma_N \cdot \cot \phi / (1 + \cot^2 \phi)$$

$$V_a = \tan \theta (1 - \beta) b \cdot D \cdot \sigma_N / 2$$

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

$$\beta = \left\{ \frac{(1 + \cot^2 \phi) p_w \cdot \sigma_{wy}}{\sigma_N} \right. \\ \left. (1 + \cot^2 \phi) / 2 \right\}$$

$$\cot \phi = \min \left\{ \begin{array}{l} 2.0 \\ j_t = (D \tan \theta) \\ \sqrt{\sigma_N / (p_w \cdot \sigma_{wy})} - 1.0 \end{array} \right\}$$

$$\sigma_N = \lambda (\nu \cdot \sigma_B)$$

$$\nu = 0.7 - \sigma_B / 2000$$

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

$$\tau_t = V_u / b \cdot j_t \quad \dots \dots \dots (1)'$$

ここに、 σ_B : コンクリートの圧縮強度、 σ_{wy} : せん断補強筋強度 ($\sigma_{wy} > 25 \sigma_B$ の場合 $\sigma_{wy} = 25 \sigma_B$ とする)、 b : 柱の幅、 j_t : 主筋中心間距離、 D : 全せい、 L : 内法高さ、 p_w : せん断補強筋比、 ν : コンクリート圧縮強度の有効係数、 ϕ : トラス機構のコンクリート圧縮束の角度

係数 λ は図5に示すように、断面形状(円・四角)、寸法(断面径100-400mm)、形状(断面との高さの比1-3)をパラメーターとする数体の供試体によるプレーンコンクリートの一軸圧縮試験を行い、断面形状と供試体形状により補正した圧縮強度を整理したものから算出したものである。断面形状が円形か四角かに関わらず、断面寸法が大きくなると、相対的に強度が小さくなる“寸法効果”が現れていることがわかる。

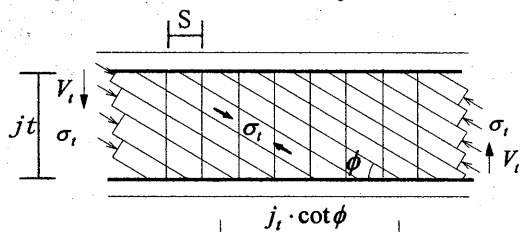


図4 トラス機構における静的許容応力場

◇ H/D=1 (角柱) ○ H/D=1 (円柱) ◆ H/D=2 (角柱)
● H/D=2 (円柱) ○ H/D=3 (円柱)

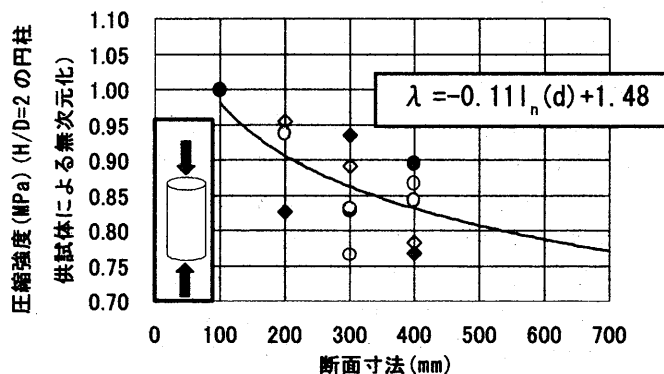


図5 圧縮強度(無次元化)と断面寸法の関係

4.2 土木学会式(文献[2])

$$V_{yd} = V_{cd} + V_{sd} \quad \dots \dots \dots (2)$$

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

$$f_{vcd} = 0.20 \sqrt[3]{f'_{cd} (N/mm^2)} \quad f_{vcd} \leq 0.72 (N/mm^2)$$

$$\beta_d = \sqrt[4]{1000/d} (d: mm) \quad \beta_d > 1.5 \text{ の場合 } 1.5$$

$$\beta_p = \sqrt[3]{100 p_w} \quad \beta_p > 1.5 \text{ の場合 } 1.5$$

$$\beta_n = \begin{cases} 1 + M_0 / M_d (N_d \geq 0 \text{ の場合}) & \beta_n > 2 \text{ の場合 } 2 \\ 1 + 2M_0 / M_d (N_d < 0 \text{ の場合}) & \beta_n < 0 \text{ の場合 } 0 \end{cases}$$

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

$$\tau_c = V_{yd} / b \cdot d \quad \dots \dots \dots (2)'$$

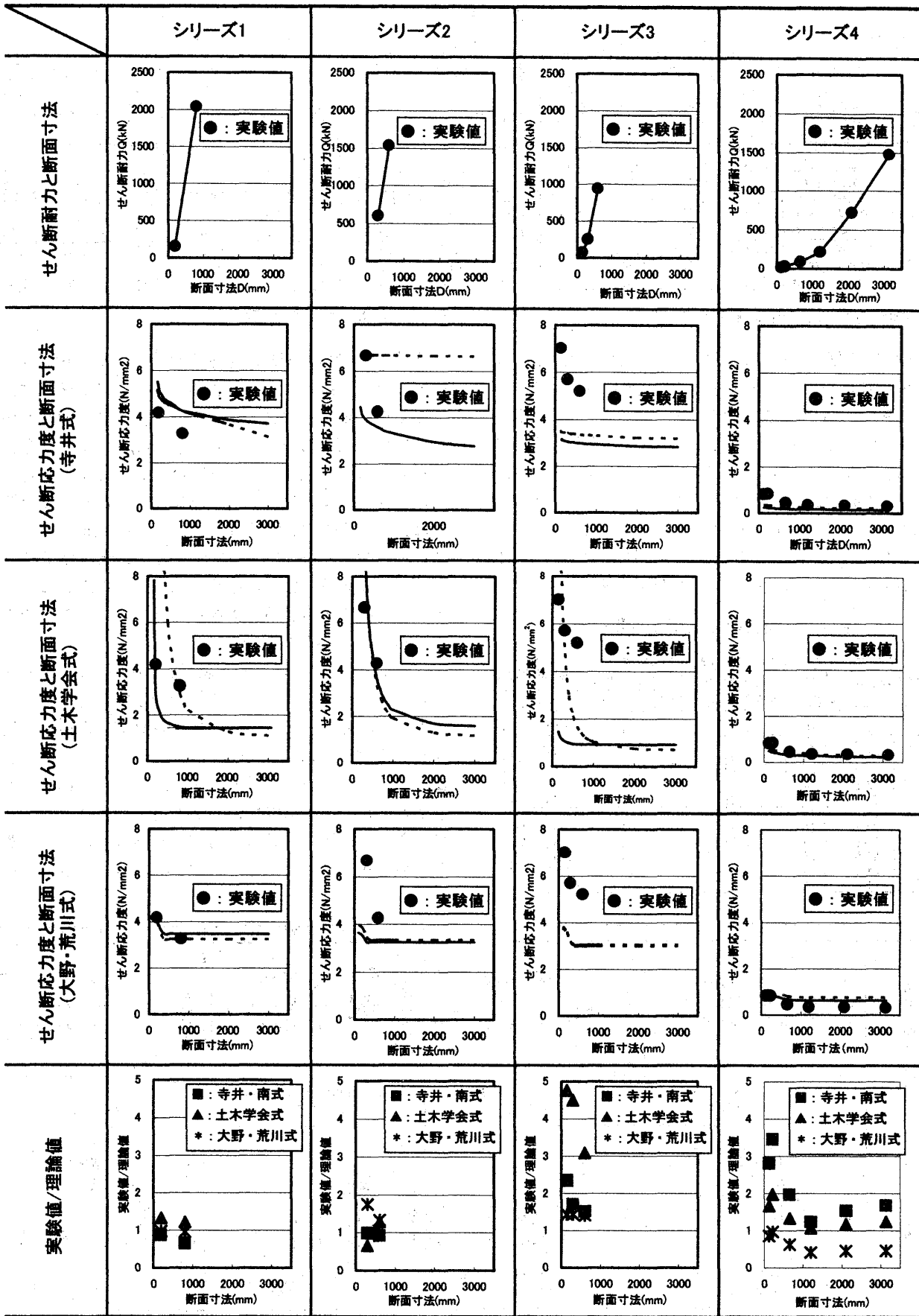
ここに、 M_d : 設計曲げモーメント、 M_0 : M_d に対する引張縁において、軸力方向によって発生する応力を打ち消すのに必要な曲げモーメント、 b_w : 腹部の幅、 d : 有効高さ、 p_w : 引張鉄筋比、 A_s : 引張側鋼材の断面積、 f_{cd} : コンクリートの設計圧縮強度、 γ_b : 1.3、 s : 帯筋間隔、 A_w : 区間 s におけるせん断補強鉄筋の総断面積、 f_{wyd} : せん断補強鉄筋の設計降伏強度 (400N/mm² を超えるものは $25 \sigma_B$ とした)、 α : せん断補強鉄筋が軸力となす角度、 z : 圧縮応力の合力の作用位置から引張鋼材図心までの距離、 γ_b : 1.5

4.3 大野・荒川式(文献[1])

$$Q_u = \left\{ \frac{0.092 k_u k_p (18 + \sigma_B)}{M/Qd + 0.12} + 0.85 \sqrt{p_w \cdot \sigma_{wy}} \right\} b \cdot j \quad \dots \dots \dots (3)$$

$$\tau_A = Q_u / b \cdot d \quad \dots \dots \dots (3)'$$

ここに、 τ_A : せん断応力度、 k_u : 断面寸法による補正係数、 k_p : 引張鉄筋比 p による補正係数、 σ_B : コンクリートの圧縮強度、 p_w : 帯筋比、 $M/(Qd)$: せん断スパン比、 σ_{wy} : 帯筋降伏強度、 b : 断面幅、 j : 応力中心間距離 ($j=7/8d$ とする)



——— : 小型試験体の諸元による計算値, ···· : 大型試験体の諸元による計算値

図6 各実験シリーズにおける断面寸法に関する検討

表2 算定結果

寸法	シリーズ1		シリーズ2		シリーズ3			シリーズ4						
	S1-A	S1-B	S2-A	S2-B	S3-A	S3-B	S3-C	S4-A	S4-B	S4-C	S4-D	S4-E	S4-F	
試験体断面(mm)	200×200	800×800	300×300	600×600	75×150	150×300	300×600	158×120	158×220	300×655	500×1200	1000×2100	1500×3140	
断面寸法D(mm)	200	800	300	600	150	300	600	120	220	655	1200	2100	3140	
断面積(N/mm ²)	40000	640000	90000	360000	11250	45000	180000	18960	34760	196500	600000	2100000	4710000	
実験値	理論値(kN)	167.70	2087.00	600.00	1540.00	78.90	256.55	937.80	15.87	29.30	91.18	213.60	732.90	1478.94
	実験値τ(N/mm ²)	4.19	3.26	6.67	4.28	7.01	5.70	5.21	0.84	0.84	0.46	0.36	0.35	0.31
寺井式	理論値(kN)	176.36	3662.40	600.97	1656.97	33.59	150.57	619.63	5.64	8.48	46.33	173.92	478.15	882.20
	理論値τ _s (N/mm ²)	5.04	6.54	7.63	5.26	3.41	3.82	3.93	0.30	0.24	0.24	0.29	0.23	0.19
	実験値/理論値	0.83	0.50	0.87	0.87	2.06	1.50	1.32	2.81	3.46	1.97	1.23	1.53	1.68
土木学会式	理論値(kN)	117.06	1863.14	899.75	1202.03	16.56	56.98	303.32	9.56	14.83	68.07	200.98	626.90	1191.49
	理論値τ _c (N/mm ²)	3.25	3.23	11.11	3.51	1.64	1.41	1.87	0.50	0.43	0.35	0.33	0.30	0.25
	実験値/理論値	1.28	1.00	0.60	1.22	4.27	4.04	2.79	1.66	1.98	1.34	1.06	1.17	1.24
大野・荒川式	理論値(kN)	158.92	2221.38	341.99	1153.03	55.13	178.62	665.40	3.97	7.11	32.53	105.98	381.59	778.55
	理論値τ _A (N/mm ²)	4.54	3.97	4.34	3.66	5.60	4.54	4.22	0.97	0.87	0.74	0.86	0.76	0.68
	実験値/理論値	0.92	0.82	1.53	1.20	1.25	1.26	1.23	0.86	0.97	0.63	0.41	0.46	0.46

5. 大野・荒川式の低減係数k_uの検討

低減係数の修正を行うにあたって、大野・荒川式の低減係数k_uに注目した。低減係数k_uは実験値から求められた係数であるが、図6の結果から分かるように各シリーズにおいての適合性が低い。そこで、今回検討したシリーズにおいて比較的適合性が良い土木学会式の低減係数β_dとk_uを置換し、その適合性を検討した。表3に低減係数の置換前のせん断応力度をτ_A、置換後のせん断応力度をτ_{A'}として示す。図7に各実験シリーズにおける低減係数k_uとβ_dの置換の検討を示す。

表3 低減係数k_uとβ_dの置換

シリーズ名	試験体名	実験値 τ(N/mm ²)	大野・荒川式		実験値/理論値	
			k _u =k _u を使用 理論値τ _A (N/mm ²)	k _u をβ _d と置換 理論値τ _{A'} (N/mm ²)	τ/τ _A	τ/τ _{A'}
シリーズ1	S1-A	4.19	4.54	5.24	0.92	0.80
	S1-B	3.26	3.97	4.32	0.82	0.75
シリーズ2	S2-A	6.67	4.34	4.82	1.54	1.38
	S2-B	4.28	3.66	3.90	1.17	1.10
シリーズ3	S3-A	7.01	5.60	5.16	1.25	1.36
	S3-B	5.70	4.54	4.80	1.26	1.19
	S3-C	5.21	4.22	4.15	1.23	1.26
シリーズ4	S4-A	0.84	0.97	1.65	0.87	0.51
	S4-B	0.84	0.87	1.27	0.97	0.66
	S4-C	0.46	0.74	1.06	0.62	0.43
	S4-D	0.36	0.86	1.14	0.42	0.32
	S4-E	0.35	0.76	0.87	0.46	0.40
	S4-F	0.31	0.68	0.71	0.46	0.44

6. 算定結果および考察

算定は、寺井・南式、土木学会式、大野・荒川式を用いて行った。図6には各試験体についての断面寸法に関する検討、表2には算定結果を示す。表2での理論値τは、建築に関する算定式ではτ_A=Q/bj(式(1))を、土木に関する算定式ではτ_c=Q/bd(式(2))を、大野・荒川式に関する算定式ではτ=Q/b・j(式(3))を採用した。せん断耐力と断面寸法の実線は各シリーズでの小型試験体の諸元による値の曲線、点線は各シリーズでの大型試験体の諸元による値の曲線となっている。これは材料強度が寸法効果にどのような影響を与えているのかを示している。

せん断耐力と断面寸法の関係においては、断面寸法が増加するに伴って、比例的に増加している。せん断応力度と断面寸法の関係について、各算定式の結果をしてみる。寺井式ではシリーズ1、2においてはほとんど影響が見られないが、シリーズ3では差が見られる。土木学会式においては低強度、高強度材料ともに、断面寸法が小さなものほど、著しい増加がみられる。この影響は土木学会式では、もともと400N/mm²以下のものを想定

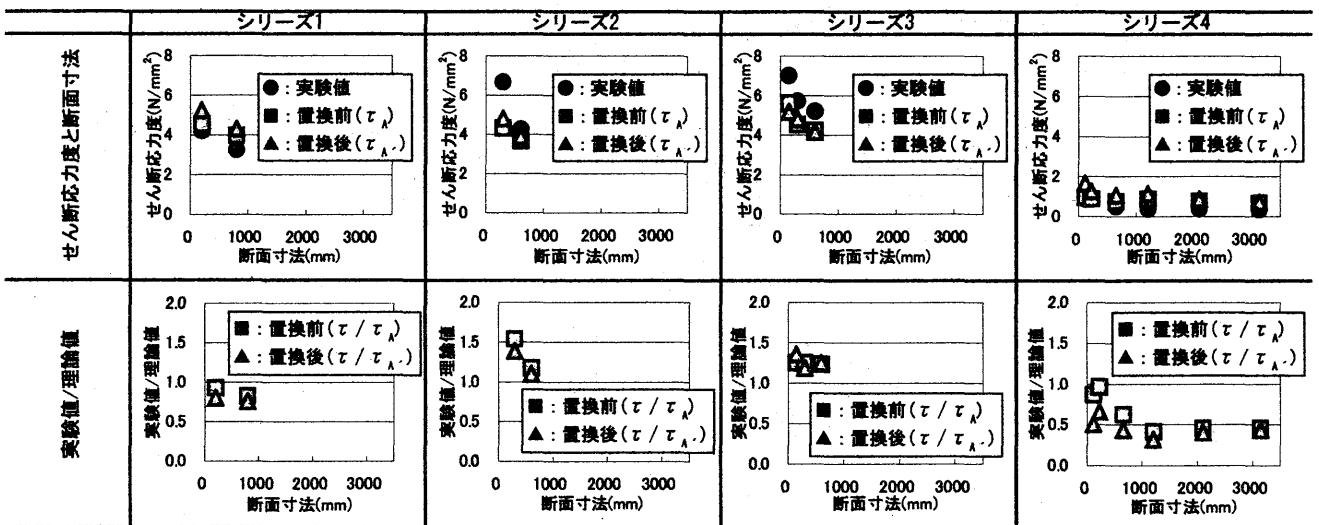


図7 各実験シリーズにおける低減係数k_uとβ_dの置換の検討

しているため、建築で用いる材料を適用する場合には、補正が必要だと思われる。シリーズ4においては土木学会式が適合性が最も良い。シリーズ4はせん断補強筋が無い試験体である。よって土木学会式は純粋なコンクリート部材における寸法効果の影響を評価出来ているといえる。大野・荒川式においては、材料強度の差による影響はほとんど見られなかったが、実験値との差が激しく見られた。

実験値/理論値においては寺井式および土木学会式の適合性は高いが、大野・荒川式との適合性は低かった。原因としては大野・荒川式は、軸力の影響を考慮していないためと思われる。

7. まとめ

文献[10]では、基準強度 390N/mm^2 を超える高強度せん断補強筋の評価基準として、寸法効果の影響を除くために、できる限り実大に近い部材断面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モデル程度以上とし、柱断面では $30\text{cm} \times 30\text{cm}$ 程度、はり断面では $20\text{cm} \times 40\text{cm}$ 程度が最小断面の大きさの目安とされている。本論で検証した例においても、断面せいが 30cm 以上の試験体の平均せん断応力度においても、その値は低下する傾向にあることが認められ、しかも、大野・荒川式の 40cm 以上の寸法での低下は一定とされているが、実際には 3000mm 程度の断面まで低下が予想される。そのため、今後、大断面での算定では寸法効果の影響を考慮し、大野・荒川式の寸法効果の補正係数の修正やせん断補強筋の耐力の負担などの検討が必要だと思われる。

参考文献

- [1] 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 - 許容応力度設計法 -, 1999.11
- [2] 土木学会：コンクリート標準示方書 [構造性能照査編], 2002.12
- [3] 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), pp.219-229, 2001.6
- [4] 土木学会コンクリート委員会寸法効果小委員会 (304)：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, 土木学会
- [5] 寺井雅和・南宏一：鉄筋コンクリート柱の終局強度に影響を与える寸法効果に関する一実験, 福山大学工学部紀要, 第26巻, pp.59-66, 2002.12
- [6] 研究代表者荒木秀夫：石炭灰を多量に使用した鉄筋コンクリート部材の力学的性状に関する研究 (課題番号 13650630) 研究成果報告書, 2003.3
- [7] 沼倉隆人他：せん断補強した鉄筋コンクリートはりのせん断強度の寸法効果に関する実験的研究 (その

1,2,3), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東海), pp.869-874, 1994.9

- [8] 塩屋俊幸他：等分布荷重下における大型鉄筋コンクリートはりのせん断強度に関する実験的研究, 土木学会論文集, 第348号/V-1(報告), pp.175-184, 1984.8
- [9] 日本コンクリート工学協会：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報告集, 第25巻, pp.1021-1026, 2003
- [10] 日本建築センター：基準強度 4000kg/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, pp.15-19, 1996.6