

論文 鉄筋コンクリート造柱梁のせん断強度の特性に関する研究

松本 栞^{*1}・田尻 清太郎^{*2}・塩原 等^{*3}・向井 智久^{*4}

要旨：鉄筋コンクリート造柱梁のせん断補強筋量および軸力をそれぞれ変化させたとき部材のせん断強度がどのように変化するか、またその変化量が部材の特性にどのような影響を受けるのか実験データベースを用いて調査した。荒川式および広沢式の仮定と同様、柱梁ともにせん断補強筋量が増大するほどその効果が減少する傾向を示したが、柱ではせん断補強筋量を増大させても広沢式の想定する効果を下回るデータが 29% 存在した。柱の軸力の効果はばらつきが大きく、広沢式の想定する効果を下回るデータが 62% 存在した。またこれらせん断補強筋量および軸力の効果に他の因子が影響を及ぼす可能性を示した。

キーワード：せん断強度, 荒川式, 広沢式, せん断補強, 軸力, データベース

1. はじめに

鉄筋コンクリート造柱梁のせん断強度式として一般に荒川式(式(1))や広沢式(式(2))が用いられている¹⁾。これらは約半世紀前の対照実験から導出された梁のせん断強度式^{2,3)}(式(3), SI 単位に変換)に対し、第一項(無補強筋梁項)に低減率をかけて安全性を高め⁴⁾、さらに軸力項を加えて柱に適用したものである^{5), 6)}。したがって各因子がせん断強度に及ぼす影響の仮定および式の構成はせん断強度式成立当初のままである。

$$Q_{su} = \left\{ \frac{0.053 p_t^{0.23} (F_c + 18)}{M/(Qd) + 0.12} + 0.85 \sqrt{p_w \cdot \sigma_{wy}} \right\} bj \quad (1)$$

$$Q_{su} = \left\{ \frac{0.053 p_t^{0.23} (F_c + 18)}{M/(Qd) + 0.12} + 0.85 \sqrt{p_w \cdot \sigma_{wy}} + 0.1 \sigma_0 \right\} bj \quad (2)$$

$$Q_{su} = \left\{ \frac{0.068 p_t^{0.23} (F_c + 18)}{a/d + 0.12} + 0.85 \sqrt{p_w \cdot \sigma_{wy}} \right\} bj \quad (3)$$

ここで、 Q_{su} ：はりおよび柱のせん断終局強度 (N)、 F_c ：コンクリートの圧縮強度 (N/mm²)、 M/Q ： M 、 Q はそれぞれ終局強度算定時における部材の最大曲げモーメントおよびせん断力、 d ：はりおよび柱の有効せい (mm)、 p_w ：せん断補強筋比、 σ_{wy} ：せん断補強筋の降伏強度 (N/mm²)、 σ_0 ：作用軸応力度 (N/mm²)、 b ：はりおよび柱の幅 (mm)、 j ：応力中心間距離 (mm)、 a ：せん断スパン (mm) である。

これらのせん断設計式としての安全性はこれまでに様々な研究^{例えは 7)}で検証されてきたが、その目的上、式中の各因子を総合した式全体で評価する手法が多く、各因子がせん断強度に及ぼす影響について検討した例は少ない。しかし実際の設計行為においては、例えばせん断補強筋の量を増やすことによって設計式に見合うせん断強度の増加を期待する。よって式全体としての安全性に加え、各因子(特にせん断補強筋)のせん断強度への寄

与を把握できれば、より安全で有効なせん断設計が可能となる。

そこで本研究では実験データベースを用いて各因子とせん断強度の関係性を調査した。その際、各因子のせん断強度への寄与分を直接求めることはできないため、着目する因子以外が全て等しい試験体のデータを同一実験シリーズとして整理し、各実験シリーズの中で因子を変動させたときのせん断強度の変化量を用いて検討することにした。

2. 実験データによる検討

2.1 データの概要

文献⁷⁾で収集された実験データ(1975~2013年の日本建築学会構造系論文集, 構造工学論文集, JCI 年次大会論文集, コンクリート工学論文集から収集されたデータ)のうち付着破壊を含まないせん断破壊型の柱梁で、かつ式(1)および式(2)に含まれる因子のうち一因子のみを変動させた実験シリーズを抽出した。その結果、各変動因子に対する実験シリーズ数は表-1 および表-2 のようになった。本研究ではこのうち十分な実験シリーズ数が得られたせん断補強筋量 $p_w \sigma_{wy}$ と軸力(作用軸応力度) σ_0 について検討した。

表-1 各変動因子に対する実験シリーズ数(梁)

変動因子	F_c	a/d	p_t	$p_w \sigma_{wy}$
シリーズ数	10	1	0	12

表-2 各変動因子に対する実験シリーズ数(柱)

変動因子	F_c	a/d	p_t	$p_w \sigma_{wy}$	σ_0
シリーズ数	5	10	3	42	43

*1 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻 (学生会員)

*2 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻准教授 博士(工学) (正会員)

*3 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻教授 工博 (正会員)

*4 国立研究開発法人 建築研究所 主任研究員 博士(工学) (正会員)

2.2 検討方法

(1) セン断強度増加率の算出

同一実験シリーズの試験体、すなわち着目するパラメータ以外の条件が全て等しい試験体について、着目する因子 t_i が小さい順に 2 試験体ずつ抽出し、その実強度 τ_u (せん断終局強度を bj で除した値) の差分を因子の差分で除す。この値 α_i をせん断強度増加率とし、着目した因子がせん断強度へ及ぼす効果を表す指標として用いる。(図-1 左)

また本研究では各因子に対する制限¹⁾ ($1 \leq M/(Qd) \leq 3$, $p_w \leq 0.012$ (中子筋を除く場合), $p_w \leq 0.015$ (中子筋を併用する場合やスパイラル筋を用いる場合), $\sigma_0 \leq 0.4 Fc$) を設けず、着目する因子の寄与分を純粋に評価した。

(2) セン断強度増加率のプロット

縦軸にせん断強度増加率を、横軸に着目した因子 (軸力によるせん断強度増加率のグラフでは軸力比 σ_0/Fc) をとり、(1)の結果をプロットした。その際、せん断強度増加率を算出した 2 試験体のデータを直線で結び、着目した因子とせん断強度増加率との関係を読み取れるようにした。(図-1 右)

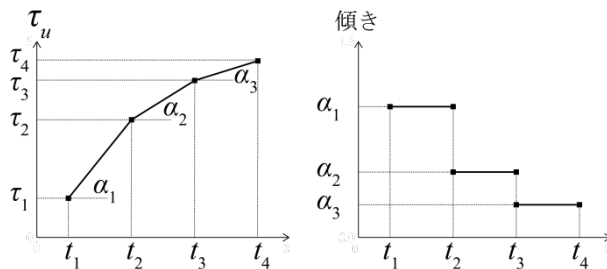


図 - 1 検討方法

また、各試験体について靱性指針式⁸⁾により推定される破壊機構で分類しあわせて示した。本研究で扱ったデータは付着破壊を含まないせん断破壊型の試験体であるため、以下の 3 式で破壊機構を推定した。

$$V_u = \mu p_{we} \sigma_{wy} b_e j_e + \left(v \sigma_B - \frac{5 p_{we} \sigma_{wy}}{\lambda} \right) \frac{bD}{2} \tan \theta \quad (4)$$

$$V_u = \frac{\lambda v \sigma_b + p_{we} \sigma_{wy}}{3} b_e j_e \quad (5)$$

$$V_u = \frac{\lambda v \sigma_b}{2} b_e j_e \quad (6)$$

ここで、 V_u : 柱および梁のせん断信頼強度、 μ : トラス機構の角度を表す係数、 p_{we} : 有効せん断補強筋比、 σ_{wy} : せん断補強筋の信頼強度算定用強度、 b_e : トラス機構に参与する断面の有効幅、 j_e : トラス機構に参与する断面の有効せい、 v : コンクリート圧縮強度の有効係数、 σ_B : コンクリート圧縮強度、 λ : トラス機構の有効係数、 b : 断面の幅、 D : 断面せい、 θ : アーチ機構の圧縮束の角度で

ある。

また、柱梁のせん断補強筋量とせん断強度増加率の関係を示すグラフには、荒川式および広沢式におけるせん断補強筋量とせん断強度増加率の関係 (式(7)) を示した。

$$\text{せん断強度増加率} = \frac{\partial \tau_u}{\partial (p_w \sigma_{wy})} = 0.425 \times (p_w \sigma_{wy})^{-0.5} \quad (7)$$

(3) 靱性指針と実験データの比較

柱において、せん断補強筋量によるせん断強度増加率が広沢式の仮定を下回るデータが一定数存在したため、靱性指針との比較もおこなった。その際、靱性指針式 (式(4)、式(5)、式(6)) を用いて各試験体のせん断強度を算出し、(1)と同様にせん断強度増加率を求めた。プロットする際、縦軸に (実験データのせん断強度増加率/靱性指針によるせん断強度増加率) を、横軸に 2 試験体のせん断補強筋量の平均値をとった。

(4) その他の因子による分類

柱梁のせん断補強筋量および軸力によるせん断強度増加率に対し、他の因子が影響を及ぼすか調査するため、荒川式および広沢式に含まれる因子 (Fc , a/d , p_r , p_w , σ_{wy} , σ_0)、主筋降伏強度 σ_y 、中子筋の有無によってデータを分類しグラフに示した。その際、横軸には 2 試験体のせん断補強筋量の平均値をとった。

ただし、実際には試験体の傾向によって上記の因子に特定の分布や偏りがあるため、本来その影響を考慮すべきだが、本研究はせん断強度増加率に影響を及ぼす可能性のある因子を挙げることを目的としたため、それらを考慮しなかった。

3. 結果と考察

3.1 梁のせん断補強筋量とせん断強度の関係

(1) $p_w \sigma_{wy}$ とせん断強度増加率の関係 (図 - 2)

14% (4/28) が荒川式の仮定を下回った。これらの試験体は、荒川式においてせん断強度増加率がしだいに頭打ちになるせん断補強筋量の大きな領域にあり、この領域ではせん断補強筋比の制限を満たしていてもせん断補強筋の増減による効果がほとんど期待できないためと考えられる。せん断補強筋量が増大するとせん断強度増加率が減少する全体的な傾向は荒川式に一致する。

(2) 各因子の影響 (図 - 3, 図 - 4, 図 - 5, 図 - 6)

(1) より梁のせん断補強筋量によるせん断強度増加率はおおむね荒川式で安全側に評価できた。そこで他の因子がせん断強度増加率に与える影響を調べるため、コンクリート強度、せん断スパン比、主筋比、主筋降伏強度によってデータを分類したところ、これらの因子による明確な影響はみられなかった。荒川式の仮定と同様、梁においてせん断補強筋がせん断強度へ及ぼす影響は他の因子から独立するとみなせるためと考えられる。

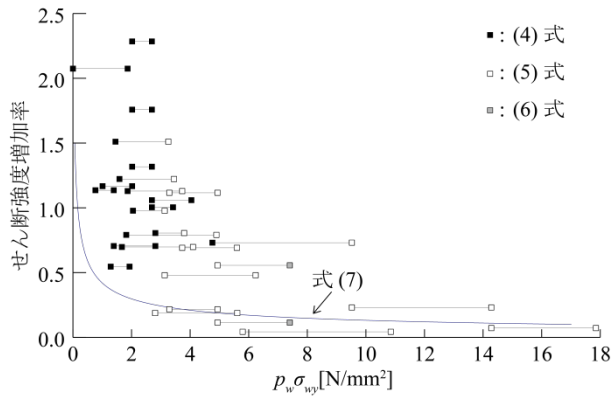


図 - 2 $p_w \sigma_{wy}$ とせん断強度増加率の関係

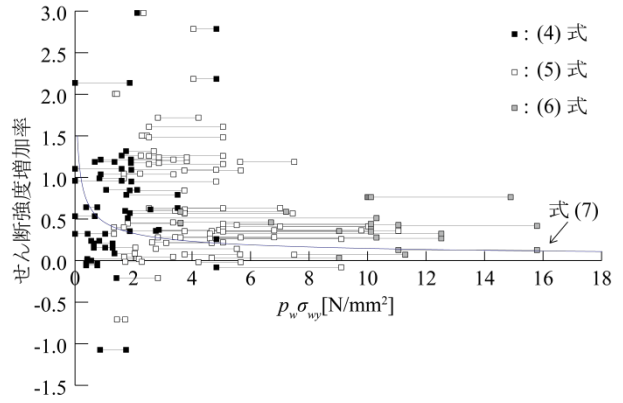


図 - 7 $p_w \sigma_{wy}$ とせん断強度増加率の関係

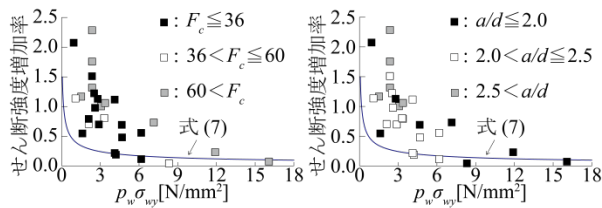


図 - 3 F_c による分類

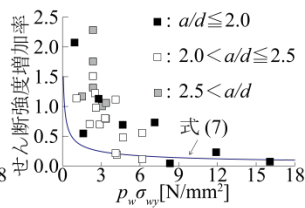


図 - 4 a/d による分類

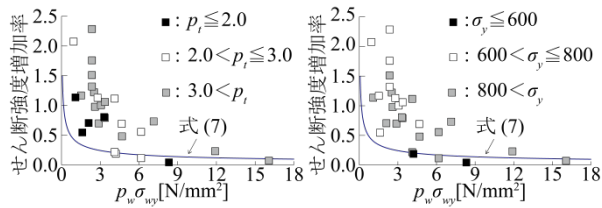


図 - 5 p_t による分類

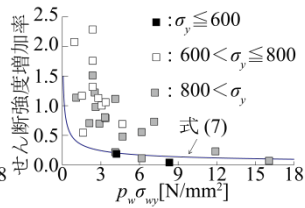


図 - 6 σ_y による分類

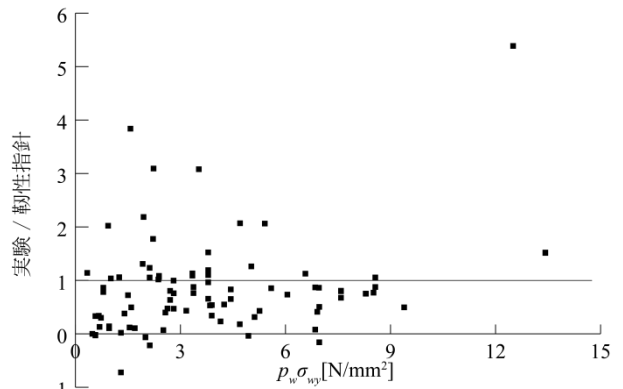


図 - 8 靱性指針で算出したせん断強度増加率との比較

3.2 柱のせん断補強筋量とせん断強度の関係

(1) $p_w \sigma_{wy}$ とせん断強度増加率の関係 (図 - 7)

29% (24/84) が広沢式の仮定を下回り、そのうち 71% (17/24) がせん断補強筋量 3 (N/mm²) 以下であった。これよりせん断補強筋量によるせん断強度増加率が大きいとされるせん断補強筋量の比較的小さい範囲において、せん断強度が増加しない可能性があるといえる。またせん断補強筋量が増大するとせん断強度増加率が減少する全体的な傾向は広沢式の仮定に一致する。

ただし、せん断補強筋量の変化量のごくわずかなためせん断強度増加率が 24.4 と増幅して得られたデータは、はずれ値として除外した。

(2) 靱性指針との比較 (図 - 8)

靱性指針式から算出したせん断強度増加率を下回ったデータは 68% (60/88) であり、広沢式の仮定を下回った 29% より多かった。このとき、試験体のせん断強度が式 (4), (5), (6) のいずれかで決定されるかに関わらず、実験から算出したせん断強度増加率が靱性指針式から算出したせん断強度増加率を下回っていた。これより、式(4), (5),

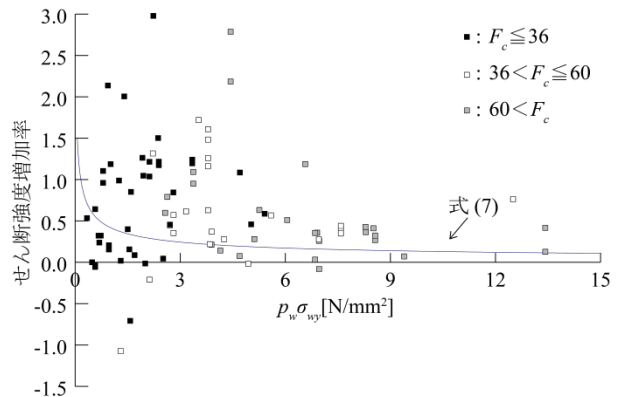


図 - 9 F_c による分類

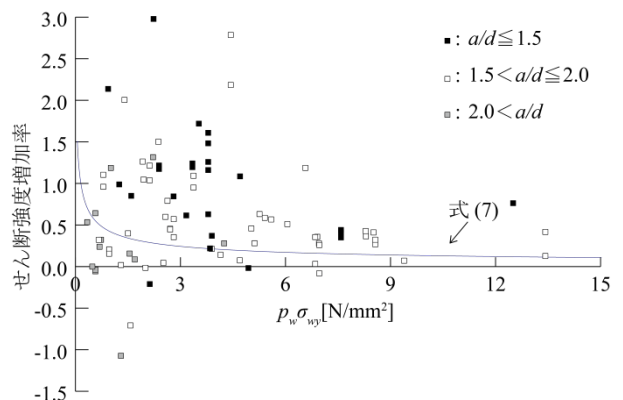


図 - 10 a/d による分類

(6)の破壊機構において共通して仮定されるトラス寄与分が、実現象と比較すると結果的にせん断補強筋によるせん断強度増加率を過大に評価するためにこのような結果となったと考えられる。

(3) コンクリート強度の影響 (図 - 9)

せん断強度増加率が広沢式の仮定を下回ったのは、 F_c の小さいカテゴリから順に 38% (15/40), 13% (3/23), 23% (6/26) であり、 F_c の影響はみられなかった。

(4) せん断スパン比の影響 (図 - 10)

せん断強度増加率が広沢式の仮定を下回ったのは、 a/d の小さいカテゴリから順に 8% (2/25), 26% (13/50), 69% (9/13) であり、 a/d が 2.0 より大きい試験体ほどせん断補強筋量の効果が小さくなる傾向がある。

(5) 主筋比の影響 (図 - 11)

せん断強度増加率が広沢式の仮定を下回ったのは、 p_t の小さいカテゴリから順に 35% (17/48), 16% (5/32), 25% (2/8) であり、 p_t の影響はみられなかった。

(6) 主筋降伏強度の影響 (図 - 12)

せん断強度増加率が広沢式を下回ったのは、 σ_y の小さいカテゴリから順に 46% (16/35), 10.6% (5/47), 50% (3/6) であり、 σ_y の影響はみられなかった。

(7) 軸力比の影響 (図 - 13)

せん断強度増加率が広沢式の仮定を下回ったのは、軸力比 n の小さいカテゴリから順に 15% (3/19), 32.3% (21/32), 0% (0/4) であり、軸力比の影響はみられなかった。

(8) 中子筋の影響 (図 - 14)

せん断強度増加率が広沢式の仮定を下回ったのは、中子筋なし 36% (21/59), 中子筋あり 10% (3/29) であり、中子筋を有する試験体でせん断強度増加率が大きくなる傾向にあった。これは靱性指針において中子筋があるほどトラス機構の有効係数 λ が大きくなることに合致する。

3.3 柱の軸力比とせん断強度の関係

(1) せん断強度増加率の分布 (図 - 15)

62% (41/66) のデータが広沢式の仮定 0.1 を下回る。柱のせん断強度式における軸力比の上限値 0.4 付近からせん断強度増加率が負となるデータが増加しており、軸力比が大きくなるとせん断強度に対する軸力の影響が不安定になる。以後、軸力比 0 以上 0.4 以下のデータについてせん断強度増加率を 0.1 と比較することにする。

(2) コンクリート強度の影響 (図 - 16)

軸力比 0 以上 0.4 以下において、せん断強度増加率が 0.1 を下回ったのは、 F_c の小さいカテゴリから順に 30% (6/20), 61% (11/18), 83% (10/12) であり、 F_c が大きい試験体ほど軸力の効果が小さくなる傾向がある。

(3) せん断スパン比の影響 (図 - 17)

軸力比 0 以上 0.4 以下において、せん断強度増加率が

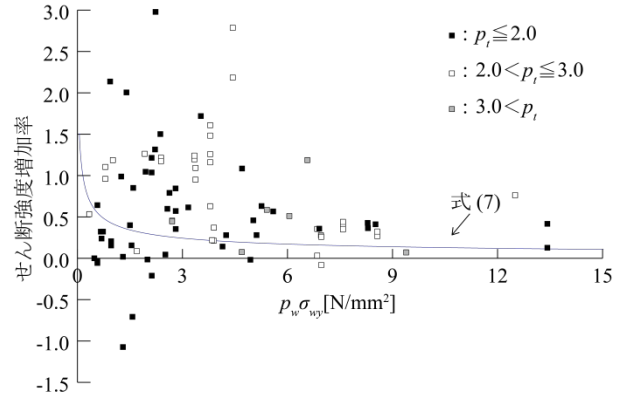


図 - 11 p_t による分類

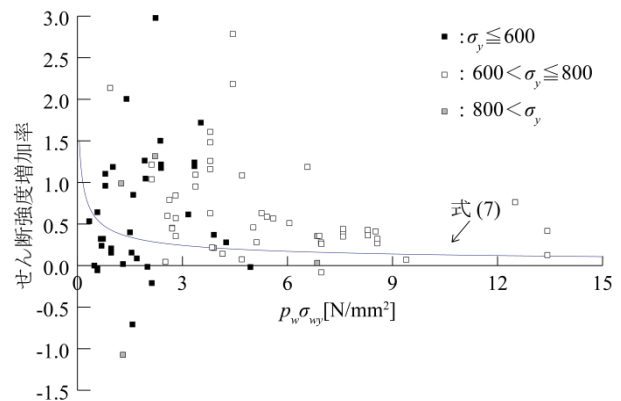


図 - 12 σ_y による分類

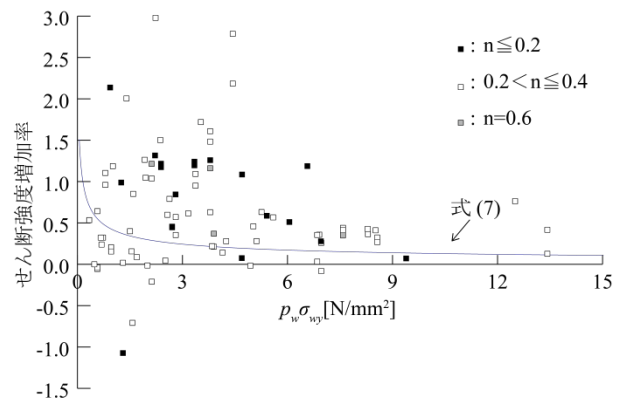


図 - 13 軸力比による分類

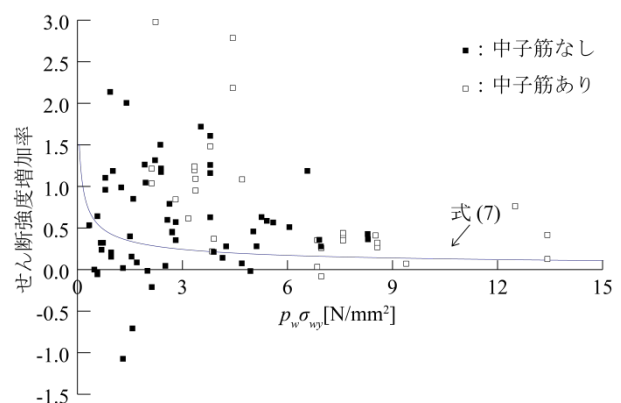


図 - 14 中子筋の有無による分類

0.1 を下回ったのは、 a/d の小さいカテゴリーから順に 57% (12/21), 58% (14/24), 20% (1/5) であり、 a/d の影響はみられなかった。

(4) 主筋比の影響 (図 - 18)

軸力比 0 以上 0.4 以下において、せん断強度増加率が 0.1 を下回ったのは、 p_t の小さいカテゴリーから順に 53% (9/17), 44% (7/16), 65% (11/17) であり、 p_t の影響はみられなかった。

(5) 主筋降伏強度の影響 (図 - 19)

軸力比 0 以上 0.4 以下において、せん断強度増加率が 0.1 を下回ったのは、 σ_y の小さいカテゴリーから順に 29% (5/17), 69.6% (16/23), 60% (6/10) であり、 σ_y が 600 (N/mm²) より大きい試験体ほど軸力の効果が小さくなる傾向がある。

(6) せん断補強筋比の影響 (図 - 20)

軸力比 0 以上 0.4 以下において、せん断強度増加率が 0.1 を下回ったのは、 p_w の小さいカテゴリーから順に 30% (6/14), 53% (8/15), 86% (12/14) であり、 p_w が大きいほど軸力の効果が小さくなる傾向がある。

(7) せん断補強筋降伏強度の影響 (図 - 21)

軸力比 0 以上 0.4 以下において、せん断強度増加率が 0.1 を下回ったのは、 σ_{wy} の小さいカテゴリーから順に 50% (10/20), 38% (3/8), 69% (5/9), 56% (5/9) であり、 σ_{wy} の影響はみられなかった。

(8) せん断補強筋量の影響 (図 - 22)

軸力比 0 以上 0.4 以下において、せん断強度増加率が 0.1 を下回ったのは、 $p_w\sigma_{wy}$ の小さいカテゴリーから順に 25% (4/16), 58% (11/19), 70% (7/10), 100% (5/5) であり、 $p_w\sigma_{wy}$ が大きいほど軸力の効果が小さくなる傾向がある。

(9) 中子筋の影響 (図 - 23)

軸力比 0 以上 0.4 以下においてせん断強度増加率 0.1 を下回ったのは、中子筋なし 30% (6/20), 一方向 40% (2/5), 二方向 76% (19/25) であり、中子筋を有するとより軸力の効果が小さくなる傾向がある。

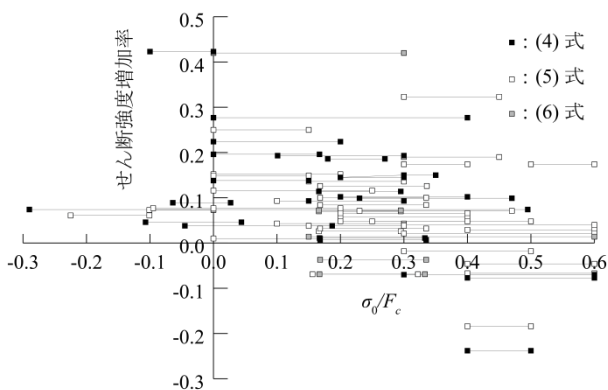


図 - 15 軸力比 σ_0/F_c とせん断強度増加率の関係

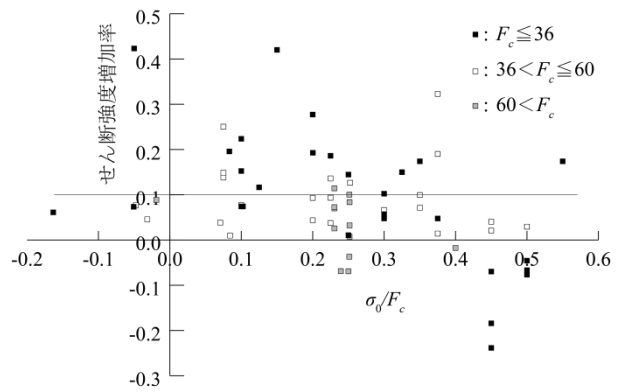


図 - 16 F_c による分類

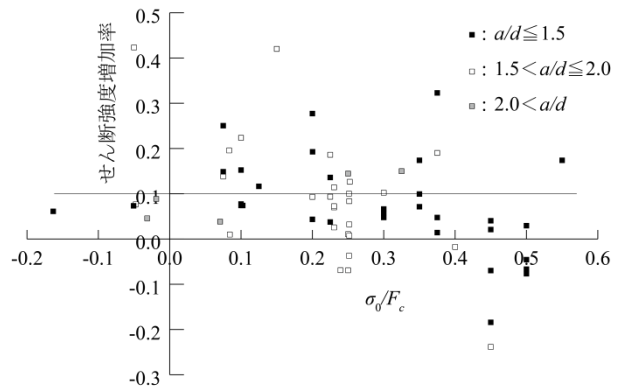


図 - 17 a/d による分類

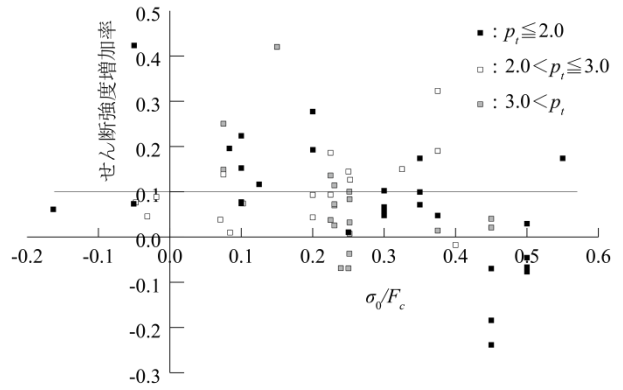


図 - 18 p_t による分類

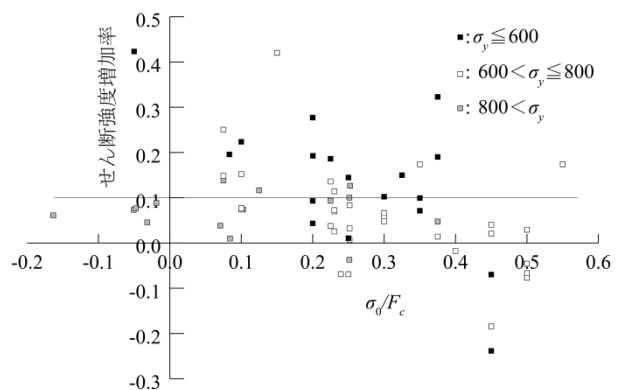


図 - 19 σ_y による分類

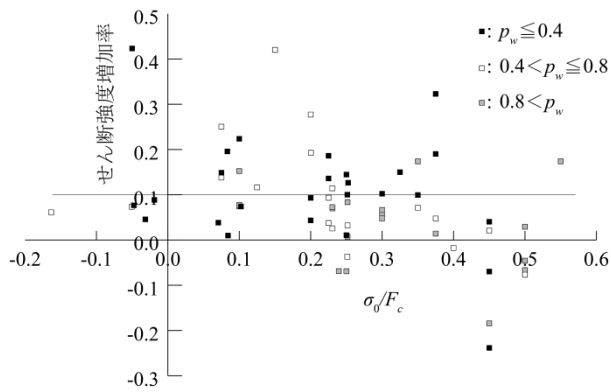


図 - 20 ρ_w による分類

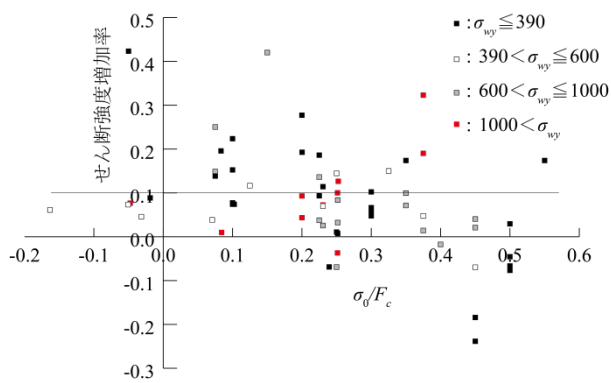


図 - 21 σ_{wy} による分類

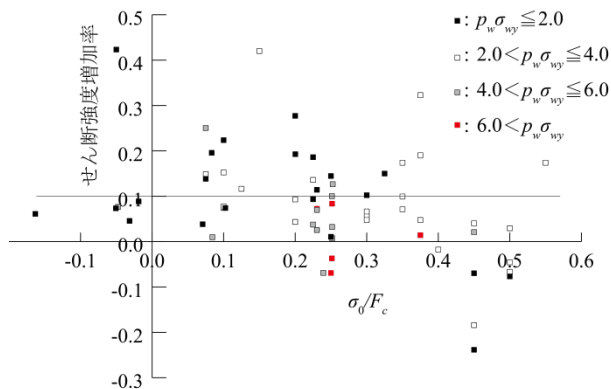


図 - 22 $\rho_w \sigma_{wy}$ による分類

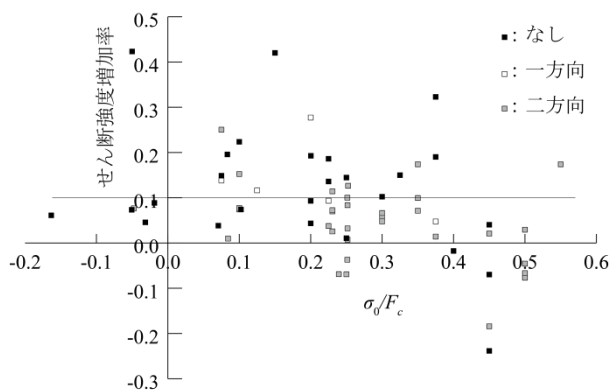


図 - 23 中子筋による分類

4. 結論

本研究では以下の結論を得た。

- (1) 梁において、せん断補強筋量によるせん断強度増加率は86%が荒川式を上回り、おおむね荒川式で安全側に評価できた。また荒川式と同様、せん断補強筋量が大きくなるとせん断強度増加率は減少する傾向にある。
- (2) 柱において、せん断補強筋量によるせん断強度増加率は29%が広沢式を下回り、さらに68%が靱性指針式を下回った。せん断スパン比が2.0より大きい試験体、中子筋のない試験体ほどせん断補強筋量によるせん断強度増加率が小さくなる傾向にあった。
- (3) 柱において、軸力によるせん断強度増加率はばらつきが大きく、62%が広沢式の仮定を下回る。軸力比0以上0.4以下では、コンクリート強度が大きい試験体、主筋降伏強度が600(N/mm²)より大きい試験体、せん断補強筋比が大きい試験体、せん断補強筋量が多い試験体、中子筋を有する試験体ほど軸力によるせん断強度増加率が小さくなる傾向にあった。

謝辞

本検討は建築研究所の研究課題「鉄筋コンクリート造部材の実験データベースを利活用した構造特性評価に関する検討」の一環で実施したものである。

参考文献

- 1) 建築行政情報センターほか編：2015年版建築物の構造関係技術基準解説書，全国官報販売協同組合，2015.6
- 2) 荒川卓：鉄筋コンクリートはり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：鉄筋コンクリートはりのせん断抵抗に関する研究，北海道大学工学部研究報告，1961年3月
- 4) 荒川卓：鉄筋コンクリート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
- 5) 広沢雅也・後藤哲郎：軸力をうける鉄筋コンクリート部材の強度と粘り(その2 既往の資料に関する検討)，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.817-818，1971.11
- 6) 広沢雅也：鉄筋コンクリート部材の強度と靱性，建築研究報告，No.76，1977.3
- 7) 向井智久・田尻清太郎ほか：実験データベースを用いた鉄筋コンクリート造部材の構造特性評価式の検証，建築研究資料，No.175，2016.11
- 8) 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，1999.9