

論文 中空スラブにおけるせん断補強筋形状の違いがせん断挙動に与える影響に関する実験研究

青砥 貴道^{*1}・榎谷 榮次^{*2}・池田 秀樹^{*3}・岡崎 和広^{*1}

要旨：中空スラブ構造のスラブ断面は、通常のスラブより小さいため、シングルタイプのせん断補強筋が使用されるが、この端部形状が中空スラブのせん断挙動に与える影響に関して調べた研究は見当たらない。本論は、せん断補強筋によりせん断補強されたスラブのせん断挙動を調べるために、載荷実験を行い、その結果を基に既往のせん断評価式との比較を行った。その結果、既往のせん断評価式におけるコンクリートによるせん断抵抗を増大させることで準用できることが認められた。

キーワード：中空スラブ，せん断補強筋，スタッド筋，端部形状

1. はじめに

中空スラブにおいてボイド間に配されるせん断補強筋は、シングルタイプの肋筋によって補強される。その末端部としては、施工上上端および下端に配された主筋に緊結するのに便利な135°フック、90°フックおよび皿状のスタッドの形状を持つ定着法が用いられる。このようなシングルタイプのせん断補強筋の端部形状が中空スラブのせん断挙動に与える影響に関して調べた研究は見当たらない。また、そのせん断耐力の評価も、ダブルタイプを持つ梁材のせん断実験結果から導かれた強度式を準用しているの

が現状である。

本研究は、シングルタイプを持つ中空スラブにおけるせん断補強筋の末端部の形状がせん断挙動に与える影響を調べるために、一方向中空スラブのせん断実験を行った。

得られた実験結果を基に、シングルタイプのせん断補強筋を持つ中空スラブのせん断耐力に対して、コンクリートと肋筋のせん断抵抗の累加として導かれた既存のせん断耐力式において、コンクリートに増大係数を導入した式を実験結果に適用して、その適応性の検証を行った。

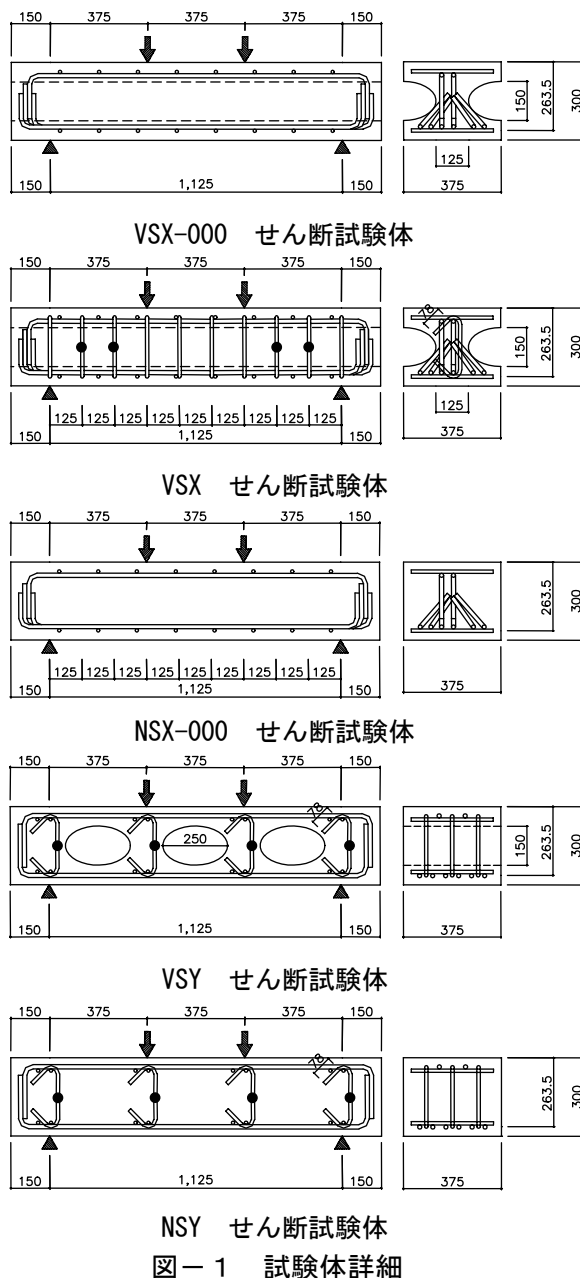
表－1 試験体一覧

試験体名	軸方向	スラブ				せん断補強筋		
		断面 [mm]	シア スパン比	上下主筋	ボイドの有無	形状	径	
VSX-000-1,2	強軸方向 (ボイド平行方向)	375 × 300 〔有効せい 263.5〕	1.5	上端筋： 2-D16 (SD295A)	有 (径：縦150, 横250)	無し	D13(SD295A) @125	
VSX-135-1,2						135° フック		
VSX-113-1,2						135° -90° フック		
VSX-090-1,2						90° フック		
VSX-ST-1,2						スタッド筋		
NSX-000-1,2	弱軸方向 (ボイド直交方向)			下端筋： 6-D16 (SD295A)	無	無し	-	
NSX-135-1,2						135° フック	D13(SD295A)	
NSX-ST-1,2						スタッド筋	@125	
VSX-000-1,2						有 (径：縦150, 横250)	無し	-
VSX-135-1,2							135° フック	D13(SD295A)
NSY-135-1,2	135° フック			@375				

*1 関東学院大学大学院 工学研究科 博士前期課程 (正会員)

*2 関東学院大学教授 工学部建築学科 工博 (正会員)

*3 (株)栗本鐵工所



2. 実験概要

2.1 試験体

中空スラブの試験体は、幅×成×長さ=375×300×1500mm の寸法をもち、その断面は、半楕円形のボイド管を両端に持つ I 形の形状を有し、また直交方向に楕円形のボイド管を有する 2 タイプとする。また、中空の影響を調べるために、中実タイプの試験体も製作した。シングルタイプのせん断補強筋 (D13) の端部は 90° フック (余長 $8d_b$ —鉄筋径の 8 倍)、135° フックと、その組み合わせタイプ及び皿状のスタッド (異形鉄筋の両端部を熱処理し鉄筋径の約 3 倍の円形状に形成した) を有する機械式定着 (図-3)

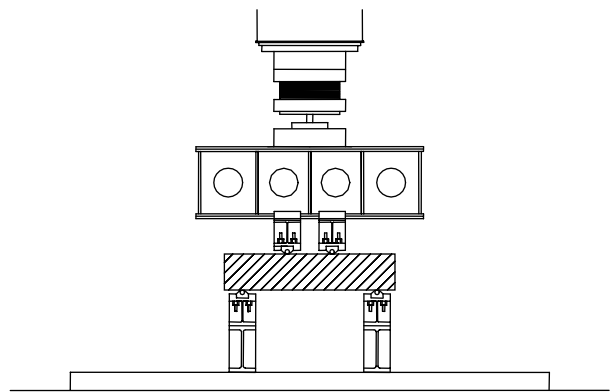


図-2 加力装置図

表-2 鉄筋の材料性状

	引張強さ (kN)	降伏点強度 (N/mm ²)	降伏ひずみ (μ)	引張強さ (N/mm ²)	ヤング係数 ($\times 10^5$)N/mm ²	伸び率 (%)
主筋 D16 SD295A	101.11	353.41	1982	508.04	1.90	25.54
せん断補強筋 D13 SD295A	62.75	348.30	1801	494.13	1.93	27.30
スタッド筋 D13 SD295A	61.82	348.83	1806	486.77	2.00	27.85



スタッド部

図-3 スタッド付きタイプ

の 4 種類とし、各種類に対して 2 体の合計 22 体の試験体を作製した。試験体の一覧を表-1 に、また、各試験体の配筋詳細を図-1 に示す。

コンクリートは、普通ポルトランドセメントを使用し、目標強度は、 21N/mm^2 とする。

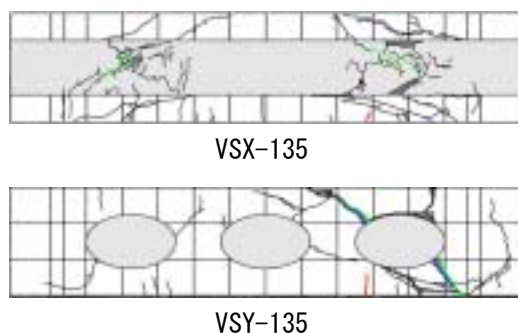
2.2 加力方法

単純支持ボイドスラブに中央から左右に 562.5mm の位置で支持し、中央から左右に 187.5mm の位置で一定荷重速度による二点集中載荷をアクチュエーターによる試験機 (3MN) を用いて行った。荷重はロードセル、歪を鉄筋に貼り付けたワイヤーストレインゲージで測定した。また、変位を中央部、載荷点下および支持点上部の位置に高感度変位計を設置し測定した。加力方法及びワイヤーストレインゲージの位置は、図-1 の試験体内にそれぞれ矢印と黒丸印で示す。

3. 実験結果と考察

3.1 ひび割れおよび破壊性状

長手方向に半楕円形のボイドが配置された I 形の試験体 (VSX タイプ) は、中央部の下フランジ部に曲げひび割れが最初に発生し、その後



図－４ ひび割れの発生状況と破壊状況

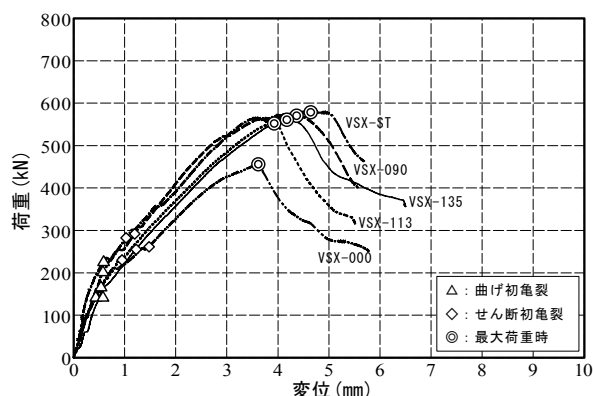
支持点から載荷点に向って斜めせん断ひび割れが発生する。ウェブ部分には、せん断補強筋を有する場合、多数のひび割れが形成されるが、せん断補強筋がない場合、ひび割れ本数は少ない顕著な違いが見られる。せん断ひび割れは、上部フランジ全幅に亘って貫通してせん断破壊を生じている状況も観察される。ひび割れの形成に対して、せん断補強筋の端部形状の違いによる影響は見受けられない。

短辺方向に楕円形ボイドが配置された試験体（VSY タイプ）は、ボイド上部と下部にせん断ひび割れが発生し、このひび割れが進展してせん断破壊に至る。上部のひび割れは上面まで貫通している破壊が見られる。また、VSX タイプ同様にひび割れの形成に対して、せん断補強筋の端部形状の違いによる影響は見受けられない。

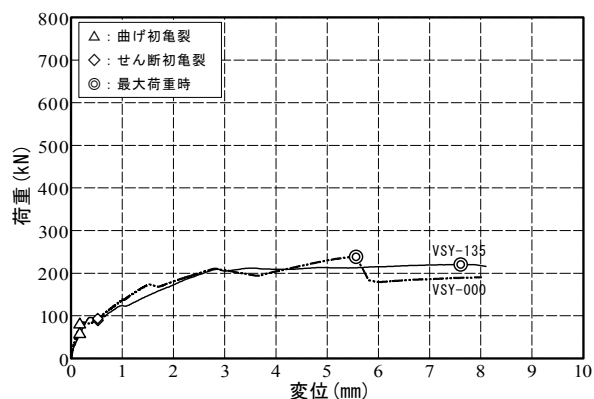
試験体 VSX-135 および VSY-135 において発生したひび割れと破壊状況を図－４に示す。

3.2 荷重および変位の関係

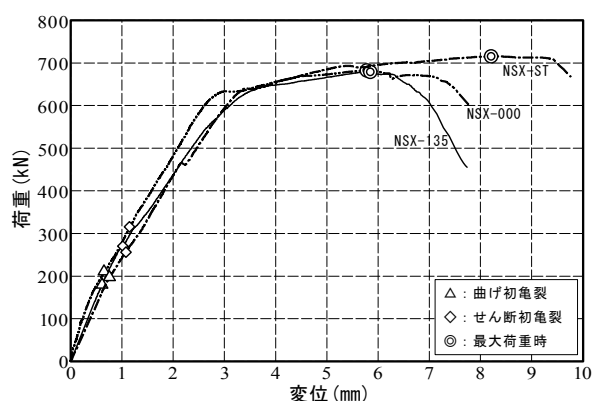
長辺方向にボイドを配した中空スラブ試験体 VSX タイプ、短辺方向にボイドを配した中空スラブ試験体 VSY タイプ別に荷重－中央部の鉛直変位に関する代表的な曲線を図 5a～図 5c に示した。これより、試験体 VSX タイプでは、曲げひび割れ発生後、せん断ひび割れが生じ、剛性の低下を伴いながら最大荷重に達し、せん断破壊によって荷重は急激に低下する典型的な荷重－変位曲線を呈している。ひび割れ荷重時および最大荷重時変位は、せん断補強筋の端部形状によって大きな差異を生じないが、せん断補強筋の無い試験体 VSX-000 の最大荷重およびその



図－５a VSX タイプの荷重－変位曲線



図－５b VSY タイプの荷重－変位曲線



図－５c NSX タイプの荷重－変位曲線

時の変位は他に比して小さいことが認められる。

一方、VSY タイプの試験体では、せん断ひび割れ発生後も荷重は増大しないが、最大荷重以降もボイド間のトラス効果によって荷重の低下は VSX タイプと比較して、小さいことが見受けられる。また、中実スラブ試験体 NSX では、3 タイプの荷重－変位曲線に大きな差異は見られないが、せん断補強筋の端部にスタッドを有する試験体 NSX-ST における最大荷重時変位が他の NSX に比して大きく発現していることが注目される。

表－３ 実験結果一覧

試験体名	コンクリート強度 N/mm ²	初亀裂発生時		せん断初亀裂発生時		最大せん断荷重		破壊性状
		荷重	変位	荷重	変位	荷重	変位	
		kN	mm	kN	mm	kN	mm	
VSX-000-1	29.2	164.93	0.54	261.10	1.48	455.57	3.62	せん断破壊
VSX-000-2	27.3	193.91	0.58	291.67	1.31	482.87	3.16	せん断破壊
VSX-135-1	29.2	140.48	0.50	254.89	1.23	560.33	4.18	せん断破壊
VSX-135-2	26.7	138.07	0.50	249.57	1.39	461.16	5.29	せん断破壊
VSX-113-1	29.2	140.75	0.44	230.03	0.95	551.95	3.93	せん断破壊
VSX-113-2	29.2	158.34	0.74	220.36	1.14	545.27	5.07	せん断破壊
VSX-090-1	29.2	200.67	0.58	291.38	1.20	569.69	4.37	せん断破壊
VSX-090-2	26.7	208.20	0.70	235.80	0.85	505.61	3.04	せん断破壊
VSX-ST-1	27.3	224.56	0.59	281.90	1.03	578.43	4.65	せん断破壊
VSX-ST-2	27.3	161.34	0.65	309.70	1.68	542.39	3.95	せん断破壊
NSX-000-1	29.4	164.78	0.45	306.47	1.13	703.34	6.30	せん断破壊
NSX-000-2	29.3	210.38	0.59	315.41	0.98	681.75	5.78	せん断破壊
NSX-135-1	29.6	179.29	0.61	269.72	1.02	678.34	5.85	せん断破壊
NSX-135-2	26.7	158.42	0.55	285.39	1.13	677.34	6.74	曲げせん断破壊
NSX-ST-1	29.3	196.88	0.76	255.89	1.08	714.82	8.21	せん断破壊
NSX-ST-2	29.3	161.31	0.62	247.36	1.12	603.31	5.38	曲げせん断破壊
VSX-000-1	29.1	78.90	0.17	88.79	0.53	236.62	4.77	せん断破壊
VSX-000-2	29.1	60.63	0.14	90.58	0.49	238.42	5.57	せん断破壊
VSX-135-1	29.1	54.60	0.20	80.32	0.78	206.15	3.21	せん断破壊
VSX-135-2	29.1	56.81	0.17	92.91	0.52	220.12	7.61	曲げせん断破壊
VSX-135-1	29.6	191.55	0.53	327.53	1.17	684.60	4.44	せん断破壊
VSX-135-2	29.4	183.32	0.47	234.30	0.80	523.41	3.14	せん断破壊

3.3 剛性および荷重

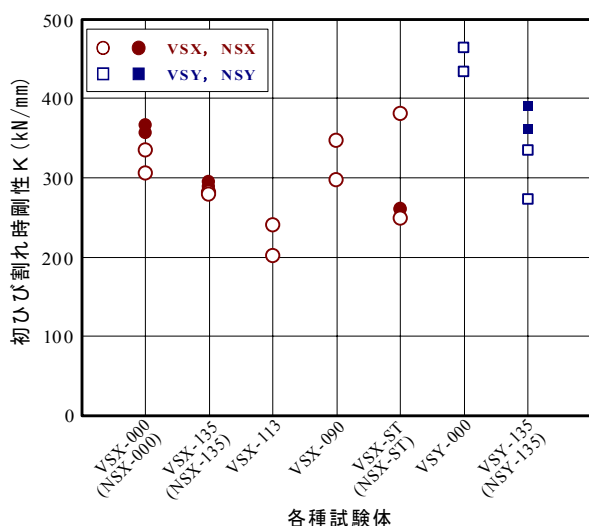
実験から得られた曲げ初亀裂時荷重，せん断初亀裂時荷重および最大荷重およびその時の中央点における鉛直変位に関する結果を表－３に示した。これより，せん断ひび割れ時荷重は，試験体 VSX タイプの場合，せん断補強筋の端部形状の違いによる顕著な影響は見られない。

試験体 VSY タイプの場合，中空スラブ試験体は，中実スラブ試験体に対して，約 31%に減少することが認められる。

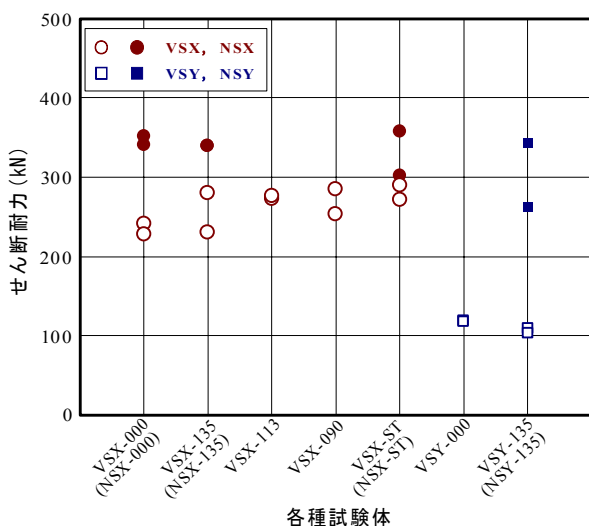
曲げせん断実験によって得られた初亀裂時の荷重 (Q_{cr}) と垂直変位 (δ_{cr}) から，割線剛性 K (Q_{cr} / δ_{cr}) について，各種試験体に対して図－６にプロットした。ここで，白印は中空スラブ，黒印は中実スラブを示す。中空スラブと中実スラブの剛性を端部形状別に比較すると，スタッドを持つ試験体 VSX-ST を除いて，前者が後者に対して剛性が 73%～88%に減少することが認められる。また，全中空スラブの剛性の平均値は，全中実スラブの剛性の平均値に比して，VSX タイプが 91%に減少するが，VSY タイプは，ほぼ同一の値を示し，低減は見られない。一方，VSX タイプおよび VSY タイプの剛性の平均値を

比較すると，前者が後者より約 26%小さく発現している。これより，中空スラブにおけるひび割れ時までの剛性は，VSY タイプが VSX タイプに比して低減されないことが検証された。これは，VSY タイプのせん断伝達がボイド間のコンクリート内に形成されるトラス効果に大きく依存していると考えられる。

表－３に示された最大荷重の 1/2 に対応するせん断耐力を各試験体別に図－７にプロットした。図中では中空スラブを白印，中実スラブを黒印で表した。この図において試験体 VSX-000 のせん断耐力の平均値に対する試験体 VSX タイプのせん断力の平均値の比を求めると，135° フック，135°－90° 混合タイプ，90° フックおよびスタッド定着に対して，それぞれ 1.09，1.17，1.15，および 1.19 となり，端部形状によって大きな違いは見られないが，135° フックが最も小さく，スタッドによる機械式定着が最も大きな値を示している。また，この比から中空スラブのせん断補強筋は，9%～19%のせん断抵抗の向上に寄与しているが，荷重点と支点間のコンクリートに形成される斜め圧縮ストラットによるアーチ効果に依存するせん断抵抗と比べると極



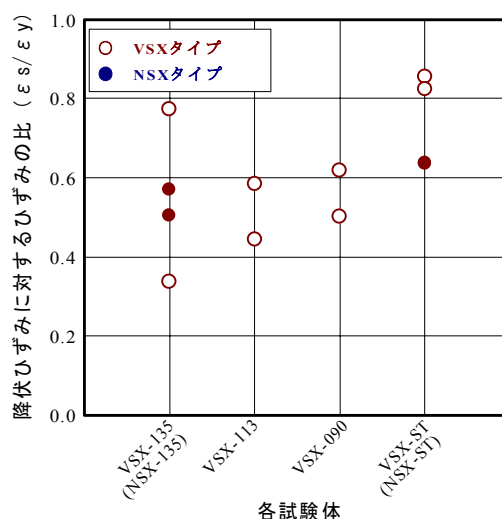
図－6 各種試験体の初亀裂時剛性



図－7 各試験体のせん断耐力

めて小さいことも認められる。また、中実スラブの試験体（NSX-000,135,ST）の平均せん断耐力と中空スラブの試験体（VSX-000,135,ST）の平均せん断力を比較すると、後者が前者より76.0%に低減している。これより、中空スラブのせん断抵抗の有効幅は、中実スラブの約 3/4 を採用することが可能であると考えられる。

ボイドが短辺方向に配された試験体 VSY タイプの試験体は、せん断補強筋の位置が荷重点直下と支持点直上に配筋されたために、せん断補強筋の効果が最大耐力には反映されていない。長辺方向にボイドが配された VSX タイプと比較すると、その耐力は、せん断補強筋を施さないと 50.6%に低減し、135° フックの場合 41.7%に減少する。また、中実スラブと比較すると、耐



図－8 試験体 VSX タイプの作用ひずみ

力は 35.3%に減少することが認められる。

3.4 せん断補強筋に作用するひずみ

試験体に配筋されたせん断補強筋（4 本）に貼られたひずみゲージから測定された最大荷重時ひずみ ϵ_s の降伏ひずみ ϵ_y に対する比 ϵ_s/ϵ_y の平均値を各試験体別に図－8 にプロットした。これより、VSX タイプでは、135° フック、90°－135° フック混合タイプおよび 90° フックをもつせん断補強筋に作用するひずみは、いずれも降伏ひずみには達せず、大きな差異が認められないが、スタッドをもつ機械式定着筋に作用するせん断補強筋が最も大きく発現していることが見受けられる。一方、NSX タイプでも、VSX タイプほどではないが、スタッド筋に作用するひずみは、135° フックを持つせん断補強筋に作用するひずみより大きく生じていることが見られる。

4. せん断耐力の評価

鉄筋コンクリート部材のせん断耐力を評価する設計式は、多く見受けられるが、ダブルタイプのせん断補強筋による実験結果に基づいて提案されており、シングルタイプのせん断補強筋に対応するせん断耐力式は見当たらない。したがって、ダブルタイプのせん断補強筋を対象にした多数の実験結果に基づいて提案され、終局せん断強度 Minimum 式として一般に適用されて

いる次式を準用する。

$$Q_{us} = \left[\alpha_c \times \frac{0.053 \times p_t^{0.23} (\sigma_B + 17.6)}{M/Qd + 0.12} + 0.846 \sqrt{p_w \cdot \sigma_{wy}} \right] b \cdot j \quad (1)$$

ここで、 b は、部材の断面幅で、中空スラブでは、実験結果から安全をみて全幅の 70% を有効幅とする。 j ($\approx 7/8d$) は、応力中心間距離、 $p_w (=a_w/b \cdot x)$ は、せん断補強筋比、 σ_{wy} はせん断補強筋の降伏点強さ、 σ_B は、コンクリート圧縮強度、 M/Qd は、せん断スパン比、 $p_t (=a_t/bd)$ は、主筋の引張鉄筋比、 α_c は、増加係数。この式は、第 1 項がコンクリート、第 2 項がせん断補強筋によるせん断抵抗を示すが、シングル筋は、せん断補強筋の場合、 p_w が小さいので、第 1 項のアーチ作用によるせん断抵抗が過小評価となるために増加係数 α_c を導入した。中空スラブおよび中実スラブに対して $\alpha_c = 2.0$ と仮定すると、せん断耐力に関して実験から得られた結果および(1)式によって計算された結果を図-9 にプロットした。これより、中空スラブにおけるシングルタイプのせん断補強筋のせん断耐力に関して、計算結果は、実験結果に対して、 $\pm 20\%$ の範囲内に含まれ、下限式として適応していることが認められる。

5. まとめ

シングルタイプのせん断補強筋が配された中空スラブのせん断挙動を調べるために、せん断実験を行い、得られた結果から以下の事柄が示唆される。

- (1) 端部形状を 135° フック、 90° フック、 $90^\circ - 135^\circ$ フックの混合タイプ、スタッドによる機械式定着を施したせん断補強筋によって補強された中空スラブのせん断抵抗は、端部形状の違いによる大きな差異は認められないが、スタッドを施された支圧抵抗のせん断補強筋が他に比して大きく発現した。
- (2) シングルタイプのせん断補強筋によるせん断抵抗は、斜め圧縮ストラットによるア

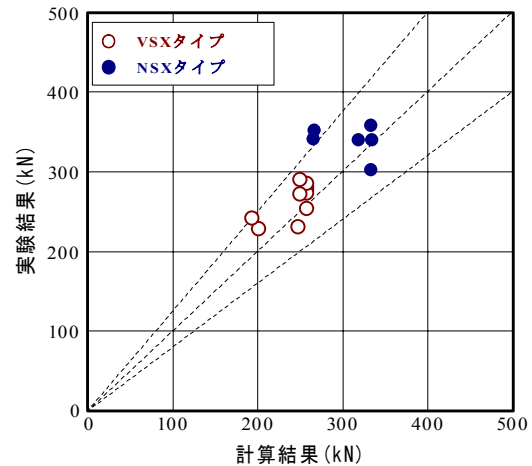


図-9 VSX および NSX タイプの実験結果と計算結果の比較

ーチ作用に依存するせん断抵抗に比して極めて小さいことが確認された。

- (3) 中空スラブのせん断抵抗の有効幅は、中実スラブの約 3/4 を採用することが可能であることが認められた。
- (4) 既往のせん断評価式におけるコンクリートによるせん断抵抗を増大させることで準用できることが認められた。

参考文献

- 1) 堤純, 榎谷榮次, 神尾俊久, 菊本一高, 依田定和: ボイドラメンにおけるスラブ-壁接合部の補強方法に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸), pp91-92, 2002, 8
- 2) 石川通広, 榎谷榮次, 神吉裕輔, 三森弘之, 伊藤嘉則, 両角智: スタッド筋により定着された鉄筋コンクリート部材の引抜き抵抗に関する実験研究(その 1 引き抜き実験), 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), pp409-410, 2003, 9
- 3) 久保政照, 森石裕子, 佐藤立美: システムトラス中空スラブの力学的特性に関する実験的研究(その 4 せん断耐力および継手部の耐力について), 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), pp149-150, 2004, 8
- 4) 社団法人日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 社団法人日本建築学会, pp171-188, 1999, 10