

増設せん断補強筋により耐震補強した鉄筋コンクリート平板の面外せん断耐力評価

Evaluation of Out-of-Plane Shear Strength of Reinforced Concrete Plate Seismic-Retrofitted with Post-Installed Reinforcement

高 稲 宜 和 岡 安 隆 史

要 約

重要構造物等の既存建物における基礎スラブや地下外壁は、当初の設計において、面外せん断力に対して概ねコンクリートのみで負担できる場合が多いため、面外せん断力に対する補強筋が不要であるか、もしくは最小限の配筋となっていることが一般的である。一方、近年、想定を上回る大規模地震の経験や地震動に関する研究の進展に伴い、重要構造物等では検討地震動を従来よりも増大させる場合があり、基礎スラブや地下外壁では設計時に考慮する面外せん断力が増大する傾向にある。このような最新の知見により増大した面外せん断力に対して、既存の重要構造物等の当該部材は、面外せん断補強が必要となる場合がある。そこで、筆者らは、基礎スラブや地下外壁を増設せん断補強筋により面外せん断補強する工法の開発を進めてきた。本研究では、増設せん断補強筋による面外せん断補強設計に資することを目的に、補強した部材の面外せん断耐力評価法について検討を行った。

目 次

- I. はじめに
- II. 増設せん断補強筋による面外せん断補強概要
- III. 面外せん断耐力評価
- IV. おわりに

I. はじめに

重要構造物等の既存建物における基礎スラブや地下外壁は、当初の設計において、面外せん断力に対して概ねコンクリートのみで負担できる場合が多いため、面外せん断力に対する補強筋が不要であるか、もしくは最小限の配筋となっていることが一般的である。一方、近年、想定を上回る大規模地震の経験や地震動に関する研究の進展に伴い、重要構造物等では検討地震動を従来よりも増大させる場合があり、基礎スラブや地下外壁では設計時に考慮する面外せん断力が増大する傾向にある。既存の重要構造物等の当該部材に対しても、このような最新の知見により増大した面外せん断力に対して検証することが求められ、面外せん断補強が必要となる場合がある。

基礎スラブや地下外壁といった板状部材（以下、平板と称する）のあと施工の面外せん断補強として有効な工法は少な

く、さらに基礎スラブや地下外壁は、片面が地盤に接しており、建物の外側からの補強が困難という制約もある。このような背景から、これら平板の面外せん断補強工法として、建物の内側から施工可能な工法の開発が望まれている。

筆者らは、面外せん断力を受ける基礎スラブや地下外壁を想定し、土木分野で既に実用化されている山野辺ら^{1),2)}の「増設せん断補強筋」による耐震補強工法を建築分野に展開するため、逆対称曲げせん断実験を実施し、基礎性状の把握を行ってきた³⁾。その結果、増設せん断補強筋は、180度フックを有する通常のせん断補強筋と異なり、端部が主筋に直接かかっていないため、補強された部材は、通常のせん断補強筋のみを有する部材とせん断抵抗機構が異なることが明らかとなった。

そこで本研究では、増設せん断補強筋による面外せん断補強設計に資することを目的に、過去に実施した筆者らと山野辺らの実験結果を用い、補強した部材の面外せん断耐力評価法について検討を行う。

II. 増設せん断補強筋による面外せん断補強概要

増設せん断補強筋による面外せん断補強概要を Fig.1 に示す。本研究で対象とする増設せん断補強筋による面外せん断

キーワード：増設せん断補強筋，耐震補強，面外せん断耐力，基礎スラブ，地下外壁

Keywords：post-installed shear reinforcement, seismic retrofitting, out-of-plane shear strength, foundation slab, underground exterior wall

補強法は、既存 RC 部材の表面から削孔機で削孔を行い、その孔内に増設せん断補強筋を挿入し、グラウトで固定することにより、構造体と一体化し、部材の面外せん断耐力を向上させるものである。本研究で用いる増設せん断補強筋は、ねじ鉄筋の両端に定着体を取り付けたものがある。この定着体は、孔内に挿入した増設せん断補強筋端部の定着性能を向上させ、面外せん断補強の効果を確認する²⁾。

定着体の材質は、山野辺ら¹⁾²⁾のセラミック製と筆者らが新たに採用した鋼製の2種類とした (Photo 1)。また、定着体の種類は、挿入するために径を小さくした先端型 (Tip anchor) と定着を確実にする後端型 (End anchor) があり、材質により形状が異なる。セラミック製の先端型は円筒形状、後端型は円錐に膨らみを持たせた形状を有している。また、鋼製の先端型は六角形の長ナット形状で、後端型は六角形の長ナットの端部に円形の定着板を有した形状をしている。いずれの定着体も、内部はねじ鉄筋の形状に合わせたねじ形状となっており、ねじ鉄筋を定着体にねじ込み、樹脂系又は無機系グラウトで固定することにより、両者を一体化させる。このような仕組みのため、増設せん断補強筋は、施工現場において、各孔の実際の削孔長に合わせて長さを容易に調節することが可能である。なお、本研究では、増設せん断補強筋の総称を「PSR (Post-Installed Shear Reinforcement)」, ねじ鉄筋の両端にセラミック製定着体を用いた場合を「セラミックキャップバー (CCb)」, 両端に鋼製定着体を用いた場合を「スチールキャップバー (SCb)」と称する (Photo 2)。また、ねじ鉄筋の一方に先端型, 他方に後端型を用いた場合を「標準型 (Standard type)」, 両端に先端型を用いた場合を「両端先端型 (Both tip anchor type)」, 両端に後端型を用いた場合を「両端後端型 (Both end anchor type)」と称する。

Ⅲ. 面外せん断耐力評価

1. 検討データの範囲

面外せん断耐力評価のための検討データの範囲を Table 1 に、検討対象試験体の諸元一覧を Table 2 に、最大耐力実験値及びせん断耐力計算値一覧を Table 3 に、試験体形状・配筋例を Fig.2 に示す。なお、表中の記号は、後述の Fig.3, Fig.4, (1)式, (9)式等を参照されたい。

検討対象試験体は、いずれも増設せん断補強筋を有するせん断破壊型の試験体で、筆者らが逆対称曲げせん断載荷 (Fig.3 : Type A) で実施した 24 体と、山野辺らが 2 点曲げ載荷 (Fig.3 : Type B) で実施した 10 体の計 34 体である。Type A は建築分野で、Type B は土木分野で一般的に行われている載荷方法である。

本章では、山野辺らが提案した増設せん断補強筋によるせん断補強効果の考え方を述べた後、この考え方を取り入れた土木学会「コンクリート標準示方書」⁴⁾ (以下、標準示方書

と称する)に基づく山野辺らの面外せん断耐力評価式と筆者らが新たに提案を行う荒川式、及び、許容せん断力式に関して、実験結果との比較を行い、これら評価式の妥当性について検討を行う。

2. 増設せん断補強筋によるせん断補強効果の考え方

最大耐力時の増設せん断補強筋のひずみに関して、増設せん断補強筋が短い試験体では、フックなどで定着されている通常のせん断補強筋を有する試験体よりせん断ひび割れを横切るせん断補強筋のひずみが小さいことが確認された³⁾。したがって、増設せん断補強筋により既存構造物を面外せん断補強する場合は、通常のせん断補強筋が負担するせん断力

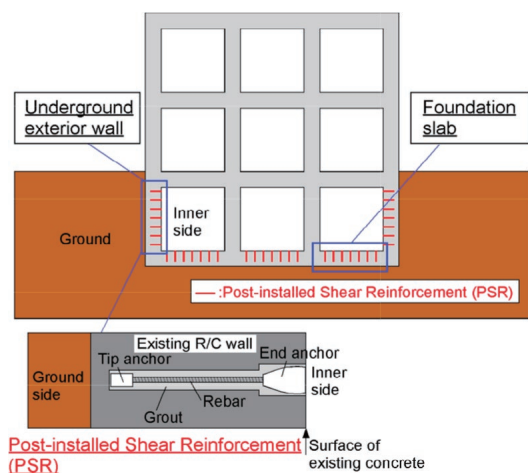
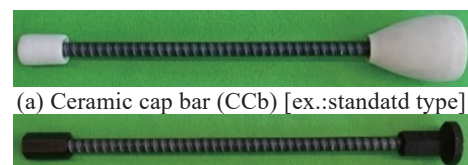


Fig.1 増設せん断補強筋による面外せん断補強概要 (Shear Retrofitting Using Post-Installed Shear Reinforcement)



Tip anchor End anchor Tip anchor End anchor
(a) Ceramic (b) Steel

Photo 1 定着体の種類と形状 (Type and Shape of Anchor Devices)



(a) Ceramic cap bar (CCb) [ex.:standatd type]

(b) Steel cap bar (SCb) [ex.:standatd type]

Photo 2 増設せん断補強筋 (Post-Installed Shear Reinforcement)

をすべて負担することは困難であるといえる。そこで、山野辺ら^{1),2)}は、アルカリ骨材反応により破断したせん断補強筋のせん断補強効果の評価法⁵⁾を参考に、増設せん断補強筋のせん断補強効果を定着が十分でないせん断補強筋とみなして以下のように評価している。

せん断ひび割れを架橋する増設せん断補強筋を考えた時、せん断ひび割れが増設せん断補強筋の先端より先にある場合は、増設せん断補強筋はせん断力を負担することができず、一方、増設せん断補強筋先端位置から定着長 l_f 以上手前の位置にせん断ひび割れがある場合は、鉄筋の付着や定着体小口の支圧により定着性能が確保されていると考えられ、増設せ

Table 1 検討データの範囲 (Study Data Range)

Number of specimens	34 specimens	
	[Classification]	
	Authors' 3) : 24 specimens	
	Yamanobe et al.'s 2) : 10 specimens	
Concrete strength [σ_B](N/mm ²)	25.2~63.1	
Depth [D](mm)	500~1000	
Shear span ratio [a/d]	1.16~2.78	
Tensile main rebar ratio [a_s/bd](%)	1.05~1.60	
Diameter of PSR	D13~D29	
Yield strength of PSR [σ_{wy}](N/mm ²)	329.0~406.8	
PSR ratio [ρ_w](%)	0.125~0.479	
$[L_{pe}/D]^1$	0.70~1.00	
Shear reinforcement effectiveness ratio [V_r]	0.67~1.00	
Effective section ratio [$L_{pe}/(D-d_{t1})^2$]	0.77~1.00	

*1 No.7, No.8: L_{pe}/D , Other: L_p/D . *2 No.7, No.8: $L_{pe}/(D-d_{t1})$ Other: $L_p/(D-d_{t1})$

Table 2 検討対象試験体一覧 (Specimens Program)

Ref.	Name	Type of loading	Width b (mm)	Depth D (mm)	Effective depth d (mm)	Shear span a (mm)	Shear span ratio a/d	Concrete strength σ_B (N/mm ²)	Tensile Main rebar [$\rho_s=a_s/bd$]	Shear reinforcement										
										Specification	Yield stress σ_{wy} , ρ σ_{wy} (N/mm ²)	Existing shear reinforcement (Standard hook)		Post-installed shear reinforcement (PSR)						
												Reinforcement ratio [ρ_w]	Reinforcement ratio [ρ_w]	Insertion length L_p (mm)	L_p/D					
3)	No.3	Type A	600	500	403	1000	2.48	26.2	10-D22 SD490 [$\rho_s=1.60\%$]	D13-CCb [Standard type]	329	-	2-D13SD295@169 [0.25%]	454	0.91					
	No.4							27.5						406	0.81					
	No.5							27.8						329	351	0.70				
	No.6							28.0						D16-CCb [Standard type]	342	2-D16SD295@169 [0.39%]	351	0.70		
	No.7							26.9						D13-Standard hook + D13-CCb [Standard type]	329	1-D13SD295@169 [0.125%]	1-D13SD295@169 [0.125%]	351	0.70	
	No.8							27.1						D13-CCb [Standard type]	329	-	2-D13SD295@169 [0.25%]	454 + 351	0.91 + 0.70	
	No.9							32.6						D13-CCb [Standard type]	342	-	2-D13SD295@169 [0.25%]	381	0.76	
	No.10							63.1										381	0.76	
	No.11							29.9										342	351	0.70
	No.12							28.7										342	2-D13SD295@338 [0.125%]	381
	No.13		29.6	D16-CCb [Standard type]	342	2-D16SD295@169 [0.39%]	479	0.96												
	No.14		28.1	342	381	0.76														
	No.17		27.5	8-D22 SD490 [$\rho_s=1.20\%$]	342	-	2-D13SD295@169 [0.25%]	479	0.96											
	No.18		29.8	D13-CCb [Standard type]	342	-	2-D13SD295@169 [0.25%]	381	0.76											
	No.19		26.8	D13-CCb [Both tip anchor type]	342	-	2-D13SD295@169 [0.25%]	351	0.70											
	No.20		25.2	10-D22 SD490 [$\rho_s=1.60\%$]	342	-	2-D13SD295@169 [0.25%]	454	0.91											
	No.21		25.5	D13-CCb [Standard type]	342	-	2-D13SD295@169 [0.25%]	351	0.70											
	No.23		25.2	D13-SCb [Both tip anchor type]	342	-	2-D13SD295@169 [0.25%]	454	0.91											
	No.24		25.5	10-D22 SD490 [$\rho_s=1.60\%$]	342	-	2-D13SD295@169 [0.25%]	351	0.70											
	No.25		25.3	D13-SCb [Standard type]	342	-	2-D13SD295@169 [0.25%]	351	0.70											
No.LB	30.9	12-D22 SD685 [$\rho_s=1.06\%$]	342	-	2-D13SD295 @200 [0.25%]	954	0.95													
No.LC	28.0	D13-CCb [Standard type]	342	-	2-D13SD295 @200 [0.25%]	750	0.75													
No.SB	25.7	2-D22 SD685	342	-	1-D13SD295@200 [0.25%]	479	0.96													
No.SC	25.7	2-D16 SD685 [$\rho_s=1.07\%$]	342	-	1-D13SD295@200 [0.25%]	375	0.75													
2)	No.1-3	Type B	825	685	590	1640	2.78	33.9	6-D38 SD490 [$\rho_s=1.41\%$]	D22-CCb [Standard type]	407	-	2-D22SD345@325 [0.29%]	635	0.93					
	No.2-2							38.0	6- ϕ 36 PC bar [$\rho_s=1.05\%$]	D29-CCb [Standard type]	389	-	2-D29SD345@325 [0.48%]	750	0.94					
	No.3-3							42.4	4-D35 SD490 [$\rho_s=1.48\%$]	D16-CCb [Standard type]	389	-	2-D16SD345@200 [0.33%]	430	0.86					
	No.3-4							42.6						408	0.82					
	No.3-5							42.9						389	408	0.82				
	No.3-6							42.6						389	392	0.78				
	No.4-1		34.0	D16-CCb [Both tip anchor type]	390	-	2-D16SD345@200 [0.33%]	408	0.82											
	No.4-2		34.3					408	0.82											
	No.4-3		33.5					390	392	0.78										
	No.4-4		33.9					D16-CCb [Both end anchor type]	390	-	2-D16SD345@200 [0.33%]	500	1.00							

*1: L_{pe} , *2: L_{pe}/D

Table 3 最大耐力実験値及びせん断耐力計算値一覧
(Test Results and Calculated Value)

Name	Maximum shear strength eQ_{max} (kN)	Failure mode ¹⁾	L_{pe}/D ²⁾	$L_{pe}/(D-d_{t1})$ ³⁾	γ_o	Calculated shear strength							Remarks	
						PSR Q_{JSCE} (kN)	eQ_{max} PSR Q_{JSCE}	PSR Q_{min1} (kN)	eQ_{max} PSR Q_{min1}	PSR Q_{min2} (kN)	eQ_{max} PSR Q_{min2}	PSR Q_{AU} (kN)		eQ_{max} PSR Q_{AU}
No.3	513	ST	0.91	1.00	0.96	377	1.36	374	1.37	374	1.37	290	1.77	D13-CCb [Standard type]
No.4	450	ST	0.81	0.94	0.84	360	1.25	371	1.21	358	1.25	278	1.62	D13-CCb [Standard type]
No.5	382	ST	0.70	0.82	0.69	334	1.14	358	1.07	317	1.21	240	1.59	D13-CCb [Standard type]
No.6	361	ST	0.70	0.82	0.67	404	0.89	393	0.92	352	1.03	275	1.31	D16-CCb [Standard type]
No.7	486	ST	0.78	0.91	0.69	359	1.36	368	1.32	348	1.40	266	1.83	D13-Standard hook+ CCb($L_p/D=0.70$) [Standard type]
No.8	469	ST	0.81	0.94	0.96, 0.69	356	1.32	366	1.28	352	1.33	273	1.72	D13-CCb [Standard type]($L_p/D=0.91+0.70$)
No.9	427	ST	0.76	0.84	0.74	375	1.14	429	1.00	384	1.11	293	1.46	D13-CCb [Standard type]
No.10	534	ST	0.76	0.84	0.74	433	1.23	596	0.90	524	1.02	397	1.35	D13-CCb [Standard type]
No.11	447	ST	0.70	0.77	0.67	355	1.26	406	1.10	346	1.29	261	1.71	D13-CCb [Standard type]
No.12	373	ST	0.76	0.84	0.74	294	1.27	363	1.03	321	1.16	265	1.41	D13-CCb [Standard type]
No.13	622	ST	0.96	1.00	0.95	512	1.22	476	1.31	476	1.31	391	1.59	D16-CCb [Standard type]
No.14	437	ST	0.76	0.84	0.72	439	1.00	439	0.99	398	1.10	316	1.38	D16-CCb [Standard type]
No.17	726	SC	0.96	1.00	0.97	390	1.86	624	1.16	624	1.16	498	1.46	D13-CCb [Standard type]
No.18	624	SC	0.76	0.84	0.74	352	1.77	625	1.00	548	1.14	428	1.46	D13-CCb [Standard type]
No.19	419	ST	0.70	0.82	0.69	336	1.24	356	1.18	316	1.33	238	1.76	D13-CCb [Both tip anchor type]
No.20	548	ST	0.91	1.00	0.96	381	1.44	373	1.47	373	1.47	287	1.91	D13-CCb [Standard type]
No.21	408	ST	0.70	0.82	0.69	333	1.22	349	1.17	310	1.31	234	1.74	D13-CCb [Standard type]
No.23	508	ST	0.91	1.00	0.96	381	1.33	373	1.36	373	1.36	288	1.77	D13-SCb [Both tip anchor type]
No.24	364	ST	0.70	0.82	0.69	333	1.09	349	1.04	311	1.17	234	1.56	D16-SCb [Both tip anchor type]
No.25	365	ST	0.70	0.82	0.69	333	1.10	349	1.05	310	1.18	233	1.56	D13-SCb [Standard type]
No.LB	958	ST	0.95	1.00	0.98	615	1.56	725	1.32	725	1.32	593	1.62	D13-CCb [Standard type]
No.LC	636	ST	0.75	0.81	0.75	529	1.20	662	0.96	584	1.09	460	1.38	D13-CCb [Standard type]
No.SB	221	ST	0.96	1.00	0.97	161	1.37	169	1.31	169	1.31	139	1.60	D13-CCb [Standard type]
No.SC	187	ST	0.75	0.82	0.73	141	1.32	159	1.17	142	1.31	114	1.64	D13-CCb [Standard type]
No.1-3	1082	ST	0.93	1.00	0.96	881	1.23	827	1.31	827	1.31	634	1.71	D22-CCb [Standard type]
No.2-2	1598	ST	0.94	1.00	0.94	1323	1.21	1107	1.44	1107	1.44	963	1.66	D29-CCb [Standard type]
No.3-3	563	ST	0.86	1.00	0.89	510	1.10	482	1.17	482	1.17	379	1.49	D16-CCb [Standard type]
No.3-4	570	ST	0.82	0.95	0.83	492	1.16	476	1.20	461	1.24	359	1.59	D16-CCb [Standard type]
No.3-5	531	ST	0.82	0.95	0.83	493	1.08	477	1.11	463	1.15	360	1.48	D16-CCb [Standard type]
No.3-6	526	ST	0.78	0.91	0.78	480	1.10	471	1.12	446	1.18	344	1.53	D16-CCb [Standard type]
No.4-1	532	ST	0.82	0.95	0.82	474	1.12	436	1.22	424	1.26	329	1.61	D16-CCb [Both tip anchor type]
No.4-2	535	ST	0.82	0.95	0.82	475	1.13	438	1.22	425	1.26	330	1.62	D16-CCb [Both tip anchor type]
No.4-3	546	ST	0.78	0.91	0.78	460	1.19	428	1.27	407	1.34	314	1.74	D16-CCb [Both tip anchor type]
No.4-4	661	ST	1.00	1.00	1.00	525	1.26	456	1.45	456	1.45	355	1.86	D16-CCb [Both end anchor type]

¹⁾ ST: Shear-Tension failure, SC: Shear-Compression failure. ²⁾ No.7, No.8: L_{pe}/D , Other: L_p/D . ³⁾ No.7, No.8: $L_{pe}/(D-d_{t1})$ Other: $L_p/(D-d_{t1})$

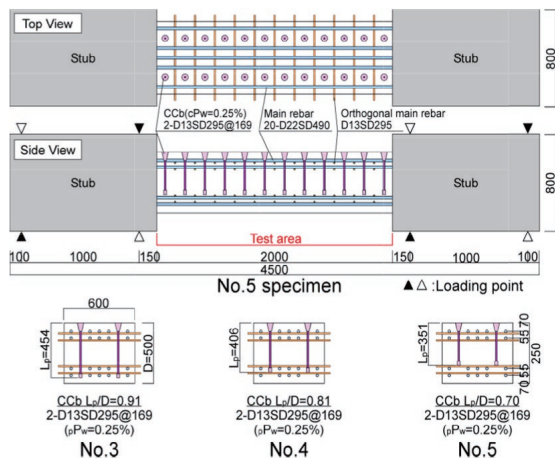


Fig.2 試験体形状・配筋例
(Details of the specimens)

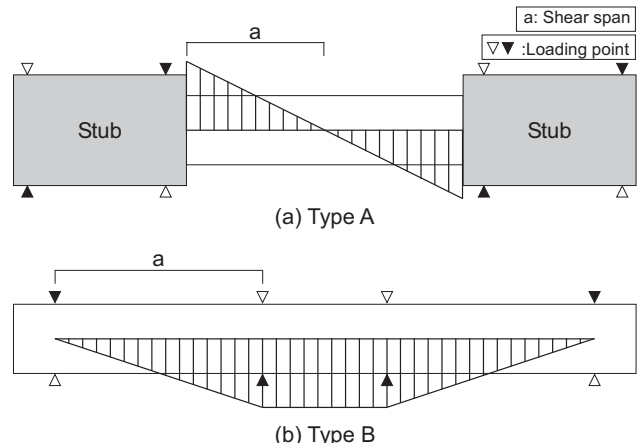


Fig.3 載荷方法
(Type of Loading)

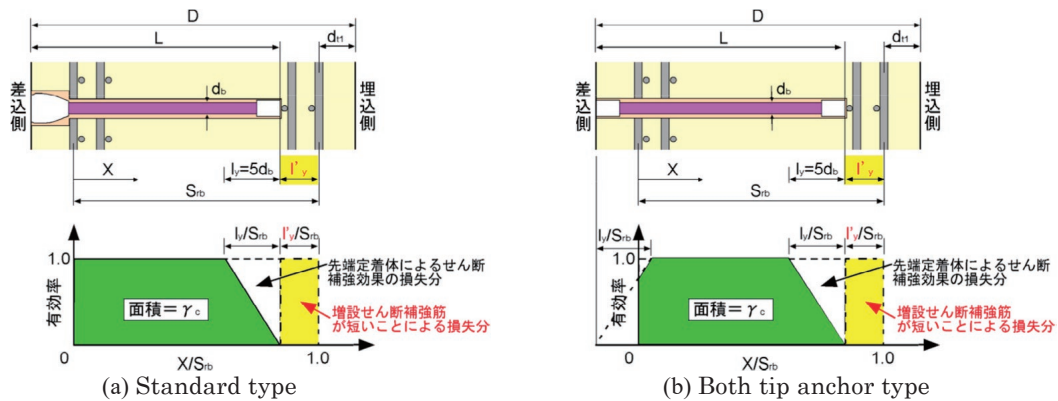


Fig.4 増設せん断補強筋のせん断補強有効率 γ_p
(Concept of Shear Reinforcement Effectiveness Ratio)

ん断補強筋は降伏強度相当のせん断力を負担することができるものと仮定している。また、増設せん断補強筋先端位置付近にせん断ひび割れがある場合は、ある程度のせん断力は負担できるが当該位置は定着性能が低いいため、増設せん断補強筋は降伏強度相当より小さいせん断力しか負担できない。先端型定着体が増設せん断補強筋の降伏強度相当以上の定着力を発揮するための必要定着長 l_y は、引抜試験の結果²⁾より $l_y=5d_b$ (d_b : 鉄筋径の呼び名) とし、「増設せん断補強筋のせん断補強有効率 γ_p 」を定着体の組合せに応じて(1.1)式から(1.3)式に示すように定義している (Fig.4 参照)。このように定義した「増設せん断補強筋のせん断補強有効率 γ_p 」を通常のせん断補強筋として算出したせん断耐力に乗じることにより、増設せん断補強筋によるせん断力負担を評価できるとしている。

$$\text{標準型} \quad \gamma_p = 1 - \frac{l_y}{2s_{rb}} - \frac{l'_y}{s_{rb}} \quad (1.1)$$

$$\text{両端先端型} \quad \gamma_p = 1 - \frac{l_y}{2s_{rb}} - \frac{l'_y}{s_{rb}} - \frac{(l_y-d')^2}{2l_y s_{rb}} \quad (1.2)$$

$$\text{両端後端型} \quad \gamma_p = 1 \quad (1.3)$$

s_{rb} : 主筋重心間距離 (多段配筋の場合、一段筋の重心間距離とする), d' : 差込側部材表面から差込側主筋図心までの距離 (多段配筋の場合、一段筋図心までの間距離とする), l_y : 定着長²⁾ (先端型定着体: $5d_b$, 後端型定着体: 0), d_b : 増設せん断補強筋の鉄筋径の呼び名, l'_y : 埋込側の主筋図心から増設せん断補強筋先端型定着体の先端までの距離

3. 土木学会標準示方書に基づく山野辺らのせん断耐力評価式

山野辺ら²⁾は、増設せん断補強筋によりせん断補強した部材の面外せん断耐力は、補強前の既存部材の面外せん断耐力に、増設せん断補強筋により受け持たれる面外せん断耐力を累加することで評価できるとしている。つまり、増設せん断補強筋によりせん断補強した部材のせん断耐力評価法として、(2)式に示すように、標準示方書のせん断耐力算定式 ($Q_{cd}+Q_{sd}$) に、増設せん断補強筋によるせん断補強効果の項 (Q_{PSR}) を加えた式を提案している。

$$PSRQ_{JSCE} = Q_{cd} + Q_{sd} + Q_{PSR} \quad (2)$$

ここに、

$$Q_{cd} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_n \cdot f_{vcd} \cdot b \cdot d / \gamma_b \quad (3)$$

$$Q_{sd} = [A_w f_{wyd} (\sin \alpha_s + \cos \alpha_s) / s_s] z / \gamma_b \quad (4)$$

$$Q_{PSR} = \gamma_p \cdot Q_{awd} \quad (5)$$

$$Q_{awd} = [A_{aw} f_{awy d} (\sin \alpha_{as} + \cos \alpha_{as}) / s_{aw}] z / \gamma_b \quad (6)$$

Q_{cd} : せん断補強筋のない部材により受け持たれるせん断耐力, Q_{sd} : 既存せん断補強筋により受け持たれるせん断耐力, Q_{PSR} : 増設せん断補強筋により受け持たれるせん断耐力, Q_{awd} : 増設せん断補強筋を通常のせん断補強筋として算出したせん断耐力, $f_{vcd} = 20\sqrt{f'_{cd}}$ (ただし, $f_{vcd} \leq 0.72$), $\beta_d = \sqrt[4]{1000/d}$ (ただし, $\beta_d > 1.5$ となる場合は 1.5 とする), $\beta_p = \sqrt[3]{100p_v}$ (ただし, $\beta_p > 1.5$ となる場合は 1.5 とする), $N'_d \geq 0$

の場合: $\beta_n = 1 + 2M_0/M_{ud}$ (ただし, $\beta_n > 2$ となる場合は 2 とする), $N'_d < 0$ の場合: $\beta_n = 1 + 4M_0/M_{ud}$ (ただし, $\beta_n < 0$ となる場合は 0 とする), N'_d : 設計用軸方向圧縮力, M_{ud} : 軸方向力を考慮しない純曲げ耐力, M_0 : 設計用曲げモーメント M_d に対する引張縁において軸方向力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 : 断面の幅, d : 有効高さ, $p_v = A_s / (b_w \cdot d)$, 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 : (3)式の場合一般に 1.3, (4)式, (6)式の場合一般に 1.1 としてよい, A_w : 区間 s_s における既存せん断補強筋の総断面積, f_{wyd} : 既存せん断補強筋の設計降伏強度で 400N/mm^2 以下とする, α_s : 既存せん断補強筋が部材軸となす角度, s_s : 既存せん断補強筋の配置間隔, 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で一般に $d/1.15$ としてよい, $f_{awy d}$: 増設せん断補強筋の設計降伏強度で 400N/mm^2 以下とする, α_{as} : 増設せん断補強筋が部材軸となす角度, s_{as} : 増設せん断補強筋の配置間隔

なお、増設せん断補強筋により受け持たれる Q_{PSR} は、(5)式に示すように、増設せん断補強筋を通常のせん断補強筋として算出したせん断耐力 Q_{awd} に「増設せん断補強筋のせん断補強有効率 γ_p 」を乗じることで求める。

最大耐力実験値 eQ_{max} と(2)式による面外せん断耐力計算値 $PSRQ_{JSCE}$ の関係を Fig.5, Table 3 に示す。図の横軸は増設せん断補強筋の長さ L_p と断面せい D の比 (L_p/D) である。なお、180 度フックと増設せん断補強筋が混在している No.7 と増設せん断補強筋の長・短が混在している No.8 は、 L_p に替えて後述の(9)式に示す増設せん断補強筋の平均挿入長さ L_{pe} を用いている (後述の Fig.6, Fig.9, Fig.10 も同様)。

これより、 L_p/D が小さくなるほど、実験値/計算値が 1 に近づく傾向がみられ、1 体のみ実験値が計算値を下回っているが、(2)式により実験値の下限を概ね評価できている。なお、実験値が計算値を下回っているのは No.6 で、これは増設せん断補強筋の挿入長さが短い試験体 ($L_p/D=0.70$) であった。

4. 荒川式 (下限式) に基づくせん断耐力評価式

(1) 「増設せん断補強筋のせん断補強有効率」を考慮した場合

増設せん断補強筋によるせん断力負担は、増設せん断補強筋の降伏強度に「増設せん断補強筋のせん断補強有効率 γ_p 」

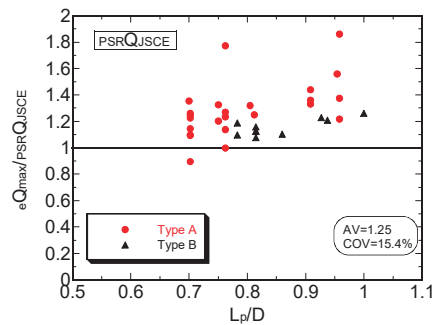


Fig.5 $eQ_{max}/PSRQ_{JSCE}$ と L_p/D の関係 (Relationship between $eQ_{max}/PSRQ_{JSCE}$ and L_p/D)

を乗じることにより評価できると考え、荒川式(下限式)⁹⁾をもとにした面外せん断耐力算定式を(7)式に示す。なお、(7)式以降のせん断耐力評価式は、180度フック型既存せん断補強筋と長さ等が異なる2種類の増設せん断補強筋(PSR-1, PSR-2と称する)が混在する場合について示している。また、(7)式は元式をSI単位系に変換している。

$$PSRQ_{min1} = \left\{ \frac{0.092k_u k_p (17.7 + \sigma_B)}{M/Qd^{0.12}} + 0.846 \sqrt{p_w \cdot \sigma_{wy} + p_1 p_w \cdot \gamma_{p1} \cdot p_1 \sigma_{wy} + p_2 p_w \cdot \gamma_{p2} \cdot p_2 \sigma_{wy}} \right\} b \cdot j \quad (7)$$

b : 断面の幅, d : 断面の有効せい, D : 断面のせい, j : 応力中心間距離 ($7d/8$), M : 設計する部材の最大曲げモーメント, Q : 設計する部材の最大せん断力, M/Qd : せん断スパン比, d_{t1} : 埋込側部材表面から埋込側主筋図心までの距離(多段配筋の場合, 一段筋図心までの間距離とする), σ_B : コンクリートの圧縮強度 (N/mm^2), k_u : 断面有効せいによる補正係数⁹⁾, k_p : 引張鉄筋比 $p_t (= \Sigma a_t / bd$, a_t : 引張鉄筋断面積) による補正係数⁹⁾ ($k_p = 0.82(100p_t)^{0.23}$), p_w : 既存せん断補強筋のせん断補強筋比, $p_1 p_w$: 増設せん断補強筋のせん断補強筋比【PSR-1: $p_1 p_w$, PSR-2: $p_2 p_w$ 】, σ_{wy} : 既存せん断補強筋の降伏強度 (N/mm^2), $p_1 \sigma_{wy}$: 増設せん断補強筋の降伏強度 (N/mm^2)【PSR-1: $p_1 \sigma_{wy}$, PSR-2: $p_2 \sigma_{wy}$ 】, γ_{pi} : 増設せん断補強筋のせん断補強有効率((1.1)式~(1.3)式)【PSR-1: γ_{p1} , PSR-2: γ_{p2} 】

最大耐力実験値 eQ_{max} と(7)式による面外せん断耐力計算値 $PSRQ_{min1}$ の関係を Fig.6, Table 3 に示す。これより, L_p/D が小さくなるほど, 実験値/計算値が小さくなる傾向がみられ, $L_p/D=0.8$ 程度以下で実験値/計算値が1を下回る試験体が見つかる。

(2) 「増設せん断補強筋のせん断補強有効率」と「部材断面有効率」を考慮した場合

筆者らが実施した逆対称曲げせん断加力の実験³⁾において, 増設せん断補強筋を有する試験体は, 次のような破壊性状を示した (Photo3, Fig.7 参照)。まず先端型定着体が曲げ引張側となる付近のヒンジ域せん断ひび割れが進展・拡幅し (Fig.7①), その後最大耐力付近でこのひび割れが増設せん断補強筋先端付近に達したときに増設せん断補強筋先端を

結ぶように水平方向にひび割れが発生し (Fig.7②), 最終的にこの水平ひび割れを境に断面が上下に分離した。したがって, 最大耐力時において, 増設せん断補強筋先端以深のコンクリートはせん断抵抗に寄与しないと考えられる。そこで, (8)式に示すように, この影響を(7)式のコンクリートによるせん断抵抗の項(第1項)に「部材断面有効率 $L_{pe}/(D-d_{t1})$ (L_{pe} : 増設せん断補強筋の平均挿入長さ, D : 断面せい, d_{t1} : 埋込側(Ground side)部材表面から埋込側主筋図心までの距離 (Fig.4))」を乗じることにより取り入れることとした。部材断面有効率の分母を $(D-d_{t1})$ としたのは, 増設せん断補強筋を埋込側(Ground side)図心位置程度まで挿入した試験体は180度フック型試験体と同程度のせん断耐力を有していたためである (Fig.8)³⁾。なお, 180度フック型既存せん断補強筋や長さの異なる増設せん断補強筋が混在する場合, 最も短い増設せん断補強筋先端以深のコンクリートはせん断抵抗に寄与しないと考える方が安全側であるが, 既存せん断補強筋を有する部材や挿入長さの長い増設せん断補強筋で補強された部材に, 短い増設せん断補強筋が僅かでも混在することにより面外せん断耐力計算値が大幅に低下することは合理的でない。そこで, 部材断面有効率算定に当たり, 増設せん断補強筋の挿入長さは, (9)式に示すように180度フック型せん断補強筋や増設せん断補強筋それぞれの挿入長さ L_p を, それぞれの補強筋量(せん断補強筋比×せん断補強筋強度)で重み付けした平均挿入長さ L_{pe} を用いることとした。

$$PSRQ_{min2} = \left\{ \frac{0.092k_u k_p (17.7 + \sigma_B)}{M/Qd^{0.12}} \left(\frac{L_{pe}}{D-d_{t1}} \right) + 0.846 \sqrt{p_w \cdot \sigma_{wy} + p_1 p_w \cdot \gamma_{p1} \cdot p_1 \sigma_{wy} + p_2 p_w \cdot \gamma_{p2} \cdot p_2 \sigma_{wy}} \right\} b \cdot j \quad (8)$$

ここに,

$$L_{pe} = \frac{((D-d_{t1}) \cdot p_w \cdot \sigma_{wy} + L_{p1} \cdot p_1 p_w \cdot p_1 \sigma_{wy} + L_{p2} \cdot p_2 p_w \cdot p_2 \sigma_{wy})}{(p_w \cdot \sigma_{wy} + p_1 p_w \cdot p_1 \sigma_{wy} + p_2 p_w \cdot p_2 \sigma_{wy})} \quad (9)$$

以下の記号以外は(1)式, 及び, (7)式と同じ。

L_{pe} : 増設せん断補強筋の平均挿入長さ, L_{pi} : 増設せん断補強筋の挿入長さ【PSR-1: L_{p1} , PSR-2: L_{p2} 】, $L_{pe}/(D-d_{t1})$: 部材断面有効率で1以上のときは1とする。

最大耐力実験値 eQ_{max} と(8)式による面外せん断耐力計算値

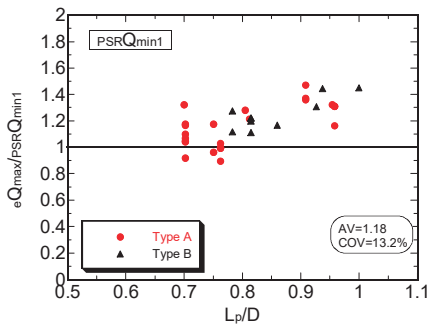


Fig.6 $eQ_{max}/PSRQ_{min1}$ と L_p/D の関係 (Relationship between $eQ_{max}/PSRQ_{min1}$ and L_p/D)

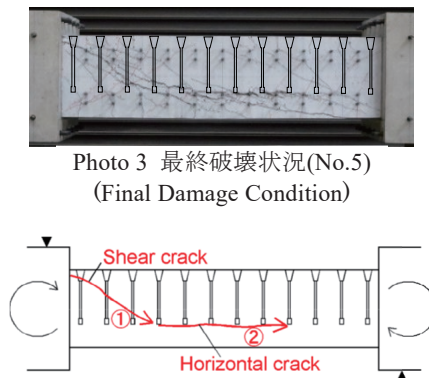


Photo 3 最終破壊状況(No.5) (Final Damage Condition) Fig.7 ひび割れ進展状況 (Progress of Cracking)

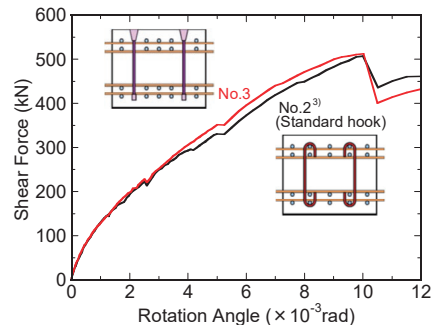


Fig.8 荷重-変形関係の比較 (Load-Displacement Relationship)

$PSRQ_{min2}$ の関係を Fig.9, Table 3 に示す。これより、「増設せん断補強筋のせん断補強有効率 γ_p 」と「部材断面有効率 $L_{pe}/(D-d_{ti})$ 」の両方を取り入れることにより、実験値/計算値の平均値は 1.26, 変動係数は 9.1%で、増設せん断補強筋挿入長さ (L_p/D) によらず、計算値は実験値を安全側に評価できていることがわかる。

5. 安全性確保のための許容せん断力式に基づく評価式

既存の基礎スラブや地下外壁の面外せん断設計では、日本建築学会「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」⁶⁾(以下、RC 規準と称する)の安全確保のための許容せん断力式(以下、許容せん断力式と称する)が用いられている。したがって、増設せん断補強した部材に関して、許容せん断力式を基本とした評価式があれば、増設せん断補強筋による補強効果を簡易的に確認するのに有用となる。

RC 規準の許容せん断力式は、荒川式を基に近似的に設計上簡便な式となるように導かれたものである⁶⁾。したがって、荒川式を基に提案したせん断耐力評価式((8)式)を参考に、「増設せん断補強筋のせん断補強有効率 γ_p 」と「部材断面有効率 $L_{pe}/(D-d_{ti})$ 」を取り入れた評価式を(10)式に示す。

$$PSRQ_{AIJ} = bj \left\{ \alpha f_s \left(\frac{L_e}{D-d_{ti}} \right) + 0.5 \cdot eq\sigma_{wy} (p_w + p_1 p_w + p_2 p_w - 0.002) \right\} \quad (10)$$

ただし、

$$\alpha = \frac{4}{\frac{M}{Qd} + 1} \quad \text{かつ} \quad 1 \leq \alpha \leq 2$$

せん断補強筋の和($p_w + p_1 p_w + p_2 p_w$)が 1.2%を超える場合は 1.2%とする。

以下の記号以外は(1)式、及び、(7)~(9)式と同じ。

f_s : コンクリートの短期許容せん断応力度 (N/mm²) (1.5($\sigma_B/30$)かつ1.5(0.49 + $\sigma_B/100$)以下), $eq\sigma_{wy}$: せん断補強筋の等価降伏強度 (N/mm²) で(11)式により求める。

$$eq\sigma_{wy} = \frac{p_w \sigma_{wy} + p_1 p_w \gamma_{p1} \sigma_{wy} + p_2 p_w \gamma_{p2} \sigma_{wy}}{p_w + p_1 p_w + p_2 p_w} \quad (11)$$

最大耐力実験値 eQ_{max} と(10)式による面外許容せん断力計算値 $PSRQ_{AIJ}$ の関係を Fig.10, Table 3 に示す。これより、実験値/計算値の平均値は 1.60, 変動係数は 9.5%で、(8)式に比べて安全側の評価(実験値/計算値は(8)式の 1.27 倍)となつて

いる。

6. せん断耐力評価式の比較

増設せん断補強筋の挿入長さがパラメータの No.3~No.5 ($a/d=2.48$, Type A), No.16~No.17 ($a/d=1.16$, Type A), 及び, No.3-3~No.3-6 ($a/d=2.78$, Type B) に関して、最大耐力実験値と提案した各せん断耐力評価式による計算値の関係を Fig.11 に示す。

これより、増設せん断補強筋の挿入長さが短くなることに伴うせん断耐力計算値の低下の傾きは、 $PSRQ_{ISCE}$ ((2)式), $PSRQ_{min2}$ ((8)式), $PSRQ_{AIJ}$ ((10)式) の3式は同程度で、実験結果の傾向を概ね表現できていることがわかる。一方、これら3式に比べて $PSRQ_{min1}$ ((7)式) の傾きは若干緩やかであった。

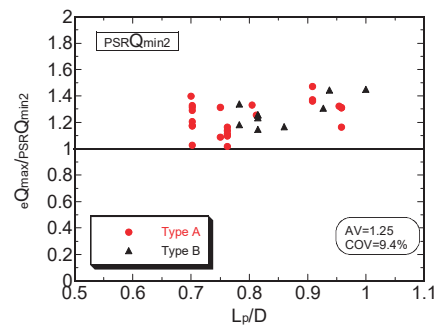


Fig.9 $eQ_{max}/PSRQ_{min2}$ と L_p/D の関係 (Relationship between $eQ_{max}/PSRQ_{min2}$ and L_p/D)

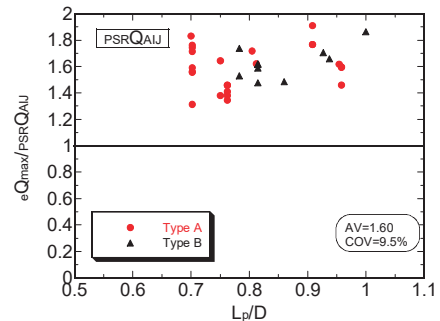


Fig.10 $eQ_{max}/PSRQ_{AIJ}$ と L_p/D の関係 (Relationship between $eQ_{max}/PSRQ_{AIJ}$ and L_p/D)

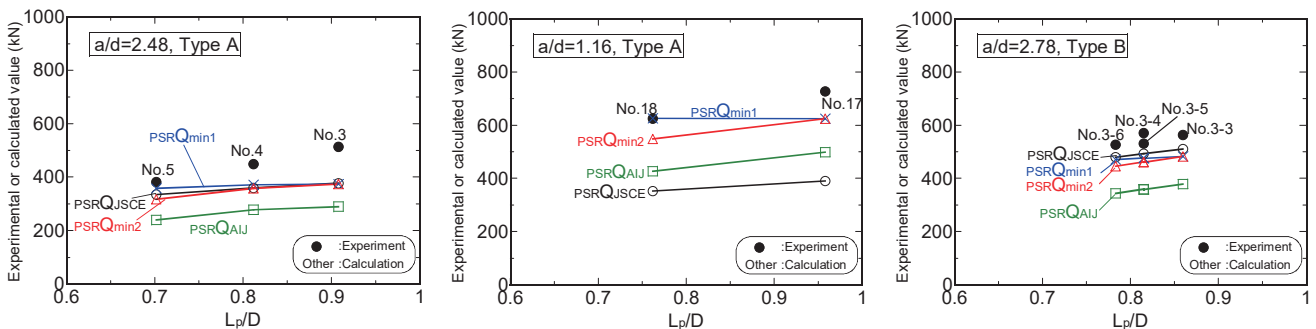


Fig.11 最大耐力実験値とせん断耐力計算値の関係 (Relationship Experimental and Calculated Value)

IV. おわりに

増設せん断補強筋により面外せん断補強した試験体 34 体の実験結果を用い、補強した部材の面外せん断耐力評価法について検討を行った。本研究に限られた範囲内で、得られた知見を以下に示す。

- ① 荒川式（下限式）を基に、増設せん断補強筋のせん断補強効果を表す「増設せん断補強筋のせん断補強有効率」と増設せん断補強筋先端以深のコンクリートがせん断抵抗に寄与しないことを表す「部材断面有効率」を取り入れた提案式は、面外せん断耐力を安全側に評価した。許容せん断力式を基にした提案式は、荒川式を基にした式よりさらに安全側の評価となった。
- ② 標準示方書式を基に、増設せん断補強筋の効果を取り入れた山野辺らの提案式は、面外せん断耐力の下限值を評価できることを確認した。

参考文献

- 1) 山野辺慎一，金光嘉久，玉野慶吾，古市耕輔，曾我部直

樹，植田政明，豊田要，佐貫武：セラミックキャップバー（CCb）工法の適用拡大，鹿島技術研究所年報，第 61 号，2013.9，pp.49-56.

- 2) 土木研究センター：建設技術審査証明報告書第 0811 号 後施工セラミック定着型せん断補強鉄筋「セラミックキャップバー（CCb）」，2018.1.
- 3) 岡安隆史，高稲宜和，村上浩也，川瀬喬久：増設せん断補強筋により耐震補強した鉄筋コンクリート平板の面外せん断性状，日本建築学会構造系論文集，第 86 巻，第 789 号，2021.11，pp.1507-1518
- 4) 土木学会：2017 年制定 コンクリート標準示方書 [設計編]，2018.3.
- 5) 土木学会：アルカリ骨材反応対策小委員会報告書 一鉄筋破断と新たな対応一，コンクリートライブラリー 124，2005.9.
- 6) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，2018.12.

Evaluation of Out-of-Plane Shear Strength of Reinforced Concrete Plate Seismic-Retrofitted with Post-Installed Reinforcement

Yoshikazu Takaine and Takashi Okayasu

Recently, with the progress of research on earthquake ground motion, it has become necessary to increase the out-of-plane shear force used in the design of reinforced concrete flat plates such as foundation slabs and underground outer walls. There is a concern that out-of-plane shear failure will occur in the flat plates of existing buildings with an insufficient amount of shear reinforcement. However, effective seismic retrofitting of foundation slabs or underground outer walls is difficult because the construction work can be completed only from the inside of the building. To deal with this problem, a post-installed shear reinforcement (PSR) method was developed. In this study, out-of-plane shear strength evaluation formulas are proposed using past test results.