

[117] 無開口耐震壁の壁板にせん断初ひび割れが発生する時の層間変形角

正会員 ○江崎 文也 (九州大学工学部)
 正会員 富井 政英 (九州大学工学部)
 瀬戸口 幹光 (九州大学工学部)
 松石 泰浩 (九州大学工学部)

1. 序

現在、耐震壁の断面設計は、(i) 比較的頻度の多い中小地震に対しては、壁板にせん断初ひび割れが生じないような弾性設計、(ii) 頻度の少ない大地震に対しては、壁板にせん断初ひび割れを認めるような塑性設計という2つの設計法により行なわれている。ゆえに、合理的な耐震壁の断面設計を行なうためには、各々の設計法の限界となる点の力学的特性を明らかにしておく必要がある。従来、弾性設計の限界として、壁板にせん断初ひび割れが発生する時の水平せん断力 Q_{cr} がとくに注目され、既往の実験結果によれば、かなりばらついてはいるが、ほぼ $Q_{cr} = 0.1 F_c d l$ (F_c : コンクリート圧縮強度, t : 壁厚, l : 壁板周辺の柱中心間距離), F_c が大きくなると壁板の収縮応力の影響により、低い方に大きくばらつくことを富井・江崎によって明らかにしている¹⁾。しかし、最近の構造設計では、動的設計が取り入れられ、変形も重要な設計資料とみなされてきていること、 Q_{cr} のばらつきがかなり大きいという結果を考慮し、本論では、弾性設計の限界として変形に注目し、壁板にせん断初ひび割れが発生する時の層間せん断変形角 $R_{s\cdot cr}$ ($= \delta_{s\cdot cr} / h$, $\delta_{s\cdot cr}$: 壁板にせん断初ひび割れが発生する時のせん断変形による層高 h 間の相対水平変位, h : 耐震壁の高さ(層高)で、上下はり中心間距離、ただし、図-1に示す試験体の h は図示による)を、既往の多くの実験結果から統計的に解析し、定量的にとらえることを試みたものである。これまで、 $R_{s\cdot cr}$ に関する研究はほとんどないが、既往の実験結果によれば、 $R_{s\cdot cr} = 0.2 \sim 0.3 \times 10^{-3} \text{ rad.} = \text{平均 } 0.25 \times 10^{-3} \text{ rad.}$ であることが提唱されており²⁾、本論では、さらに多くの資料によって、信頼のある値を得ようとするものである。

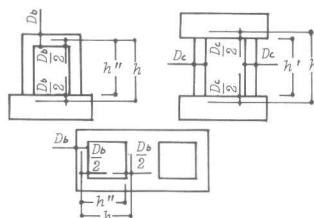


図-1 耐震壁の層高

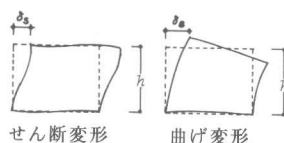


図-2 耐震壁の層間水平変位

2. 資料の選択

資料の中で、 Q_{cr} は発表されているが、その時の層間変形角 R_{cr} ($= \delta_{cr} / h$, δ_{cr} : 壁板にせん断初ひび割れが発生する時の層高 h 間の相対水平変位) が発表されていないものがある。そこで、これらの資料については、荷重変形曲線を投影機で拡大し、 R_{cr} を推定した。その結果、無開口単独耐震壁に関する静的なせん断実験資料の中から、付帯ラーメン部材の曲げ初ひび割れが、壁板のせん断初ひび割れより先行していることが明らかでない資料(以後、曲げ先行の資料と呼ぶ)を除き、Concrete: 112例(日本: 73, 外国: 39), Mortar 73例(日本: 73), Total 185例(日本: 146, 外国: 39)を選択した。選択した資料のうち、せん断初ひび割れが、曲げひび割れより先行していることが明らかでない資料(以後、せん断先行の資料と呼ぶ)62例、いずれが先行しているか明らかでない資料(以後、不明な資料と呼ぶ)123例である(表-1参照)。一般に、耐震壁の層間変形角 R は、耐震壁の底部の回転角が大きい

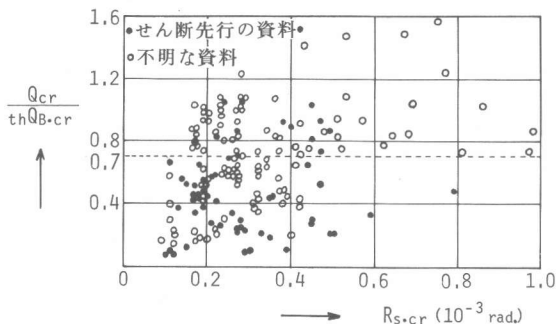


図-3 $Q_{cr} / t h Q_{B\cdot cr}$ と $R_{s\cdot cr}$ の関係

のとする、 $R = R_s + R_B$ ($R_s = \delta_s / h$, $R_B = \delta_B / h$; δ_s, δ_B :せん断・曲げ変形による層高 h 間の相対水平変位) で表される(図-2参照)。既往のせん断実験方法のうち、(i)片持ばりの自由端に集中荷重を与える方法、(ii)単純支持ばりの中間に集中荷重を与える方法では、耐震壁の水平断面にせん断力とともに、曲げも作用することになるため、実験値の R_{cr} から $R_{s,cr}$ を分析する必要がある。そこで、これらの資料については、I型ばり理論を用いて、曲げおよびせん断剛性の低下率が等しいものとして求められる R_s と R_B の比率によって、 R_{cr} から $R_{s,cr}$ を推定した。ゆえに、不明な資料については、せん断先行と考えられる資料を選択する必要がある。図-3に $Q_{cr} / thQ_{B,cr} (thQ_{B,cr} = 1.8\sqrt{f_c} Z_e + NZ_e / Ae^3)$, $thQ_{B,cr}$:耐震壁に曲げ初ひび割れが発生する時の水平せん断力計算値, Ae, Z_e :対象とする断面について鉄筋を考慮して求めた有効断面積および有効断面係数)と $R_{s,cr}$ の関係を示す。 $Q_{cr} / thQ_{B,cr} > 0.7$ の不明な資料の $R_{s,cr}$ は大きい方になりばらついており、曲げ先行の資料が含まれている可能性がある。ゆえに、不明な資料のうち、 $Q_{cr} / thQ_{B,cr} \leq 0.7$ の条件に適合する資料50例とせん断先行の資料62例を合せ、結局、合計112例を解析対象の全資料とした。なお、粗骨材の粒径が5mm以上のものは Concrete, 5mm以下のものは Mortar に分類した。

表-1 耐震壁の壁板にせん断初ひび割れが発生する時の層間変形角 R_{cr} と層間せん断変形角 $R_{s,cr}$ (単位 10^{-3} rad.)

引用文献	試験体符号	R_{cr}	$R_{s,cr}$	引用文献	試験体符号	R_{cr}	$R_{s,cr}$	引用文献	試験体符号	R_{cr}	$R_{s,cr}$	引用文献	試験体符号	R_{cr}	$R_{s,cr}$
1C	6CWF-00	0.11	0.11	12C	3Pa 0.71A76	0.19**	0.17	21C	3A2-1	0.82*	0.69	3M	46	0.28*	0.20
	6CWF-AA	0.16	0.16		13C	S-0-5	0.15		0.11	3A2-2	0.38*		0.32	48	0.28*
	8CWF-00	0.21	0.21	R30-5		0.65	0.49		3A2-3	0.92*	0.77		50	0.28**	0.20
	8CWF-BO	0.17	0.17	R30-5		0.22	0.17		3A2-4	0.20*	0.17		51	0.34*	0.23
	8CWF-AA	0.23	0.23	R30-10		0.28	0.22		4B1-1	0.30*	0.22		53	0.34*	0.23
	8CWF-BB	0.14	0.14	14C	20×20×6	0.19	0.19		4B1-2	0.50*	0.42	55	0.34*	0.23	
	10CWF-00	0.23	0.23		15C	18×18×6	0.22		0.22	4B1-3	1.10*	0.97	B-3	0.24	0.24
10CWF-AA	0.15	0.15	18×15×8	0.44		0.44	4B1-4	0.18*	0.17	A-1	0.23	0.23			
2C	A-1.L	0.50	0.42	16C	D=240-1	0.23	0.23	4BII-1	0.50*	0.36	B-1	0.17	0.17		
	3C	B-3	0.21		0.21	D=240-2	0.35	0.35	4BII-3	0.26**	0.23	B-2	0.24	0.24	
B-4		0.17	0.17	17C	D	0.27	0.27	4BII-4	0.55*	0.51	C-1	0.25	0.25		
B'-1		0.18	0.18		C'	0.45	0.45	VR-3	0.70*	0.62	C-2	0.24	0.24		
B'-3		0.18	0.18	18C	B'	0.79	0.79	VR-1	0.80*	0.70	B-o	0.62*	0.49		
C-3		0.15	0.15		NO.1	0.12	0.12	VR-2	0.51*	0.44	B-x	1.00*	0.79		
C-4	0.19	0.19	NO.2		0.15	0.15	VR-4	0.28*	0.24	B-Δ	1.30*	1.03			
C'-2	0.17	0.17	NO.3		0.29	0.29	VR-5	0.37*	0.32						
C'-4	0.14	0.14	NO.A'	0.11	0.11										
4C	B-2-1	0.33	0.28	NO.C'	0.10	0.10						6M	A	0.80*	0.70
	B-2-2	0.29	0.24									B1	0.80*	0.63	
5C	WA-1	0.27*	0.23									B2(e=10.5)	1.25*	0.99	
	6C	W7103	0.58*	0.44									B2(e=0)	1.80*	1.42
7C		RCW(P=0.3%)	0.50	0.50	19C	4S25W40-79	0.10**	0.09	1M	2	0.76*	0.56	7M	W-1	0.15**
	RCW(P=0.6%)	0.50	0.50	4S50W40-78		0.19**	0.17	3		0.46*	0.37	W-2		0.15**	0.12
	RCW(P=1.2%)	0.40	0.40	4S67W40-78		0.25**	0.22	8M	5	0.36**	0.27	W-3		0.15**	0.12
	RCW(B3-φ9)	0.35	0.35	4S50W60-78	0.25**	0.22	6		0.40*	0.28	W-1-1	0.53**	0.42		
8C	WB-1	1.02*	0.86	20C	NO.1	0.17	0.17		7	0.34*	0.23	W-1-2	0.35**	0.27	
	WB-2	0.38**	0.32		NO.2	0.22	0.22		8	0.13**	0.11	W-2-1	0.35**	0.27	
	WB-3	0.44**	0.37	21C	C-1	0.65*	0.53		9	0.36*	0.27	W-2-2	0.35**	0.27	
	WB-4	0.32**	0.27		C-2	0.70*	0.57		10	0.36*	0.27	W-3-1	0.40**	0.32	
	WB-5	0.46**	0.39		C-4	0.90*	0.74		11	0.36*	0.27	W-3-2	0.40**	0.32	
	WB-6	0.32*	0.27		C-5	0.82*	0.67	12	0.40*	0.28	W-4-1	0.45*	0.36		
	WB-7	0.62*	0.52		2b-1	1.20*	0.98	13	0.40*	0.28	W-4-2	0.81*	0.64		
	WB-8	0.50**	0.42		2b-2	0.22**	0.18	14	0.40*	0.28	9M	SW-1	0.58	0.58	
	9C	1	0.27**		0.25	2b-3	0.23**	0.19	15	0.29*		0.19	SW-2	0.44	0.40
		2	0.28**		0.26	MR-2	0.45*	0.42	16	0.29*		0.19	SW-3	0.55	0.47
3		0.26*	0.24		MR-4	0.30*	0.28	17	0.29*	0.19		SW-4	0.55	0.45	
4		0.35**	0.32		VRR-2	0.40*	0.34	10M	36	0.38**	0.31	SW-1	0.29	0.26	
5		0.37**	0.34	VRR-3	0.20*	0.17	39		0.38**	0.31	SW-2	0.55	0.47		
6		0.28**	0.26	VRR-6	0.43*	0.37	42		0.25**	0.19	SW-3	0.60	0.45		
7		0.23**	0.26	VRR-7	0.60*	0.51	44		0.25**	0.19	SW-4	0.55	0.38		
8		0.26**	0.24	1bI-1	0.39**	0.34	47		0.15**	0.11	11M	SC-1	1.00*	0.43	
10C	WB-9	0.38**	0.32	1bI-2	0.93*	0.81	49		0.15**	0.11		SC-2	1.75*	0.75	
	WB-10	0.29**	0.24	1bI-2a	0.29**	0.25	52		0.26*	0.17		SF-1	0.85*	0.48	
	WB-11	0.38**	0.32	1bI-3	0.47**	0.41	54	0.26*	0.17	SF-2		0.95*	0.53		
	WB-12	0.44**	0.37	1bII-1	0.32**	0.28	37	0.46**	0.38	12M	W79-1	0.38	0.35		
	11C	SW-1	0.33	0.33	1bII-1a	0.30*	0.26	38	0.46**		0.38	W79-2	0.56	0.47	
		SW-2	0.39	0.39	1bII-2a	0.19*	0.17	40	0.46**	0.38					
		SW-3	0.45	0.45	1bII-2b	0.65*	0.57	41	0.26**	0.19					
					1bII-3	0.47*	0.41	43	0.26*	0.19					
					3A1-1	0.81*	0.68	45	0.26**	0.19					

注) i) 引用文献に付した C, M の記号は Concrete, Mortar の別を示す。(または R_{cr}) が発表されている資料については $\delta_{cr} = R_{cr} h$ (または $R_{cr} h^2$) を求め $R_{cr} = \delta_{cr} / h = R_{cr} h / h$ (または $R_{cr} h^2 / h$) として補正したものを表に示している。 $R_{s,cr}$ は $\delta_{scr} = \delta_{cr} \delta_s / (\delta_s + \delta_B)$ (δ_s, δ_B : I型ばり理論を用いて耐震壁の I型部分の変形のみを考慮して求められるせん断, 曲げ変形)より $\delta_{s,cr}$ を求め $R_{s,cr} = \delta_{scr} / h$ として表に示している。

ii) R_{cr} のゴチック数字は荷重変形曲線から推定した数字である。

iii) *印は不明な資料を示し、**印はその中で $Q_{cr} / thQ_{B,cr} \leq 0.7$ の条件を満足するものを示す。

iv) 図-1に示す層高 h と異なる層高 h' (または h'') で層高変形角 R_{cr}' (形)より $\delta_{s,cr}$ を求め $R_{s,cr} = \delta_{scr} / h$ として表に示している。

3. 層間せん断変形角 $R_{s.cr}$ とその累積確率 P_c , 確率密度 P_D

図-4, 図-5に, $R_{s.cr}$ の累積確率 P_c と確率密度 P_D を $R'_{s.cr}$ ($=\delta s.cr/h'$, h' : 壁板のうちのり高さ) の場合と合わせて示した。 P_c および P_D 曲線を求める方法は文献⁴⁾を参照されたい。

$R_{s.cr}$ および $R'_{s.cr}$ に関する確率密度の極大値 P_{Dmax} とその層間せん断変形 $R_{s.crDmax}$ および $R'_{s.crDmax}$ の値を表-2に示す。いずれも, $R_{s.cr}$ に関する P_{Dmax} の方が $R'_{s.cr}$ に関する P_{Dmax} より大きい。モルタル耐震壁がコンクリート耐震壁に比べてばらつきが大きいのは, 収縮による影響と考えられ, また $R_{s.crDmax}$ の値が大きいのは, 最大耐力時の層間変形角の場合⁴⁾と同様な傾向であり, ヤング率の小さい粗骨材を含んでいる影響と考えられる。

表-2 $R_{s.cr}$ および $R'_{s.cr}$ に関する確率密度の極大値 P_{Dmax} とその層間変形角 $R_{s.crDmax}$ および $R'_{s.crDmax}$

	P_{Dmax} ($\frac{\%}{10^{-4}rad.}$)	$R_{s.crDmax}$ ($10^{-3}rad.$)	P_{Dmax} ($\frac{\%}{10^{-4}rad.}$)	$R'_{s.crDmax}$ ($10^{-3}rad.$)
Concrete	47.0	0.22	37.9	0.26
Mortar	41.1	0.25	35.7	0.30
Total	45.4	0.23	35.7	0.28

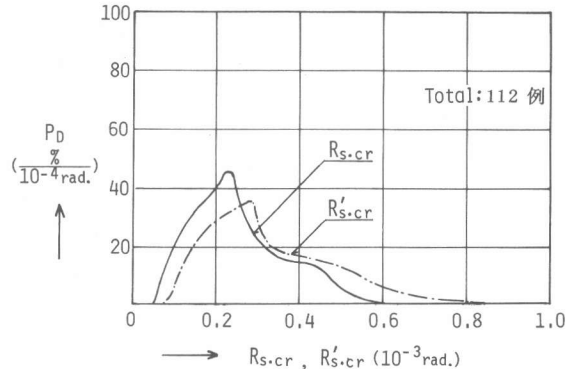
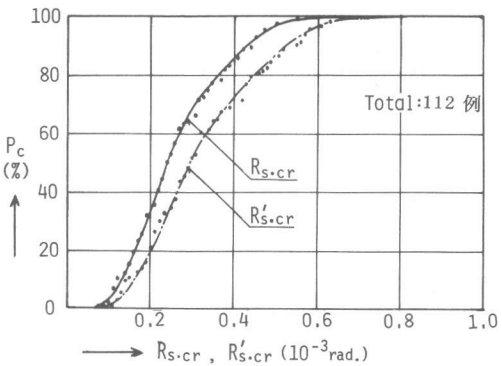
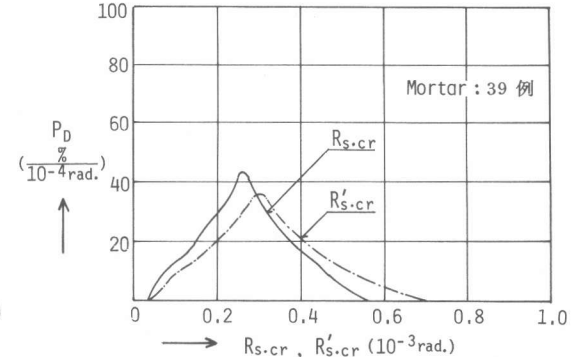
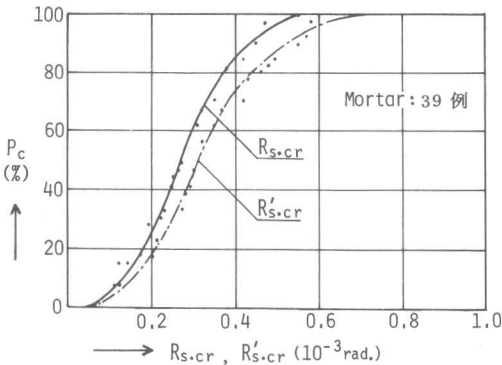
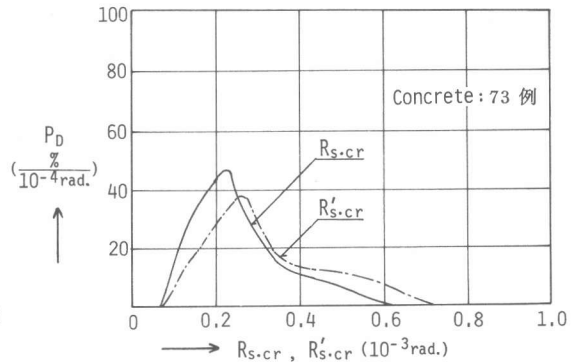
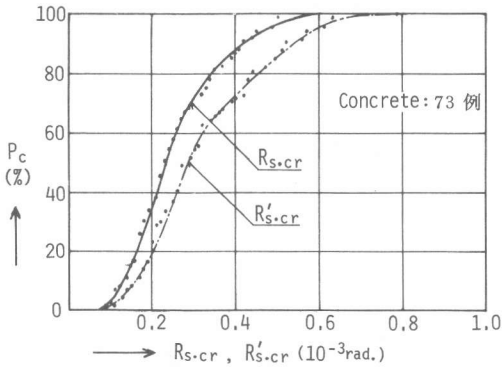


図-4 $R_{s.cr}$ および $R'_{s.cr}$ に関する累積確率 P_c

図-5 $R_{s.cr}$ および $R'_{s.cr}$ に関する確率密度 P_D

4. 層間せん断変形角 $R_s \cdot cr$ とコンクリート強度 F_c および壁筋比 P_s の関係

Q_{cr} は F_c と関係があるが、 P_s とはほとんど無関係であることが認められている⁵⁾。図-6に $R_s \cdot cr$ と F_c の関係を P_s 別に示す。いずれも、その関係は認められないようである。

5. 結論

$R_s \cdot cr$ に関し、既往の多くの無開口単独耐震壁の実験資料から確率的に解析し、コンクリート耐震壁 0.22×10^{-3} rad. モルタル耐震壁 0.25×10^{-3} rad. 両者を合わせると 0.23×10^{-3} rad. が $R_s \cdot cr$ に関する確率密度の極大値を与えること、 $R_s \cdot cr$ と F_c 、 P_s とはほとんど関係がないことを明らかにした。

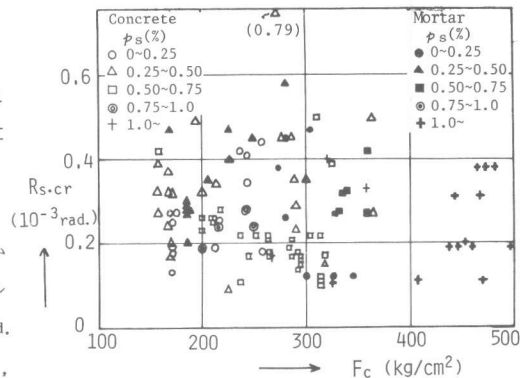


図-6 $R_s \cdot cr$ と F_c および P_s の関係

引用文献

- 1) 富井他:「耐震壁の断面設計に関する検討 その1」建築学会大会学術講演梗概集, 昭44. 8.
- 2) 「建築構造物のリミットアナリシス」日本建築学会, 昭38. 4.
- 3) 広沢:「既往の鉄筋コンクリート耐震壁に関する実験資料」建築研究資料6, 昭50. 3.
- 4) 富井他:「The Relations between The Deformed Angle and The Shearing Force Ratio (0.80~1.00) with regard to 200 Shear Walls」建築学会論文報告集第153号, 昭43. 11.
- 5) 富井:「鉄筋コンクリート壁板の初ひび割れせん断応力度」建築学会論文報告集第63号, 昭34. 10.

コンクリート耐震壁に関するもの:

- 1C) 富井他:「梁構付無開口壁の剪断抵抗に関する研究(第1報)」建築学会論文報告集第51号, 昭30. 9.
- 2C) 仲他:「鉄筋コンクリート造有孔壁に関する実験的研究(その1)」建築学会論文報告集第69号, 昭36. 10.
- 3C) 富井:「耐震壁の周辺にせん断力を与える実験」建築学会論文報告集第89号(大会号), 昭38. 9.
富井:「耐震壁の付帯ラーメンの拘束効果」日本A.C.I.第1回研究発表講演会講演概要, 昭39. 2.
- 4C) 横山他:「高層建築の耐震壁の実験」建築学会関東支部研究報告, 昭41. 6.
- 5C) 菅野:「溶接金鋼を使用する鉄筋コンクリート耐震壁の破壊実験」建築学会大会学術講演梗概集, 昭45. 9.
- 6C) 遠藤:「耐震壁による建築物の崩壊防止効果に関する研究」建築研究所年報昭和46年度
- 7C) 山田他:「鉄筋コンクリート耐震壁の弾塑性変形状に関する研究(II)」建築学会大会学術講演梗概集, 昭46. 11.
- 8C) 志賀他:「鉄筋コンクリート耐震壁の動特性に関する研究」建築学会大会学術講演梗概集, 昭47. 10.
- 9C) 森脇他:「異形線溶接金鋼の適用性に関する実験的研究(その3)」建築学会大会学術講演梗概集, 昭48. 10.
- 10C) 志賀他:「鉄筋コンクリート耐震壁の動特性に関する研究(その5)」建築学会大会学術講演梗概集, 昭49. 10.
- 11C) 山田他:「鉄筋コンクリート耐震壁の弾塑性変形状に関する研究(XIV)」建築学会近畿支部研究報告書, 昭52. 5.
同上:「同上(XVI)」建築学会大会学術講演梗概集, 昭52. 10. 同上:「同上(IX)」建築学会近畿支部研究報告書, 昭50. 6.
- 12C) 村橋:「RC造独立耐震壁に関する実験的研究(その1)」建築学会九州支部研究報告, 昭52. 2.
- 13C) 阿知良他:「鉄筋コンクリート造無開口耐震壁に関する実験」建築学会北海道支部研究報告, 昭52. 3.
- 14C) 富井他:「ひび割れ発生以後の耐震壁の挙動に及ぼす付帯ラーメンの影響その3」建築学会大会学術講演梗概集, 昭52. 10.
- 15C) 富井他:「壁板の付帯ラーメンが耐震壁の弾塑性挙動に及ぼす影響に関する研究第4報, 第5報」建築学会中国・九州支部研究報告, 昭53. 2.
- 16C) 山田他:「鉄筋コンクリート耐震壁の弾塑性変形状並びに崩壊性状に関する研究」建築学会大会学術講演梗概集, 昭53. 9.
- 17C) 山田他:「鉄筋コンクリート耐震壁の弾塑性変形状並びに崩壊性状に及ぼす周辺梁の拘束効果に関する研究」建築学会大会学術講演梗概集, 昭53. 9.
- 18C) 山田他:「剛な梁を持つ鉄筋コンクリート耐震壁の弾塑性変形状に関する研究(I, II)」建築学会大会学術講演梗概集, 昭54. 9.
同上:「鉄筋コンクリート耐震壁の弾塑性変形状並びに崩壊性状に関する研究(梁が比較的剛な場合)」建築学会近畿支部研究報告書, 昭53. 5.
- 19C) 村橋:「RC造独立耐震壁の強度および変形状に関する実験的研究(壁筋比および帯筋比の影響)」建築学会大会学術講演梗概集, 昭55. 9.
- 20C) 富井他:「付帯柱がせん断破壊する耐震壁の実験」建築学会中国・九州支部研究報告, 昭56. 3.
- 21C) Jack R. Benjamin and Harry A. Williams: "Investigation of Shear Walls" Department of Civil Engineering, Stanford University Apr. 1952 ~ Dec. 1956 "The Behavior of One - story Reinforced Concrete Shear Walls" Journal of the Structural Division of the American Society of Civil Engineers, Vol. 83, No. ST3, May 1957.

モルタル耐震壁に関するもの:

- 1M) 田辺他:「耐震壁に関する研究 第1報」建築学会大会論文集, 昭8. 4.
- 2M) 同上:「同上 第2報」同上, 昭9. 4.
- 3M) 同上:「同上 第4報」同上, 昭10. 4.
- 4M) 富井:「ラーメン付壁板の対角線加力に関する研究(梁構付無開口壁の剪断抵抗に関する研究)」建築学会論文報告集第60号, 昭33. 10.
- 5M) 鬼武他:「せん断ひび割れ進展後の耐震壁の曲げ剛性に関する実験」建築学会論文報告集第89号, 昭38. 9.
- 6M) 同上:「同上」同上第103号, 昭39. 10.
- 7M) 谷他:「鉄筋コンクリート耐震壁の崩壊過程に関する実験的研究」建築学会大会学術講演梗概集, 昭48. 10.
- 8M) 同上:「鉄筋コンクリート耐震壁に関する実験的研究」建築学会大会学術講演梗概集, 昭50. 10.
- 9M) 安藤他:「せん断スパン比と軸力を考慮した耐震壁の実験的研究(破壊状態について)」建築学会大会学術講演梗概集, 昭53. 9.
- 10M) 同上:「同上 せん断スパン比 M/Qd が変化する部分(III)」同上, 昭54. 9.
- 11M) 柴田他:「境界梁の拘束を受けるRC耐震壁の水平加力実験」同上, 昭54. 9.
- 12M) 安藤他:「せん断スパン比と軸力を考慮した耐震壁の実験的研究, 主として壁水平断面積が変化する場合(I)」同上, 昭55. 9.