

論文 廃ガラス発泡骨材を用いたコンクリート耐震壁の破壊性状

大岡督尚^{*1}・橋高義典^{*2}・小林康人^{*3}・宮下真一^{*4}

要旨: 本研究は、廃ガラス発泡骨材を用いたコンクリート（以下、発泡骨材コンクリート）を増設耐震壁へ適用することを目的としている。発泡骨材コンクリートは脆性的な破壊形態を示すため、ビニロン短繊維を混入した調合についても検討し、切欠き梁3点曲げ試験による靱性能評価、および耐震壁としての有効性確認のための水平加力試験を行った。その結果、発泡骨材コンクリートが増設耐震壁として十分機能することや、ビニロン短繊維の混入により、靱性能が著しく改善され、その耐震壁は最大耐力以降の急激な耐力低下がないことが判明した。

キーワード: 廃ガラス、発泡骨材、破壊力学、引張軟化曲線、増設耐震壁、水平加力実験

1. はじめに

再利用を目的として回収されたガラスビンの中で、特にワインやドリンク剤、化粧品など色の付いたビンは再利用の道がほとんどなく、廃棄処分されることが多い。本研究で使用している廃ガラス発泡骨材は、これら廃棄されていたガラスビンを原料としているため、コンクリートの軽量化に有効であるばかりでなく、地球環境保護の面からも、利用する価値が十分ある。

本研究の目的は、廃ガラス発泡骨材を使用し、単位容積質量 1.1~1.3ton/m³ で実用的な圧縮強度を有するコンクリートを、既存建物の増設耐震壁へ適用することである。

廃ガラス発泡骨材を使用したコンクリートは、骨材自体の強度が小さいことから、普通コンク

リートと比較して脆性的な破壊性状を示す。このため、ビニロン短繊維を混入したコンクリートについても検討した。

本報告は、切欠き梁3点曲げ試験による靱性能評価結果と、耐震壁としての有効性を確認するために行った柱壁試験体の水平加力試験結果について述べ、両者の関係を考察した。

2. 廃ガラス発泡骨材の特性

廃ガラス発泡骨材の化学成分を表-1 に、骨材試験結果を表-2 に示す。廃ガラス発泡骨材は1号:2号:3号を8:1:1で混合し、コンクリート用細骨材とした。

3. 試験体種類

使用したコンクリートは、普通コンクリート(N)・発泡骨材コンクリート(L)・ビニロン繊維補強発泡骨材コンクリート(LV)・ビニロン繊維補強発泡骨材モルタル(LM)の4調合である。また柱壁試験体は、壁部なし(WF)・壁がN調合(WN)・壁がL調合(WL)・壁がLV調合(WV)・壁がLM調合のプレキャスト版(WM)の5体である。

表-1 廃ガラス発泡骨材の化学成分 (%)

ig.loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃
0.2	71.0	4.4	0.40	0.57	9.4	12.0	1.2	0.43

表-2 廃ガラス発泡骨材試験結果(メーカー資料より)

種類	粒径 (mm)	表乾比重	絶乾比重	24時間吸水率 (%)	単位容積質量 (ton/m ³)	洗い損失率 (%)
1号	~1.2	0.81	0.75	7.85	0.46	3.7
2号	1.2~2.5	0.70	0.65	7.18	0.38	2.6
3号	2.5~5.0	0.66	0.61	7.64	0.34	1.5

アルカリシリカ反応性試験は化学法・モルタルパー法ともに無害の判定

*1 東急建設(株)技術研究所建築研究室(正会員)
 *2 東京都立大学大学院助教授 工学研究科建築学専攻 工博(正会員)
 *3 東急工建(株)商品開発部部長(正会員)
 *4 東急建設(株)建築本部構造設計部

4. 切欠き梁 3点曲げ試験

4.1 試験方法

柱壁試験体に使用したコンクリートの靱性を把握するため、RILEM 法¹⁾に準じた切欠き梁 3点曲げ試験を行った。

表-3 にコンクリート調合を、表-4 に使用したビニロン短繊維の物性を示す。曲げ試験はそれぞれの水平加力試験時に合わせて行い、材齢 22 日から 42 日の間に、N・LM は計 6 体、L・LV は計 3 体試験した。試験体寸法は 100×100×500mm で、すべて柱壁試験体と同じ環境の現場封緘養生とし、試験直前に深さ 50mm の切欠きを入れた。図-1 に示すようにスパン 400mm とし、インストロン型試験機を用いて、クロスヘッド移動速度の制御により、N・L は 0.02mm/min、LV・LM は 0.2mm/min で載荷した。

4.2 管理供試体強度試験結果

表-5 に φ10×20cm の強度管理用供試体の強度試験結果を示す。これらは柱壁試験体の水平加力試験と同時に行ったものである。

4.3 切欠き梁 3点曲げ試験結果

図-2 に切欠き梁 3点曲げ試験で得られた荷重-荷重点変位曲線 (LPD) を、図-3 に逆解析により多直線で近似した^{2),3)}引張軟化曲線 (TSD) を示す。LPD は 3 体または 6 体の試験結果を平均化したものであり、TSD は平均化した LPD から求めたものである。

破壊パラメータの算出方法は既往の研究⁴⁾と同一である。表-6 は、各 1 体ごとに破壊パラメータを算出し、それぞれの平均値を一覧表に

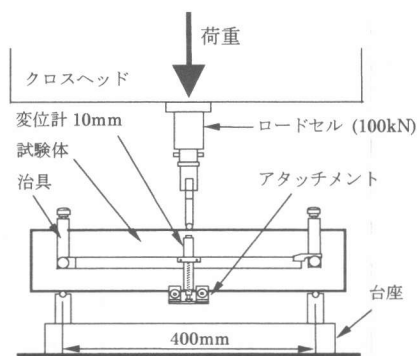
表-3 コンクリート調合 (kg/m³)

調合記号	W/C (%)	W	C	S	G	GL	SM	VF 1500	VF 350	SP (C×%)
N	54	195	359	811	887	—	—	—	—	0.3
L	35	170	486	—	—	364	124	—	—	2.0
LV	35	170	486	—	—	359	122	13	—	2.0
LM	30	180	600	—	—	413	—	—	13	3.0

C:早強セメント, S:山砂・砕砂=3:7 混合,
G:粗骨材 (砂岩) 最大寸法 10mm
GL:廃ガラス発泡骨材, SM:超軽量粗骨材
SP:高性能 AE 減水剤 (Ncon は AE 減水剤)
VF1500・VF350:ビニロン短繊維

表-4 ビニロン短繊維の物性

記号	長さ (mm)	径 (μm)	引張強度 (MPa)	ヤング率 (GPa)	比重
VF1500	30	240×720	882	29	1.30
VF350	12	200			



インストロン型精密万能試験機 (容量 100kN)

図-1 切欠き梁 3点曲げ試験方法

表-5 管理供試体強度試験結果 (試験時)

柱壁試験体記号	部位	調合記号	圧縮強度 (MPa)	割裂引張強度 (MPa)	ヤング率 (GPa)	単位容積質量 (ton/m ³)
WF	柱梁	N	26.7	2.41	20.4	2.24
WN	柱梁壁	N	28.6	2.21	21.9	2.25
WL	柱梁	N	31.7	2.75	23.3	2.17
	壁	L	29.3	1.98	11.4	1.17
WV	柱梁	N	28.5	2.49	22.7	2.21
	壁	LV	23.2	2.37	8.2	1.10
WM	柱梁	N	31.7	2.44	23.6	2.22
	壁	LM	35.8	2.78	12.9	1.27
	グラウト	—	47.6	—	23.4	2.15

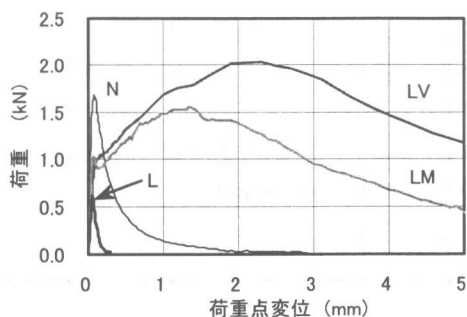


図-2 荷重-荷重点変位曲線 (LPD)

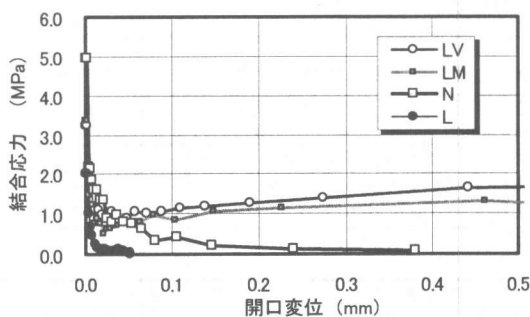


図-3 引張軟化曲線 (TSD)

表-6 破壊パラメータ一覧

調査記号	ヤング率	破壊エネルギー ¹	有効破壊エネルギー ²	初期結合応力	限界開口変位	有効引張強度 ³	限界荷重点変位 ¹	等価応力拡大係数 ⁴	等価限界ひび割れ長さ ⁴	限界CTOD ⁴	等価曲げ強度 ⁵
	E (GPa)	G_F^{WOF} (N/m)	G_F^u (N/m)	σ_0 (MPa)	δ_c (mm)	f_t^{eff} (MPa)	u_0 (mm)	K_{JC}^5 (MPa \sqrt{m})	a_c (mm)	$CTOD_C$ (mm)	f_b (MPa)
N	21.11	134.7	141	4.43	0.349	2.68	2.92	0.895	57.1	0.0082	4.20
L	8.37	24.3	14.9	1.39	0.050	0.96	0.29	0.325	52.8	0.0080	1.55
LV	6.66	—	679	3.25	1.766	2.13	—	12.35	71.8	0.1923	4.89
LM	10.92	—	558	3.34	0.892	1.84	—	24.46	72.4	0.2220	3.88

*1 RILEM 法に準じて求めた。(ビニロン繊維混入試験体は最終破断に至らなかったため測定できなかった)
 *2 TSD において開口変位 0.5mm までの囲まれる面積とした。
 *3 TSD において開口変位 0.01mm までの平均結合応力とした。
 *4 2パラメータ法での等価パラメータ解析結果⁵⁾
 *5 LPD の最大荷重とリガメント面積から算出した。

まとめたものである。また、図-4 は各コンクリートの有効破壊エネルギー (G_F^u)・有効引張強度 (f_t^{eff})・等価曲げ強度 (f_b) を示したものである。表-5 に示したように N と L の圧縮強度は大差ないが、図-4 のように N と比較して L の $f_t^{eff} \cdot f_b \cdot G_F^u$ は小さい値を示している。LV のように、ビニロン繊維を混入することにより、これらの弱点は著しく改善される。

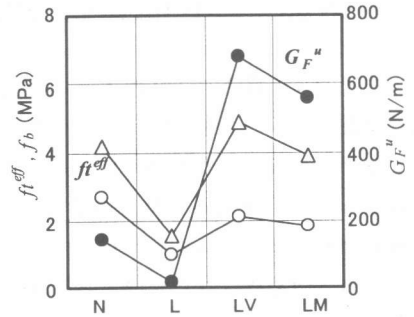


図-4 有効破壊エネルギー・有効引張強度・等価曲げ強度

5. 柱壁試験体の水平加力試験

5.1 使用材料

表-7 に使用鉄筋の材料特性を示す。使用コンクリートは表-3 に示した調合で、水平加力試験時の強度は表-5 に示したとおりである。

5.2 試験体形状寸法

水平加力試験体一覧を表-8 に、試験体形状寸法および配筋状況例を図-5 に示す。試験体は、実大の 1/3 スケールを想定した縮尺モデル 5 体とした。壁全長 (柱を含む) は 2240mm、柱芯々寸法を 2000mm、柱脚から上部スタブ中心間距離を 1400mm とした。シアスパン比は 0.625 である。柱断面は 240×240mm の正方形断面とし、壁厚は 60mm (WF は壁を持たない)、壁内法長さは 1760mm とした。

柱主筋は 12-D13 (SD345) とし、柱がせん断破壊する前に壁部がせん断破壊することを想定して、柱補強筋比は 0.53% とした。

WF および WN は、普通コンクリートを一体打設したが、WL と WV は柱梁フレームに普通コンクリートを先に打設し、その後フレーム内

表-7 使用鉄筋の材料特性

部位	種類	降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	ヤング率 (GPa)	伸び率 (%)
柱主筋	D13 (SD345)	384	541	206	27.4
柱・壁補強筋	D6 (SD295A)	335	631	201	23.5
PCa 版補強筋	φ3.2 (溶接金網)	—	662	—	—

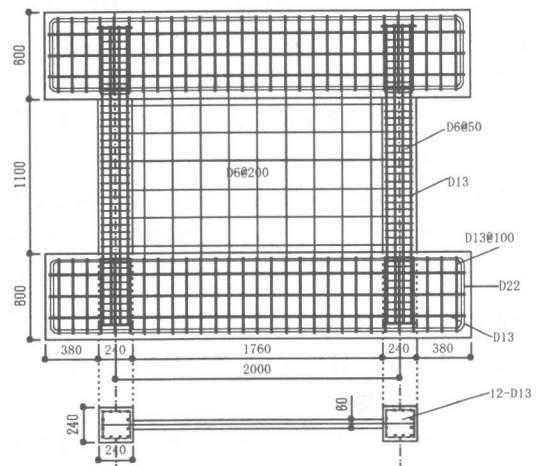


図-5 試験体形状寸法および配筋状況例 (WN・WV・WL)

表-8 水平加力試験体一覧

試験体名	WF	WN	WV	WL	WM	
断面	240×240mm					
柱主筋	SD345 12-D13 Pg 2.65%					
帯筋	SD295A D6 @50 Pw 0.53%					
断面	-	60×1760mm			60×392mmPCa版 4枚	
壁縦横筋		SD295A D6 @200 Ps 0.27%			溶接金網 φ3.2 @50 Ps 0.27%	
コンクリート調合	N		LV	L	LM	
施工方法	柱梁のみ施工	柱梁、壁板を一体打設	柱梁打設時に壁筋を先行配筋し、その後壁部分に、発泡骨材コンクリートを打設	柱梁コンクリート打設後、2週で接合金物をエポキシ樹脂で柱梁に接着、3週で柱梁とPCa版の間に無収縮グラウト材を充填		
軸力	各柱に 1/6BD σ_B					
載荷	サイクル	±1/6400(1), ±1/3200(1), ±1/1600(1), ±1/800(1), ±1/400(1), ±1/200(1), ±1/100(1), ±1/50(1), +1/25(1)			±1/800(1), ±1/400(1), ±1/200(2), ±1/100(2), ±1/50(2), +1/25(1)	
	層間変形角 ()内は回数					

にLまたはLV調合のコンクリートを打設した。壁筋は柱梁フレーム施工時にあらかじめ配筋した。また、柱梁フレーム部にコッターとして、深さ20mm、幅100mmの凹部を設けた。

WMは柱梁フレームを施工後、LM調合のプレキャスト版を取付けたものである(図-6参照)。その施工手順は、まず柱梁フレーム側にスタッド付平鋼をエポキシ系接着剤で接着した。そして周辺に高さ9mm、幅50mm(底辺56mm)の凸状のコッターを84mmピッチで設けたプレキャスト版を所定の位置に取付け、接合部分すべてに無収縮グラウト材を充填した。

5.3 加力方法

加力は、一定の軸方向力を保ちながら水平方向に正負漸増繰返し载荷を行った。図-7に加力装置図を示す。軸力は2台の100tonf油圧ジャッキを用い、両側柱芯上のスタブ上部に、常に一定の軸力 $N (=1/6BD \sigma_B, BD:柱断面, \sigma_B:コンクリート圧縮強度)$ を与えた。水平力は、加力治具を介して上部のスタブ芯の位置に2台の200tonf油圧ジャッキの荷重が等しくなるよう载荷した。加力は変位制御とし、表-8に示すサイクルで加力した。なお、層間変形角 R は、水平変位 δ を、壁の下端から上部スタブ芯までの高さ(1400mm)で除して求めた。

5.4 実験結果

水平加力試験で得られたせん断力と層間変形角の関係を図-8に、最終破壊状況を写真-1に示す。WFは層間変形角 R が1/67rad.で最

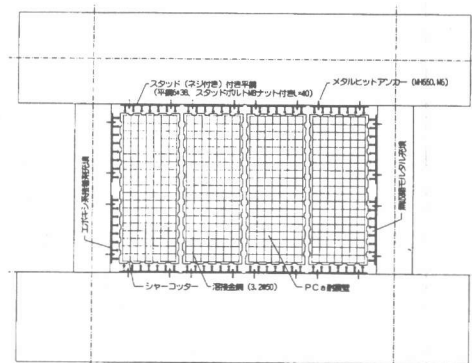


図-6 プレキャスト増設耐震壁施工状況(WM)

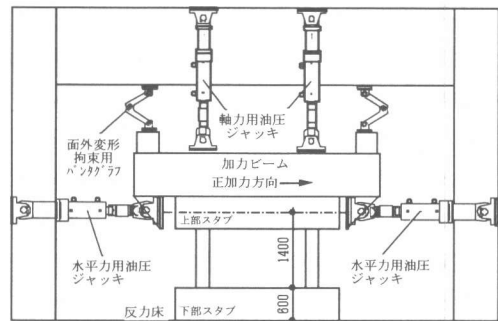
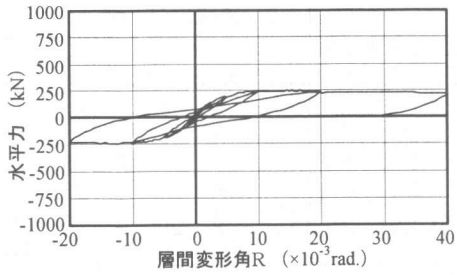


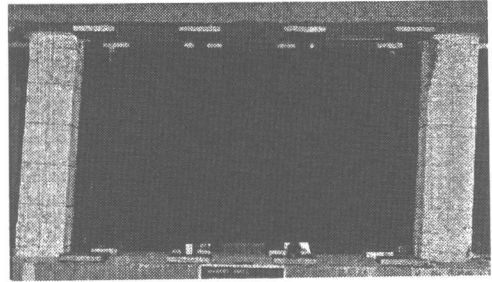
図-7 加力装置

大耐力を示し、±1/25rad.に達しても200kN以上の水平耐力を保持した。WF以外の壁のある試験体については、すべて1/250~1/200rad.程度で最大耐力を示した。

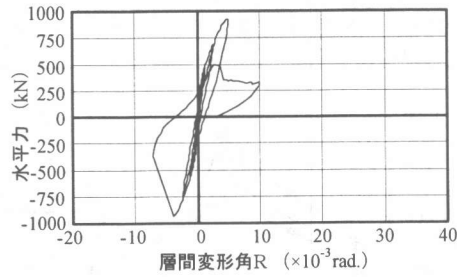
表-9に実験結果一覧を示す。水平耐力比は、WNの最大耐力を1.0としている。今回の実験では、壁部分コンクリートの圧縮強度がWNと同程度であったWLの水平耐力比は0.86で、圧縮強度が1.25倍のWMでも0.93であり、発



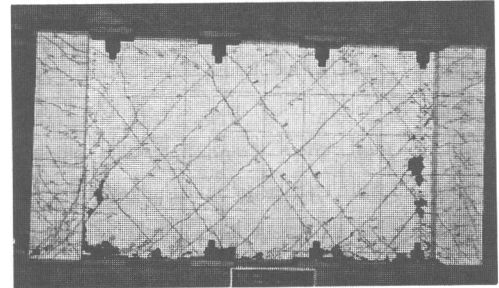
(1) WF



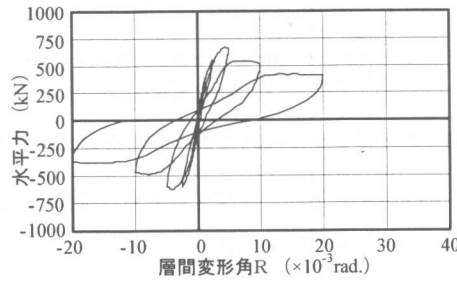
(1) WF



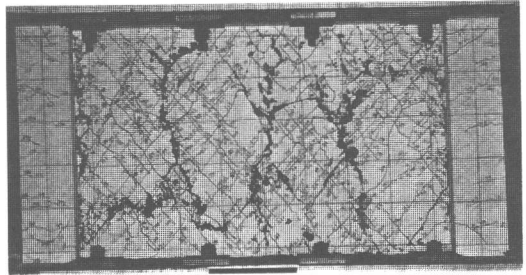
(2) WN



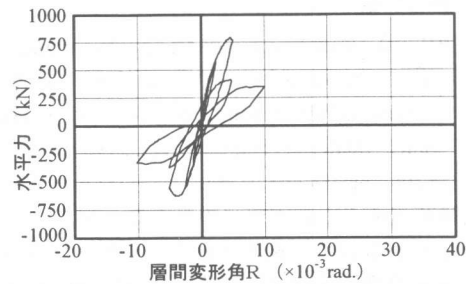
(2) WN



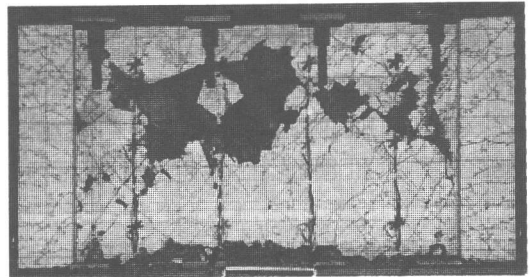
(3) WV



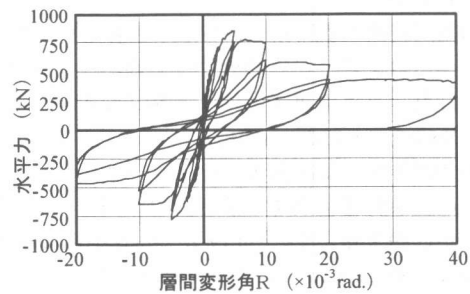
(3) WV



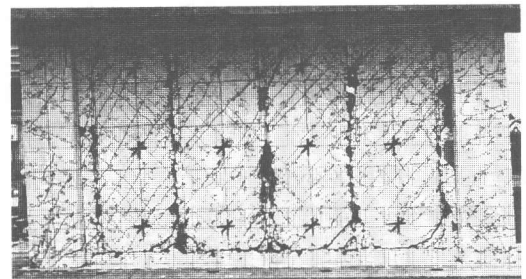
(4) WL



(4) WL



(5) WM



(5) WM

図-8 せん断力-変形関係

写真-1 各試験体の最終破壊状況

泡骨材コンクリートを使用した試験体はすべて、普通コンクリートの WN より低い最大耐力値であった。しかし、WV や WL のように一体化した場合でも、WM のようにプレキャスト化した場合でも、フレームのみの WF と比較すると、2.6 倍以上の最大耐力を示したことから、廃ガラス発泡骨材を用いたコンクリートは、増設耐震壁として十分に機能し、プレキャスト化も可能であると考えられる。

図-9 に正方向加力時における各サイクル最大変位時の水平力を示す。WN および WL の場合、最大耐力付近の $R=1/200\text{rad}$ で以降急激に耐力は低下するが、切欠き梁 3 点曲げ試験で高い靱性を示した LV・LM 調合を用いた試験体 (WV・WM) は、耐力低下の割合は小さい。このように、高靱性材料を耐震壁に適用した場合、大変形時の急激な水平耐力低下を防止できると考えられる。

6. まとめ

廃ガラス発泡骨材を使用したコンクリートの切欠き梁 3 点曲げ試験、および水平加力試験を行った結果、以下のことが判明した。

- (1) ビニロン繊維を混入することにより、発泡骨材コンクリートの靱性は著しく改善される。
- (2) 発泡骨材コンクリート耐震壁は、柱梁フレームのみの 2.6 倍以上の耐力があり、増設耐震壁として十分に機能し、プレキャスト化も可能である。
- (3) ビニロン繊維による靱性改善により、発泡骨材コンクリート耐震壁の靱性が向上し、最大耐力以降の急激な耐力低下を防止できる。

謝辞

本研究を行うに当たり、実験にご協力頂いた都立大学大学院生の高橋仁智氏、および卒論生の後藤大輔氏、吉岡昌洋氏に深く感謝いたします。さらに材料および資料を提供して下さったクリスタルクレイ(株)・(株)クラレ・(株)ポリス物産の方々に感謝の意を表します。

表-9 実験結果一覧

試験体名	方向	最大耐力 (kN)	層間変形角 R ($\times 10^3\text{rad.}$)	水平耐力比	破壊状況
WF	正	245	14.74	0.27	柱脚曲げ破壊
	負	-244	-12.24		
WN	正	922	5.06	1.00	壁脚部コンクリート圧壊
	負	-930	-3.97		
WV	正	667	5.03	0.72	壁板せん断破壊
	負	-631	-5.02		
WL	正	790	4.81	0.86	壁板せん断破壊
	負	-624	-4.08		
WM	正	853	5.03	0.93	壁板せん断破壊
	負	-753	-5.02		

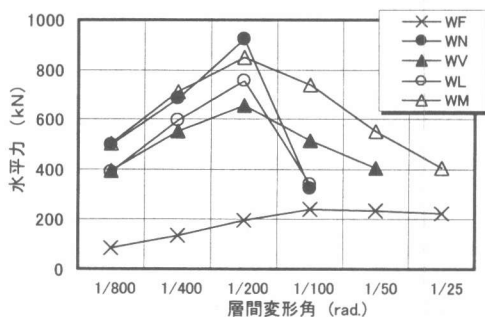


図-9 各サイクル最大変位時の水平力(正加力時)

なお、本研究の一部は文部省科学研究費(基盤C)の助成を受けて行いました。

参考文献

- 1) RILEM, Draft Recommendation : Determination of the Fracture Energy of Mortar and Concrete by Means of Three-point Bend Test on Notched Beams, Materials and Structures, Vol.18, No.106, pp.285-290, 1985.
- 2) 橋高義典, 上村克郎, 中村成春: コンクリートの引張軟化曲線の多直線近似解析, 日本建築学会構造系論文報告集, No.453, pp.15-25, 1993.11
- 3) 橋高義典: 引張軟化曲線の多直線近似解析によるコンクリートの弾塑性破壊パラメータの評価, 日本建築学会構造系論文報告集, No.467, pp.17-24, 1995.3
- 4) 大岡督尚, 橋高義典: ハイパーコンクリートの破壊靱性に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19-2, pp.111-116, 1997.6
- 5) Jenq, Y.S., and Shah, S.P.: Two Parameter Fracture Model for Concrete, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol.111, No.10, pp.1227-1241, 1985