

論文 衝撃的荷重をうける無開口耐震壁の破壊性状

兼平雄吉^{*1}・亀川隆史^{*2}・小野里憲一^{*3}・望月洵^{*4}

要旨：地震荷重による応答変位を模した、荷重速度 $v=40\text{cm/sec}$ の衝撃的荷重を無開口耐震壁に与える水平加力実験を行った。実験結果から、1)最大強度は静的な加力実験から求めた簡略強度式で評価できる、2)最大強度に達する大きな変形を経験した場合、著しい強度と剛性の低下が生じる、3)最大強度に達する衝撃的荷重を2波以上うけた場合の単位時間あたりの吸収エネルギーは第1波が最大である、などが捉えられた。

キーワード：衝撃的荷重、無開口耐震壁、最大強度、強度低下率、吸収エネルギー

1. はじめに

著者らは、地震時における RC 構造物の耐震性能を捉えるために、地震荷重の高速性と繰返し性をパラメータにした RC 有開口耐震壁の挙動に関する実験を行った¹⁾。その結果、1)RC 有開口耐震壁の最大強度は静的荷重をうける場合と変わらない、2)最大強度以降の力-変形関係に、荷重速度と繰返し回数は顕著な影響を与える、などが確かめられた。衝撃性については、物体の直接的な衝突に対応する衝撃荷重と、大きい荷重速度を急激に生じさせる衝撃的荷重に分けられている²⁾。地震荷重は後者にあたる。衝撃的荷重をうける RC 構造の挙動を捉えることは重要である。しかし、これに関する研究は

少ない。特に RC 耐震壁については皆無に近い。衝撃的荷重をうける RC 柱または PC 梁に関する実験から次のことが報告されている。岸ら³⁾は、RC 柱を台車に乗せ壁に衝突させる実験を行い、台車から伝わってくる衝撃力を衝撃的荷重とし、RC 柱の動的特性を検討している。その結果、1 箇所に塑性ヒンジが形成されるとその部分の損傷が大きくなると述べている。高木ら⁴⁾は、PC 梁に動的アクチュエータで $v=40\text{cm/sec}$ 以上の正負方向各1回の衝撃荷重を与える実験を行い、曲げ破壊型では靱性が増し、せん断破壊型では曲げ破壊先行のせん断破壊になると述べている。

本研究は、これらを考慮して、衝撃的荷重を

表-1 試験体の諸性質

番号	試験体	柱				壁		コンクリート σ_B (N/mm^2)	荷重 パターン	破壊 モード
		P_g (%)	$g_{\sigma y}$ (N/mm^2)	P_w (%)	$w_{\sigma y}$ (N/mm^2)	P_s (%)	$s_{\sigma y}$ (N/mm^2)			
1	00SWFC1	1.26 (4-D10)	341.7	1.42 (2-D6@30)	467.8	0.71 (ϕ 2.6@30)	617.7	32.2	CASE1	曲げ
2	00SWFC2							31.1	CASE2	
3	00SWFC3							32.2	CASE3	
4	00SWSC1	2.26 (4-D13)	341.8					31.1	CASE1	せん断
5	00SWSC2							33.4	CASE2	
6	00SWSC3							33.4	CASE3	

【共通】 柱幅： $b=150\text{mm}$ ，柱せい： $D=150\text{mm}$ ，壁板の内法高さ： $h'=850\text{mm}$ ，壁板の内法幅： $l'=700\text{mm}$
壁板の厚さ： $t=25\text{mm}$ ，加力点高さ： $h=950\text{mm}$ ，柱芯々間距離： $l=850\text{mm}$

【記号】 P_g ：柱全主筋比， $g_{\sigma y}$ ：柱主筋の降伏点強度， P_w ：帯筋比， $w_{\sigma y}$ ：帯筋の降伏点強度
 P_s ：壁板の縦横補強筋比， $s_{\sigma y}$ ：壁筋の降伏点強度， σ_B ：コンクリートの1軸圧縮強度

- *1 工学院大学 (正会員)
- *2 工学院大学大学院 工学研究科建築学専攻
- *3 O.R.S 設計事務所 (正会員)
- *4 工学院大学教授 工学部建築学科 工博 (正会員)

急激に大きな変形を引き起こす荷重と捉え、地震時の応答変位を模した衝撃荷重をうける無開口耐震壁の破壊性状を、実験から捉えることを目的としている。なお、文献1)の高速・繰返し荷重は、ほぼ一定高速度の漸増変位の力である。

2. 実験計画

2.1 試験体

試験体は曲げ破壊モードとせん断破壊モードの各3体、計6体である。破壊モードは、静的な水平交番力を与えた実験で予測される破壊モード³⁾である。試験体の名称は試験体のパラメータを示す。例えば、00・SW・F/S・C1/C2/C3は、00：2000年度，SW：無開口耐震壁，F/S：曲げ破壊モード/せん断破壊モード，C1/C2/C3：CASE1/CASE2/CASE3である。ここで，CASEは，荷重パターンをいう。表-1に試験体の諸性質を，図-1に試験体の形状と配筋を示す。

2.2 加力と計測の方法

加力は，動的アクチュエータ(最大能力：245kN，最大荷重速度：50cm/sec，最大ストローク：±20cm)を使用し，試験体の上梁中心に荷重パターンで設定される水平変位を与えた。荷重パターンは，固有周期 $T=0.4\text{sec}$ ，減衰 $h=0.05$ の1質点系振子モデルが，兵庫県南部地震の神戸海洋気象台波NS成分をうけて生じる応答変位をモデル化したものである。図-2に応答変位の時刻歴を示す。これをもとに，図-3に示すような衝撃波とこれに続く中小の繰返し波から構成される波形A，B，C，およびDの組合せである荷

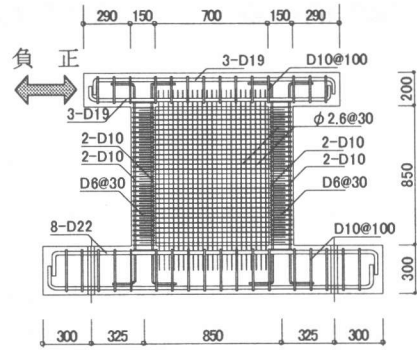


図-1 試験体の形状と配筋

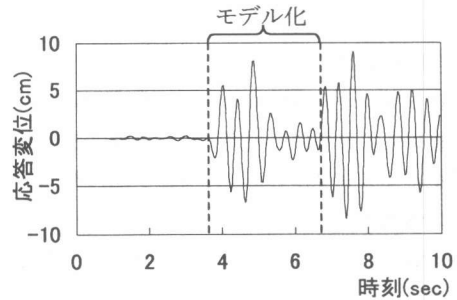
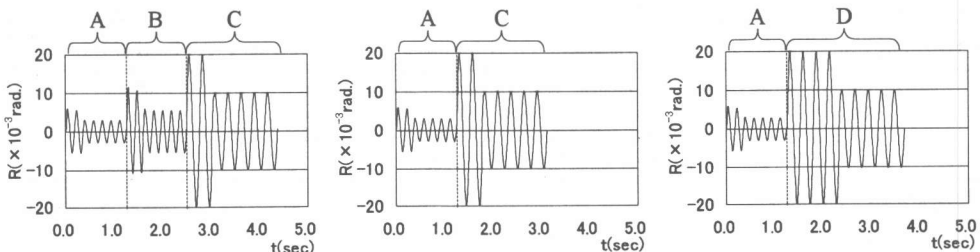


図-2 応答変位の時刻歴

重パターンのCASE1，2，および3を設定した。Aは， $R=5 \times 10^{-3}\text{rad}$ (以下 $R=5$ とする)を2回，ついで $R=2.5$ を5回繰返すもので使用限界状態を目標とした波形である。ここで，層間変形角 $R=\delta/h'$ ， δ ：上梁の水平方向の変位， h' ：壁板の内法高さである。Bは， $R=10$ を2回，ついで $R=5$ を5回繰返す設計限界状態を目標とした波形である。Cは， $R=20$ を2回，ついで $R=10$ を5回，Dは， $R=20$ を4回，ついで $R=10$ を5回繰返すもので，終局限界状態を目標とした波形である。荷重パターンの3つのCASEとも，初



(a)CASE1

(b)CASE2

(c)CASE3

図-3 荷重パターン

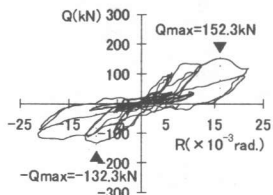
振動数

A, B : 5.6Hz C, D : 3.7Hz

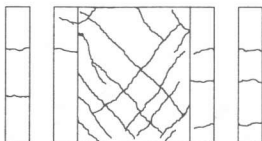
めに使用限界状態の波形の荷重を経験しているものとし、CASE1は波形A、B、およびCの組合せ、CASE2は波形AとC、CASE3は波形AとDの組合せである。また、波形A、B、C、およびDの大きい振幅の荷重速度はそれぞれ $v=15\text{cm/sec}$, 30cm/sec , 40cm/sec , 40cm/sec である。荷重と変位の計測は、ロードセルとレーザー変位計をデジタルレコーダに接続し、500Hzのサンプリング間隔で記録をした。なお、制御用の加力パターンと計測変位は、ほぼ一致していた。破壊経過は、波形A、B、C、およびDがそれぞれ終了した時点で加力を止め、スケッチと写真撮影を行った。

3. 実験結果

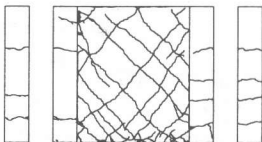
3.1 破壊経過



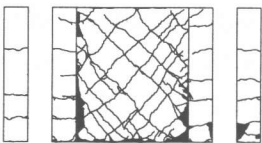
カー変形関係



A 終了時ひび割れ状況

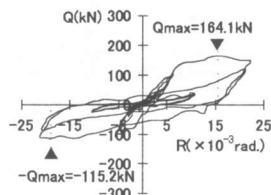


B 終了時ひび割れ状況

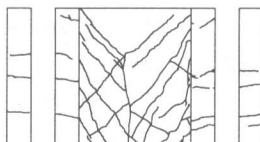


C 終了時ひび割れ状況

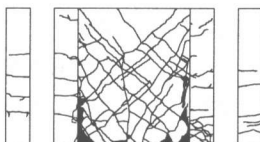
(a)00SWFC1



カー変形関係

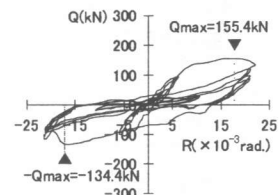


A 終了時ひび割れ状況

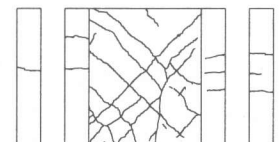


C 終了時ひび割れ状況

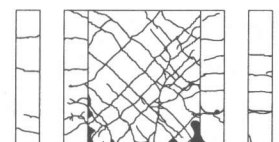
(b)00SWFC2



カー変形関係



A 終了時ひび割れ状況



D 終了時ひび割れ状況

(c)00SWFC3

図-4 曲げ破壊モードの試験体の破壊性状

図-4に曲げ破壊モードの、図-5にせん断破壊モードの試験体の破壊性状を示す。ひび割れなどの発生の破壊経過は、曲げ破壊モードとせん断破壊モードの試験体で大差がないため、荷重パターンのCASE別に述べる。

i) CASE1

波形Aの終了時に、壁板の斜めひび割れと柱の水平ひび割れの発生が確認された。波形Bで、壁板の斜めひび割れ網が形成され、波形Cで、正加力時に約 $R=15$ で最大強度に達した。その後、壁板が圧壊し、壁板の剥離と剥落が生じ、最終に至った。

ii) CASE2

CASE1と同様に、波形A終了時に、壁板の斜めひび割れと柱の水平ひび割れが確認された。波形Cで、正加力時に約 $R=15$ で最大強度に達

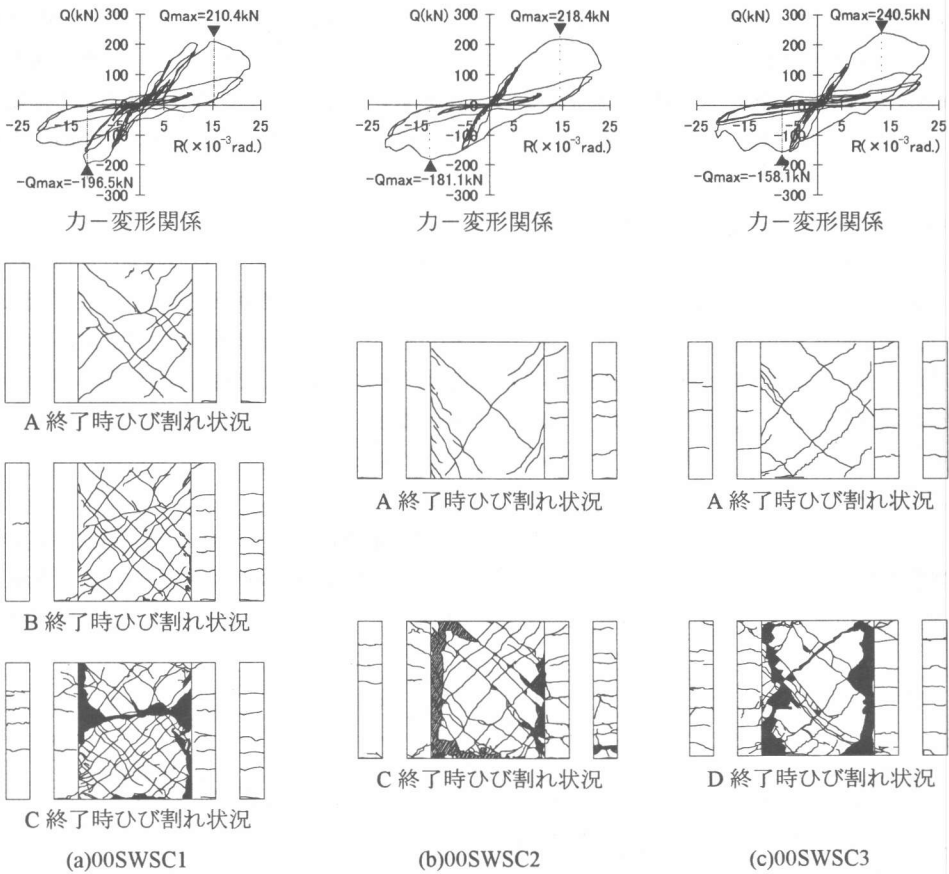


図-5 せん断破壊モードの試験体の破壊性状

し、壁板の圧壊、剥離と剥落が生じ、最終に至った。

iii) CASE3

波形 D で、最大強度に達したことを除いて CASE2 と同じである。

CASE1, CASE2, および CASE3 は、共通して、正加力時の最大強度における変形は約 $R=15$ である。しかし、負加力時の最大強度とその変形はばらつきが大きい。これは、正加力時に壁板が破壊したため、負加力時に抵抗する圧縮ストラットが欠落したことに起因している。

せん断破壊モードの試験体の場合、曲げ破壊モードの試験体と同様に、最大強度時における変形が約 $R=15$ で、既往の単調増分変位の静的繰返し加力実験で観察される変形に比べて著しく大きい。また、曲げおよびせん断破壊モード

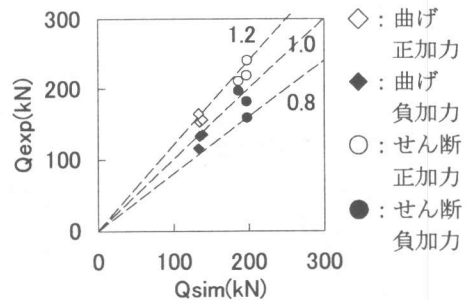


図-6 最大強度の実験値と解析値の比較

のすべての試験体に共通して、衝撃的荷重をうけて最大強度に達した後、強度と剛性が極めて小さくなることが認められた。これも壁板の圧縮ストラットの破壊に起因している。

3.2 最大強度

図-6 に最大強度の実験値 Q_{exp} と解析値 Q_{sim}

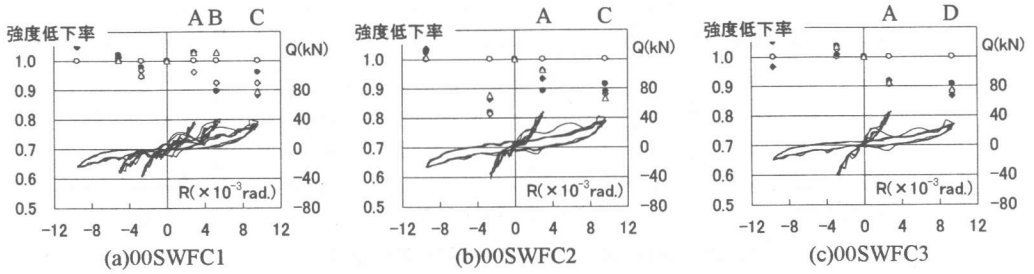


図-7 曲げ破壊モードの試験体の強度低下率

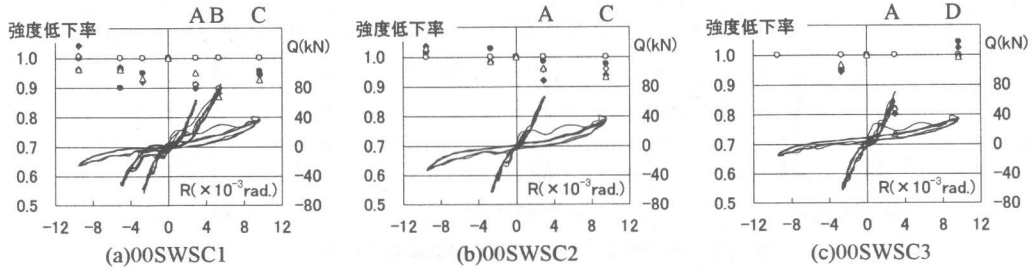


図-8 せん断破壊モードの試験体の強度低下率

の比較を示す。ここで、 Q_{exp} はロードセルの計測値で、振幅による慣性力はたかだか 2~4kN と算定されたため考慮していない。 Q_{sim} の算定は著者らによる静的加力実験から求めた簡略強度式⁹⁾を用いた。すべての試験体に共通して、正加力の Q_{exp}/Q_{sim} が 1.0 を超え、実験値が大きくなっているが、1 例を除いて 1.2 よりも小さく、衝撃的荷重をうける場合でも、最大強度は静的な簡略強度式で評価できるといえる。

3.3 強度低下率

図-7 に曲げ破壊モードの、図-8 にせん断破壊モードの試験体の強度低下率を示す。強度低下率は、同一層間変形角の繰返し荷重による 1 回目の最大強度に対する n 回目の最大強度の割合である。ここでは、衝撃的荷重を経験した後の中小波形域における繰返し荷重の影響を捉えるために、各波形域のうち小さい波形だけを対象としている。図中の記号は、○： $n=1$ (1 回目)、●： $n=2$ (2 回目)、◇： $n=3$ 、◆： $n=4$ 、△： $n=5$ を表している。また、図中の力-変形関係は小さい波形の応答曲線である。強度低下率は、破壊モードと CASE の違いによる著しい差はなく、

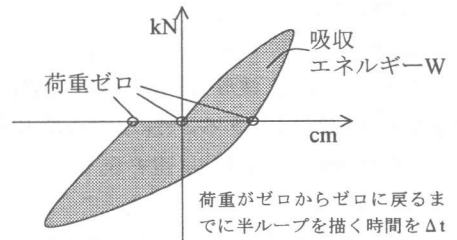


図-9 吸収エネルギーと履歴ループ

0.9 前後の値を示している。

3.4 単位時間あたりの吸収エネルギー

構造物の吸収エネルギー W は、力-変形関係の履歴ループの面積である。図-9 に吸収エネルギーと履歴ループの関係を示す。外力が作用したとき、構造物が吸収するエネルギーの指標として、正加力域および負加力域の吸収エネルギーを荷重がゼロからゼロに戻るまでの時間 Δt で除して、 $W/\Delta t$ を定義した。図-10 に曲げ破壊モードの試験体の、図-11 にせん断破壊モードの試験体の $W/\Delta t$ を示す。

i) CASE1

波形 A, B, および C で、正加力と負加力の $W/\Delta t$ の大きさに大差はない。しかし、波形 B

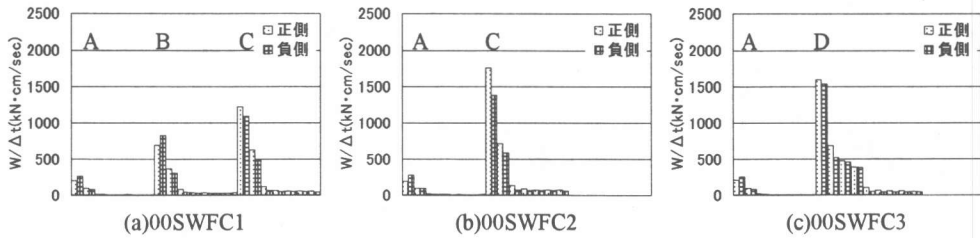


図-10 曲げ破壊モードの試験体の $W/\Delta t$

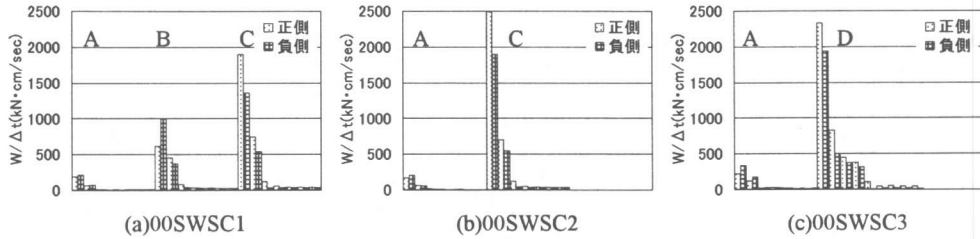


図-11 せん断破壊モードの試験体の $W/\Delta t$

と C における第 1 波の $W/\Delta t$ は、第 2 波の $W/\Delta t$ の 2 倍以上になっている。

ii) CASE2

CASE1 と同様に、波形 C の第 1 波の $W/\Delta t$ は第 2 波の 2 倍以上である。特に、せん断破壊モードの試験体では約 3 倍に達する。

iii) CASE3

CASE2 の波形 C と同様に、せん断破壊モードの試験体では、波形 D で第 1 波の $W/\Delta t$ は、第 2 波の約 3 倍に達する。

これから、衝撃的荷重をうけて最大強度に達した耐震壁の単位時間あたりの吸収エネルギーは、第 1 波が最大で第 2 波の 2 倍以上になるといえる。

4. まとめ

無開口耐震壁に衝撃的荷重を与える水平加力実験を行い、以下の結果を得た。

- (1) 最大強度は、曲げ破壊モード、せん断破壊モードの試験体とも静的加力実験に基づく簡略強度式で評価できる。
- (2) いずれの破壊モードの試験体も、最大強度に達する衝撃的荷重をうけて $R=15$ の大きな変形が生じる。その後、急激に強

度と剛性が低下する。

- (3) 最大強度に達する衝撃的荷重後の繰返し荷重のもとでの強度低下率は 0.9 前後である。
- (4) 衝撃的荷重をうけて最大強度に達した耐震壁の単位時間あたりの吸収エネルギーは、第 1 波が最大である。

参考文献

- 1) 望月ほか：高速・繰返し荷重を受ける開口耐震壁の劣化性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.22，No.3，2000，pp.457～462
- 2) (続)兵庫県南部地震における構造物の衝撃的破壊に関するシンポジウム，日本建築学会，2000年，3月，pp.135～154
- 3) 岸ほか：衝撃的載荷重を受ける RC 柱の動的挙動に関する実験，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19，No.2，pp.969～974
- 4) 高木ほか：衝撃力を受ける PC 梁の挙動に関する実験的研究(その 1，その 2)，日本建築学会大会学術講演梗概集(東北)2000年 9月，pp.977～980
- 5) 望月ほか：連層耐震壁の破壊モードの判別式，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.13，No.2，1991，pp.559～564
- 6) 望月ほか：連層耐震壁の簡略化最大せん断強度式，第 8 回日本地震工学シンポジウム，1990，pp.1425～1429