多段階破壊機構を有するエネルギー吸収壁

—破壊機構及び構造性能に関する実験—

ENERGY ABSORPTION WALL WITH MULTI-STAGE DESTRUCTIVE MECHANISM

—Experiment on destructive mechanism and structural performance—

金子佳生^{*1}, 三橋博三^{*2}, 桐越一紀^{*3}, 下川博之^{*4}Yoshio KANEKO, Hirozo MIHASHI, Kazuki KIRIKOSHI
and Hiroyuki SHIMOKAWA

In this paper, an energy absorption wall with multi-stage destructive mechanism is experimentally studied. The wall is made by filling the gap between the alignment of energy absorption members. The energy absorption members are made by using hybrid fiber reinforced cementitious composites and reinforcement. In the test, shear test specimens are made with two energy absorption members, and cyclic load is applied. The results show that the energy absorption wall clearly gives the multi-stage destructive mechanism and also gives the ductile hysteresis curve. It is concluded that the energy absorption wall is applicable to the structural control.

Keywords: Cementitious composite, Hybrid fiber reinforcement, Energy absorption member, Damage monitoring

セメント系複合材料, ハイブリッド型繊維補強, エネルギー吸収部材, 損傷モニタリング

1. はじめに

近年、地震に対する構造形式として、建物に入力されるエネルギーを吸収する部材を付加し、応答を制御させる制震構造が注目され、様々な研究が行われている。制震デバイスとして、鋼材や粘弾性材など種々の材料が使用されている。セメント系材料を用いたものとしては、繊維で補強することにより曲げ応力下においてマルチプルクラック(multiple cracks)挙動を示し、靱性が大幅に向上する高靱性セメント系複合材料に関する研究が盛んに行われている¹⁾。この靱性に富み、優れたエネルギー吸収性能のある材料を活かしたエネルギー吸収部材の開発に関する研究として、モルタル中に PVA(ポリビニルアルコール)繊維を混入した高靱性セメント系複合材料を用いた制震デバイスの構造性能が検討され、エネルギー吸収部材として機能を発揮できることが指摘されている²⁾。しかしながら、セメント系材料を用いた制震デバイスはスリップ形の履歴性状を示し、その高いエネルギー吸収能力は十分活用されているとはいえない。

一方、鉄筋コンクリート構造部材の耐力と靱性を向上させる X 形配筋を利用した鉄筋コンクリート部材による制震デバイスに関する研究も行われている³⁾。X 形配筋を用いることで部材の靱性能は向上しているが、大変形時には最大耐力が徐々に低下し、さらにかぶりも剥落し部材の損傷程度も大きくなるため、損傷制御の観点から

も、高靱性セメント系複合材料の適用が考えられる。

筆者らは、繊維補強セメント系複合材料の制震構造への適用性を明らかにし、その高靱性能力を十分に発揮させるための基礎研究として、鋼繊維と合成繊維を混入したハイブリッド型繊維補強セメント系複合材料(Hybrid Fiber Reinforced Cementitious Composite: HFRCC)を用いたエネルギー吸収部材の開発について、実験的かつ解析的に研究してきた^{4)~6)}。セメント系材料としてモルタルにスチールコードとポリエチレン繊維を混入したハイブリッド型繊維補強セメント系複合材料を用い、曲げモーメント分布に応じて部材の断面形状を変化させ、その変断面に対応して X 形鉄筋を配したエネルギー吸収部材を提案した。さらに、構造部材の耐力・変形性能を実験的に検討し、エネルギー吸収性能に優れた紡錘形の履歴性状と大変形の履歴を受けても損傷の少ないエネルギー吸収部材が可能であることを明らかにした⁴⁾⁵⁾。

本研究では、このエネルギー吸収性能に優れた紡錘形の履歴性状を示すエネルギー吸収部材を制震壁へと拡張する。多段階に破壊する機構を付与することにより必要剛性・耐力を調整し、同時に履歴による大きな減衰効果を付加することを目指したエネルギー吸収壁を、各種建築物へ適用するための基礎的研究として、その多段階破壊機構及び構造性能を実験的に検討する。

^{*1} 東北大学大学院工学研究科 助教授・Ph. D.

^{*2} 東北大学大学院工学研究科 教授・工博

^{*3} 東北大学工学部 教務職員

^{*4} 東北大学大学院工学研究科博士前期課程 大学院生

Assoc. Prof., Tohoku University, Graduate School of Engineering, Ph. D.

Prof., Tohoku University, Graduate School of Engineering, Dr. Eng.

Research Assistant, Tohoku University, Faculty of Engineering

Graduate Student, Tohoku University, Graduate School of Engineering

2. エネルギー吸収壁の構造特性

本研究で提案するエネルギー吸収壁の概要を図 1 に示す。その構成は、曲げモーメント分布に応じて断面形状を変化させたエネルギー吸収部材を複数用いて並列配置し、これらの断面形状により生じた隙間をセメント系複合材料などの充填材で結合させることによって構築される。以下に、エネルギー吸収部材の力学的特性を 1)～4) に、エネルギー吸収壁の力学的特性を 5)～6) に示す。

- 1) 剛強なスタブを設け、変形を強制的にエネルギー吸収部材に与える。
- 2) 曲げモーメント分布を考慮して断面形状を変化させることにより、ひび割れを分散させ破壊の局所化を抑制し、曲げによる鉄筋の降伏領域を広げることにより局所的に過度なひずみが生じることなく、大変形を可能にさせる。
- 3) HFRCC を用いることでひび割れの局所化を防ぎ、分散させる。
- 4) 形状に合わせ X 形鉄筋を配し、曲げせん断耐力を向上させる。
- 5) エネルギー吸収部材の並列配置とその結合部の充填材により、中小規模の地震動や風荷重などに対しては、壁版として高い剛性により建物の使用・機能性能を確保する。また、壁充填部のひび割れ挙動により視覚的に小さな損傷レベルが判断できる。
- 6) 大規模な地震動に対しては、充填材が大きな損傷を受けせん断伝達機能が低下することにより、壁版としての水平抵抗機構と剛性を失う。同時に、水平抵抗機構の遷移によりエネルギー吸収部材の持つ高靱性性能が発揮され、建物の安全性能を確保する。また、壁充填部のひび割れ挙動により視覚的に大きな損傷レベルが判断できる。

3. 実験概要

基本実験として、解析的にその特性を評価した 9 段階破壊機構の確認を目的とした実験（破壊機構実験）を行い、充填材の有無による初期段階の剛性と水平耐力の差異を明らかにする。さらに、エネルギー吸収壁の充填材の物性及び付着特性を変化させた場合の実験（性能評価実験）を行い、剛性及び耐力の制御を含む構造性能を明らかにする。なお、両実験ともエネルギー吸収壁の基本特性を評価することを目的として、2 本のエネルギー吸収部材とその結合部の充填材からなる試験体を用いた。

載荷方法は、大野式加力機によるせん断試験法を適用し、破壊機構実験では漸増 1 方向繰返し載荷により部材角 1/10 程度の大変形時における破壊機構の変化を確認する。性能評価実験では漸増交番繰返し載荷により、層間変形角 1/50 程度を想定した変形領域におけるエネルギー吸収壁の履歴性状を定量化する。

実験で用いたセメント系複合材料の調合、材料特性及び鋼材の材料特性を表 1 から表 3 に示す。エネルギー吸収部材とスタブは、モ

ルタルに 5 本の鋼繊維をより合わせたスチールコード(SC:破断荷重 230.5N、コード直径 0.38mm、繊維長 32mm)とポリエチレン繊維(PE:引張強度 2770MPa、繊維直径 0.012mm、繊維長 15mm)を混入した HFRCC を用いた。充填材は、高強度モルタルと低強度モルタル、及び非構造材を充填した場合の剛性・耐力特性の評価を目的としてスタイロフォームを用いた。なお、材料試験はφ50mm×100mm 円柱試験体の圧縮及び割裂試験を行った。

表 1 セメント系複合材料の調合

材料	水結合材比 (%)	砂結合材比 (%)	繊維混入率(vol%)	
			SC*	PE*
HFRCC	45	40	1.0	1.0
低強度モルタル	70	40	0	0
高強度モルタル	50	40	0	0

*: SCはスチールコードを示す。PEはポリエチレン繊維を示す。

表 2 セメント系複合材料の材料特性

実験	材料	試験体	圧縮強度 (MPa)	割裂強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
破壊機構 (F 実験)	HFRCC	F-充有・無	49.3	9.33	20.5
	低強度モルタル	F-充有	14.6	1.45	8.33
性能評価 (P 実験)	HFRCC	P-SF 付有	52.4	10.3	20.6
		P-高付無	52.9	10.7	21.1
		P-低付有・無	46.8	10.0	20.1
	低強度モルタル	P-低付有・無	13.4	1.66	8.81
	高強度モルタル	P-高付無	40.3	2.84	14.6

表 3 鋼材の材料特性

実験	鉄筋	降伏点 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	破断伸び (%)
破壊機構 (F 実験)	X 形筋と平行筋(φ4)	168	292	148	31.9
	スパイラル筋(φ1)	374	421	-	25.0
性能評価 (P 実験)	X 形筋と平行筋(D10)	387	525	191	16.2
	横筋(φ4)	168	292	148	31.9

4. 破壊機構実験

4.1 試験体概要

試験体は、力学特性の差異を明確に確認するため、表 2 に示す HFRCC を用いたエネルギー吸収部材に対し、結合部を充填しない試験体(F-充無)と表 2 に示す低強度モルタルを結合部に充填した試験体(F-充有)とした。試験体寸法は実物大を想定したエネルギー吸収部材実験の 1/5 とした。図 2 に試験体概要と載荷条件を示す。エネルギー吸収部材の厚さは 30 mm、スタブの厚さは 100 mm とし、表 3 に示す鉄筋を用いた。X 形鉄筋及び平行鉄筋はスタブ端部の鉄板に溶接により定着した。せん断補強筋はスパイラル形状とし、せん断補強筋比は繊維の充填性を考慮して 0.62% とした。なお、両試験体共に打ち込みは比較的良好であった。また、養生は湿潤養生で、エネルギー吸収部材とスタブの HFRCC を一体打設後、翌日に脱型

図 1 エネルギー吸収壁の概要

図2 破壊機構実験の試験体概要と載荷条件

し充填部を打設した。エネルギー吸収部材打設 1 週間後に載荷試験を行い、加力梁にかかる荷重と左右スタブの相対変位を測定項目とした。なお、せん断力は加力梁にかかる荷重の 1/3 として評価した。また、部材角は図 2 に示す変位計測フレームによる左右スタブの相対変位を、スタブを除く試験体高さ(180mm)で除して評価した。

4.2 水平耐力の算定

エネルギー吸収部材の概ねの水平耐力を推定するため、曲げ降伏を仮定して曲げ耐力から水平耐力を評価する。曲げ耐力算定において仮定した断面内の応力ひずみ分布を図 3 に、曲げ耐力算定位置とそれに対応した水平耐力の比較を表 4 に示す。HFRCC の圧縮側では材料構成則 ⑨に基づき圧縮強度(f_c)までパラボラ近似とした。引張側では曲げ試験から得られた引張軟化曲線 ⑩が引張強度の概ね 1/2 を保持している結果に基づき、引張強度(f_t)の 1/2 を用い等分布近似とした。本算定法ではエネルギー吸収部材端部と絞部(変断面開始部)、及び変断面中央部を算定位置とし、せん断破壊を含む広域ひび割れ分散に対し、局所的な曲げ破壊に至る前段階として HFRCC が圧縮縁において圧縮強度に達することを曲げ耐力算定条件とし、平面保

持を仮定し、中立軸をパラメータとして、釣合い条件を満足するように曲げ耐力を算定した。なお、鉄筋はひずみ硬化を考慮せず完全弾塑性モデルとし、X 形鉄筋に関しては有効断面積(部材軸成分)を用いた。表より、エネルギー吸収部材絞部の曲げ耐力時に水平耐力が決定されるが、全算定位置ではほぼ同程度の水平耐力となり、鉄筋の降伏領域が拡大していることがわかる。

4.3 実験結果と破壊機構

図 4 に全履歴と部材角 1/100 までのせん断力-部材角関係を、表 5 に各試験体の水平耐力と初期剛性(多段階に破壊する本エネルギー吸収壁の剛性指標として 1/3 割線剛性で定義)、及び計算弾性係数の比較をそれぞれ示す。図中の計算水平耐力は図 3 の仮定に基づきエネルギー吸収部材 2 体の単純和として評価している。また、表中の計算弾性係数は、充填材の無い試験体の場合スタブ境界を固定端として 2 体の変断面エネルギー吸収部材の弾性解(曲げ変形とせん断変形)より評価し、充填材の有る試験体の場合エネルギー吸収壁中央幅(156mm)を持つ矩形壁の弾性解(曲げ変形とせん断変形)より評価した。なお、せん断剛性はポアソン比 0.2 として評価し、矩形壁は、試験体形状より HFRCC と充填材の立面面積比(3:1)で重み付け平均化した弾性係数を用いて評価している。図表より、充填材の付与により水平耐力と初期剛性が大きく上昇するが、充填部の損傷が拡大し壁版としての水平抵抗機構の低下とともに、エネルギー吸収部材の変形が増幅され、充填材の有る試験体は軟化し 2 試験体の曲線は漸近していることがわかる。これは、数値解析 ⑨で確認された充填材の有無による剛性の差異と水平耐力の収斂と整合する。計算水平耐力は、充填材の無い試験体の水平耐力を概ね評価している。また、充填材の有る試験体の水平抵抗はピーク後軟化し、計算水平耐力に収斂しており、2 本のエネルギー吸収部材の水平耐力評価は概ね妥当であると考ええる。なお、本実験では漸増 1 方向繰返し載荷のため、充填材の有る試験体では充填部の損傷後も 1 方向圧縮ストラットによるせん断伝達機構が残存し、初期の変形レベルで充填材の無い試験体に対し大きな水平耐力を示したものと考える。また、表の初期

図3 断面内の応力ひずみ分布の仮定

表4 エネルギー吸収部材の曲げ耐力算定位置と計算水平耐力

算定位置	端部断面	変断面中央部	絞部断面
計算水平耐力 (kN)	9.04	8.24	7.71

剛性(1/3 割線剛性)は、計算弾性剛性に対しては、概ね充填材の無い試験体で 50%程度、充填材の有る試験体で 70%程度となっている。

図4 破壊機構実験のせん断力-部材角関係

表5 破壊機構実験の水平耐力と剛性の比較

試験体	水平耐力(kN)	①初期剛性(kN/rad)	②計算弾性剛性(kN/rad)	①/②
F-充無	17.3(1.00)	4.20×10^3 (1.00)	9.82×10^3	0.43
F-充有	23.1(1.34)	14.2×10^3 (3.38)	19.4×10^3	0.73

()内は、F-充無試験体とF-充有試験体の比を示す。

(a) F-充無試験体

(b) F-充有試験体

図5 破壊機構実験の最終荷重ステップひび割れ状況

図5に最終ステップひび割れ状況を示す。充填材の無い試験体では部材角 1/60 から部材角 1/30 にかけて、エネルギー吸収部材絞部近傍にひび割れが発生し、エネルギー吸収部材絞部から端部にかけてひび割れが分散した。部材角 1/20 ではエネルギー吸収部材絞部近傍で局所的なひび割れが発生し始めた。これ以降は部材角 1/10 まで部材角 1/20 で発生したひび割れが進展すると同時にエネルギー吸収部材絞部から端部にかけてのひび割れが進展した。充填材の有る試験体は、部材角 1/400 において充填材にひび割れが発生し、さらに充填材のひび割れが進展しエネルギー吸収部材にも損傷が確認された。部材角 1/200 になると充填材にひび割れが集中し、部材角 1/400 で見られたエネルギー吸収部材のひび割れは進展しなかった。部材角 1/70 になると充填材を介してエネルギー吸収部材絞部にも軽微なひび割れが発生し始めた。部材角 1/40 ではエネルギー吸収部材絞部のひび割れが進展し、エネルギー吸収部材端部の剥離が見られた。これは先述した充填部の 1 方向圧縮ストラットにより壁版挙動がある程度保持されたため発生した壁版脚部損傷と考えられる。部材角 1/20 から 1/10 ではエネルギー吸収部材絞部のひび割れが進展し、端部のひび割れもいくらか進展した。壁版挙動による端部損傷が集中しなかった充填材の無い試験体に対し、充填材の有る試験体は、壁版挙動により端部に局所的な損傷と剥離が発生し、異なる破壊挙動を示した。

図6 性能評価実験の試験体概要と荷荷条件

5 性能評価実験

5.1 試験体概要

試験体は、表 2 に示す HFRCC を用いたエネルギー吸収部材に對し、型枠用スタイロフォームを充填材とした試験体(P-SF 付有)、充填材に表 2 に示す高強度モルタルを用いた付着の無い試験体(P-高付無)、充填材に表 2 に示す低強度モルタルを用いた充填材との付着を有または無とした試験体(P-低付有と P-低付無)とした。また、試験体寸法は、実物大を想定したエネルギー吸収部材実験⁹⁾の 1/3 とした。なお、モルタルを充填材とした 3 試験体は、充填材とエネルギー吸収部材の境界面の付着を除いた場合の耐力・剛性の上昇レベルと充填材の強度の影響を確認するためのものである。付着の無い試験体では塩ビ板を 2 枚重ねてその間にグリースを封入した付着断絶要素を充填材とエネルギー吸収部材の境界面に設置し、両者の凹凸による噛み合わせや付着を断絶し圧縮力のみを伝達するようにした。また、付着を有とした試験体では、充填部型枠を脱型し境界面を濡らした後に充填材を打設した。図 6 に試験体概要と載荷条件を示す。エネルギー吸収部材の厚さは 50 mm、スタブの厚さは 150 mm とし、表 3 に示す鉄筋を用いた。X 形鉄筋及び平行鉄筋はスタブ端部の鉄板に溶接により定着した。せん断補強筋は、横筋形式を採用し、せん断補強筋比はエネルギー吸収部材実験⁹⁾の試験体に基づき 1.13% とした。養生は湿潤養生で、エネルギー吸収部材とスタブの HFRCC を一体打設後、1 週間後に充填部を打設した。充填部打設 1 週間後に載荷試験を行い、加力梁に作用する荷重、左右スタブの相対変位、及びエネルギー吸収部材端部と絞部の鉄筋ひずみを測定項目とした。なお、せん断力は加力梁にかかる荷重の 1/3 として評価した。また、部材角は図 6 に示す変位計測フレームによる左右スタブの相対変位をスタブを除く試験体高さ(300mm)で除して評価した。図 7 に載荷履歴を示す。本実験では片方向除荷後に載荷点と支持点を移動することにより漸増交番繰返し載荷を行った(図 6 の着色部は正載荷時の載荷点と支持点)。

図 7 性能評価実験の交番載荷履歴

5.2 水平耐力の算定

破壊機構実験と同様、エネルギー吸収部材の水平耐力を評価するため、図 3 に示す断面内の応力ひずみ分布に基づき曲げ耐力を算定した。曲げ耐力算定位置とそれに対応した水平耐力の比較を表 6 に示す。表より、エネルギー吸収部材絞部の曲げ耐力時に水平耐力が

表 6 エネルギー吸収部材の曲げ耐力算定位置と計算水平耐力

算定位置	端部断面	変断面中央部	絞部断面
計算水平耐力 (kN)	55.4	56.0	52.6

決定されるが、破壊機構実験と同様に全算定位置でほぼ同程度の水平耐力となっている。

5.3 実験結果と破壊機構

図 8 にせん断力一部材角関係と鉄筋の降伏状況を示す。なお、図中の計算水平耐力は図 3 の仮定に基づきエネルギー吸収部材 2 体の単純和として評価している。セメント系材料を用いた既往の制震デバイスのスリップ形の履歴性状と異なり、全ての試験体で同レベルの水平耐力を示すと共に、せん断力軸の切片荷重(部材角 0 におけるせん断力)が荷重サイクルを経るごとに高くなる紡錘形の履歴性状を示している。また、計算水平耐力は、全ての試験体の水平耐力を概ね評価しており、充填材の有る試験体の履歴がピーク後軟化し計算水平耐力に収斂した破壊機構実験と異なる結果となった。これは、漸増 1 方向繰返し載荷において充填部の損傷後も圧縮ストラットによるせん断伝達機構が残存したことに対し、漸増交番繰返し載荷においてはその効果が減少し、軟化挙動のない紡錘形の履歴性状を示したものと考えられる。

P-SF 付有試験体の水平耐力は他の試験体に対し若干下回ったが、安定した履歴性状を示している。P-高付無試験体と P-低付無試験体の水平耐力は P-SF 付有試験体より高く、計算水平耐力とほぼ同じ値を示しており、付着断絶要素を用いた場合、充填材の物性値によらず、せん断力一部材角関係はほぼ同じとなるのがわかる。P-低付有試験体のせん断力一部材角関係は、他の試験体と同様紡錘形の履歴性状を示し、最も高い水平耐力となっている。なお、充填部の耐力負担を考慮せず、エネルギー吸収部材の曲げ降伏を仮定した計算水平耐力は、P-SF 付有試験体の水平耐力を過大評価しており、図 4(a)に示す F-充無試験体と異なる結果となった。これは、せん断破壊を含む広域ひび割れ分散に起因するものと考えられ、詳細な耐力評価法は今後の研究課題である。

鉄筋の降伏状況としては、全てのひずみゲージにおいて鉄筋降伏が確認された。また、降伏履歴として P-低付無試験体を除いて、概ね部材角 1/100 までにエネルギー吸収部材絞部のひずみゲージ 1、2、3 で鉄筋降伏が確認され、その後、変形が増幅するに従いエネルギー吸収部材端部のひずみゲージ 4 と 5 において鉄筋降伏が確認されている。これは、表 6 の曲げ耐力算定結果と概ね整合するものと考えられ、変断面とすることにより鉄筋の降伏領域が拡大しているのがわかる。

全試験体のひび割れ状況を図 9 に示す。P-SF 付有試験体のひび割れ進展状況としては部材角 1/100 の荷重サイクルでエネルギー吸収部材中央部に斜めのひび割れ及び変断面部から微細なひび割れが生じた。部材角 1/50 の荷重サイクルではひび割れ領域が広がり、この荷重サイクルにおいて、エネルギー吸収部材と充填部スタイロフォームの剥離が確認された。部材角 1/20 の荷重サイクルではエネルギー吸収部材の斜めひび割れが進展し、エネルギー吸収部材絞部と端部間のひび割れが繋がりはじめた。

P-高付無試験体のひび割れ進展状況としては部材角 1/200 の荷重サイクルでエネルギー吸収部材と充填部境界から付着断絶要素のグリースが滲出し、充填材の変断面部に損傷が発生し、エネルギー吸収部材中央部に極微細な斜めひび割れが順番に確認された。部材角 1/50 の荷重サイクルでは充填材損傷は変断面部から端部付近以外には発生せず、主にエネルギー吸収部材中央部の斜めひび割れの進展

とエネルギー吸収部材端部付近のひび割れが発生した。また、付着が無い場合充填材が移動して充填材とエネルギー吸収部材の境界が開き、最終荷重サイクルでは中央部と端部のひび割れが進展した。P-低付無試験体のひび割れ進展状況としては、部材角 $1/200$ の荷重サイクルにおいて付着断絶要素のグリースが滲出し、充填材変断面部に損傷が発生し、エネルギー吸収部材中央部に極微細な斜めひび割れが順番に確認された。それ以降は P-高付無試験体と同様に充填材損傷はあまり進展せずエネルギー吸収部材のひび割れが進展した。

図8 性能評価実験のせん断力-部材角関係

(a) P-SF 付有試験体

(b) P-高付無試験体

(c) P-低付無試験体

(d) P-低付有試験体

図9 性能評価実験の最終ステップひび割れ状況

P-低付有試験体のひび割れ進展状況としては部材角 $1/500$ の荷重サイクルで充填材中央部に斜めひび割れが確認された。また、エネルギー吸収部材に極微細なひび割れが確認された部材角 $1/200$ の荷重サイクルではこの充填材のひび割れが充填部全体に進展し、水平耐力に達する前にエネルギー吸収部材と充填材の付着による圧縮ストラットの形状が確認された。部材角 $1/100$ の荷重サイクルでは充填材の損傷進展と共にエネルギー吸収部材絞部のひび割れと中央部の斜めひび割れが確認された。部材角 $1/50$ から $1/20$ の荷重サイクルではエネルギー吸収部材絞部のひび割れと中央部の斜めひび割れが進展した。このように他の試験体と大きく異なった点は、充填材の顕著な損傷と、他の試験体ではエネルギー吸収部材端部付近にひび割れが発生したのに対し、P-低付有試験体では絞部に集中したことである。これは付着力があることによって、充填材中央部の顕著なせん断破壊が発生しエネルギー吸収部材中央部に変形が集中したためと考えられる。このように、弱点となる可能性が高いスタブとエネルギー吸収部材の接合部破壊を制御する上で、充填材とエネルギー吸収部材の付着特性は重要な評価因子と考えられる。なお、漸増1方向繰返し载荷を用いた破壊機構実験において、充填材の有る試験体に見られた壁版挙動によるエネルギー吸収部材の端部剥離は、漸増交番繰返し载荷においては充填部の圧縮ストラットによるせん断伝達機構の効果が減少したため、同様な現象が見られなかったものと考えられる。

各試験体の小変形レベルでの剛性比較として各試験体の第1荷重サイクルのみを抽出したものを図10に、各試験体の水平耐力と初期剛性(正载荷の1/3割線剛性)及び計算弾性剛性の比較を表7にそれぞれ示す。表の水平耐力は全サイクル中でせん断力の絶対値の最大値とした。また、表中の計算弾性係数は、破壊機構実験と同様に弾性解に基づき評価したものであり、P-低付有試験体は、エネルギー吸収壁中央幅(260mm)を持つ矩形壁の弾性解より評価し、それ以外の試験体は2体の変断面エネルギー吸収部材の弾性解より評価した。図表より他の試験体に比べP-低付有試験体の初期剛性が2倍以

上高いことがわかる。また、P-低付無試験体と P-高付無試験体の初期剛性にほとんど差異がないことから、付着の無い試験体の場合、初期剛性は充填材の物性に依存しない事がわかる。以上より、本実験から充填材の有無や充填材とエネルギー吸収部材の接合部付着の有無により剛性・耐力の調整が可能であることがわかる。なお、初期剛性(1/3 割線剛性)は、破壊機構実験と同様に計算弾性剛性に対しては、概ね充填材がスタイロフォームまたは充填部付着の無い試験体で 50%程度、充填部付着の有る試験体で 70%程度となっている。

図 11 にエネルギー吸収壁の減衰性能の指標として、図中に定義したエネルギー吸収指標(E_{ind})の履歴を示す。図より各試験体ともエネルギー吸収指標は部材角 1/20 まで概ね増加傾向となり、大きなエネルギー吸収能力を示している。また、各試験体において極端な差異は無く、減衰性能を変えることなく剛性と耐力を調整することが可能であることがわかる。

表 7 性能評価実験の水平耐力と剛性の比較

試験体	P-SF 付有	P-高付無	P-低付無	P-低付有
水平耐力(kN)	91.7	105	108	110
水平耐力比	1.00	1.15	1.18	1.20
①初期剛性(kN/rad)	12.8×10^3	11.0×10^3	12.7×10^3	35.0×10^3
初期剛性比	1.00	0.86	0.99	2.73
②計算弾性剛性(kN/rad)	27.3×10^3			53.3×10^3
①/②	0.47	0.40	0.47	0.66

図 10 第 1 荷重サイクルのせん断力-部材角関係

図 11 エネルギー吸収指標の履歴

図 12 復元力特性のモデル化

エネルギー吸収壁の復元力特性のモデル化に関する基本的な考え方を、P-低付無試験体の履歴性状を例にとって図 12 に示す。ここでは、図 3 の仮定に基づき評価した水平耐力(P_u)と、表 5 と表 7 の剛性比較(①/②)に基づき充填材の無いまたは充填部付着の無い試験体の計算弾性剛性に低減係数 0.5 を乗じた計算初期剛性(K_i)を用いてモデル化している。また、性能評価実験で確認した部材角履歴に基づき、限界部材角を ± 0.05 と規定し、限界部材角到達後の除荷完了時の残留部材角と逆方向水平耐力(P_u)より得られる剛性(K_s)を用いて復元力の骨格曲線を構築している。実験結果との比較より、最終モデル構築に対しては K_s の設定法を詳細に検討する必要があるが、 P_u と K_i の工学量を用いた復元力モデルの骨格としては、概ね妥当であると考えられる。なお、P-低付有試験体の場合は、表 5 と表 7 に基づき、充填部付着の有る試験体の計算弾性剛性に低減係数 0.7 を乗じた計算初期剛性を用い、充填部が大きく損傷する水平耐力到達以後の復元力特性は、充填材の無い試験体と同じモデルを用いることで概ね評価可能と考えられる。ただし、あくまでも限られた試験体数における比較であり、復元力特性のモデル化について、より多くのデータによる比較が今後必要と考える。

6 構造性能と損傷モニタリング

本エネルギー吸収壁の構造性能は、その特徴の 1 つである多段階破壊機構の進展に応じて変化する。その性能レベルは充填部の損傷レベルとエネルギー吸収部材の損傷レベルにより特徴付けられる。特に、セメント系複合材料を基本材料としているため、外観からエネルギー吸収壁の損傷レベルを視覚的に判断でき、性能劣化に対する損傷モニタリング機能を付与することが可能となる。さらに、樹脂注入工法を適用することにより、充填部の損傷レベルからエネルギー吸収部材の損傷レベルまで、損傷レベルに応じて多段階に補修・補強を行うことも考えられる。

表 8 に本実験の試験体形状を採用した場合の、建物の応答変形レベルと、スタブによる変形角の増幅を 3 倍としたエネルギー吸収壁の多段階損傷レベルの関係を示す。また、多段階損傷レベルの視覚的判断例として、P-低付有試験体の各部材角レベルにおけるひび割れ状況を図 13 に示す。充填材が無損傷の場合を健全レベル(HL)とし、充填材の軽微な損傷を損傷レベル 1(DL1)、充填材の顕著な損傷とエネルギー吸収部材の軽微な損傷を損傷レベル 2(DL2)、充填材の剥落とエネルギー吸収部材の顕著な損傷をレベル 3(DL3)として、損傷レベルに応じて性能劣化状況や入力地震動レベルを推定し、定期

検査や修復判断データとして活用することが考えられる。なお、性能評価実験において、充填部に大きな損傷が発生しなかった付着の無い試験体は、付着断絶要素からグリースが滲出するレベルを DL1 に対応するものと定義し、DL2 と DL3 に関しては、エネルギー吸収部材の損傷レベルに応じて定義している。また、P-SF 付有試験体の充填部損傷については DL1 と DL2 の区分が不明確となるが、スタイロフォーム表面にモルタルを薄く塗布することによって損傷レベルの視覚化は可能と考える。

表 8 応答変形レベルと多段階損傷レベル

試験体部材角	0	1/500	1/200	1/100	1/50	1/20
層間変形角	0	1/1500	1/600	1/300	1/150	1/60
P-SF 付有	HL	DL1-DL2				DL3
P-高付無	HL	DL1	DL2		DL3	
P-低付無	HL	DL1	DL2		DL3	
P-低付有	HL	DL1	DL2		DL3

図 13 P-低付有試験体の各部材角レベルにおけるひび割れ状況

7. まとめ

本稿では、鋼繊維と合成繊維を混入したハイブリッド型繊維補強セメント系複合材料を用い、エネルギー吸収性能に優れた紡錘形の履歴性状を示すエネルギー吸収部材を制震壁として拡張した。多段階に破壊する機構を付与することにより必要剛性・耐力を調整し、同時に履歴による減衰効果を付加したエネルギー吸収壁に対し、その多段階破壊機構及び耐力・変形性能を実験的に検討した。本研究の範囲内では、以下の知見が得られた。

- 1) 漸増 1 方向繰返し水平載荷に対し、充填材の軽微な損傷から顕著な損傷、その後のエネルギー吸収部材の軽微な損傷から顕著な損傷まで段階的な破壊が見られ、エネルギー吸収壁の多段階破壊機構が確認できた。また、エネルギー吸収部材の連結部充填により、エネルギー吸収壁の水平耐力と初期剛性が大きく上昇し、ピーク後の軟化挙動により、無充填のエネルギー吸収壁の履歴特性に漸近した。これにより充填材の付与による剛性調

整機能が確認できた。

- 2) 漸増交番繰返し水平載荷に対し、全ての試験体で紡錘形の履歴特性と高いエネルギー吸収能力を有することが確認できた。また、エネルギー吸収能力は充填材の物性や付着に大きく依存しないが、初期剛性は充填材と充填部付着の有無により調整が可能であることが確認できた。
- 3) 低強度モルタルを充填した場合、付着の有無による力の伝達機構の差異から、エネルギー吸収部材の損傷箇所をエネルギー吸収部材絞部から端部まで調整可能であることが確認できた。
- 4) エネルギー吸収壁の水平耐力は、充填材を考慮せずエネルギー吸収部材の水平耐力の単純和として、材料構成則からモデル化した応力ひずみ分布に基づく断面解析により、充填部の差異による精度差はあるものの、ある程度評価可能であることが確認できた。さらに計算水平耐力と弾性解を用いた簡便な復元力モデルの構築の可能性が確認できた。
- 5) エネルギー吸収壁の構造性能レベルは充填部の損傷レベルとエネルギー吸収部材の損傷レベルにより特徴付けられ、外観からエネルギー吸収壁の損傷レベルを視覚的に判断でき、性能劣化に対する損傷モニタリング機能を付与することが可能であることが確認できた。

本研究の範囲内で得られた知見において、多段階破壊機構を有するエネルギー吸収壁を制震デバイスとして適用することにより、セメント系材料を用いた制震デバイスの高性能化が可能であることが明らかとなった。特に、高い剛性と視覚的な損傷判断は、セメント系複合材料を用いた壁版において特徴付けられる構造特性である。今後は、より詳細な耐力・剛性評価法の構築、並びに実構造物に適用するために、架構内の柱梁に対して負担の少ない接合法、簡便な施工に適用したプレキャスト化、及びスタブの必要耐力・剛性の定量化に関する研究が必要と考える。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：高靱性セメント複合材料を知る・作る・使う、2002.1
- 2) 藤原徳郎、松崎育弘、磯雅人、福山洋：高靱性型セメント系複合材料を用いたデバイスの構造性能に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.23、No.3、pp.145-150、2001.
- 3) 杉本訓祥、増田安彦、江戸宏彰：鉄筋コンクリート造部材を用いた制震装置の開発、コンクリート工学年次論文集、Vol.23、No.3、pp.1075-1080、2001.
- 4) 石原誠一郎、三橋博三、金子佳生、和地正浩：ハイブリッド型繊維補強セメント系複合材料を用いたエネルギー吸収部材の構造性能に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.25、No.2、pp.1705-1710、2003.
- 5) 和地正浩、金子佳生、三橋博三、石原誠一郎：ハイブリッド型繊維補強セメント系複合材料を用いたエネルギー吸収部材の構造性能、日本建築学会大会学術講演梗概集（東海）、C-2、構造 IV、pp.585-586、2003.9
- 6) 下川博之、金子佳生、三橋博三、石田裕：繊維補強セメント系複合材料を用いたエネルギー吸収壁の開発—多段階破壊機構について—、日本建築学会大会学術講演梗概集（東海）、C-2、構造 IV、pp.589-590、2003.9
- 7) 大野和男、横山和雄、久保田吉彦：新載荷法による鉄筋コンクリート梁の剪断抵抗について、日本建築学会研究報告、第 30 号、pp.1-4、1955.
- 8) 金子佳生、三橋博三、桐越一紀、阿部孝仁：鋼繊維補強セメント系複合材料の単純化した軸構成モデル、日本建築学会技術報告集、第 11 号、pp.5-8、2000.

(2005年2月7日原稿受理、2005年5月18日採用決定)