

3.3 非構造部材を含む構造物の崩壊余裕度に関するデータ収集・整備

3.3.2 災害拠点建物の安全度即時評価および継続使用性即時判定

(1) 業務の内容

(a) 業務の目的

- ・「(2)災害拠点建物の安全度即時評価および継続使用性即時判定」として、行政庁舎や体育館など、災害時拠点となる既設の建物内に少数のセンサを設置し、地震後速やかに建物安全性、崩壊余裕度、および継続使用の可否等を判定するシステムの構築を目指す研究開発を行う。具体的には、構造躯体のみならず設備・非構造部材をも再現した実物建物を大型振動台実験により損傷させ、センサによって検知した建物の揺れのデータをもとに、躯体から設備・非構造部材までの損傷レベルを即時に評価する技術、および崩壊余裕度の定量的評価に基づく施設の継続使用性判定手法を提案する。

(b) 平成 29 年度業務目的

- ・研究 3 年目の E-ディフェンスによる大型振動台実験に向けて、試験体の設計および設備・非構造部材を含む建物損傷評価技術の開発に着手する。更に、非構造壁の損傷挙動を把握・評価するための要素実験を実施する。

(c) 担当者

所属機関	役職	氏名
東京大学地震研究所	教授	楠 浩一
東京大学大学院新領域創成科学研究科	准教授	清家 剛
広島大学大学院工学研究院	准教授	日比野 陽
建築研究所構造研究グループ	主任研究員	向井 智久
大阪大学大学院工学研究科	准教授	真田 靖士
広島大学大学院工学研究院	教授	大久保 孝昭
広島大学大学院工学研究院	助教	寺本 篤史
大林組技術研究所	所長	勝俣 英雄
大林組技術研究所構造技術研究部	副部長	米澤 健次
防災科学技術研究所地震減災実験研究部門	主任研究員	中村 いずみ

(2) 平成 29 年度の成果

(a) 業務の要約

試験体の設計、非構造部材の損傷劣化検知、および非構造部材を含む損傷評価システムの開発を目的に、以下の項目について、検討を行った。

震動台実験試験体の設計

- 1) 震動台実験試験体の試設計
- 2) 新しい壁端部ディテールを採用した袖壁付柱の性能確認実験
- 3) 新しい壁端部ディテールを採用した腰壁・垂れ壁付き梁の性能確認実験

非構造部材の損傷劣化検知

- 4) 画像解析を用いた天井の劣化診断実験
- 5) 仕上げタイルの損傷検知委実験

非構造部材を含む損傷評価システム

- 6) 構造・非構造ヘルスマニタリングシステムの統合

(b) 業務の成果

1) 震動台実験試験体の試設計

災害拠点を想定して、国土技術政策総合研究所「災害拠点建築物の設計ガイドライン(案)」技術資料「①壁を活用した鉄筋コンクリート造建築物の損傷制御設計法」を参考に、図 1-1 に示すような、1×2 スパン 3 層試験体の試設計を行った。耐震ランクは I とし、そで壁等を有効に利用した設計とした。具体的構造設計の内容を以下示す。

- ・ 雑壁（袖壁、腰壁等）を考慮したモデルで、ベースシア係数が 0.55 に達する時点の各層の最大層間変形角 R_{max} が 0.33%以内であることを確認するとともに部材塑性率が 1 以下であることを確認する。
- ・ 雑壁を無視した純ラーメンのモデルで、保有水平耐力時のベースシア係数が 0.3 以上であることを確認する。

試設計建物の地震応答解析を実施し、図 1-2 に示すように、所要の耐震性能を有していることを確認した。

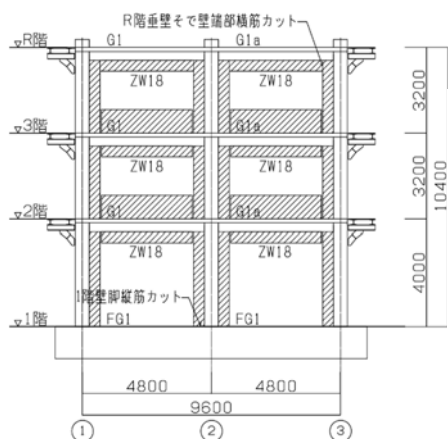


図 1-1 試験体軸組図

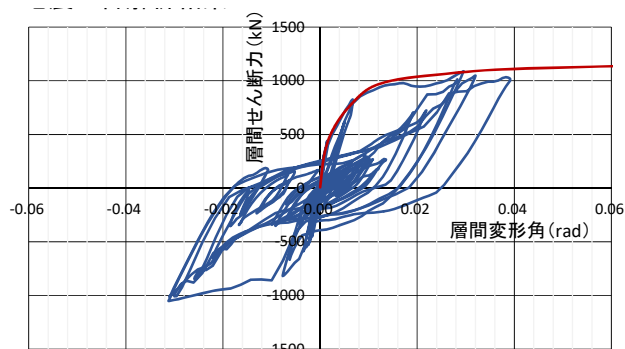


図 1-2 試験体の層せん断力一層間変形角関係

2) 新しい壁端部ディテールを採用した袖壁付柱の性能確認実験

本実験では、1)RC 柱の耐力増大を意図として柱せいと同一長さの袖壁を有する構造の性能確認、2)袖壁の損傷抑制を意図して袖壁脚部の壁縦筋を定着しない構造詳細の効果検証を目的として、柱 1 体、袖壁付柱 2 体の 1/2 スケール試験体（写真 2-1）を対象とする構造実験を実施した。表 2-1 に 3 体の試験体概要をまとめる。

袖壁付柱 2 体は袖壁端部の拘束域の構造詳細が異なり、No.2 が保有水平耐力指針（案）によるみなし FA 相当の仕様、No.3 が ACI 規準を満足する仕様である。図 2-1 に袖壁付柱の荷重変形関係を柱と比較する。いずれの袖壁付柱も上記の設計意図通り耐力の向上が図られ、危険断面を除き袖壁の損傷を抑制できることを確認した。



写真 2-1 試験体

表 2-1 試験体概要

		No. 1	No.2	No.3	
柱	B×D	250×250 (mm)			
	主筋	10-D16($p_g=3.16\%$)			
	せん断補強筋比	D6@50($p_w=0.50\%$)			
	かぶり厚さ	25(mm)			
壁	壁筋(横筋)	—	D6@100($p_s=0.50\%$)		
	壁筋(縦筋)	—	D6@100	D10@100	
	拘束域長さ	—	130(mm)	210(mm)	
	拘束筋量	—	D10@50	□_D10@50	
	拘束域鉄筋比	X 方向	—	2.79	2.79
		Y 方向	—	1.08	1.83
	かぶり厚さ	20(mm)			
コンクリート設計基準強度		36(N/mm ²)			
鉄筋		SD345			

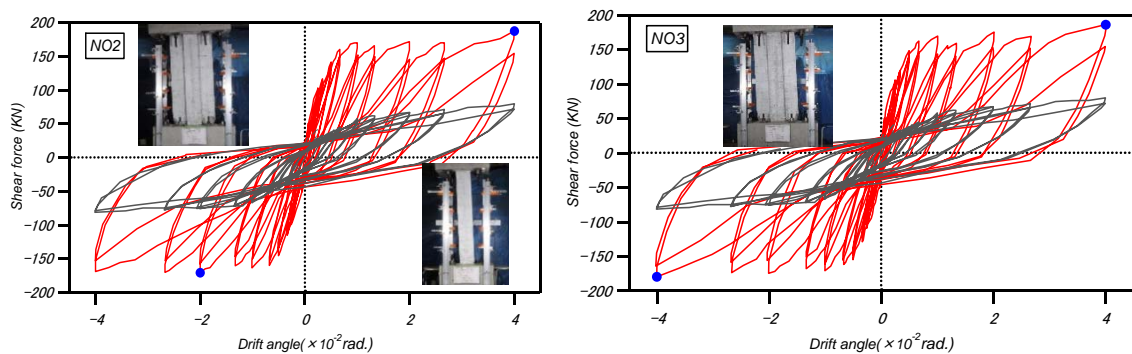


図 2-1 荷重変形関係の比較（赤線：袖壁付柱、黒線：柱）

3) 新しい壁端部ディテールを採用した腰壁・垂れ壁付き梁の性能確認実験

本実験では袖壁付き柱の実験と同様に壁端部の鉄筋を定着しない二次壁を有する梁 2 体の構造実験を行った。表 3-1 に試験体概要を、図 3-1 に試験体 BSH の配筋図を示す。試験体 BS の壁端部の拘束筋量は保有水平耐力計算基準（案）の FA 部材相当、試験体 BSH の拘束筋量は ACI 規準における壁端部拘束筋量と同等となるよう設計した。荷重—変形関係を図 3-2 に示す。試験体 BS および BSH はいずれも断面解析により計算した耐力を発揮し、良好な靱性能を有することを確認した。両試験体の構造性能において大きな差異は見られず、危険断面の浮き上がりに伴うひび割れの拡大を除き、大きな損傷が生じないことも確認した（図 3-3）。

表 3-1 試験体概要

試験体	設計基準強度 [N/mm ²]	梁部材			2次壁			せん断耐力 [kN]		
		断面 [mm]	主筋 (引張鉄筋比)	せん断補強筋 (補強筋比)	断面 [mm]	壁筋 (壁筋比)	スリット [mm]	拘束筋	断面解析	実験結果
BS	36	400×600	6-D19 (0.78%)	D13@150 (0.42%)	200×600	2-D13@150 (0.84%)	300	-	246	313
BSH								D13@75	254	285

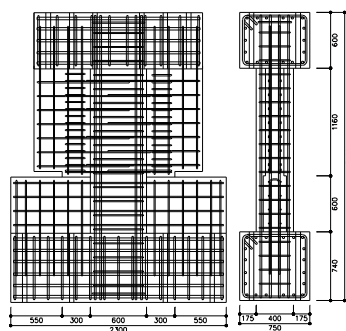


図 3-1 配筋図(BSH)

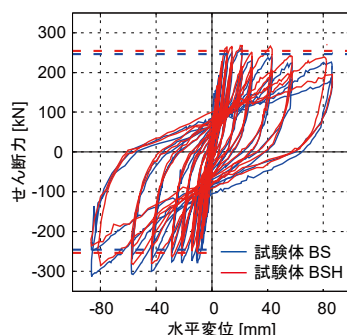


図 3-2 荷重－変形関係



図 3-3 最終破壊状況

4) 画像解析を用いた天井の劣化診断実験

地震発生時の防災拠点や避難所等の天井板の状況を確認する為、天井裏の非構造物（吊りボルト、レール、天井板）にマーカーを取付け、画像処理により各マーカーの変位を算出し、ずれ量の測定を行なった。（図 4-1、図 4-2 参照）。



図 4-1 吊りボルトへのマーカー設置イメージ
得られた結果

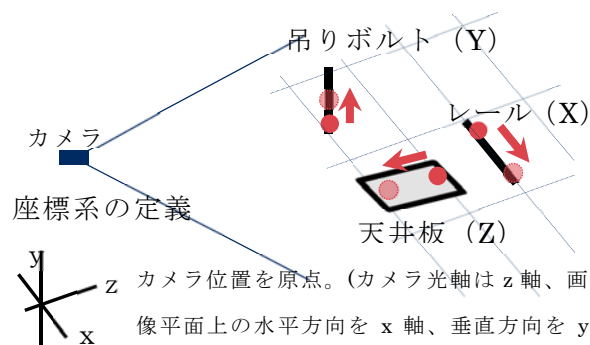


図 4-2 マーカーの設置個所と変位方向

得られた結果

- ・ 画像検知の精度のバラつきはマーカーと背景のコントラストに依存しており、コントラストが悪いと誤差が大きくなる傾向があるため、照明条件の改善が必要になる
- ・ Z 方向のずれ量は検出困難。（カメラを複数台設置して補完することが望ましい）
- ・ X, Y 軸方向はカメラから 4m 程度の距離において、5cm 程度の検出精度が得られた。

すなわち
画像処理によってマーカーのずれを検知することが可能である。

- ・画像検知の精度はマーカーの照度に依存するため、照明条件の改善が必要になる
- ・約 4m 先のマーカーの 10cm のズレを検知するためには要求されるカメラの性能は画素数 2048 x 1536 画素以上、画角 47.4×36.3 度以下である。

5) 仕上げタイルの損傷検知実験

外壁タイルと躯体との接着一体性は地震作用時に低下し、剥離、剥落を引起す場合がある。外壁タイルの剥離、剥落を検知する手法としては打音検査が一般的であるが、検査に時間を要するため、巨大地震下における被害推定、機能継続可否・機能損失度を即時に判断可能とする技術が必要である。

本実験では、RC 耐震壁を想定した壁部材に対して、接着方法、タイル寸法をパラメータとした 4 種類の工法によりタイルを貼り付け、水平載荷によって曲げひび割れ、せん断ひび割れを導入し、タイルの剥離を発生させ、載荷時に生じるタイルの剥離を、各種非破壊試験によって検知することを目的とした。実施した非破壊試験およびセンサは、打音検査、パイゲージ、光ファイバーセンサ、加速度センサ、サーモグラフィ、三次元計測であり、載荷後にタイルの実際の接着強度を取得するため、タイルの引張試験を行った。その結果、以下の知見を得た。1) 躯体のひび割れとそれに対応するタイル表層に導入されるひび割れは異なる挙動を示す。2) 剥離が発生したタイルの振動特性の変化を加速度センサにより検知することができる。3) 十分な温度変化が与えられた場合、サーモグラフィによって剥離を検知することができる。4) 光ファイバーセンサによりタイルと下地のディフレンシャルムーブメントを取得できるため、剥離が想定されるタイルに設置することで、剥離の早期検知が可能と推察される。

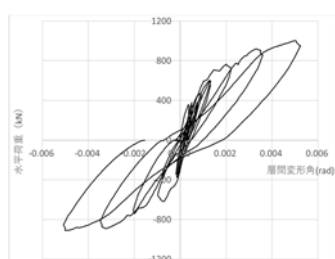


図 5-1 RC 壁の荷重変形関係



図 5-2 タイルの剥離状況 (1/200 終了後)

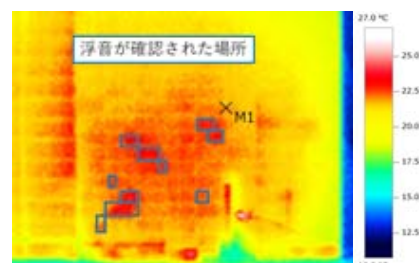


図 5-3 サーモグラフィによる剥離の検知

6) 構造・非構造ヘルスマニタリングシステムの統合

モニタリングシステムのシステム構成図を図 6-1 に示す。本システムでは、強震計の計測データから構造解析を行い建物の安全性を評価するとともに、カメラを用いた非構造部材の画像認識により継続利用性を即時評価を統合し報告することを目的としている。モニタリングシステムは、複数の強震計で地震のトリガー判定と建物の構造解析を行う構造処理サーバーと、カメラの画像データから非構造部材等の判定を行う非構造処理サーバー群から構成される。非構造処理サーバー群は、複数配置することが可能であり、判定結果も複数取り込むことが出来る。構造・非構造の各サーバーは全て固定のグローバル IP を持っており、非構造サーバーは、ローカル設置でもイン

ターネット経由での通知でも良い。結果は、非同期的に結果が判定されるため、取得出来た段階で構造処理サーバーは再度判定結果を作成することを想定している。構造処理サーバーは、非構造処理サーバー群の結果を地震毎に集約し、最終的な建物の安全性と継続使用性の判定をレポートの形で報告する。

従来システムでは、地震検出を行った時の1回のみ構造側の解析を行い、以降判定に対して情報更新されることは無かった。今回のシステムでは、以下の大きな特徴が追加されている。

1. システム的に独立した外部判断を複数取り込み、全く異なる複数の判定方法を用いて総合的な判断を行う。
2. 判定時に、全ての情報が揃ってなくても、手元にある情報（分かっている情報）を用いて可能な範囲での総合判定を行う。
3. 時間的に遅れて追加される情報がある場合には、自動的に取り込み何度でも再判定を行う。

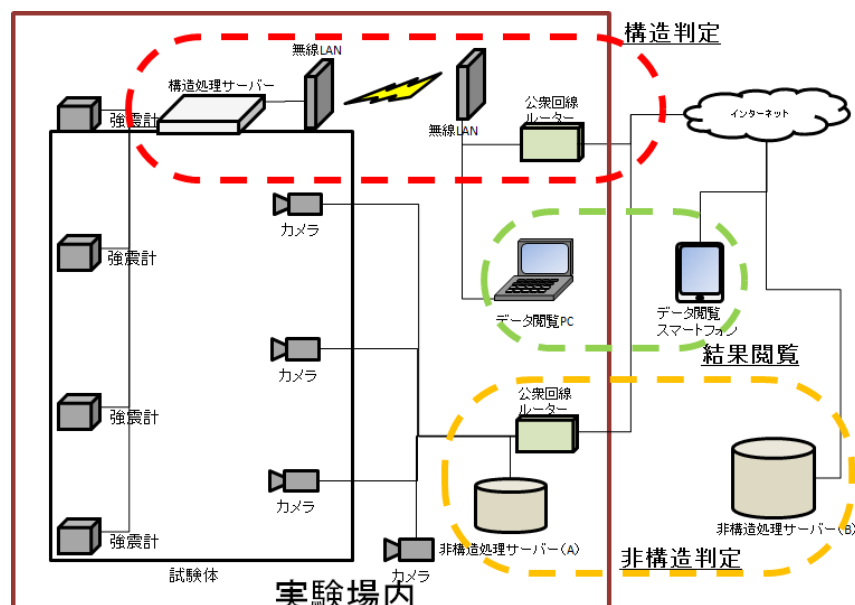


図 6-1 モニタリングシステムのシステム構成図

(c) 結論ならびに今後の課題

本年度は、試験体に用いる袖壁・腰壁・垂れ壁端部の新ディテールを用いた部材の構造性能を確認し、研究3年目に実施予定の震動台実験用の試験体（案）の設計を終えることが出来た。また、非構造部材に関しては、天井吊り材の変形を画像解析により把握する手法の基本性能、タイル仕上げの損傷劣化検知に関する基本情報を得ることが出来た。更に、構造性能評価システムと非構造性能評価システムの統合部分のシステムコード開発を行った。特に建築構造分野以外の技術利用部分も多いので、今後もプロジェクトの進捗と方向性について、密に情報共有を行う。

(d) 引用文献

なし

(e) 学会等発表実績

1) 学会等における口頭・ポスター発表

発表成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表場所 （学会等名）	発表時期	国際・国内の別
耐力向上と損傷抑制を目的とした壁縦筋を定着しない袖壁付柱部材の開発研究（その1）実験計画、口頭	椿美咲子，張政，真田靖士，楠浩一，日比野陽，向井智久	日本建築学会学術講演梗概集	2018年9月 （投稿中）	国内
耐力向上と損傷抑制を目的とした壁縦筋を定着しない袖壁付柱部材の開発研究（その2）実験結果、口頭	張政，真田靖士，楠浩一，日比野陽，向井智久	日本建築学会学術講演梗概集	2018年9月 （投稿中）	国内
壁筋の定着を除去した二次壁を有する鉄筋コンクリート梁部材の耐震性能評価、口頭発表	森悠吾，日比野陽，楠浩一，真田靖士，向井智久	日本建築学会大会学術講演会	2018年9月 （投稿中）	国内

2) 学会誌・雑誌等における論文掲載

なし

3) マスコミ等における報道・掲載

なし

(f) 特許出願，ソフトウェア開発，仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

名称	機能
レジリエンス総合力向上モニタリングソフト	従来の東京大学地震研究所に設置された IT 強震計観測ネットワーク用サーバー計測ソフトの基本機能である構造ヘルスマニタリングシステムの解析レポートに様々な非構造モニタリングの判定結果を統合し，災害対策本部や避難所などの重要拠点に於ける利用可否の自動判定を行うための統合環境を構築する。

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 平成 30 年度業務計画案

- ・ 研究 3 年目の E-ディフェンスによる大型振動台実験に向けて、試験体の設計および設備・非構造部材を含む建物損傷評価技術の開発に着手する。更に、非構造壁の損傷挙動を把握・評価するための要素実験を実施する。