

# 論文 乾燥収縮を受けた耐震壁の低速衝撃载荷時挙動に関する研究

春名 秀一郎\*1・長沼 一洋\*2・佐藤 裕一\*3・金子 佳生\*4

**要旨：**乾燥収縮ひび割れが RC 耐震壁の動的曲げせん断挙動に及ぼす影響を定量化するため、ポリプロピレン繊維混入の有無、および乾燥収縮拘束の有無を実験変数とした4体の耐震壁試験体を落錘衝撃試験に供し、併せて有限要素法による検証を行った。繊維体積比 1.2%の混入により収縮ひずみは 47%低減する。拘束によりひび割れが生じやすくなる一方、繊維混入はひび割れを低減した。有限要素法による非線形動的応答解析により、拘束によって固有周期が 20%増加する一方、繊維混入がこの増加を防止することを確認した。

**キーワード：**ひび割れ, ポリプロピレン繊維, 衝撃応答, FEM 解析

## 1. はじめに

従来 RC 建物の乾燥収縮ひび割れ対策は美観維持や鉄筋発錆防止を主眼に行われてきた。しかし最近の有限要素法 (FEM) による解析から、乾燥収縮ひび割れが曲げ降伏型部材主体の建物の地震時応答変位を増大させることが指摘されている<sup>1,2,3)</sup>。応答変位抑制のための部材断面の増大や補剛部材の追加は使用性・経済性の低下を招く。架構構成を変えずに乾燥収縮ひずみを抑制し応答変位を低減するために繊維補強コンクリートの応用が考えられる。上記の既往研究では 1,000 $\mu$  程度の乾燥収縮ひずみ<sup>2,3)</sup>が想定されている。一方、筆者らの地震応答解析<sup>3)</sup>では 5/s 程度のひずみ速度が耐震壁に生じることを確認している。

これらの条件を再現しつつ、収縮ひび割れによる応答増大の抑制を図ることを目的として、筆者らは 2018 年にポリプロピレン繊維補強コンクリート (PPRC) 耐震壁の衝撃载荷実験<sup>4)</sup>を実施した。本研究は、その装置を改良し (図-1)、かつ乾燥収縮期間を 1 年とした試験体に加え、FEM による非線形動的応答解析を併用し、振動特性と繊維補強の効果を確認する。

## 2. 実験計画

### 2.1 概要

図-2 に示す耐震壁を 4 体 (N0, NR365, PP0, PPR365) 作製し、材料種類 (普通コンクリート・PPRC) と収縮拘束の有無、乾燥収縮期間の 3 つを実験変数とする。これは岩本・津田の「NOP」試験体<sup>5)</sup>とほぼ同形状で、その静的挙動が有限要素解析により再現されている<sup>6)</sup>ことから、解析による検証に有効と判断して同じ諸元とした。

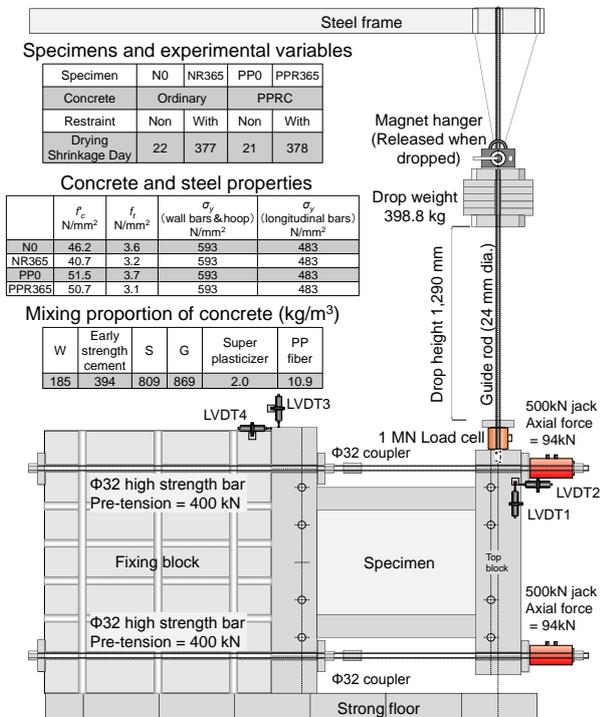


図-1 载荷装置

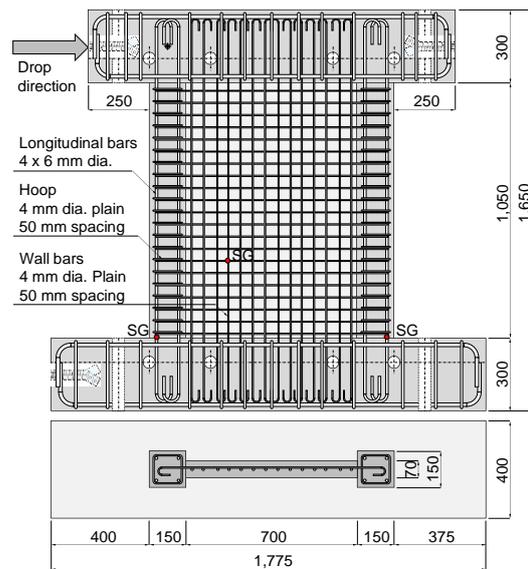


図-2 試験体の形状・寸法・配筋

\*1 日本大学大学院 理工学研究科建築学専攻 (学生会員)

\*2 日本大学 理工学部建築学科教授 博 (工) (正会員)

\*3 京都大学大学院 工学研究科建築学専攻助教 博 (工) (正会員)

\*4 京都大学大学院 工学研究科建築学専攻教授 Ph.D. (正会員)

## 2.2 落錘と載荷手法

落錘実験の目標変位は、曲げ降伏状態からせん断劣化初期に至る変位とする。岩本・津田の静的実験では、部材角約 0.1%で曲げ降伏、約 0.5%でせん断ひび割れが発生した。曲げ降伏からせん断ひび割れまでは約 150 kN の一定荷重となり、荷重一部材角関係で囲まれる面積は約 700 Nm である。一方、落錘運動エネルギーに対する試験体変形エネルギーの割合は、Saatici らの梁試験体<sup>7)</sup>で 6%～32%、森らの架構試験体<sup>8)</sup>で 20%となっている。壁では減衰が小さくなる可能性を考えて 15%と仮定し、落下距離 1290 mm、衝突速度 5.0 m/s、落錘重量 398.8 kg と設定した。試験体は図-1 に示すように 90° 回転し、1,750 mm×1,500 mm×1,500 mm のコンクリートブロックに下部固定ブロックと 32 mm 径 PC 鋼棒 2 本により緊結する。その後、カプラーを用いて上部固定ブロックに PC 鋼棒を接続し、NOP 試験体と同じ計 188kN の軸力を加える。落錘は磁石式吊具から解放してガイド用鋼棒に沿う形で落下させる。サンプリング周期は 5kHz とし、試験体上部ブロックに設けた変位計 (周波数特性約 8Hz) とロードセル (同約 1kHz) により変位と荷重を計測した。試験体の変位計測には図-1 に示すとおり、層間変形計測用の変位計 1 本 (LVDT1) とともに直交方向に変位計 1 本 (LVDT2) の計 2 本を設置し、固定ブロックと試験体の離間と滑りを計測するための変位計 2 本 (LVDT3, LVDT4)、合計 4 本設置した。

## 2.3 試験体の材料と製作手順

試験体は、「全体配筋→固定ブロック打設→21 日間養生→壁打設 (図-3(a))」という順で製作した。収縮ひずみ増加が緩やかになるまで 21 日間を置くことにより、固定ブロック部の収縮が、壁の収縮に与える影響の低減を図っている。

壁・柱のコンクリートにはやや大きな収縮が想定される早強セメントを用いた。PP0、PPR365 に使用するポリプロピレン繊維は、既往研究<sup>9)</sup>を参考に表面にエンボス加工した繊維長 30 mm、織度 3,500 dtex の製品とし、十分な構造性能向上が期待できる量として体積比で 1.2% を外割として混入した。また同研究の寸法効果検討より、本実験条件での寸法効果は無視できると判断した。

壁・柱の材齢 2 日で試験体 NR365、PPR365 を剛な反力壁に緊結・拘束する (図-3(b))。上下固定ブロックにそれぞれ 4 本の 32 mm 径 PC 鋼棒を通し、各 285 kN の緊張力を導入している。この緊張力は、壁の引張強度を固定部摩擦係数 0.25 で除した値に相当する。壁の上下端間が無変位とみなせるこの状態を 1 年間保ち、落錘実験を実施する。N0、P0 は拘束をせず 21 日間静置する。以上の条件により、竣工から 1 年以上を経過した建物が振動を受ける状況を想定した。

## 2.4 乾燥収縮ひずみと強度発現

上下固定ブロック用コンクリート、壁・柱用普通コンクリート、壁・柱用 PPRC の 3 種について、それぞれ 100 mm×100 mm×485 mm の乾燥収縮計測用ブロック 2 本を準備し、クリップゲージを取り付け、壁試験体と同環境下で乾燥収縮ひずみを計測した。この計測値を後述の有限要素モデルに直接入力した。図-4 にひずみの平均と材齢の関係を示す。PP 繊維補強により、落錘実験時の壁・柱用普通コンクリートのひずみは N0、PP0 (乾燥収縮期間 3 週間) では 22%、NR365、PPR365 (乾燥収縮期間 1 年) では 47%の収縮低減が確認された。



(a) 壁・柱打設 (b) 反力壁への緊結・拘束

図-3 試験体打設と収縮拘束状況

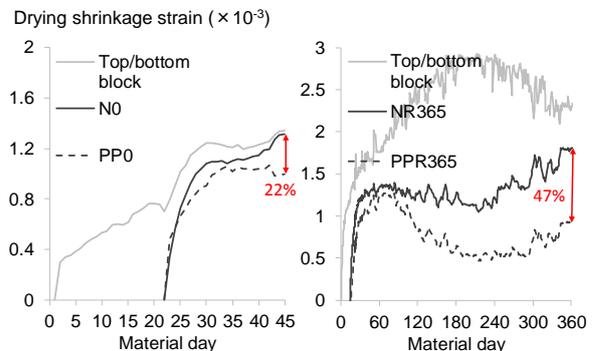


図-4 乾燥収縮ひずみの計測

## 3. 解析概要

### 3.1 試験体のモデル化

図-5 に有限要素分割図を示す。壁の要素寸法は既往研究<sup>6)</sup>に倣い約 50mm とした。コンクリートと鋼錘、ロードセルは四辺形要素、鉄筋と軸力用 PC 鋼棒はトラス要素、上部ブロック-ロードセル間、ロードセル-鋼錘間は、ばね要素でモデル化した。図-1 に示すように試験体は軸力(400kN)用 PC 鋼棒 2 本によってコンクリートブロックと緊結しているが、モデルではブロックを省略した。これにともない、軸力用 PC 鋼棒の長さを実寸値 1950mm から 300mm に短縮、軸剛性を等価にするため直径を 32mm から 12.55mm に変更した。拘束は上下固定ブロックの節点に強制零変位を与えて再現した。

### 3.2 材料特性のモデル化

図-6にコンクリートと鉄筋の応力度( $\sigma$ )-ひずみ度( $\epsilon$ )関係を示す。コンクリートの圧縮側には修正 Ahmad モデル<sup>10)</sup>、引張軟化域には PP0, PPR365 試験体について破壊エネルギー $G_F$ を考慮した土木学会標準示方書の式<sup>11)</sup>を採用した。 $G_F$ の値は既往研究<sup>12)</sup>に基づいて  $0.53\text{N/mm}^3$ としている。ひび割れ後のせん断伝達モデルとして、ひび割れ直交方向のひずみに応じてせん断抵抗が変化するモデル<sup>13)</sup>を採用した。クリープには、Bažant と Osman<sup>14)</sup>が提案した二重べき乗則を採用し、 $\alpha=0.8$ ,  $d=0.5$ ,  $p=0.25$ とした。材齢依存性は、実験での材料試験から得られたデータによって縦軸が圧縮強度、引張強度、ヤング係数の基準値に対する比、横軸が材齢とした図-7 となっている。鉄筋は Bi-linear 型とし、降伏後の二次勾配は初期剛性の  $1/100$  としている。履歴特性は、Ciampi らの提案<sup>15)</sup>による修正 Menegotto-Pinto モデルを用いた。また、コンクリートのひずみ速度依存性モデルは圧縮、引張側共に図-8 に示す藤掛らの式<sup>16)</sup>を、鉄筋のひずみ速度依存性モデルは細谷らの式<sup>17)</sup>を採用した。本解析において生じる最大ひずみ速度は引張側が  $6.0/\text{s}$ 、圧縮側が  $22/\text{s}$  である。

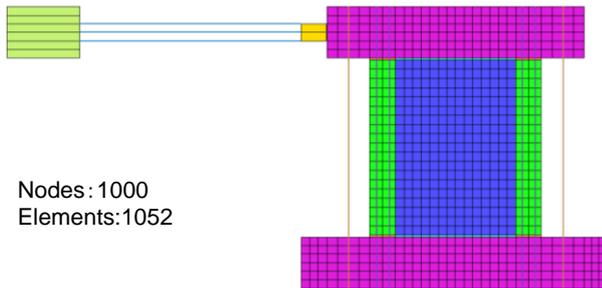


図-5 要素分割図

### 3.3 解析方法

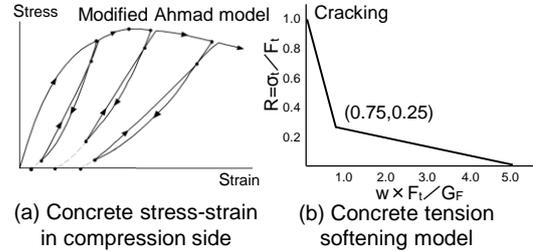
上部ブロッカーロードセル間、ロードセル-鋼錘間に適用するばね要素の構成則として、多くの研究で用いられる剛仮定<sup>例えば 8)</sup>を適用したところ、荷重の過大評価が見られた。このため(1)式の非線形剛性仮定を用いる。

$$F(N) = \beta \times \delta^3 \text{ (mm)} \quad (1)$$

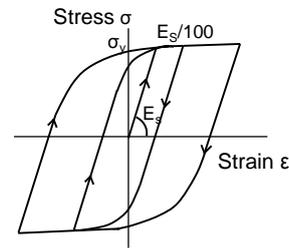
ここに  $\beta=500(\text{N/mm}^3)$  とする。非線形剛性の例として幾何形状から導かれた Hertz 則<sup>18)</sup>が知られるが、本研究の場合は試験体表面の未硬化層や不陸による衝突初期の低剛性を考慮しており、変位の進行に伴う剛性増加を荷重実測値に整合するよう試行して決定している。

実験の当該日数の乾燥収縮ひずみ実測値を 420 ステップ(N0, PP0), 3000 ステップ(NR365, PPR365)にわたり入力して計算した。NR365 と PPR365 は実験条件と同じく上下固定ブロックを固定している。次いで 5 ステップで軸力用 PC 鋼棒に緊張力を与える。次の 150 ステップでは時間増分約  $0.01$  秒でモデル全体に重力加速度を入力し、落錘を試験体に衝突する直前まで加速・移動させる。

衝突解析の時間積分には陽解法が用いられる場合もあるが、本研究では収束が保証される Newmark の  $\beta$  法を用い、以降は時間増分  $0.0001$  秒と十分に小さくして応答解析を実行した。減衰は試験体 1 次固有周期  $0.00856$  秒に対し  $1\%$  の初期剛性比例減衰を仮定する<sup>19)</sup>。



(a) Concrete stress-strain in compression side (b) Concrete tension softening model



Modified Menegotto-Pinto model

(c) Steel bar Stress-strain

図-6 材料構成則 (応力-ひずみ関係)

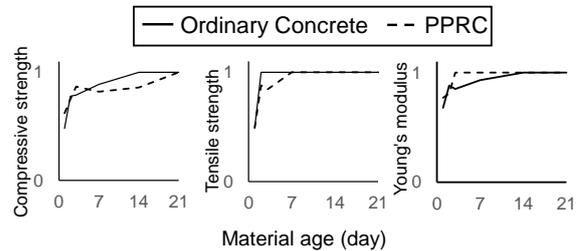
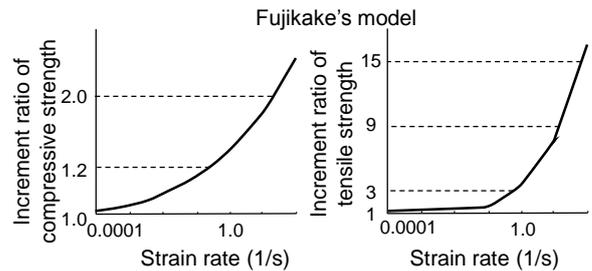
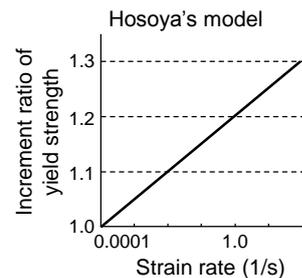


図-7 コンクリートの材齢依存性



(a) Concrete



(b) Steel

図-8 コンクリートおよび鋼材のひずみ速度依存性

#### 4. 実験および解析結果

##### 4.1 実験結果と解析結果の比較

表-1 に実験結果および解析結果の最大部材角と最大荷重を、図-9 に部材角と荷重の時刻歴を、図-10 に荷重一部材角関係を示す。なお、部材角は変位計計測値を壁の高さ 1,050 mm で除した値であるが、層間変位計 LVDT1 により測定した値より、下部ブロックの滑り LVDT3 を差し引き、さらに下部ブロック離間量 LVDT4 から推定した剛体回転分を差し引いた補正值とした。補正值  $d_c(\%)$  は(2)式のようになる。

$$d_c = \left( LVDT1 - LVDT3 - LVDT4 \times \frac{1500}{1775} \right) \times \frac{100}{1775} \quad (2)$$

解析では、変位と荷重は実験と同じ位置で観測をした。残留変位は自由振動振幅が最大部材角の 1/5 以下となる。衝突後 0.4 秒の変位とした。

両者を比較すると、最大部材角は実験では差はみられなかったが、解析ではパラメータによる差異が生じた。最大荷重は両者ともに明瞭な差異は見られなかったが、N0 以外の解析結果は実験を過小に評価した。一方、実験の残留部材角は NR365 のみ 0.16% と大きかったが、解析では明瞭な差異は生じなかった。また、図-10 に示した荷重一部材角関係から最大荷重到達後の勾配などを解析で模擬することができたが、図-9 の荷重-時刻関係でのリバウンドの発生を解析では再現できなかった。

##### 4.2 ひび割れ状況

乾燥収縮期間終了後、N0, PP0, PR365 には目視可能なひび割れは生じなかった。一方、NR365 は柱と壁の中央付近に幅 0.05mm のひび割れを観察した。理想的には対称分布となるひび割れであるが、緊張力の不均一から非対称のひび割れ分布を生じた。衝撃載荷後はすべての

試験体の引張側柱脚と壁下端に曲げひび割れを観察した。NR365 は既存ひび割れ幅が 0.10mm に拡大した。図-11 に実験と解析による NR365 のひび割れを示す。解析のひび割れ幅は目視可能な 0.05mm を表示最小値としている。解析においても NR365 に同様のひび割れが生じている。

##### 4.3 拘束、コンクリート種類の違いについて

乾燥収縮時の拘束の有無の違いについて、N0 と NR365 を比較すると、残留部材角は NR365 が上回った PP0 と PPR365 を比較すると、最大部材角は PPR365 が上回った。残留部材角は PPR365 が上回る。

コンクリート種類の違いについて、N0 と PP0 を比較すると、PP0 は残留変形が生じていない。NR365 と PPR365 の残留部材角は拘束なしの場合と同様の傾向がみられた。また前節の述べたように、乾燥収縮時および衝撃載荷後において PPR365 のひび割れ発生が抑制され、PPRC によるひび割れの抑制が確認された。解析もこれらも傾向をある程度再現したが、ひび割れ量と残留部材角にやや過大評価が見られた。

表-1 最大部材角と最大荷重  
(上段：実験結果，下段：解析結果)

試験体	N0	NR365	PP0	PPR365
最大部材角(%)	0.65	0.64	0.64	0.69
	0.57	0.67	0.50	0.58
残留部材角(%)	0.05	0.16	0.00	0.05
	0.10	0.09	0.10	0.11
最大荷重(kN)	717	780	776	764
	717	700	712	706

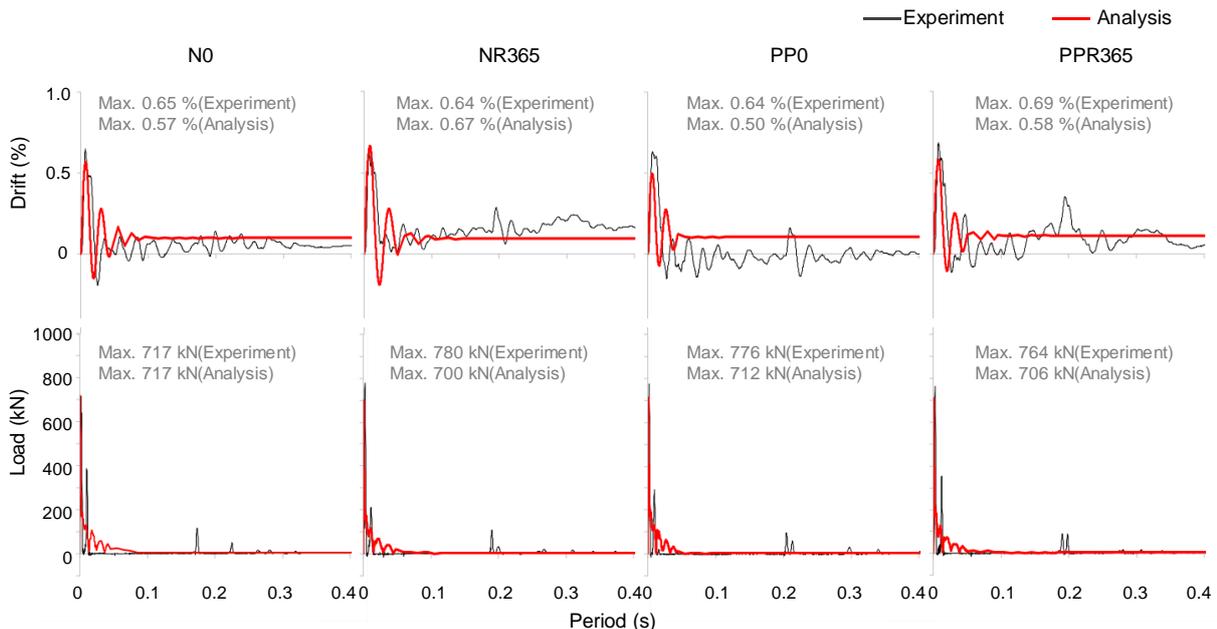


図-9 部材角および荷重の時刻歴

#### 4.4 部材角スペクトルおよび固有値解析

衝突後の振動特性を確認するため、部材角をフーリエ変換してスペクトルを算出した。衝突から 0 秒～0.075 秒, 0.075 秒～0.15 秒, 0.15 秒～0.225 秒, 0.225 秒～0.3 秒に 4 分割し、それぞれ 350 点のデータから 4 つのスペクトルの変化を観察する。図-12 に部材角スペクトル—周期関係を示す。衝突直後の時刻 0 秒～0.075 秒のスペクトルは、周期 0.04 秒以上の相対的に長周期の成分が最大となるが、これは塑性変形の急激な増大に対応する。周期 0.01 秒～0.02 秒の間に 2 番目の卓越成分が見られ、弾性ないし損傷の比較的少ない段階の振動成分を反映していると考えられる。時刻 0.075 秒～0.15 秒, 0.15 秒～0.225 秒, 0.225 秒～0.3 秒の 3 期間においては卓越周期が 0.02 秒～0.03 秒に移行する。さらに詳細な振動特性を把握するため、解析から得た各時刻における質量・剛性情報を用いて固有値を計算した。図-13 に 1 次, 2 次, 3 次モード固有周期の衝突後 0.3 秒までの推移を比較する。い

ずれもモードにおいても NR のみが他の 3 体よりも大きく、特に 1 次モードにおいて約 20% 増加している。同期間収縮変形を拘束した PR の周期は NO や P0 とほぼ同じであり、繊維混入による剛性低下抑制が見られる。

#### 5. まとめ

繊維混入、および収縮拘束の有無を変数とする耐震壁試験体 4 体の落錘試験および有限要素法による動的応答解析について以下の知見を得た。

- (1) 拘束が収縮ひび割れを発生させやすくし、衝撃荷重によりさらに延伸・増加することを確認した。
- (2) 繊維混入により収縮ひずみ、ひび割れの低減を確認し、固有周期から剛性低下抑制を確認した。
- (3) 実験と解析の比較から、拘束が固有周期を 20% 増加させる一方、繊維混入がこの増加を防止することを確認した。

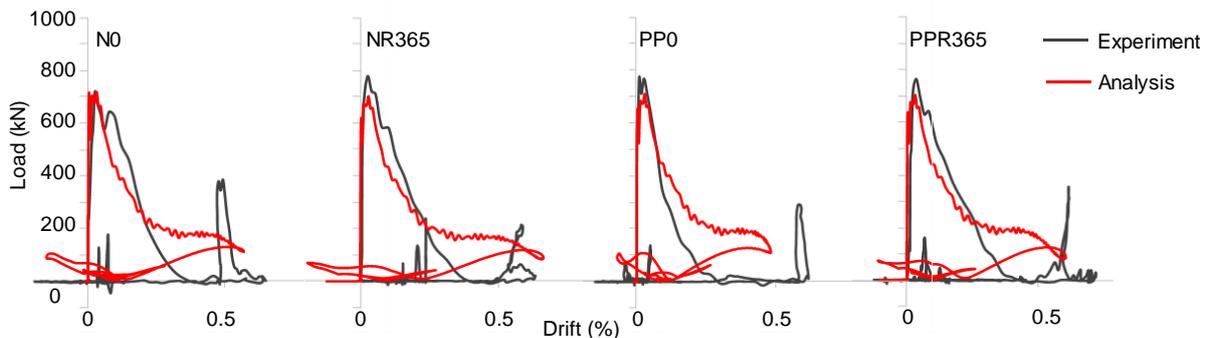


図-10 荷重—部材角関係

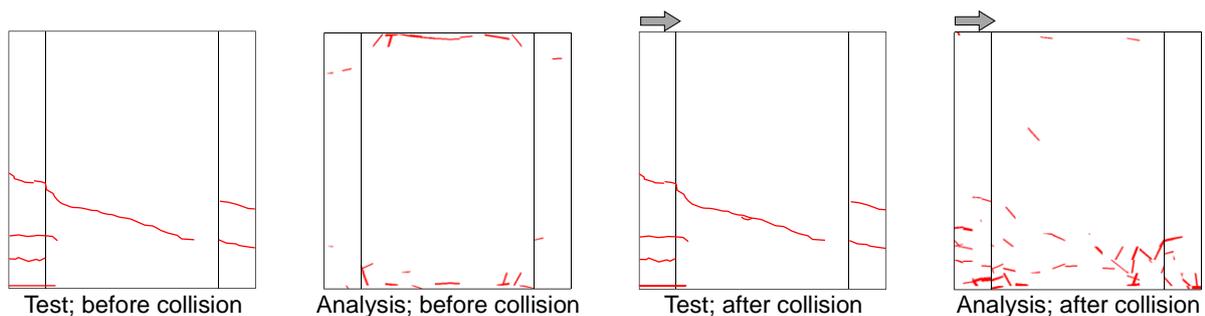


図-11 NR365 ひび割れ状況

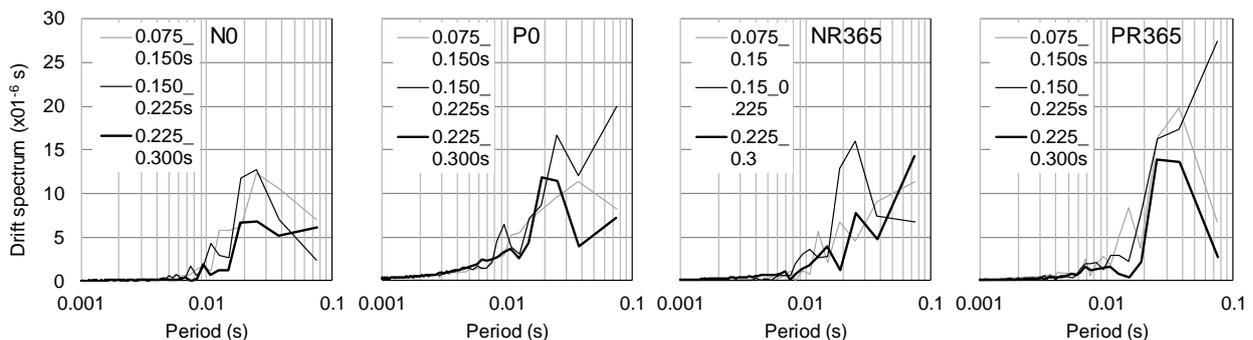


図-12 部材角スペクトル—周期関係

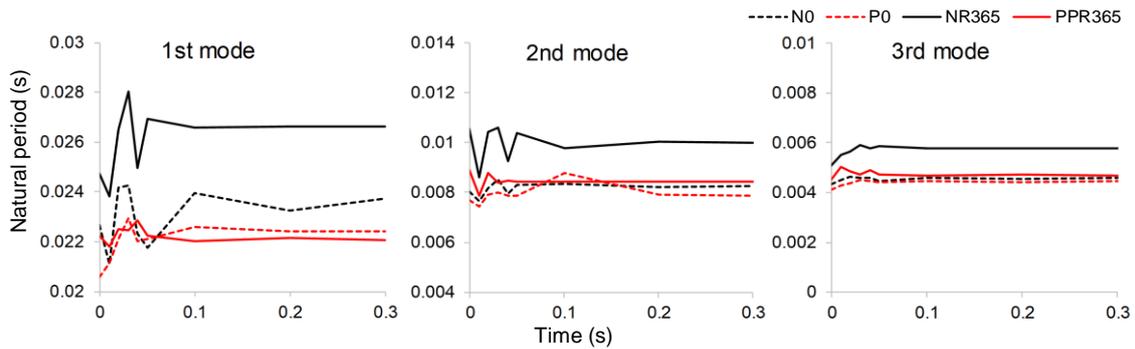


図-13 固有周期の推移 (1~3次モード)

本研究は JSPS 科研費 JP18K04430 の助成を得た。また京都大学の野村昌弘氏、北澤佳祐氏、宇野謙史氏より実験の協力を得た。

#### 参考文献

- 1) Kurihara, R. and Chijiwa, N. and Maekawa, K.: Thermo-Hygral Analysis on Long-Term Natural Frequency of RC Buildings with Different Dimensions, *Advanced Concrete Technology*, Vol.15, pp.381-396, 2017
- 2) 渡部嗣道, 富田耕司, 張殿宇: 乾燥収縮ひび割れが構造性能に与える影響に関する解析的研究, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.38, No.1, pp.561-566, 2016.7
- 3) 佐藤裕一, 伊田唯果, 長沼一洋, 金子佳生: スチールチップ補強セメント系複合材料の高層壁式 RC 建物への適用検討, *日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国)*, pp.651-652, 2017
- 4) 宇野謙史, 佐藤裕一, 長沼一洋, 金子佳生: 乾燥収縮を受けた耐震壁への衝撃載荷時挙動に関する研究 (その 1, 2), *日本建築学会大会学術講演梗概集 (北陸)*, pp.555-558, 2019.9
- 5) 岩本周晃, 津田和明: 鉄筋コンクリート造開口耐震壁の曲げ挙動に関する実験的研究, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.38, No.2, pp.679-684, 2016.7
- 6) 赤井冬来, 田嶋和樹, 長沼一洋, 佐藤裕一: 塑性ひずみエネルギーに基づくコンクリート構造物の損傷指標, *日本建築学会構造系論文集*, No.742, pp.1925-1933, 2017.12.
- 7) 森浩二, 佐藤裕一, 金子佳生: 繊維補強セメント系複合材料を用いた RC 架構の衝撃載荷実験, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.39, No.2, pp.559-564, 2017.7
- 8) Saatci, S. and Vecchio, F. J.: Effects of Shear Mechanisms on Impact Behavior of Reinforced Concrete Beams: *ACI Structural Journal*, Vol. 106, pp.78-86, 2009.
- 9) 森浩二, 佐藤裕一, 金子佳生: ポリプロピレン短繊維により補強した鉄筋コンクリート梁の曲げおよびせん断性状, *日本建築学会構造系論文集*, Vol.737, pp.1081-1090, 2017.7
- 10) 長沼一洋: 三軸圧縮下のコンクリートの応力~ひずみ関係, *日本建築学会構造系論文集*, 第 474 号, pp.163-170, 1995.8
- 11) 土木学会: *コンクリート標準示方書 設計編*, 2012
- 12) 森浩二: ポリプロピレン繊維による繊維補強セメント系複合材料を用いた建築架構の耐震性能および耐衝撃性状に関する研究, *京都大学* 2018.3, 博士論文: <https://repository.kulib.kyoto-u.ac.jp/dspace/bitstream/2433/232000/2/dkogk04431.pdf> (閲覧日: 2020年1月6日)
- 13) 長沼一洋: 鉄筋コンクリート壁状構造物の非線形解析手法に関する研究(その 1), *日本建築学会構造系論文報告集*, 第 421 号, pp.39-48, 1991.3
- 14) Bazant, Z. P. and Osman, E.: *Double Power Law for Basic Creep of Concrete*, *Materials and Structures*, RILEM, Paris, Vol.9, pp.3-11, 1976.
- 15) Ciampi, V, et al.: *Analytical Model for Concrete Anchor-ages of Reinforcing Bars Under Generalized Excitations*, Report No. UCB/EERC-82/23, Univ. of California, Berkeley, Nov., 1982
- 16) 土木学会: *衝撃実験・解析の基礎と応用*, *構造工学シリーズ* 15, 2004.3
- 17) 細谷博, 岡田恒男, 北川良和, 中埜良昭, 隈澤文俊: ひずみ速度の影響を考慮したファイバーモデルによる鉄筋コンクリート部材の断面解析, *日本建築学会構造系論文集*, No.482, pp.83-92, 1996.4
- 18) Goldsmith W. *Impact: The Theory and Physical Behaviour of Colliding Solids*, 1st edn, Edward Arnold, London, U.K., 1960.
- 19) Naganuma K, Yonezawa K, Kurimoto O and Eto H: Simulation of nonlinear dynamic response of reinforced concrete scaled model using three-dimensional finite element method. *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*, 586, 2004