

論文 小開口を有するRC造方立壁の耐震診断に関する研究

中村 慎*1・藤田 正則*2

要旨：近年の大地震では、雑壁等の非構造部材が破壊することで、既存建築物の機能性が損なわれ、震災後の継続利用が困難になる事例が確認されている。既往の研究では、小開口を有するRC造方立壁に着目し、RC造骨組の水平載荷実験および水平載荷実験の方立壁を模擬した縮小試験体の部材実験を行い、各々の終局強度や変形能力を確認した。本論では、既往の研究に引き続き、小開口を有する方立壁の耐震診断手法の一例を検討している。既往の研究を踏まえて小開口の位置を変更した縮小試験体の部材実験を行い、その強度や変形性能、評価方法について考察した。

キーワード：小開口，方立壁，耐震診断，耐震改修，長寿命化改修，1次診断，2次診断

1. 序

近年の大地震では、現行の耐震基準を満足しない既存不適格建築物のみならず、新耐震基準の建築物においても非構造部材が破壊することがある。RC造建築物においては、雑壁が破壊することで機能性や使用性が損なわれ、震災後の継続利用が困難になる場合があり、同様の被害を防止するための雑壁の損傷抑制や改修に関する研究が多数実施されている^{例えは1)から3)}。

一方で、既存RC造建築物の老朽化対策も喫緊の課題となっており、長寿命化改修の積極的な採用の提言⁴⁾がなされている。実際に学校をはじめとする公共施設等でその検討が進められているが、長寿命化改修では既存の構造躯体を極力再利用することを想定している⁵⁾。既存の構造躯体を再利用する場合、その床や雑壁等の撤去あるいは部分撤去の可否が建築・設備計画の自由度にも大きく影響するが、耐震診断および改修では雑壁を非構造壁でなく構造壁として評価することがある。その場合には、雑壁でも撤去あるいは部分撤去を安易に行うことが難しい。特に、方立壁等の雑壁は、耐力壁と異なり、元々設けられている開口自体の構造性能に関する知見も少ないため、それらの適切な改修や継続使用の判断に資する強度や変形性能の検討が重要であると考えられる。

以上を踏まえて既往の研究⁶⁾では、小開口を有する方立壁に着目し、RCフレームの水平載荷実験と水平載荷実験の方立壁を模擬する縮小試験体の静的載荷実験を行っている。各々のせん断耐力を実験で確認するとともに耐震診断基準⁷⁾(以降、診断基準という)の第1次診断法、第2次診断法(以降、各々を1次診断、2次診断という)による評価を行うことで、現行の基規準が小開口を有する方立壁にも適用可能か検討し、その強度や変形性能についても考察した。

本論では、既往の研究⁶⁾に引き続き、小開口を有する方立壁の耐震診断および改修手法の一例を検討する。まず、方立壁を模擬する縮小試験体の開口の位置を変更し、既往の研究と同様の静的載荷実験を行う。小開口の位置および数の方立壁を模擬する縮小試験体のせん断耐力に及ぼす影響を考察し、現行の基規準が小開口を有する方立壁にも適用可能か再検討する。

2. 実験計画

2.1 試験体概要

試験体の曲げモーメント分布の想定を図-1に、試験体形状を図-2に各々示す。既往の研究⁶⁾と同様に水平載荷実験で確認した小開口を有する方立壁の壁板(柱なし壁)のみを抽出した縮小試験体を計画している。曲げモーメント分布の想定も既往の研究⁶⁾と同様であり、小開口を有する方立壁付きRC造骨組のa部に着目し、その応力状態を模擬する図-1のb)に示す1点載荷3点曲げの単純梁式加力の実験とする。なお、本論に用いる縮小試験体は、軸力を非考慮としている。水平力の作用時に周辺架構の拘束を受けてこの種の方立壁にも変動軸力が作用することが指摘されており、実際に軸力を考慮した部分架構実験等も実施されている^{例えは10)から12)}。実験結果によれば、軸力(周辺架構の拘束)を考慮することで、

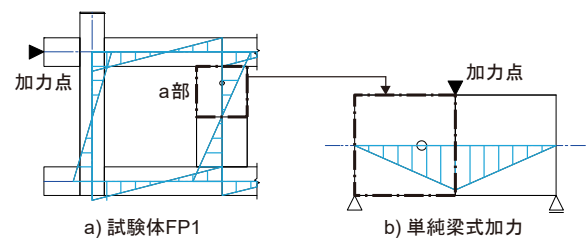
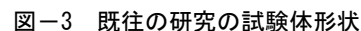
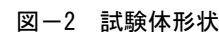


図-1 試験体の曲げモーメント分布の想定

*1 神奈川大学 建築学部建築学科 助教 博士(工学) (正会員)

*2 神奈川大学 建築学部建築学科 教授 博士(工学)

鉄筋の引張試験結果を表-2 に、コンクリートの圧縮試験結果を表-3 に各々示す。また、表-4 には診断基準と表-2 の引張試験結果（降伏点、引張強さ）より算定



表一3 壓縮試驗結果

径	種類の 記号	降伏点 又は耐力	引張 強さ	試験体	供試体の 直径	圧縮 強度	試験体
		N/mm ²	N/mm ²		N/mm ²		
D6	SD295A	379.9	495.7	No.0, 1, 2	100 φ	21.1	No.0
		353.7	532.8	No.1A, 2A		20.9	No.1
358.6		464.7	No.0, 1, 2	22.6		No.2	
D10		383.0	527.4	No.1A, 2A		18.8	No.1A
				18.2		No.2A	

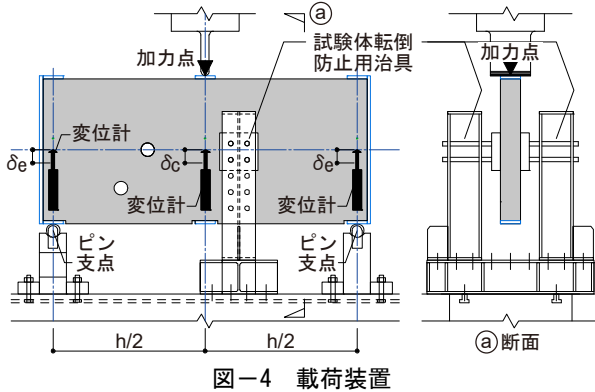
試験体	l_t mm	h mm	l_0 mm	h_0 mm	l mm	$r_0 (r_e)$	l_0/l	h_0/h	l_0/l_t	η	A^R1	A^R2	A^R3	せん断耐力等の低減率		
														r	r_2	A^R
No.0	525	1125	0	0	450	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
No.1			50	50		0.070	0.111	0.044	0.095	0.111	0.895	0.928	0.956	0.889	0.889	0.895
No.2			107	53.5		0.106	0.238	0.048	0.204	0.238	0.776	0.892	0.952	0.762	0.762	0.776
No.1A			50	50		0.070	0.111	0.044	0.095	0.111	0.895	0.928	0.956	0.889	0.889	0.895
No.2A			190	150		0.237	0.422	0.133	0.362	0.422	0.602	0.758	0.867	0.578	0.578	0.602

表－4 セン断終局強度等の計算値

試験体	診断基準による算定結果						引張試験(降伏点)による算定結果						引張試験(引張強さ)による算定結果					
	M_{u1} kN・m	Q_{mu1} kN	Q_{su1} kN	Q_{su1}/Q_{mu1}	F値	破壊形式	M_{u2} kN・m	Q_{mu2} kN	Q_{su2} kN	Q_{su2}/Q_{mu2}	F値	破壊形式	M_{u3} kN・m	Q_{mu3} kN	Q_{su3} kN	Q_{su3}/Q_{mu3}	F値	破壊形式
No.0	31.9	56.7	81.0	1.43	1.71	曲げ	33.8	60.2	82.8	1.38	1.62	曲げ	43.9	78.1	88.0	1.13	1.21	曲げ
No.1	31.9	56.7	71.1	1.25	1.42	曲げ	33.8	60.2	72.7	1.21	1.34	曲げ	43.9	78.1	77.2	0.99	1.00	せん断
No.2	31.9	56.7	63.0	1.11	1.18	曲げ	33.8	60.2	64.3	1.07	1.11	曲げ	43.9	78.1	68.2	0.87	1.00	せん断
No.1A	20.8	37.1	63.2	1.70	2.17	曲げ	22.4	39.8	63.7	1.60	2.00	曲げ	32.1	57.1	70.7	1.24	1.39	曲げ
No.2A	31.9	56.7	44.2	0.78	1.00	せん断	34.7	61.6	44.5	0.72	1.00	せん断	49.0	87.2	49.1	0.56	1.00	せん断

注) M_u : 壁の曲げ終局強度, Q_{mu} : 壁の曲げ終局強度時のせん断力, Q_{su} : 壁のせん断終局強度

$Q_{mu} = (M_{u\text{頭部}} + M_{u\text{根部}}) / \text{壁の内法高さ}$ にて算定, その他は診断基準の付則の算定式による。



図－4 荷重装置

した壁の曲げ終局強度 M_{ui} , 壁の曲げ終局強度時のせん断力 Q_{mui} , 壁のせん断終局強度 Q_{sui} を各々示す。

2.2 荷重計画

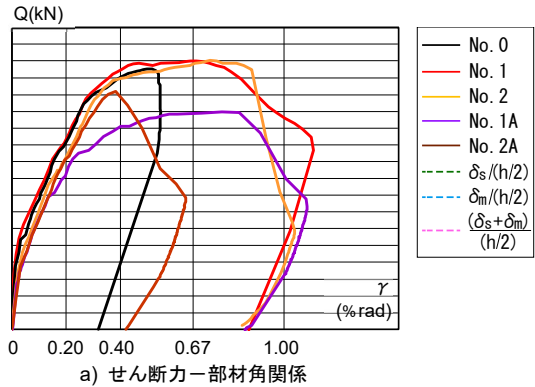
荷重装置を図－4 に示す。既往の研究⁹⁾と同様に, 壁板の転倒防止用の治具を試験体両側に設ける。転倒防止用の治具により, 対角方向の変位の計測が困難であるため, 変位は図示の通り加力点延長線上の壁板の構造芯で δ_c を計測し, 支点延長線上の構造芯で δ_e を計測する。荷重は 1000kN の万能試験機を使用し, 一方向の単調荷重とする。試験体は耐力が最大耐力の 80%以下になるまで荷重を継続する。

3. 実験結果

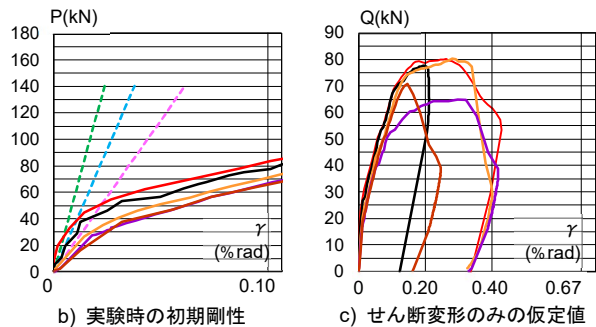
3.1 セン断力一部材角関係

各試験体のせん断力-部材角関係を図－5 の a) に示す。ここで, セン断力 Q は単純梁式の加力方法より, 荷重時の荷重 P の 1/2 とする。部材角は壁板の構造芯の傾きとし, δ_c と δ_e の差分を支点間距離の 1/2 で除した値とする。また, 各試験体の実験終了時のひび割れ状況を図－6 に, 実験時のせん断力 Q と壁の曲げ終局強度時のせん断力 Q_{mui} との比較を図－7 に, 壁のせん断終局強度 Q_{sui} との比較を図－8 に各々示す。

No.0, No.1, No.2 のせん断力の最大値は鉄筋の引張強さを用いて算定した Q_{mu3} に漸近している。表－4 の診断基準による算定結果では, いずれも破壊形式が曲げ壁となるが, 実際には壁の曲げ降伏後, 鉄筋の実強度 (引張強さ) まで荷重上昇することで, Q_{su1}/Q_{mui} の余裕度が減少し, セン断破壊に至ったと考える。



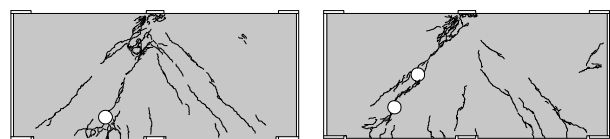
a) セン断力一部材角関係



b) 実験時の初期剛性

c) セン断変形のための仮定値

図－5 セン断力一部材角関係

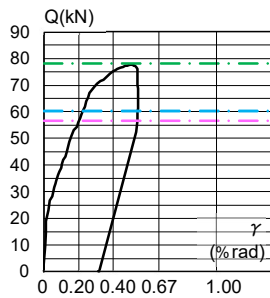
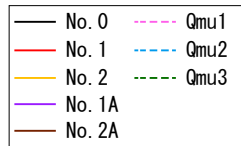


a) No.1A

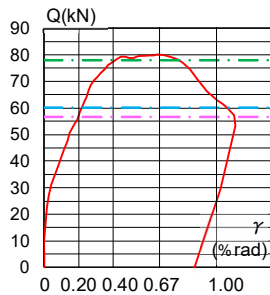
b) No.2A

図－6 実験終了時のひび割れ状況

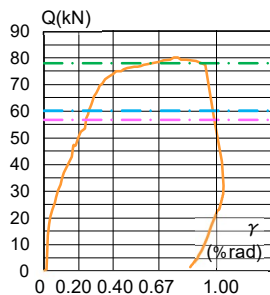
一方, 端部補強筋を 1 本切断している No.1A は, 鉄筋の実強度 (引張強さ) まで荷重上昇しても, その破壊形式が算定上は曲げ壁となるが, 実際には曲げ降伏後のせん断破壊に至っている。図－8 の b) および d) を比較すると, 実験時のせん断力 Q が引張強さで算定した Q_{su3} を超えてせん断破壊した No.1 と異なり, No.1A は実験時のせん断力 Q が引張強さで算定した Q_{su3} 未満でせん断破壊している。これによれば, 小開口の位置を壁際に寄せすぎると, 現行の診断基準⁷⁾およびせん断耐力低減率のそのままの準用は危険側の評価につながる恐れがあり, 注意を要する。



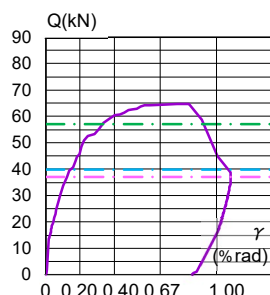
a) 試験体 No.0



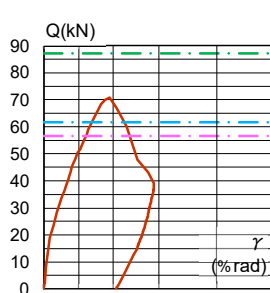
b) 試験体 No.1



c) 試験体 No.2

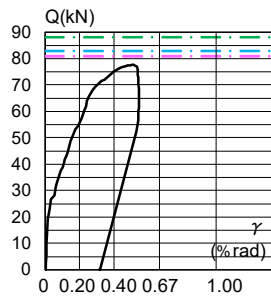
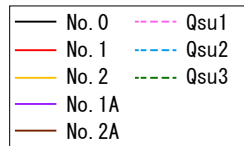


d) 試験体 No.1A

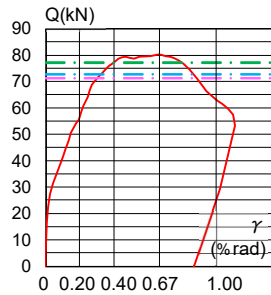


e) 試験体 No.2A

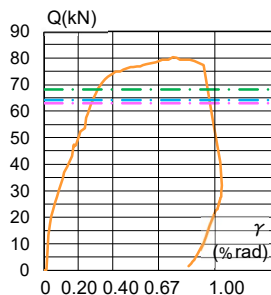
図-7 Q と $Q_{\mu 1}$ の比較



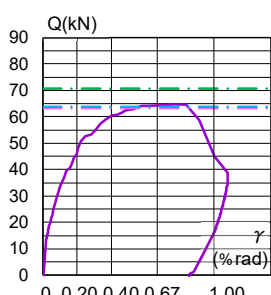
a) 試験体 No.0



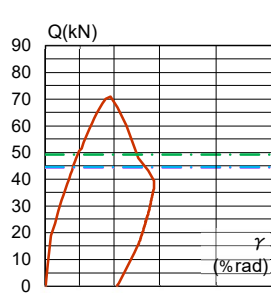
b) 試験体 No.1



c) 試験体 No.2



d) 試験体 No.1A



e) 試験体 No.2A

図-8 Q と Q_{su1} の比較

No.2A は、診断基準 7)による算定結果においても、その破壊形式はせん断壁となる。実験時のせん断力 Q は鉄筋の実強度（引張強さ）で算定した $Q_{\mu 3}$ まで至らず、実際の破壊形式もせん断破壊となるため、診断基準 7)の包絡開口等を準用してせん断耐力を評価することで、安全側の評価が可能と考える。

各試験体の変形性能を比較すると、No.1A は No.1 と同様に部材角 1/150 (0.67 % rad) を超えた範囲で耐力低下し、No.2A は No.2 よりも早い部材角 1/250 (0.40 % rad) の直前で耐力低下している。壁板のみを抽出した本論の縮小試験体の実験においては、耐力低下が生じる部材角は曲げ変形の影響により、RC 造骨組の水平載荷実験よりも遅れることを確認 6)しているため、本論でも既往の研究と同様に式(1)で壁板の曲げ変形を、式(2)で壁板のせん断変形を略算し、実験時の初期剛性とあわせて図-5の b)に示す。

$$\delta_m = \frac{P h^3}{48EI} \quad (1)$$

$$\delta_s = \kappa \frac{P h}{4GA} \quad (2)$$

ここで、 δ_m :壁板の曲げ変形、 δ_s :壁板のせん断変形、 P :荷重、 h 曲げ実験のスパン、 E :壁板のヤング係数、 I :壁板の断面 2 次モーメント、 κ :形状係数で 1.2 とする、 G :せん断弾性係数、 A :壁板の断面積

式(1)と式(2)によれば、 h/l_i が 2.1 となる矩形断面の曲げ変形とせん断変形の比率はおおよそ 6:4 となる。実験時の初期剛性はせん断変形から計算する $\delta_s/(h/2)$ よりも小さく、せん断変形と曲げ変形の和から計算する $(\delta_s + \delta_m)/(h/2)$ に近い値となる。ここで、初期剛性以降におけるせん断変形の割合も同程度と仮定して補正すると、図-5の a)は c)のように示すことができ、No.1A は曲げ変形を考慮した a)で約 1/119 (0.84 % rad) で耐力低下することに対し、せん断変形のみを仮定した c)では約 1/310 (0.32 % rad) で耐力低下する。No.2A は曲げ変形を考慮した a)で約 1/262 (0.38 % rad) で耐力低下することに対し、せん断変形のみを仮定した c)では約 1/613 (0.16 % rad) で耐力低下する。開口補強のない小開口を有する方立壁においては、診断基準による判定が曲げ壁となる場合でもせん断壁として変形性能を評価した方が安全側であり、せん断壁においては脆性部材として変形性能を評価した方が安全側の評価となる。

3.2 考察

(1) 診断基準の 1 次診断における強度の検討

小開口が方立壁のせん断耐力に与える影響を検討する。

1 次診断時の鉛直部材のせん断耐力は式(3)で算定する。

$$Q_{Cl} = (\tau_{w3} \cdot A_{w3} + \alpha_1 \cdot \tau_c \cdot A_c) \cdot \beta_c \quad (3)$$

式(3)は $Q_{c1} \approx (C_w + C_c) \cdot \Sigma W$ とし、診断基準の 12 頁、

表－5 一次診断による計算値と実験値の比較

試験体	Q_E kN	τ_{w3} N/mm ²	A_{w3} N/mm ²	Q_{C1} kN	Q_E/Q_{C1}
No.0	77.6	1.00	39375.0	39.4	1.97
No.1	80.0	1.00	35625.0	35.6	2.25
No.2	80.3	1.00	31350.0	31.4	2.56
No.1A	64.8	1.00	35625.0	35.6	1.82
No.2A	70.9	1.00	25117.5	25.1	2.82

式(7)から式(10)より導いている。なお、本研究では壁板のみ(柱なし)となるため、 $A_c=0$ として算定し、計算値は開口部面積の低減(A_{w3} から小開口の水平投影面積を除く)を考慮している。

判定結果を表－5に示す。実験時のせん断力の最大値 Q_E は計算値 Q_{C1} をいずれも上回り、その余裕度はNo.1Aで1.82、No.2Aで2.82となる。1次診断においては、既往の研究⁹⁾と同様に、 l_o/l_t が0.10以下となる小開口については、診断基準が定める τ_{w3} の低減までは要さず、開口部の水平投影面積の低減を行うことでせん断耐力を安全側に評価できる。また、複数の小開口を有し、小開口間の壁に圧縮場が形成されない場合には、その断面を無効として評価することで、診断基準が定める τ_{w3} の低減までは要さず、せん断耐力を安全側に評価できる。

(2) 診断基準の2次診断における強度の検討

2次診断時の鉛直部材のせん断耐力を式(4)で算定し、表－6に示す。

$$Q_{C2} = Q_w + \alpha_m \cdot Q_C \quad (4)$$

縮小試験体は壁板のみ(柱なし)であり、 $Q_{C2}=Q_w$ となる。ここでも既往の研究⁹⁾と同様に Q_{C2} に Q_{mu} を用いた場合と Q_{su} を用いた場合の両ケースとも算定している。実験値の Q_{E2} は表－4のF値に対応する部材角時のせん断力より抽出する。ただし、対応するF値以前に試験体が破壊している場合は最大荷重の1/2をせん断力とする。表－6より、小開口の位置を壁際に変更したNo.1A、小開口2つを包絡開口として評価したNo.2Aの Q_{E2}/Q_{C2} は1.00以上となる。診断基準⁷⁾を用いた算定では、鉄筋の降伏点を診断基準⁷⁾の記述に揃え、異形鉄筋の場合に規格降伏点+49N/mm²としているため、安全側の評価となる。ただし、3.1節の検討の通り、実際の材料強度を用いるとNo.1Aにおいては、現行の診断基準⁷⁾およびせん断耐力低減率のそのままの準用が危険側の評価につながる可能性があるため、注意を要する。

No.2Aについては、2つの開口を包絡開口として評価することで、せん断耐力の評価は安全側となる。ただし、3.2節の検討の通り、単純梁式加力よりも曲げ変形の影響が小さくなるRC架構においては、そのせん断破壊がせん断壁のF=1.0(層間変形角1/250(0.40% rad)相当)よりも早期に生じる恐れがある。せん断壁として評価する場

表－6 二次診断による計算値と実験値の比較

試験体	Q_{E2} kN	Q_{mu} kN	Q_{su} kN	Q_{E2}/Q_{C2}	
				Q_{E2}/Q_{mu} kN	Q_{E2}/Q_{su} kN
No.0	77.6	56.7	81.0	1.37	0.96
No.1	77.9	56.7	71.1	1.37	1.10
No.2	77.7	56.7	63.0	1.37	1.23
No.1A	64.8	37.1	63.2	1.75	1.03
No.2A	70.9	56.7	44.2	1.25	1.60

合は、その変形性能は極脆性部材(F=0.8で層間変形角1/500(0.20% rad)相当)とした方が安全側の評価となる。

4. 結

本論では、小開口を有する方立壁を模擬した縮小試験体の静的載荷実験を行い、診断基準等を用いてそのせん断耐力を検討し、以下の知見を得た。

- (1) 診断基準の1次診断を用いた評価において、 l_o/l_t が0.10以下となる小開口については、開口部の水平投影面積の低減を行うことで診断基準が定める τ_{w3} の低減までは要さず、せん断耐力を安全側に評価できる。
- (2) 診断基準の1次診断を用いた評価において、複数の小開口を有する方立壁で、小開口間の壁に圧縮場が形成されない場合は、その断面を無効として評価することで、診断基準が定める τ_{w3} の低減までは要さず、せん断耐力を安全側に評価できる。
- (3) 診断基準の2次診断を用いた評価において、複数の小開口を有する方立壁で、小開口間の壁に圧縮場が形成されない場合には、それらの開口を包絡開口としてせん断耐力の低減率を算定することで、実験時のせん断耐力を安全側に評価できる。

なお、本論では2章で詳述したように、診断基準を準用してその終局強度や変形性能を検討する方針とし、変動軸力の影響が小さいと考えられる低層RC造建築物の方立壁(柱なし壁)を想定して実験を計画している。中高層のRC造建築物や低層でも水平力が大きく、その変動軸力の影響が小さくないと考えられるものには、本論の評価がそのまま適用できない可能性があるため、注意が必要である。

謝辞

本研究の一部は、令和5年度科学研究費助成事業(課題番号:23K13446)の助成を受けて実施したものです。ここに記して感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 吉村拓也, 角周作, 吉岡智和: RC方立て壁の制振デバイス化に関する実験的研究(その2) 摩擦ダンパ

- 一を適用した RC 方立て壁の水平加力実験, 日本建築学会学術講演梗概集 (近畿), pp.445-446, 2014.9
- 2) 毎田悠承, 森 貴禎, 坂田弘安, 和泉信之, 前川利雄: 棒鋼ダンパーを用いた RC 造方立壁の有効活用に関する実験研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 84 巻, 第 760 号, pp.851-861, 2019.6
 - 3) 尹 ロク現, 真田靖士, 松尾啓斗, 越智健太郎, 杉本佳奈: 損傷抑制型 RC 造方立壁の構造性能に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 87 巻, 第 794 号, pp.362-371, 2022.4
 - 4) 学校施設の老朽化対策について～学校施設における長寿命化の推進～の取りまとめについて 参照: https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/shisetu/013/toushin/1331925.htm (閲覧日: 2025 年 1 月 3 日)
 - 5) 学校施設の長寿命化改修の手引～学校のリニューアルで子供と地域を元気に!～の公表について 参照: https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/shisetu/027/toushin/1343009.htm (閲覧日: 2025 年 1 月 3 日)
 - 6) 中村慎, 藤田正則: 小開口を有する RC 造方立壁の耐震診断に関する基礎研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.46, No.2, pp.187-192, 2024.6
 - 7) 日本建築防災協会: 2017 年改訂版 既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準同解説, 2017.7
 - 8) 国土交通省国土技術政策総合研究所ほか: 2015 年版建築物の構造関係技術基準解説書, 2015.6
 - 9) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 2010, 2010.2
 - 10) 小倉昌也, 谷正典, 向井智久, Rafik Taleb, 河野進: RC 造非耐力壁の地震後の損傷状態に関する実大試験体実験 (その 1: 実験概要及び実験結果), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2014.9
 - 11) 谷正典, 小倉昌也, 向井智久, Rafik Taleb, 河野進: RC 造非耐力壁の地震後の損傷状態に関する実大試験体実験 (その 2: ひび割れ計測概要及び結果), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2014.9
 - 12) 小塩友斗, 真田靖士, 金裕錫: 主体架構と一体の RC 造方立壁の構造性能評価, 日本建築学会構造系論文集, 第 80 巻, 第 713 号, pp.1145-1153, 2015.7
 - 13) 日本建築防災協会: 2017 年改訂版 既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準 改修設計指針 適用の手引, 2017.7