RC建物の二次壁被害の低減に向けて

技術解説

真　田　靖　士*

Toward Mitigation of Damage to Secondary Walls in RC Buildings

Key Words：Earthquake disaster, Non-structural wall, Reinforced concrete building

はじめに

1995年の阪神・淡路大震災などの教訓を経て、わが国では既存不適格な建物（一般に建築基準法の改正により基準に適合しなくなった建物を指す）の耐震診断・補強が進み、建物の耐震性能は大幅に改善されている。その効果が見られ、近年では鉄筋コンクリート造（以下ではRC）により建設されることが多い公共建築や集合住宅などでは、建物の倒壊などの甚大な地震災害は明らかに減少傾向にある。一方で、建物の設計時に無視されがちな構造性能を期待しない部材（非構造部材と呼ばれる）の被害（図1）は未だに多く見られる。むしろ、柱などの構造部材の被害が減少した今、こうした非構造部材の被害が注目されるようになっている。それは図１のような被害によっても建物の居住者にとっては常時の生活が困難となり、場合によっては避難生活を余儀なくされる場合があるためである。こうした被害に対する有効な対策は未だ不十分であり、将来の地震によっても発生することが予想され、とくに都市部が被災すると、避難者の収容が困難となる事態も懸念される。

こうした近年の地震災害を調査する機会を重ねるうちに、日々の研究でもこの問題を取り扱うようになった。結果的には、これまで建物の構造性能には影響がない（または小さい）と考えられてきた非構造壁が実際には建物の構造性能に大きく影響することなどがわかりつつある。本稿では、これまでの研究で明らかになった知見と、現在取り組む研究を中心に紹介させていただく。

図１　東日本大震災における非構造壁の被害事例
（左：バルコニー，右：トイレ）

非構造壁と見なされてきた独立壁（方立壁）の真の構造性能を明らかにするための実験研究 1)

図１の左の写真に紹介したのは集合住宅のバルコニーと室内の出入口（掃き出し窓）間に設けられる独立壁の被害である。いわゆる非構造壁であり、構

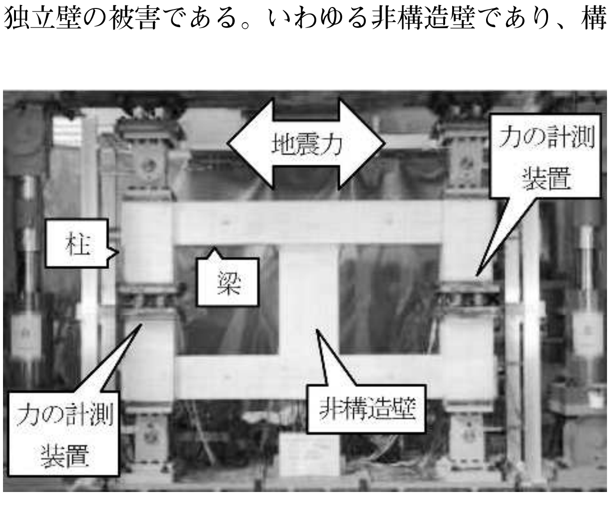


図２　独立壁を含む建物の模型

* Yasushi SANADA

1973年12月生まれ
東京大学大学院　工学系研究科
建築学専攻博士課程（2001年）
現在、大阪大学大学院　工学研究科　地球総合工学専攻　建築工学部門　コンクリート系構造学領域　教授　博士（工学）
耐震工学
TEL：06-6879-7637
FAX：06-6879-7637
E-mail：sanada@arch.eng.osaka-u.ac.jp

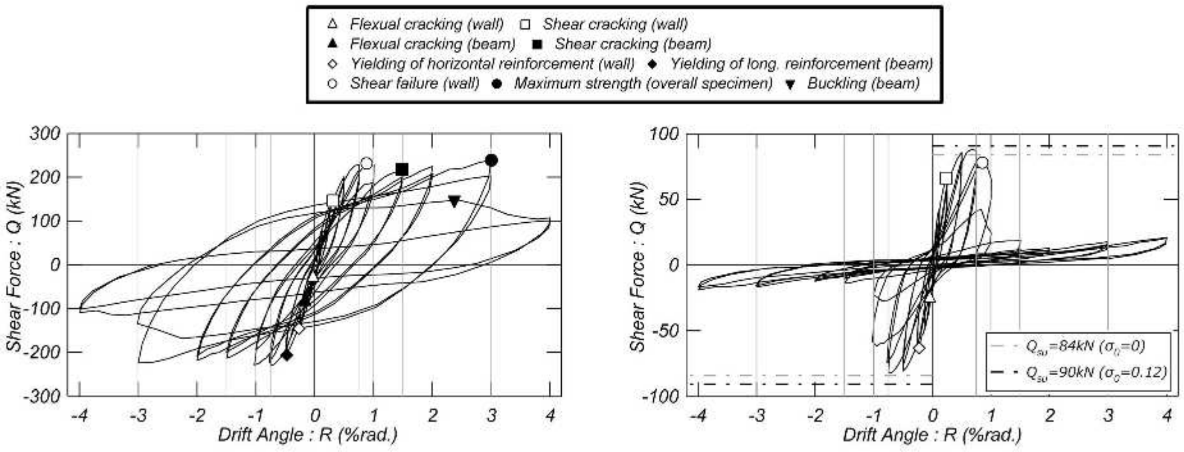


図３　実験結果の抜粋（左：全体の負担力，右：独立壁の負担力）

造性能は考慮されないため、この壁が壊れても建物の安全性には影響がない（とされてきた）。研究のきっかけはその認識が正しいだろうか？という単純な疑問であった。

そこで、図２に示すような図１の非構造壁と、その周辺の柱、梁を模した１層１スパンの模型（といってもスケール40％のため結構大きい）を製作し、地震力（水平力）を加える実験を行った。学術的に目新しい点としては、両側の柱の中央に力を計測できる特殊な装置を組み込み、非構造壁が負担する力を計測した点が挙げられる。この計画により、非構造壁が負担する水平力を定量的に知ることができた。得られた実験結果は興味深いものであり、その一例を図３に示す。図の縦軸は模型全体（左）または独立壁のみ（右）に作用した水平力、横軸は上下層の相対水平変位を高さで除した変形角であり、建物の構造性能を示すために筆者の業界でよく用いられる関係図である。ここではとくに両者の縦軸に注目いただきたい。非構造であるはずの独立壁が、全体の1/3程度の水平力を負担しており、建物の真の性能を論じる上で決して無視できるものでないことが明らかになった。この実験以降、この壁を非構造壁と書くことにも抵抗を覚えるようになり、題目に記した「二次壁」という用語を、構造性能への影響は無視されてきたが、実際には構造性能に影響する壁という意味を込めて使うようにしている。

さて、この二次壁であるが、変形（横軸）が小さい範囲では大きな地震力を負担するものの、比較的小さい変形（同図では１％未満）で、図１のように破壊することでそれまで負担した力を維持できなくなる。こうした破壊は脆性破壊と呼ばれる。一方、構造部材（柱、梁）は一般により延性に富むため、脆性部材は破壊後に建物全体の性能には影響しないと解釈されてきたものと思われる。なお、RC部材の脆性破壊は一般に数値解析で再現することがなかなか難しい。しかし、建物全体を実験するには莫大な予算が必要なため、この現象を何とか数値解析で扱おうとした研究が次の段階である。

独立壁（方立壁）の構造性能の数値シミュレーション[1)]

ともすると説明が専門的になりすぎるため、要点のみ簡潔に述べようと思い、やや厳密さを欠く説明をご容赦いただきたい。この種の独立壁が大きな地震力を負担した原因は、壁とそれが接続する梁との力のやり取りなくしては説明できない。RC構造の独立壁には水平変形を受けて、部材が塑性化すると、図４に示すように伸びが生じる特性がある。壁に伸びが生じると、その伸びに対して上下の梁（図２）

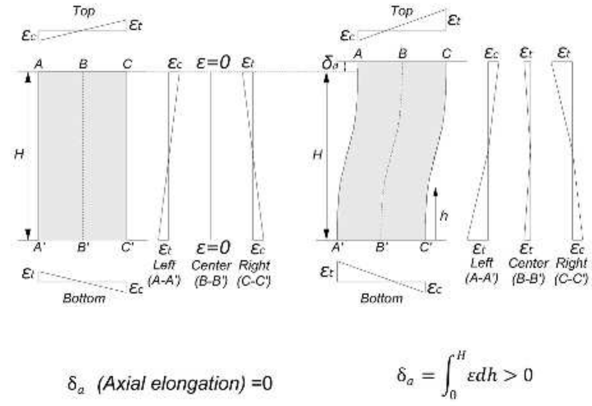


図４　RC独立壁の塑性伸びの概念図
（左：弾性域，右：塑性域）

が伸びを拘束しようとするため、拘束力が壁に圧縮力として作用する。RC 構造には断面に圧縮力が作用すると、部材の曲げ強度が増大する特性がある。その結果として、図３のような高い水平力負担に至ったというメカニズムである。

さて、本題の数値解析であるが、上記のように独立壁の実験結果を再現するためには、壁に作用する水平力（せん断力）のみでなく、軸力、曲げモーメントを考慮する必要がある。さらにはこれらが互いの性能に影響し合うため、有限要素法の利用が合理的である。しかし、建物全体を有限要素法で解析するのは合理的ではない。そこで、構造部材（柱、梁）は一般社会の実務設計でも普及している線材置換によるマクロモデルを利用して、独立壁についても１つの有限要素でこれを表現する既往のマクロモデル[2-3]を図５のように応用することで、建物全体を合理的に数値解析する計画を立てた。

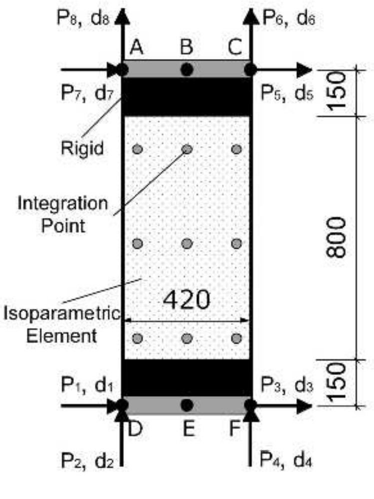


図５　独立壁のマクロモデル

後述する建物全体の数値解析の信頼性を保証するため、このマクロモデルを用いて図３の実験結果を数値シミュレーションし、モデルの妥当性を検証した。図６が解析結果と図３の実験結果の比較である。とくに右側の独立壁の構造性能をその破壊域を含めて精度よく評価できた。

地震被害を受けた建物の数値解析[4)]

図１は東日本大震災で被災した11階建ての RC 建物の被害事例である。バルコニーに面する建物の外構面全体の損傷状況を図化したものが図７である。建物下層部から中層部にかけて独立壁（図中の軸記号の間の部材）の損傷（ひび割れ）が著しいことがわかる。この建物付近では、地震動が観測されていたため（図８）、その観測地震動[5)]に対する建物の

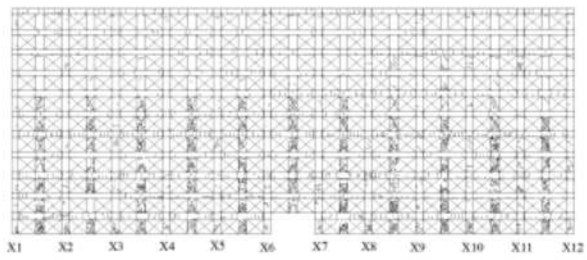


図７　建物の外構面の損傷状況

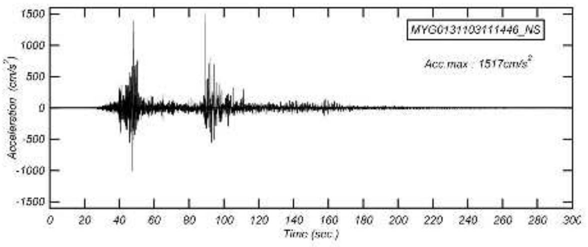


図８　建物周辺の地震動記録

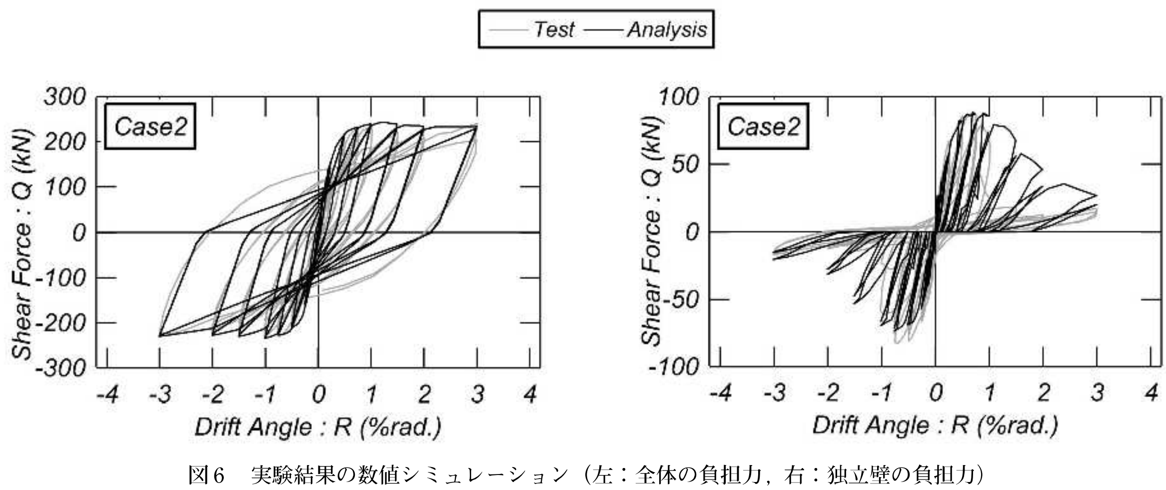


図６　実験結果の数値シミュレーション（左：全体の負担力，右：独立壁の負担力）

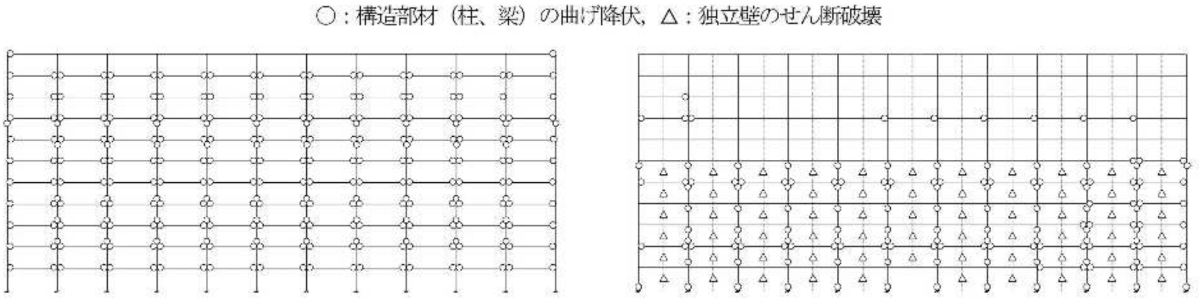


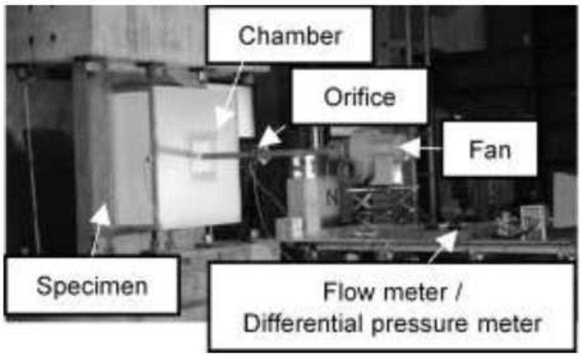
図９　観測地震動による建物の地震応答解析結果（左：独立壁を無視，右：独立壁を考慮）

揺れを数値解析した。ここで、数値解析では、独立壁を無視して構造部材（柱、梁）のみをモデル化する場合と、それに加えて図５の独立壁もモデル化する場合の二通りを行った。図９は構造部材と独立壁の破壊箇所（それぞれ図中の○と△）を解析によって評価した結果である。左側の独立壁を考慮しない場合、構造部材の破壊が建物全体で見られるのに対し、右側の考慮した場合では、構造部材および独立壁の破壊が建物の下層部から中層部にかけて見られ、図７の実際の被害状況とよく整合することを確認できる。これは図３や６に示したように、脆性部材である独立壁の破壊が、より大きな地震力を受ける下層部から発生したため（地震力は水平方向の慣性力であり、より大きな重量を支える下層に、より大きな力が作用する）、下層部の水平剛性が低下して、下層部が変形しやすくなった結果である。なお、建物の変形が一部の層で大きくなると、一般に建物全体の変形性能は低下する（阪神・淡路大震災で１階が弱層のピロティ建物が多く倒壊した事例がわかりやすい）。

先にも述べたように、従来、脆性的な独立壁が早期に破壊しても、構造部材は一般に遥かに大きな変形能力（延性）を有するため、建物の終局的な構造性能（建物が人命を保護するために必要な性能であり、安全性能と呼ばれる）にはほとんど影響しないと認識されてきた。図９の結果は、こうした認識が誤っていたことを実証しており、脆性的な独立壁の破壊は、建物の安全性能にも大きく影響し得ることを指摘している。

建物の住機能維持に向けた現在の研究

上記では、独立壁は建物の安全性能にも影響することを実証した点が価値ある成果と認識しているが、本稿の冒頭でも述べたように、独立壁の地震時の損傷（図１）は、被災後の建物の住機能性を著しく低下させる点にも大きな問題がある。こうした背景から、現在は大きく二つの挑戦的な研究に取り組んでいる。一つは、独立壁の損傷が建物の住機能性に与える負の効果を定量的に評価することを目的に、建築環境工学で扱われる建物内外の空気の移動量（気密性）に着目し、これを実験的に評価することを試みている。これまでに、RC壁に地震力による損傷を与えながら、気密性の変化を捉える図10のような新しい実験にも、建築環境工学をご専門とされる福井大学の桃井良尚博士（元大阪大学助教）のご協力を得ながら、挑戦している[6)]。



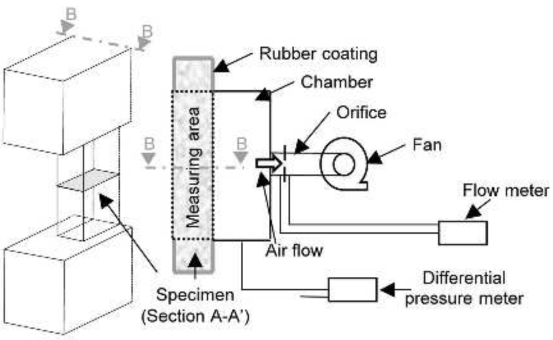


図10　地震損傷を受けたRC壁の気密性能の評価実験
（上：実験の模様，下：気密性能の測定の概念図）

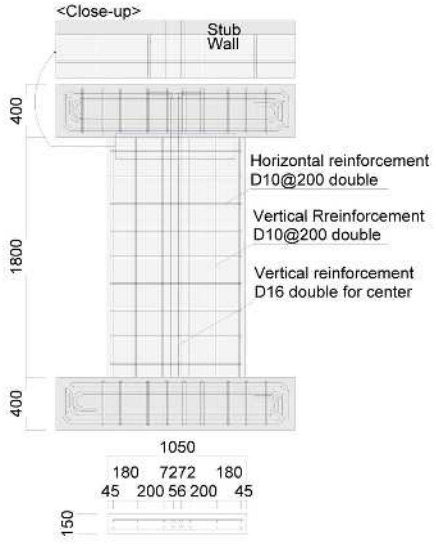


図11　独立壁の損傷制御法の提案

もう一つは、独立壁の地震時の損傷を低減するため、例えば図11に示すように、従来にはない新しい構造（主に鉄筋の配筋方法）を提案し、その有効性を実験により証明しつつある。図12は図11の構造の独立壁と従来の壁の地震時の損傷を実験的に評価し、比較したものである。提案する構造詳細を採用することによって、壁面の損傷が大幅に低減され、大地震時にもより大きな建物の変形を許容し得ることを確認しており、その成果は2019年度の論文発表を待つ段階にある[7)]。

まとめ

本稿では、筆者が専門とする鉄筋コンクリート構造の建物について、近年の地震災害の傾向を紹介し、現代の社会問題の一つである非構造部材の被害を取り上げた。これまでに実施した、とくに独立壁を対象とする実験、解析研究の成果の解説を通して、同様な地震被害を軽減するために、非構造部材に対する将来の対策の必要性を指摘した。

本稿の項目ごとのまとめを以下に示し（ただし、現在の研究は知見が未確定のため、割愛させていただいた）、私からの技術解説とさせていただく。

【独立壁の構造性能への寄与について】

典型的な集合住宅の１層１スパンの模型実験を通して、建物の地震時の比較的小さな変形状態では、一般の設計では非構造とみなされる独立壁が実際には大きな地震力を負担することを実証した。ただし、独立壁は１％未満の水平変形を受けると破壊し、およそ完全に抵抗力を喪失した。

【独立壁の数値解析モデルについて】

独立壁の構造性能の評価では、それ自身の力学的特性と周囲の構造部材からの拘束により、地震力（せん断力）のほか、軸力や曲げモーメントの発生も考慮しなければならない。そこで有限要素法に基づくマクロモデルの一例を示した。このモデルを用いて実験のシミュレーション解析を行った結果、良好に実験結果を再現できることを確認した。

【脆性的な独立壁が延性に富む建物の安全性能に与える影響について】

従来、独立壁が脆性的に破壊しても、一般により延性がある構造部材（柱、梁）からなる建物全体の

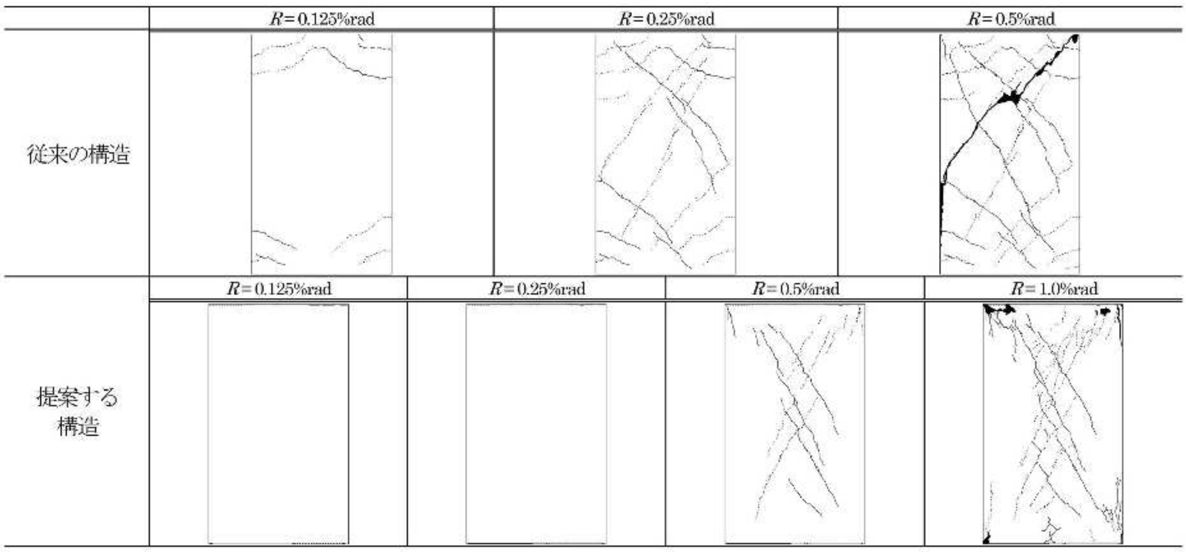


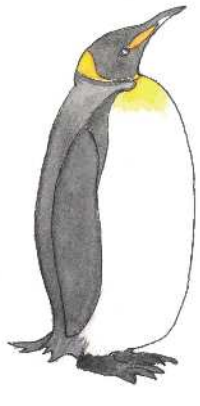
図12　提案する損傷制御法の効果の検証結果

安全性能（終局的な性能）にはほとんど影響しないと考えられてきた。しかし，上記の通り、建物の構造性能への寄与が大きい独立壁の破壊が、建物の下層部から発生するため、建物の変形は下層部がより大きくなり、建物全体の変形性能が低下することを明らかにした。

おわりに

本稿の技術解説を執筆するにあたっては、近年の地震災害を受けた複数の被災地域における現地調査において、数多くの関係者の皆様の多大なご支援のもとに得られた知見を引用しています。被災された皆様に心よりお見舞い申し上げますとともに、早期の復興を願っております。将来の地震に対してより安全、安心な社会の構築に教訓を活かしたいと思います。

また、本稿で紹介した研究成果は、主に文部科学省科学研究費補助金（課題番号：25420578、17H01306）のご支援の下に実施しました。

参考文献

1) 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，Vol.80，No.713，pp.1145-1153，2015.7
2) 陳少華，壁谷澤寿海：非線形解析における鉄筋コンクリート耐震壁のモデル，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.3，pp.763-768，1999.6
3) 金裕錫，壁谷澤寿海，松森泰造，壁谷澤寿一：E-ディフェンスによる実大６層鉄筋コンクリート耐震壁フレーム構造の破壊過程究明に関する解析的研究，日本建築学会構造系論文集，Vol.74，No.641，pp.1327-1334，2009.7
4) 真田靖士，尹ロク現，赤堀巧，小塩友斗，崔琥：東日本大震災で被災した靭性型コンクリート系建物の被害シミュレーションーRC造方立壁が靭性型コンクリート系建物の構造性能に与える影響ー，日本建築学会構造系論文集，Vol.81，No.729，pp.1893-1902，2016.11
5) 独立行政法人防災科学技術研究所：強震観測網（K-NET）
6) 尹ロク現，真田靖士，桃井良尚：建物の耐震性評価を目的とするRC壁の気密性能評価，日本建築学会環境系論文集，Vol.83，No.753，pp.871-881，2018.11
7) 松尾啓斗，水谷駿介，尹ロク現，真田靖士：RC造方立壁の損傷制御法に関する提案と検証，コンクリート工学年次論文集，2019（採択）