

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 11 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360241

研究課題名(和文) 基礎底面の滑動による地震動入力逸散機構に関する研究

研究課題名(英文) Reduction of Extreme Earthquake Motions with Sliding Base Foundation

研究代表者

壁谷澤 寿海(KABEYASAWA, Toshimi)

東京大学・地震研究所・教授

研究者番号：00134479

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,300,000円、(間接経費) 4,590,000円

研究成果の概要(和文)：過大な地震動に対して基礎底面での滑動による入力逸散効果を耐震設計に利用することを目的にして必要な実験的研究および解析的研究を行った。摩擦係数は、コンクリート平滑面では0.6～0.8程度であったが、鋼板を挿入することにより0.4程度まで安定的に低減した。さらに二硫化モリブデンを挿入した接合面詳細によって、摩擦係数は0.2～0.1、あるいは0.05～0.07程度にまで低減した。これらの実験結果と地震応答解析により、過大な入力地震動に対して安全性だけでなく、損傷を制御しうる鉄筋コンクリート建物のフェイルセーフ耐震機構が実用的にも十分経済的に実現しうることを部材実験により実証した。

研究成果の概要(英文)：Dynamic tests and analysis were conducted on sliding behavior at the base of concrete foundation to measure the friction coefficients and to develop simple joint details to slide. In 2011 tests, the friction coefficients were 0.6 to 0.8 in case of concrete to concrete joint, while reduced to 0.4 in case with steel plate. Dynamic friction coefficients were 0.66 to 0.77 in case of concrete to concrete, while 0.41 to 0.69 in case with steel plates. In 2012 tests, new joint details were tested with molybdenum disulfide powder so that the friction coefficients at the joints could be reduced to 0.2 to 0.1, down to 0.05 to 0.07 stably. It may be concluded from the tests and earthquake response analyses that the fail-safe earthquake-resistant system could be idealized with economical and feasible joint details at the bases, by which the responses of the superstructures could be reduced less than not only within safety limit but also damage control limit against extreme earthquake motions.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学・建築構造

キーワード：フェイルセーフ コンクリート 摩擦係数 地震入力逸散 すべり 基礎 損傷制御 動的試験

## 1. 研究開始当初の背景

日本の鉄筋コンクリート建物の耐震設計は、1981年の建築基準法施行令改正によって部材の塑性変形能力(靱性)に陽に依存する体系に移行して以来、部材の靱性ランクにもとづく構造物の構造特性係数に応じて必要保有水平耐力を確保する形で行われている。2001年には建築基準法が改正され、工学基盤における設計用地震動の応答スペクトルが明示的に規定されるとともに、いわゆる限界耐力計算によって地盤の地震動増幅や相互作用の影響もとりにれることが可能になったものの、多くの建物は依然として保有水平耐力計算にもとづいているのが実情である。

このような基準にしたがって設計された実際の建物の多くは、建築基準法で想定する設計用地震動に対してはもとより、これを上回る地震動に対しても一定の終局安全性を有すると考えられる。これは近年の大地震に対して新しい建物の被害率が明らかに小さいという調査結果にあらわれている。兵庫県南部地震の震度7地域における中破以上の被害率は71年以前に建設された建物で19%、72~81年で14%、82年以降で7%程度であった。この地域における地表の地震動は建築基準法で想定している地震動よりも明らかに大きいものであったことが観測や解析などによって推定されているが、ピロティ建築などを例外として、建物の被害率は地震動と応答解析などから算定される被害率よりも明らかに低いものであった。2004年の新潟県中越沖地震でも、地表面では加速度応答スペクトルが3G~4Gを上回る地震動が記録されたが、中低層の鉄筋コンクリート造建物などでは明らかに降伏力以下の応答に留まったと推定される例が多くみられた。

しかし、これらの被害率は応答解析、設計規準や施工技術の影響だけでは定量的には説明できていないのが現状である。このように地震動から推定される被害が解析よりも小さい主な理由は、1)目視による被害を解析よりも過少評価している、2)実際の構造物の性能(保有水平耐力)は解析で仮定するよりも高い、3)地盤と構造物の相互作用(特に基礎近傍での入力損失)、などが考えられる。しかし、これらの定量的な効果ないし影響はいずれも検証が十分ではない。1)、2)に関しては実態に関するデータは限られており、3)に関しては従来の線形域での理論によって算定される相互作用の効果は被害率に対応する程度に大きな入力あるいは応答の低減にはならない。ただし、基礎底面ですべり変形で代表される非線形効果を含む入力逸散が建物基礎近傍で生じるとすれば極めて大きな応答低減効果があると予想される。

近年の地震被害では設計用地震動を超える地震動に対しても、新しい建物の被害率は総体としては計算よりも低い、修復が必要な損傷まで含めると十分に小さいとはいえ

ない。また、将来は、地震動レベルあるいは性質が当然異なるのであり、また、過去の被害率が十分に説明できない以上、将来ともこれまでのように被害率が小さいとは保証できない。したがって、既存不適格はもとより、新築の建物でも設計用地震動を上回る将来の地震動に対する安全性の保証、損傷の軽減は依然として耐震工学の重要な課題である。

申請者らは2006年度E-Defense実大RC構造物の震動実験において鉄筋コンクリート造既存学校校舎の一区画を模擬した実大3層建物の振動実験を行った。2006年9月から11月に行われた実験では、学校校舎を模擬した試験体の動的崩壊過程を実験的に再現しているが、基礎の固定度が上部構造の応答に与える影響(入力逸散)、外付け耐震補強の効果の検証を主要なテーマにしており、直接基礎底面をあえて振動台(コンクリート面)に固定しない実大建物の試験体で振動実験を実施した。基礎底面はコンクリート打継ぎ面で摩擦による剛塑性の挙動になるため、レベル2相当の入力までは入力逸散効果はないが、これを上回る極大地震動(1995JMA神戸波100%)では、基礎固定の場合に比べて基礎の滑りにより極めて顕著な入力低減が生じることを実証した。この実験では上部構造の設計は旧基準によるものであり、とくに過剰な強度を意図的に確保したのではないが、腰壁の効果などにより結果として上部構造の耐力は設計用せん断力を大幅に上回っており、そのためにコンクリート面の摩擦係数(0.6~0.4)であっても基礎すべりが生じた。すなわち、従来の設計レベルであっても上部構造はすべりが生じるときの応答せん断力に対して十分な強度を保有している可能性があり、また、地震動の大加速度域で生じうる基礎の滑りによって入力および上部構造の応答を大きく低減させる可能性があることが実証された<sup>[1][2][3]</sup>。

[1] 壁谷澤寿一, 壁谷澤寿海, 松森泰造, 金裕錫, 実大振動実験による基礎入力逸散の検証, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.3, JCI, 955-960, 2007

[2] 壁谷澤寿海, 松森泰造, 壁谷澤寿一, 壁谷澤寿成, RC3層建物の振動実験概要, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.3, JCI, 949-954, 2007

[3] 壁谷澤寿成, 壁谷澤寿海, 松森泰造, 壁谷澤寿一, 実大振動実験による耐震補強効果の検証, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.3, JCI, 961-966, 2007

## 2. 研究の目的

本研究では、過大な地震動に対して生じうる建物基礎底面での滑動による入力逸散効果の評価手法を確立してその効果を耐震設計に利用することを目的にして、必要な実験的研究および解析的研究を行う。実験では、鉄筋コンクリート基礎底面要素あるいは部

材の 1)静的載荷試験, 2)動的載荷試験, 3)地盤上での現地試験, により, 基礎底面の不連続面における摩擦係数と復元力特性を定量化するとともに, 荷重条件, 材料, 構造詳細等による摩擦係数の低減効果を明らかにする。実験結果に基づいて基礎底面における入力逸散機構の解析モデル化手法を確立して, さらに, 過大な地震動入力に対して有効な鉄筋コンクリート建物のフェイルセーフ耐震機構の実用化設計手法および耐震性能評価手法, を提案する。

地盤構造物系の相互作用効果を含む入力逸散効果は耐震工学的には安全側の要因であるが, これらの影響を定量化することは将来の極大地震動に対する安全性保証, 対費用効果を考慮した耐震補強, 性能評価型設計という観点などから非常に重要な研究課題であることは多くの研究者が共有する実感であろう。また, 過大入力は将来の性能規定によるコード化に際しても避けて通れない課題である。本研究では, 過大な地震動に対して生じる建物基礎底面での滑動による入力逸散効果の評価手法を確立して, 耐震設計あるいは耐震診断に組み込むための実験的研究および解析的研究を行う。実験は, 1)基礎底面のコンクリート不連続面における摩擦係数の定量化および荷重条件による摩擦係数の変動, 2)摩擦係数低減のための材料あるいは簡易な構造詳細の試行と検証, 3)地盤上の直接基礎における基礎水平剛性の定量化, を目的とした要素試験または現地試験を行う。実験結果にもとづいて入力逸散機構の解析モデル化手法を確立し, 主に中低層の鉄筋コンクリート造建物に適用する実用化フェイルセーフ耐震機構を提案する。過大な地震動入力も想定する場合に対して, 安全性および損傷制御の目標に応じて上部構造に必要な強度の算定法, 基礎の詳細設計法を提案する。

本研究の成果の特徴は, 地震動のレベルおよび性質によらず, 終局安全性の保証はもとより, 損傷まで制御して使用性も保証しうる鉄筋コンクリート造建物を, 従来の耐震構造の延長線の簡易で安価な技術によって実現しようとする点にあり, そのために, 基礎の滑動による入力逸散効果を積極的に利用する構造システムを開発して検証することである。従来の免震構造に比較して, 従来の工法の延長で圧倒的に簡易かつ経済的に実現できる可能性があり, また, クリアランスははるかに小さくて済むことが予想される。コンクリートの基礎底面では摩擦係数に応じて上部構造の強度は従来の鉄筋コンクリート構造でも強度型の比較的高い保有水平耐力レベルが必要とされるが, 適度な摩擦係数をもった基礎構造の開発により, 靱性型骨組の必要保有水平耐力レベルあるいは開発途上国の補強ブロック構造または組積造等にも応用可能であり, これらの靱性が限定的な構造でも建築計画の自由度を許容しつつ極

大地震動に対する安全性を保証しうる普遍的なフェイルセーフ耐震システムとなる可能性がある。

### 3. 研究の方法

本研究では, 基礎底面でのすべり面を模擬した試験体を作製し, 滑動状態における基礎底面での摩擦係数およびその速度依存性の定量化するための要素試験および部材実験を行う。加力方法は一定軸力に地震力が加わる場合を想定にして, 水平加力は 1)静的載荷試験, 2)動的載荷試験, 3)地盤上での現地試験, を比較する。試験体は, コンクリート平滑打継面を基本にして, 摩擦係数低減のための材料あるいは簡易な構造詳細を試行した不連続面による場合についても比較検証する。また部材実験に並行して, 既存建物あるいは地盤上で作成した直接基礎において基礎水平剛性の定量化を目的とした現地試験を別途先行して実施した。実験結果にもとづいて入力逸散機構の解析モデル化手法を確立し, 過大な地震動入力に対する地盤構造物系の地震応答解析および理論解析を行い, 基礎の滑動による地震動入力逸散効果の評価法の基礎資料とする。

#### (1) 基礎要素の静的加力実験 (東京大学, 建築研究所)

基礎要素試験は, 底面でのすべり面を模擬した試験体を作製し, 滑動状態における基礎底面での摩擦係数と復元力特性を明らかにする。試験体は, 直接基礎フーチング底面と捨てコンクリート(スラブ)の打継ぎ面を模擬して, 上部基礎(せい 800x 幅 500x 高さ 800mm), 下部基礎(せい 1000x 幅 600x 高さ 300mm)程度を想定してそれぞれ補強するが, コンクリート不連続面(打継ぎ面)では鉄筋は通さないで仮想のすべり面を形成する。打継ぎ面は, コンクリート表面を平滑化仕上げとして, 硬化後に打継ぐ通常施工の場合を基本にするが, 摩擦係数低減のための材料あるいは簡易な構造詳細を試行した不連続面による場合も比較検証する。その場合, 通常の打継ぎに比較しても十分経済的な実用化が可能であることを念頭に置いて計画した。すなわち, コンクリート表面と底面の間に, スタyroフォーム, プラスチック, 鋼板, 砂など, 安価な建築材料を用いて不連続面あるいは基礎端部の切り欠きを形成し, 摩擦抵抗の低減を図った。

加力方法は既存の試験装置により実施した。すなわち, 基礎底面に地震力が加わる場合を想定にして, 一定軸力に繰り返し水平力を油圧ジャッキ(またはアクチュエータ)によって与える。その際, 軸力レベルを主なパラメータとするが, 直接せん断の場合とすべり面にせん断力とモーメントが作用する場合, 変動軸力を受ける場合等も比較した。

平成 24 年度以降は, 平成 23 年度の実験結果を基本にして, さらに, 摩擦係数を(0.1~

0.3 程度に)安定的に低減しうる詳細を試行して、同様に基礎要素の静的加力実験により、検証を行った。

(2) 基礎要素の動的加力実験 (建築研究所)

静的加力試験により実用化可能な詳細、すなわち、摩擦係数が安定して低い範囲にある詳細を選択して、同様の要素試験体を製作して振動台による動的加力実験により摩擦係数あるいは復元力特性の速度依存性を検証した(図1)。試験方法は振動台に試験体を固定し、上部にさらに鋼製錘(約 12TON)を載せて、振動台により動的強制変位を与えた。錘は鉛直方向には拘束しないが、水平方向には振動台周囲の基礎床を反力にして拘束する(図2)。摩擦面に作用する力は水平力支点で計測した1軸ロードセルおよび錘の慣性力により算定した。

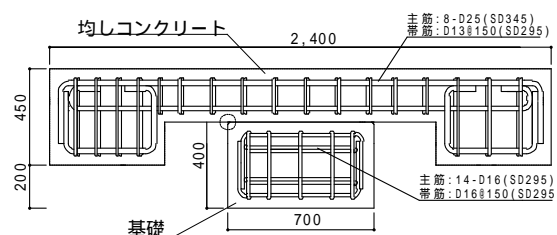


図1 試験体配筋図

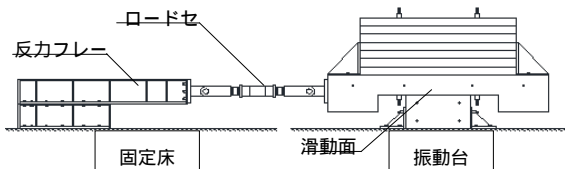


図2 加振装置

4. 研究成果

平成 23 年度の基礎要素試験では、底面でのすべり面を模擬した試験体を作製し、滑動状態における基礎底面での摩擦係数と復元力特性を明らかにした。試験体は、直接基礎フーチング底面と捨てコンクリートの打継ぎ面を模擬して、上部基礎と下部基礎を想定して、コンクリート不連続面をもつ試験体ですべり面を形成する試験体により静的加力試験を実施した。打継ぎ面は、コンクリート表面を平滑化仕上げとして、硬化後に打継ぐ通常施工の場合を基本として、摩擦係数低減のために鋼板を挿入した試験体も比較検証した。その結果、コンクリート平滑接合面では 0.6 - 0.8 程度の摩擦係数であるが、鋼板を挿入することにより摩擦係数は 0.4 程度まで安定的に低減することが可能であること、摩擦係数はコンクリートの応力度レベルが小さい場合はやや大きくなる傾向があること、などがわかった。一方、動的加力試験は平成 24 年度の実施する予定であったが、加力方法が可能かどうかを試験するために、23 年度中にも振動台による動的加力試

験を予備試験として 2 体の試験体で実施した。コンクリート面の試験体では平均摩擦係数は 0.60、最大摩擦係数は 0.77 であった。鋼板を挟んだ試験体においては平均摩擦係数 0.41、最大摩擦係数は 0.69 となった。実験結果により、振動数が減少すなわち長周期の際に摩擦係数は大きくなる反面、速度が増加すると摩擦係数は減少することを明らかにした。また、静的試験の場合と同様に、鉄板を捨てコン部と基礎部間に挟むことでさらに摩擦係数の低減を図ることが可能であること、すなわち、地震動入力基礎部の滑り挙動によりさらに大きく低減しうる可能性があること、を実証した。

平成 24 年度の実験では、接合面の詳細が異なる鉄筋コンクリート基礎底面をモデル化した試験体を製作して、1)静的載荷実験、2)動的載荷実験、を実施して、接合面詳細と加力方法による摩擦係数の違いを明らかにした。接合面の詳細は、前年度までの検討を踏まえて、さらに、コンクリートとコンクリート、コンクリートと鋼板、さらに粒子状の物質(二硫化モリブデン)を挿入した場合などについて、静的または動的な摩擦係数を比較した。その結果、比較的実用的かつ経済的な底面詳細によって、底面の摩擦係数は 0.2 ~ 0.1、あるいは 0.05 ~ 0.07 程度にまで低減しうることを明らかにした(図3)。このほか、基礎底面の不連続面における摩擦係数と復元力特性を定量化するとともに、荷重条件、材料、接合面詳細による摩擦係数の低減効果の違いを明らかにした(図4)。また、すでに別途実施済の 3)地盤上での現地試験結果(文献 - ,2011 年で発表)なども踏まえて、実験結果と数値的検討による入力逸散機構の解析モデルを確立して、過大な入力地震動に対して安全性だけでなく、損傷を制御しうる鉄筋コンクリート建物のフェイルセーフ耐震機構の実用化手法および耐震性能評価手法を提案して、本研究では実用的にも十分経済的に実現しうる部材実験により実証した。

試験体名	C-Mo	SRF-Mo	S-Mo	S
基礎底面	コンクリート	SRFシート	鋼板	鋼板
潤滑剤	MoS <sub>2</sub>	MoS <sub>2</sub>	MoS <sub>2</sub>	—

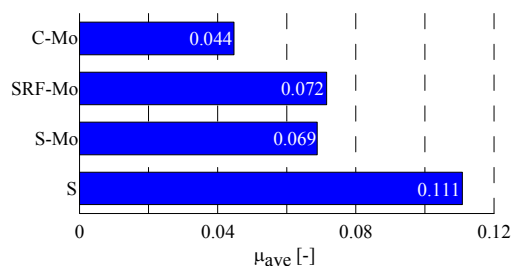


図3 接合面詳細と平均摩擦係数

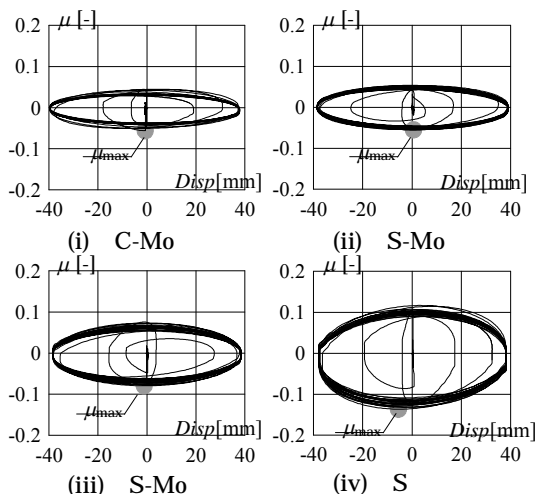


図4 相対変位 - 摩擦係数関係

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 6 件)

渡邊公美, 壁谷澤 寿一, 壁谷澤 寿海, 福山洋, クワン ヒュー ブイ, 細川洋治, コンクリート基礎の滑りに関する動的試験, 構造工学論文集, 査読有, Vol159B, 271-276, 2013.

Quang Hieu BUI, 壁谷澤寿一, 壁谷澤寿海, 細川洋治, 構造物における鉄筋コンクリート基礎の滑り正弦波加振実験, コンクリート工学年次論文集, 日本コンクリート工学協会, 査読有, 35, 2, 991-996, 2013.

渡邊公美, 壁谷澤寿一, 壁谷澤寿海, 福山洋, 構造物における鉄筋コンクリート基礎の滑り正弦波加振実験, コンクリート工学年次論文集, 日本コンクリート工学協会, 査読有, 35, 2, 973-978, 2013.

Toshikazu Kabeyasawa, Toshimi Kabeyasawa, Lateral Loading Test on Spread Foundation in an Existing Reinforced Concrete School Building, PCEE2011, 査読有, 058-1-9, 2011.

壁谷澤 寿一, 壁谷澤 寿海, 金裕錫, 細川洋治, 新潟県中越地震で被災した鉄筋コンクリート造学校校舎の直接基礎の水平載荷実験, 構造工学論文集, 査読有, Vol157B, 621-628, 2011.

壁谷澤 寿一・壁谷澤 寿海・金 裕錫・細川 洋治, 既存鉄筋コンクリート建物直接基礎の衝突水平載荷実験, コンクリート工学年次論文集, 査読有, 33, 2, 937-942, 2011.

〔学会発表〕(計 3 件)

高山洋平, 壁谷澤寿一, 福山洋, 壁谷澤寿海, 加藤周二, 細川洋治, 高橋豪, 強震時における基礎底面の滑動に関する加振実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 神戸(近畿), 9.12-9.14, 日本建築学会, 2014.

Bui Quang Hieu, Toshimi Kabeyasawa, Earthquake Responses of Buildings on Sliding Base Including the Peak and Average Values of Friction Coefficients, 日本建築学会大会, 札幌(北海道), 8.30-9.1, 日本建築学会, 715-716, 2013.

渡邊公美, 壁谷澤 寿一, 壁谷澤 寿海, 福山洋, クワン ヒュー ブイ, 細川洋治, コンクリート基礎の滑り面を実験因子とした動的滑り実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 札幌(北海道), 8.30-9.1, 日本建築学会, 711-712, 2013.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕(計 0 件)

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ URL :

<http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/KABE-LAB/home.htm>

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

壁谷澤 寿海(KABEYASAWA, Toshimi)  
 東京大学・地震研究所・教授  
 研究者番号: 00134479

(2)研究分担者

福山洋(FUKUYAMA, Hiroshi)  
 独立行政法人建築研究所・  
 構造研究グループ・グループ長  
 研究者番号: 60344008

壁谷澤 寿一(KABEYASAWA, Toshikazu)  
 国土総合政策技術研究所・  
 建築研究部・研究員  
 研究者番号: 10533953