

委員会報告「コンクリート構造物の応答制御技術に関する研究委員会」

菅野 俊介^{*1}、関松太郎^{*2}、飯塚真巨^{*3}、
幸左賢二^{*4}、北嶋 圭二^{*5}、井ヶ瀬良則^{*6}、勅使河原正臣^{*7}

<委員構成>

委員長	菅野俊介	広島大学大学院工学研究科	柿本和茂	早稲田大学理工学部建築学科
副委員長	関松太郎	(株)大林組技術研究所	和泉信之	戸田建設(株)建築設計統括部
幹事	飯塚真巨	鹿島建設(株)技術研究所	倉本 洋	豊橋科学技術大学
	幸左賢二	九州工業大学工学部	石川祐次	(株)竹中工務店技術研究所
	北嶋圭二	(株)青木建設技術研究所	黒川康嗣	鹿島建設(株)A/E 総事本部
	井ヶ瀬良則	日本道路公団試験研究所	梁川幸盛	構造計画研究所 解析技術本部
	勅使河原正臣	独立法人 建築研究所	中埜良昭	東京大学 生産技術研究所
委員	森 敦	日本技術開発株式会社	小豆畑達哉	独立法人 建築研究所
	岡野素之	(株)大林組技術研究所	稲井栄一	山口大学感性デザイン工学科
	曾我部正道	鉄道総合技術研究所	渡辺泰介	東急建設(株)土木技術設計部
	足立幸夫	阪神高速道路公団工務部	今井 隆	(株)ピーピーエム設計技術部
	中田恒和	八千代エンジニアリング	高橋良和	京都大学大学院工学研究科
	山本正幸	(株)竹中工務店東京本店	庄司 学	東京工業大学大学院理工学研究科
	関 崇夫	(株)大林組技術研究所	吉川和秀	鹿島建設(株)ITソリューション部

1. はじめに

近年、免震や制震など地震応答の低減を図る技術を用いた構造物が増加している。1995年兵庫県南部地震以降、増加傾向は顕著であり、新設構造物のみならず既存構造物の耐震補強への適用例も増大している。また、最近の日米共同研究の対象となった「高知能建築物」では、新しい考え方の応答制御技術が取り上げられるなど、コンクリート構造物に応答制御技術を取り入れる動きは活発である。

免震・制震技術を取り入れた構造物の設計は、構造評定を必要とするなど特殊な設計として扱われることが多く、あまり一般的ではない。また、こうした応答制御技術を取り入

れた構造物の耐震性能評価は、それぞれの設計ごとに行われており、一般的な評価法は確立されていない。

こうした現状を踏まえ、1) 免震・制震技術を用いて地震応答の低減を図るコンクリート構造物の耐震安全性評価やクライテリア設定のための共通手法について検討し、設計に資する、2) 新しい応答制御技術(材料、デバイス、スマート構造など)を探り実構造物への適用を検討する、ことを目的として本委員会の活動を進めてきた。この委員会は、免震技術を扱うWG1、制震技術を扱うWG2 および新しい応答制御技術を扱うWG3 から構成され、実質的な活動はこれらのWG で進められた。以

* 1 広島大学大学院工学研究科 社会環境システム専攻 教授 工博(正会員)
 * 2 (株)大林組技術研究所 建築振動制御研究室 室長 工博(正会員)
 * 3 鹿島建設(株)技術研究所 先端技術研究部 振動制御グループ 主管研究員
 * 4 九州工業大学工学部 建設社会工学科 助教授 PhD(正会員)
 * 5 (株)青木建設技術研究所 建築研究室 耐震チーム 博士(工学)(正会員)
 * 6 日本道路公団試験研究所 橋梁研究室 主任 (正会員)
 * 7 独立法人 建築研究所 構造研究グループ 上席研究員 工博(正会員)

下に、WG 毎に活動概要を報告する。

2 . WG1 (免震技術) の活動概要

< 委員構成 >

飯塚真巨 (主査)、幸左賢二 (主査)、
山本正幸、関崇夫、和泉信之、柿本和茂、
足立幸郎、曾我部正道、森 敦、岡野素之、
中田恒和、渡辺泰介、今井 隆、高橋良和、
庄司 学

2.1 免震建築物の終局耐震性の検討

2.1.1 目的

免震建物が終局となる地震動強さと終局モードおよび終局地震動強さに及ぼす各種構造要因の影響度を大略把握することを目的とし、解析的な研究を行った。また、あわせて長周期成分が卓越した既往の実地震動に対する免震建物の応答評価や免震建物と耐震建物の応答比較を行った。

2.1.2 解析方法

要因と水準 : 要因 (水準) として以下を選定した。
すなわち、上下動入力 (考慮と非考慮)、地盤の硬さ (2 種地盤硬質および軟質)、擁壁衝突時の抵抗力 (非考慮、評価値、評価値の 10 倍)、建物階数 (5 , 10 , 15 階)、架構形式 (純ラーメンと連層耐震壁)、免震周期 (3 , 4 秒)、ダンパーの降伏せん断力係数 (0.03 , 0.05 , 0.07)、免震クリアランス (40 , 55 , 70cm) である。

解析モデル : 解析モデルの例を図 1 に示す。

工学的基盤での入力地震動として建築基準法告示で規定されている応答スペクトルに合致する波を設計地震動レベルに位置付け、それを 2 倍と 2.5 倍に拡幅した。そして 1 次元重複反射理論に基づく等価線形解析により免震層下部基礎版位置での応答波を求め、振動モデルの入力波とした。地盤は薄層法の結果から鉛直・水平・回転の等価な線形ばねに置換した。免震層水平ばねは積層ゴムのハードニングばねとダンパーの弾塑性ばねおよび擁壁への衝突抵抗を表すギャップスリップば

ねで構成した。免震層鉛直ばねは積層ゴム位置に引張り降伏を考慮した弾塑性ばねを配し、浮き上がりを表現した。上部建物はラーメン方向は等価せん断・軸ばね、壁方向は曲げせん断軸ばねとした。既往の実地震動に対する解析では兵庫県南部地震鷹取 NS 波と台湾集集地震 TCU068EW 波を免震層下部を固定としたモデルに入力した。また、免震建物との比較のための耐震建物は必要保有水平耐力を満たすよう免震建物モデルに修正を加えた。

終局限界はラーメン方向では層間変形角 1/50、壁方向では曲げ塑性率 2、せん断塑性率 1 とし、積層ゴムの終局は引張せん断破断限界とした。

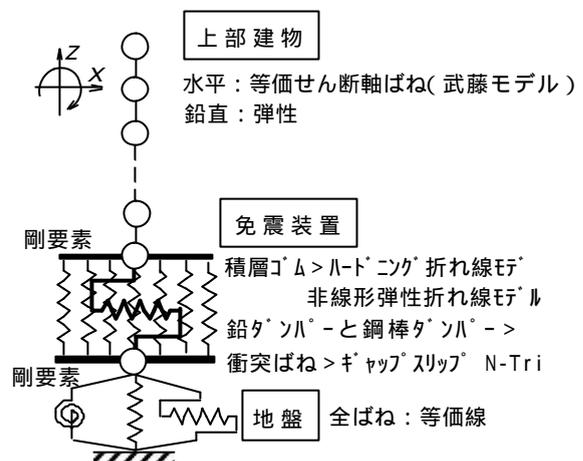


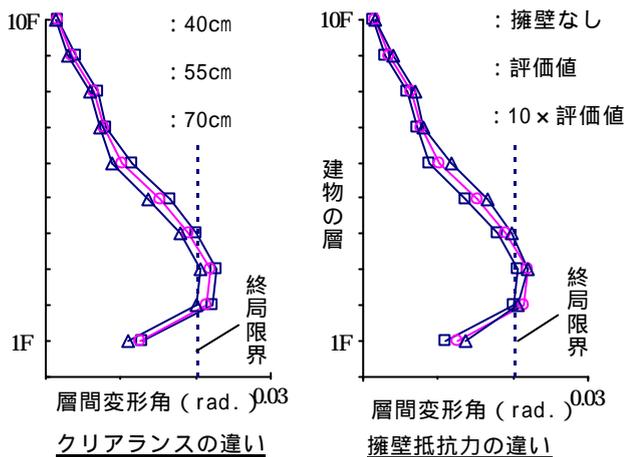
図 1 解析モデルの例

2.1.3 解析結果

解析結果の一例を図 2 に示す。

解析の結果、以下のことがわかった。

- 10 階建て、2 種地盤軟質条件 ($T_g=0.7\text{sec}$)、免震周期 4sec、ダンパーの降伏せん断力係数 0.05、免震クリアランス 55cm のケース (以下基本ケース) では、ラーメン方向が入力強度 2 倍に対して上部建物が終局限界に達した。壁方向では入力強度 2.5 倍に対して曲げおよびせん断の終局限界を超え、積層ゴムも破断限界を超えた。
- 地盤条件、免震周期、ダンパーの降伏せ



(ラーメン方向，設計地震動の2倍入力)

図2 解析結果の一例

断力係数の3要因は終局入力強度に及ぼす影響が比較的大きい。ただし、上部

構造は各与条件に合わせて設計しているわけではないので、評価に際して注意が必要である。

c. 上下地震動，免震クリアランス，擁壁衝突時の擁壁抵抗力，建物階数は終局入力強度に及ぼす影響が小さい。ただし、擁壁抵抗力を評価値の10倍にしたケースでは壁方向で他のケースより壁の塑性変形が大きい。

d. 基本ケースの TAKATORI NS に対する応答は設計地震動レベルの応答より1.5倍ほど大きい。TCU068 EW に対しては概ね設計地震動レベルの2.5倍の入力強度と同等以上の応答となり、終局限界を大きく超えた。

e. 2倍の入力強度で耐震と免震を比較すると、いずれもラーメン方向で終局となっているが、応答変形は免震の方がかなり小さい結果になった。

2.1.4 まとめ

本解析では終局を扱う関係上、モデル化に際してかなり大胆な仮定を導入せざるを得なかった。また、ねじれ振動他の重要要因でありながら検討対象から除外したり、解析対象建物が限定的である、あるいは杭の塑性化は無視するなど、本研究は一般的結論を導出するにはあまりにも問題点が多すぎる。しかし、「免震建物の終局応答をごく大雑把に把握する」という当初の目的は、ある程度達成できたのではないかと考えている。

2.2 免震橋梁に関する検討

近年橋梁への免震構造の適応が急激に増大している。しかしながら、橋梁の免震に対する設計法については未だ定量的には確立されてなく、特に軟弱地盤への適用性や免震ゴム自身の物性など未解明な項目も多い。そこで、以下の項目に着目した検討を実施した。

1) 国内における免震橋梁

国内における道路橋および鉄道橋の免震化の現状について調査する。

2) 国外における免震橋梁

国外における免震橋梁の現状について調査する。

3) 免震橋梁における設計の考え方

主要国における免震橋梁設計基準の相違を調査する。

4) 免震橋梁の適用性に関する検討

平成8年道路橋示方書を用いた試設計を行い、主に設計手法の観点から“免震設計の適用性”について検討・評価を加える。

5) 免震支承の軟弱地盤への適用性検討

軟弱地盤において橋梁に弾性支承を採用することの効果面での評価や設計上の留意事項について考察を加える。具体的には、橋梁および地盤を二次元弾塑性FEM解析法によりモデル化し、地盤条件、支承条件、地震動を組み合わせた16ケースについて、変

形量，応答値を比較する。

6) 積層ゴム支承に関する研究

既設橋梁の耐震補強用に用いられる反力分散式積層ゴム支承に要求される耐震・耐久性に関して実験的検討を行う。具体的には，引張応力が作用する状態におけるせん断変形性能，死荷重によって通常作用する圧縮応力がゼロの状態におけるせん断変形性能，一定の引張応力が作用した状態における繰り返しせん断耐久性能の3項目を実験的に確認した。

7) 滑り型免震システムに関する検討

滑り型免震システムについて，トライボロジー理論に基づく滑り支承のモデル化を試みる。ついで，橋梁の桁たわみ振動による軸力変動が滑り型免震支承を有する橋梁の地震時性能に及ぼす影響について検討する。

3. WG2 (制震技術) の活動概要

< 委員構成 >

北嶋圭二 (主査)、井ヶ瀬良則 (主査)、
倉本洋、黒川康嗣、梁川 幸盛、石川裕次、
曾我部正道、岡野素之、中田恒和、渡辺泰介

3.1 建築物のパッシブ制震技術

3.1.1 概要

本WGは，コンクリート系建築物にエネルギー吸収性能が明確なダンパーを組み込み，耐震性能を向上させるパッシブ制震構造技術について，必要な技術資料を整備することを目的に活動した。既往の研究と実施例及び，各種ダンパーと解析プログラムについて調査・検討するとともに，コンクリート系建築物を制震構造として設計する時に必要な基本事項についてまとめた。また，制震構造建物の耐震性能評価方法について，限界耐力計算法の適用性を解析ケーススタディを行って検討するとともに，米国の耐震性能評価方法につい

ても調査・検討を行った。

3.1.2 実施例，各種ダンパー，解析プログラムの調査・検討及び制震構造設計

コンクリート系建築物にダンパーを組み込み制震構造化した事例について，既往の文献及び日本建築センター発刊のビルディングレターを対象に調査した。調査結果の分析より，高さ60m以上のコンクリート系（鉄筋コンクリート(RC)造，鉄骨鉄筋コンクリート(SRC)造，鋼管コンクリート(CFT)造）の高層建物に制震構造を適用した事例は，1995年以降増加傾向にあること，その傾向はCFT構造で著しく，CFT造の高層建物の42%が制震構造化されていること，RC造では10%が制震構造化されていることなどを示した。

ダンパーについては，すでに多くの文献で紹介・分類されているが，ここでは，使用方法，制御方法，取付け箇所，エネルギー吸収の原理，等の各々の観点から分類・整理した。また，制震構造の設計には振動解析による動的な評価が不可欠であることより，市販されている振動解析プログラムについて紹介するとともに，解析上の留意点についてまとめた。

さらには，RC構造物の制震構造設計という章を設けて，コンクリート系建築物を制震構造として設計する時に必要な基本事項について，今までの実施例を基に整理あるいは分析し，制震構造設計の考え方をまとめた。ここでは，RC構造物を制震構造化する際の構造計画上の留意点，ダンパー及び建物のモデル化の留意点，ダンパーを設計する上で必要な項目（安全率，ダンパーの終局限界状態，取付け部），さらには，品質管理や維持管理の考え方について示すとともに，制震構造の普及を進める上での現状の問題点等について指摘している。

3.1.3 制震構造建物の耐震性能評価方法

制震構造建物の耐震性能評価方法として、時刻歴応答解析による動的評価法のみならず、一般建物（超高層建物以外）の評価方法として導入されている、限界耐力計算法や耐震診断法などの静的評価法のメニューを整備することが、制震構造化技術の普及につながるのではないかという観点から、制震構造建物に対する静的評価法の適用性について検討した。

ここでは、4～12階建てのRC造建物に変位依存型の履歴系ダンパーを組み込み制震構造化した建物を対象に、限界耐力計算法による静的評価法と時刻歴応答解析による動的評価法の解析ケーススタディを行い、限界耐力計算法の適用の可能性について示した。限界耐力計算法の適用に際しては、ダンパーの減衰性能の評価方法や、ダンパー取付け部の剛性の影響などについても、具体的に解説している。また、既存RC造建物の耐震補強法として実用化されている制震補強法の補強効果を、耐震診断法と同じIs指標で評価する静的評価法についても紹介・検討した。

さらには、米国で導入されている制震構造建物の耐震性能の静的評価方法について概要を示すとともに、適用検討を行い、限界耐力計算法による評価結果と比較・検討した。

3.2 コンクリート橋への制震技術の適用法に関する検討

3.2.1 背景と目的

免震設計が、構造物を地盤から切り離し地震動が伝わらないようにするというのに対し、制震設計は、伝わってきた地震動を制御して軽減させるというのが、基本的な概念である。しかし、土木構造物においては、構造物を切り離すだけでは変位が過大となるため、ダンパーによりエネルギー吸収を図っており、これらを総称して免震設計と呼んでいる。したがって、制震設計とは、この免震設計の定義

に含まれず、地震動を制御するものであると言えることができるが、明確な定義がされていないのが実情である。

免震設計は道路橋を中心に実用化が進められており、道路橋示方書にも免震設計の規定が盛り込まれている。一方、制震については、風による振動や交通振動対策としての実例はあるものの、地震に対する対策として実用化された事例はほとんど見られない。

しかし、免震設計におけるダンパーや、落橋防止装置における緩衝材など、地震時のエネルギーを吸収させるための装置の開発や適用は多く行われている。また、適用事例はないものの、橋梁にも制震設計を適用しようとする試みは数例あり、長周期構造物や、桁遊間が大きくなるなど、免震設計で問題とされている構造への適用が考えられる。

ここでは、制震設計を橋梁に適用した場合に、反力分散や免震設計と比較し、その違いや有効性について評価するとともに、ダンパーの開発事例の調査を行う。

3.2.2 活動内容

(1) 制震検討事例の整理

土木分野における制振設計の検討事例の主なものとして下記のものがある。そこで、これらの事例について、その特徴および問題点を整理した。

- ・鋼製ブレースダンパー
- ・可変減衰、可変剛性ダンパー
- ・TMD
- ・隣接桁間への衝突緩衝材の設置

(2) ダンパーの種類整理

桁間衝突や落橋防止装置の緩衝材として多くの種類のダンパーが提案されており、これらの特徴や適用性について整理した。

(3) 制震設計の有効性の検証

支点部ダンパーおよび桁間ダンパーについて、免震支承、反力分散支承との比較を行い、

制震設計の有効性の検証を行った。

(4) 結果の整理

検討モデルの違いによる橋脚の塑性化程度、桁の応答変位に着目し、比較整理を行った。

4. WG3 (新しい応答制御技術) の活動概要

< 委員構成 >

勅使川原正臣 (主査)、中埜良昭、稲井栄一、小豆畑達哉

4.1 概要

4.1.1 目的

本WGでは、コンクリート構造物への既存の免震、制震以外の新しい応答制御技術の適用を検討する。具体的には、新しい材料、およびそれを利用した装置(デバイス)のRC構造物への活用状況の調査である。

4.1.2 検討範囲

新しい材料として、現在スマート材料と言われ研究の対象となっている、形状記憶合金、MR/ER、圧電素子を取り上げる。スマート材料の定義は、検知(センシング)、判断(プロセッシング)、処理(アクチュエーティング)、これらすべてを満たす材料であることといわれている。上述の材料はこれらの要素をすべて備えているわけではないが、それぞれ、少ないエネルギーで大きな力を出すことが出来る、またはエネルギー吸収に優れている、反応が早いなど特徴をもっている。

次に、フェイルセーフシステムの必要性(想定外の入力に対する安全の確保)を考える。ここでは、免震、制震によるRC構造物の耐震補強を対象とする。制震もしくは免震による補強を行わなければ構造体だけでは十分な耐震性が確保できないRC構造物の場合には、免震、制振の機能が想定どおり発揮されない

ことは、直接建築物の破壊に結びつく。従って、制震、免震による耐震補強(新しい振動制御の応用)には、最低限軸力を保持し、落階を防止する何らかのバックアップ(フェイルセーフ)システムが必要となる。ここでは、最低限空間保持をする方法の1つとして柱の軸力保持能力の向上に関する具体的な方法を取り上げる。より高い構造性能を付加するための免震、制震装置は、それらが装備されなくても、もしくは機能しなくても最低限の構造性能は確保されていると考え、制御の不具合に対しては個別に対応すべきものと考えることとし、ここでの検討対象外とした。さらに、アクティブ制振、免震(制御理論を含む)もここでの検討対象外とした。上記の理由に加え、アクティブ制振、免震が大地震対応として可変剛性システムが鹿島技術研究所21号館で試験的に採用されているものの(鹿島都市防災研究会編著:制震・免震技術、都市・建築防災シリーズ、鹿島出版会)、もっぱら日常の頻度の高い揺れに対する居住性の確保が目的であるためである。

また、システムとしての応答制御の方法としてロッキングシステムを扱う。入力を制御する方法として、重力をうまく利用するシステムである。兵庫県南部地震で被害を免れた要因の1つと考えられている。

4.2 新しい材料の応答制御への利用状況

形状記憶合金(SMA)、磁気粘性流体(MR)、圧電磁歪素子(PZ)が、応答制御に用いる新しい材料として近年研究開発が盛んに行われている。それぞれの特性は以下のとおりである。

形状記憶合金は、一旦変形を受けても加熱などの後処理によって「元の状態」に戻ることができる性質を有し、ある温度領域では「超弾性」と呼ばれる特徴的な荷重-変形履歴を

描き、エネルギー吸収性能と復元性能が期待できる材料である。したがって、アクチュエータやエネルギー吸収部材としての利用が考えられる。

電気/磁気粘性流体は、電界もしくは磁界の作用を受けて、その粘性を変化させたり、固化したりする性質を有する材料である。制振構造システムにおけるダンパー等の振動制御デバイスとしての利用が考えられる。

電気/磁気歪素子とは、外部からの電界あるいは磁界により変形を生じることのできる素材の総称であり、これまでは携帯電話や音響機器に用いられてきた。反応速度が速く、精確に駆動させることが可能であるため、最近では研究段階ではあるが、建築物(トラス、シェル構造物)の振動制御デバイスに適用されてきており、振動制御用アクチュエータとしての利用が期待される。

4.3 フェールセーフシステム

免震あるいは制震による応答制御装置を付加した架構の場合、フェールセーフを付与すべき対象としては、主に、

制御装置以外の主体架構

制御装置

隣接建物や周辺敷地間の緩衝装置

等が考えられるが、ここでは を対象に、特に耐震補強時に免震・制震装置を導入する場合のフェールセーフについて議論する。特に耐震補強の場合は、その補強の対象となる既存架構が一般に靱性に乏しいため、主体架構内に何らかのフェールセーフを付与することは最も重要な事項のひとつである。

耐震補強時に免震・制震装置を導入する場合は、既存架構に許容しうる変形を慎重に設定し、想定される入力レベルに対して応答変形がその許容値以下に収まるよう計画し、地震応答解析などによりこれを確認するのが一

般的である。しかしながら、想定入力レベルの超過や異なる性質を有する地震動の入力が生じた場合に、直ちに架構が崩壊することは人命保護の立場からは決して望ましいことではなく、軸力支持能力の確保による落階回避が可能な機構を既存架構内に付与しておくことが重要である。そこで以下においては軸力支持能力の確保の観点から、その支持能力の評価方法や改善手法についての最近の研究事例を紹介する。

柱のせん断補強筋量が少ない古い鉄筋コンクリート造建築物では、地震時に鉛直荷重が支持できないためにパンケーキ状破壊が生じる例が世界各国の被害地震で生じている。小泉・壁谷澤らは最小限の軸力保持能力を確保し建物の崩壊を防止することを目的に、ポリエステル製の合成繊維シートにより補強したRC造柱の静的加力(逆対称曲げ繰返し載荷)実験によりその効果を実験的に確認している。

4.4 新しいシステムを用いた応答制御技術 (ロッキングシステムについて)

(1) 特徴

過去の地震被害等の分析から、建築物が強震時に浮き上りを生じることにより、地震被害が低減される場合のあることが指摘されている。ロッキングシステムは、こうした知見に基づき、強震時において、建築物に、意図的にロッキング振動を誘発し浮き上りを生じさせることによって、その地震応答を低減することを目指すものである。

ロッキングシステムの特徴は、上部構造が塑性化する前に、浮き上がりを生じさせて地震入力を頭打ちとし、地震入力の反転時には、建築物自体の自重を復元力として活用することにある。その実現のためには、地震力がある一定レベルに達した時に、建築物をねらい

通りに浮き上げると同時に、建築物頂部での変形や浮き上がり後着地した時点での衝撃力が過大なものとならないようなシステムを開発することが課題となる。

図3に、これらの特徴をまとめて示す。こうしたシステムは、現時点では必ずしも一般的なものではないが、いくつか実施事例も報告されている。報告書では、基礎を直接基礎とした場合のロッキングシステムの解析事例を、また、柱脚部にエネルギー吸収デバイスを挿入したロッキングシステムの一例としてベースプレート降伏型ロッキングシステムの振動台実験の結果を示した。

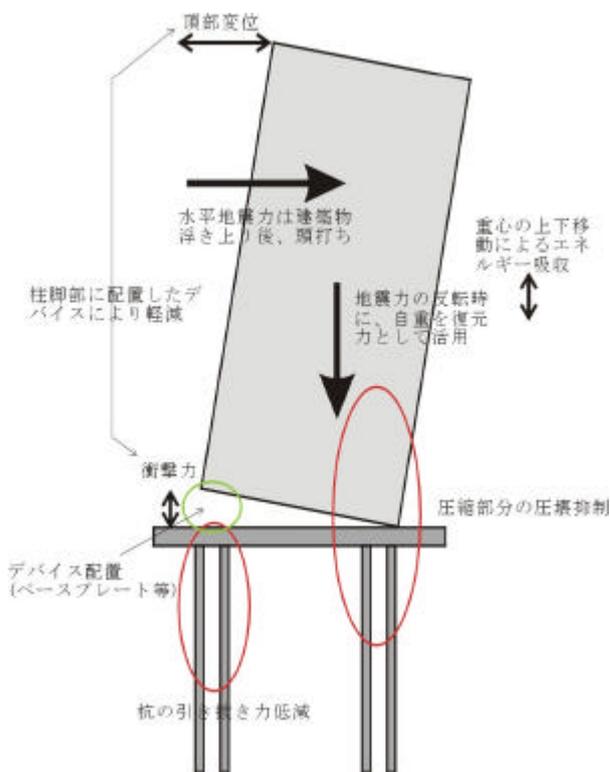


図3 ロッキングシステムの特徴

(2) 直接基礎におけるロッキングシステム

地盤上に直接支持された建築物の場合、基礎の浮き上がりロッキングを伴う振動特性は、地盤の特性と基礎下の地盤反力分布の仮定に大きく影響を受け、その応答低減効果を厳密に評価することは難しい。ここでは、剛なベ

タ基礎を持つRC造集合住宅を対象に、主として、地盤特性、地盤のモデル化、建物階数の違いが、基礎浮上りによる応答低減効果に及ぼす影響を解析的に検討した結果を示す。なお、「鉛直地震動の影響」および「高次の振動モードの影響」も合わせて検討を行っている。

< 報告書の目次 >

第1編 序論

第2編 免震技術

1. 序
2. 免震建築物の終局安全性
 - 2.1 背景と目的
 - 2.2 解析モデル
 - 2.3 解析結果
 - 2.4 既往地震波による応答と一般耐震建物との比較
 - 2.5 まとめ
3. 免震橋梁に関する検討
 - 3.1 国内における免震橋梁
 - 3.2 国外における免震橋梁
 - 3.3 免震橋梁における設計の考え方
 - 3.4 免震橋梁の適用性に関する検討
 - 3.5 免震支承の軟弱地盤への適用性
 - 3.6 積層ゴム支承に関する研究
 - 3.7 滑り型免震システムに関する検討

第3編 制震技術

1. 序
2. 建築物のパッシブ制震技術
 - 2.1 はじめに
 - 2.2 既往の研究および実施例
 - 2.3 ダンパーの種類
 - 2.4 RC構造物の制震構造設計
 - 2.5 耐震性能評価方法
 - 2.6 米国における耐震性能評価法
 - 2.7 まとめと今後の課題
3. コンクリート橋への制震技術の適用法に関する検討
 - 3.1 橋梁構造物における制震技術の現状と課題
 - 3.2 制震橋梁の検討事例
 - 3.3 制震橋梁の適用性に関する検討
 - 3.4 ダンパーの開発事例

第4編 新しい応答制御技術

1. 序
2. 新しい応答制御技術
 - 2.1 応答制御技術の分類
 - 2.2 新材料の応答制御への利用状況
 - 2.3 ロッキングシステム
 - 2.4 まとめ