

論文 RC 耐震壁の動的 FEM 解析の精度向上に向けた検討解析

野口 博*1・張 大長*2・柏崎隆志*3

要旨: 本研究では,地震動を受ける RC 立体耐震壁の動的 FEM 解析の精度向上のために,試験体を分布質量の普通モデルと集中質量の簡易モデルでモデル化し,分布と離散ひび割れモデルを利用した場合の地震応答の動的 FEM 解析を行った。また,実験と解析で得た水平応答加速度の応答スペクトル分析を行い,解析の信頼性を確認した。さらに,動的解析に基づき,動的 FEM 解析の精度向上に向けた解析モデルを提案した。

キーワード: RC 耐震壁,有限要素法,精度向上,検討解析,分布ひび割れ,離散ひび割れ,分布質量の普通モデル,集中質量の簡易モデル,時刻履歴分析

1. はじめに

今までの原子力発電技術機構 (NUPEC) の RC 立体耐震壁に関する動的 FEM シミュレーション解析では,ウェブ壁面にせん断滑り破壊が生じ,最大耐力 (RUN-5) に達する前後の水平応答変位時刻歴は実験結果と良好に対応できる解析が少なく,実験結果より過小評価する例が多い¹⁾²⁾。動的 FEM 解析の精度を高めるためには,試験体のモデル化,材料モデル及びひび割れモデルの採用方法が重要と考える。そこで,既往の動的 FEM 解析に基づき,試験体を分布ひび割れと離散ひび割れを用いた分布質量の普通モデルと集中質量の簡易モデルの2種類について地震応答の動的 FEM 解析を行った。分布ひび割れモデル,分布ひび割れモデルと離散ひび割れモデルの併用及び離散ひび割れモデルの本数をパラメータとした FEM 解析結果を実験結果と比較し,実験と解析で得られた水平応答加速度の応答スペクトル分析を行った。

さらに,解析結果と実験結果との比較に基づき,動的 FEM シミュレーション解析の精度向上に向けての試験体のモデル化,ひび割れモデル及び材料モデルの採用方法を検討した。

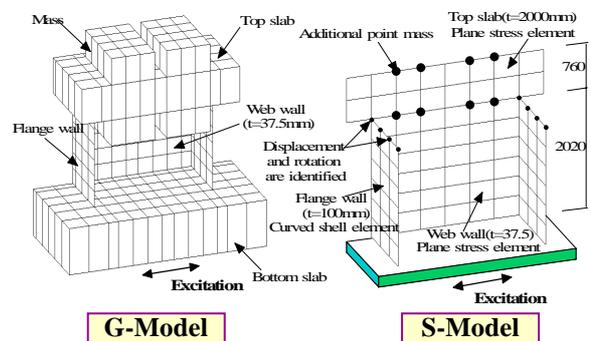
2. 試験体のモデル化

2.1 要素分割

既往の研究では,試験体の FEM 解析モデルは分布質量の普通モデル,集中質量の簡易モデルとした。分布質量の普通モデルでは,上部スラブと壁の質量及び付加質量を分布質量により考慮するが,集中質量の簡易モデルでは,上部スラブと壁の質量及び付加質量を集中質量点により考慮する。本研究での試験体の要素分割と要素種類は,図1に示す。

分布質量の普通モデル(G-Model) 上部スラブと下部スラブは8節点のソリッド要素で,Web壁とFlange壁は4節点の平面応力要素あるいはシェル要素でモデル化する。

集中質量の簡易モデル(S-Model) 下部スラブを省略して,壁の脚部分はx,y,z方向にローラで固定し,上部スラブは4節点の平面応力



(a)分布質量の普通モデル (b)集中質量の簡易モデル

図1 試験体の要素分割

*1 千葉大学教授 工学部 工博 (正会員)

*2 千葉大学 大学院自然科学研究科 工修 (正会員)

*3 千葉大学助手 工学部 工修 (正会員)

要素あるいはシェル要素で、Web壁とFlange壁は4節点の平面応力要素あるいはシェル要素でモデル化する。

2.2 ひび割れモデル

(1) 分布ひび割れモデル

分布ひび割れモデルは、最大引張応力が破壊条件を満たすと考え、ひび割れに直角な方向の剛性をゼロに修正することにより、ひび割れたコンクリート要素を直交異方性体として表現するモデルである。

従来の FEM 解析と同じように、分布ひび割れを図1の試験体の解析モデル全体に用いる。

(2) 離散ひび割れモデル

離散ひび割れモデルは、ひび割れの位置や経路をあらかじめ決めておき、ひび割れ面に位置する節点をひび割れの両側に分離して設け、これらの節点をひび割れ接合要素で接合する方法

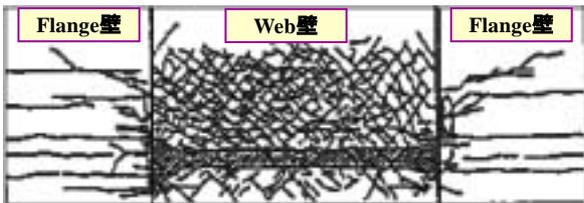


図2 RUN-5の後の破壊状況（ウェブ壁の足部分のコンクリートは滑り圧縮破壊した。）

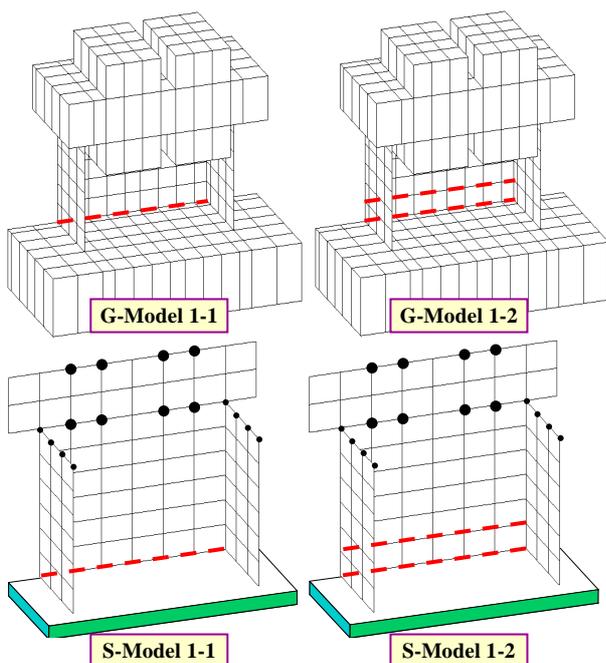


図3 離散ひび割れモデルを用いた解析モデル（離散ひび割れを图中的破線に沿って入れる。）

である。接合要素は幾何学的な大きさがなく、直交する2つのバネにより構成されている。荷重を受けると、ひび割れの接合部には開きとずれ変形が発生する。

(3) 解析モデルに離散ひび割れモデルの応用

NUPECの立体RC耐震壁の振動台実験での最終の破壊状況を、図2に示す。繰返し動的載荷RUN-5の時、ウェブ壁の脚部分には、ひび割れの開閉を繰返し、ひび割れ面の滑りが発生すると共に、コンクリートは圧縮破壊して剥落した。しかし、今までの耐震壁の動的FEM解析では、ひび割れ面の滑りを明確に考慮する例は殆どなかった。解析精度を高めるために、ひび割れ面の滑りを考慮する必要があると考える。

本研究では、ひび割れ面の滑り圧縮破壊を表すために、図3に示すウェブ壁の脚部分に離散ひび割れによりひび割れ面の開閉と滑りを考慮する。また、脚部分に1本か2本の離散ひび割れを入れるモデルについては、それぞれG-Model 1-1とG-Model 1-2、S-Model 1-1とS-Model 1-2を区別する。

(4) 離散ひび割れの材料特性

離散ひび割れの材料特性については、ひび割れが開く方向には、図4に示す線形軟化を考慮し、原点からの接線剛性により載荷 - 除荷 - 再載荷の繰返し履歴ループを採用する。また、ひび割れ方向には、図5に示す低減定数によりせん断剛性の低減を考慮する。原点からの接線剛性は、履歴上で最大応力に対する最大ひずみの割合である。

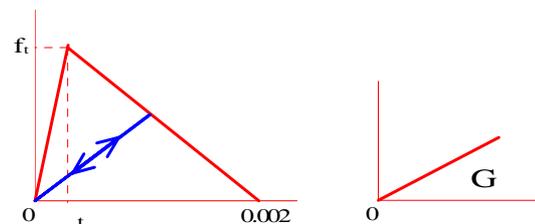


図4 線形軟化モデル 図5 ひび割れた後の剛性

3. 動的応答シミュレーション FEM 解析

動的応答 FEM 解析では、原点からの接線剛性により繰返し載荷時のコンクリート履歴特性を

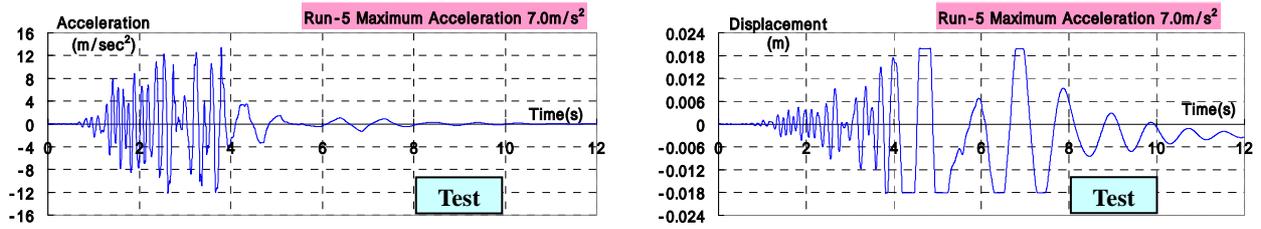


図6 RUN-5による水平応答時刻歴の振動台の実験結果

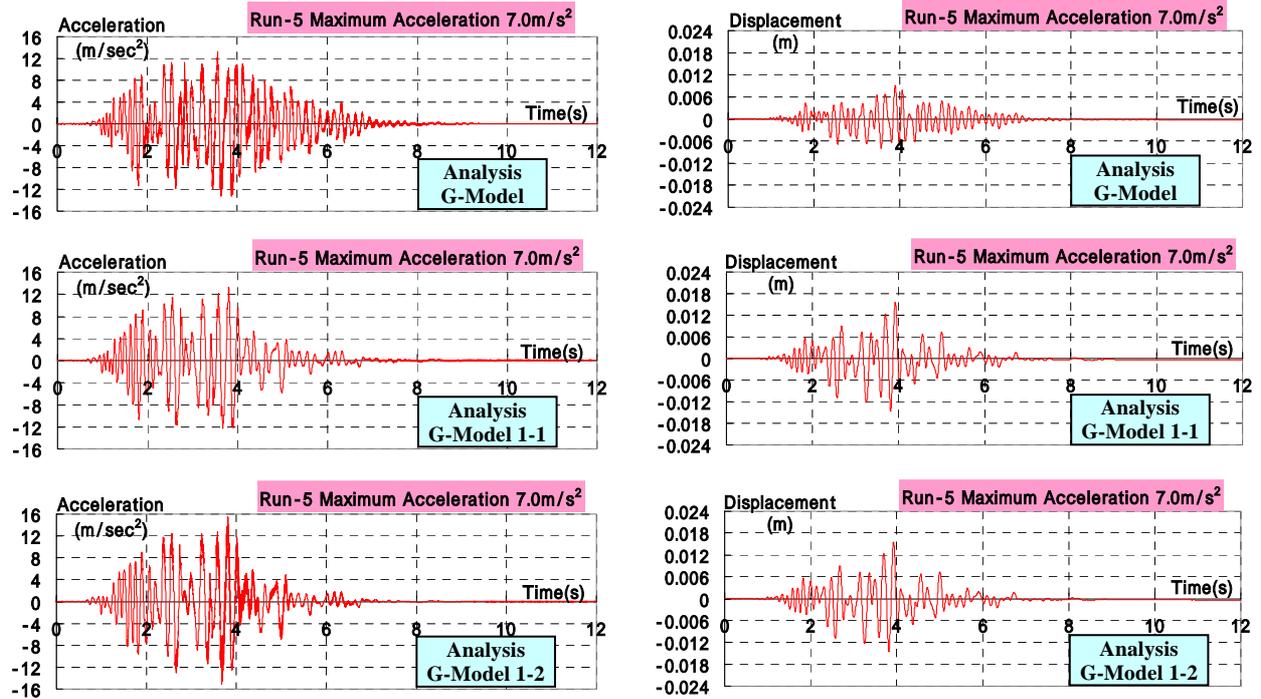


図7 RUN-5による分布質量の普通モデルにおける水平応答時刻歴の解析結果

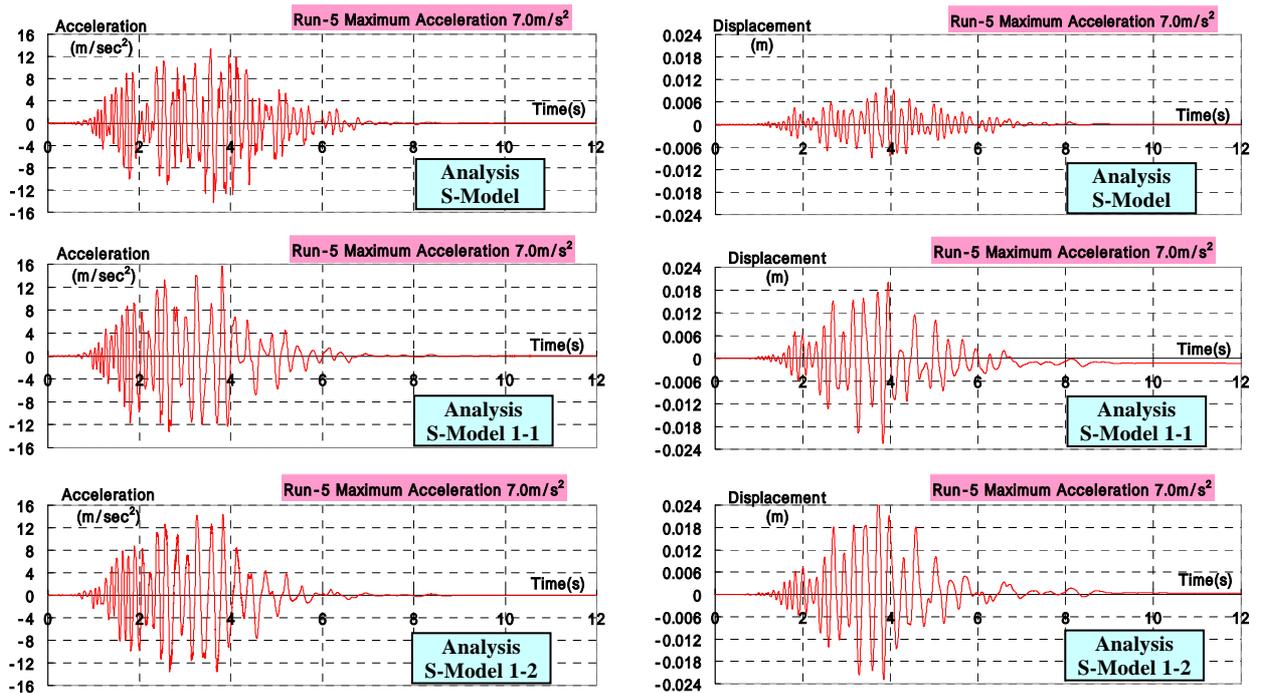


図8 RUN-5による集中質量の簡易モデルにおける水平応答時刻歴の解析結果

組み込んだ DIANA³⁾のユーザーサブルーチンを用い、時刻間隔を 0.04 秒として行っている。

3.1 水平応答加速度と応答変位の時刻歴

分布ひび割れモデルのみの場合には、RUN-1 から RUN-4 までの動的 FEM 解析で得られた水平応答加速度と水平応答変位の時刻歴は、実験結果と良好に対応できている²⁾。図 6 と図 7 と図 8 に示すように、RUN-5 による最大耐力まで水平応答加速度時刻歴は実験結果と良好に対応しているが、水平応答変位は実験結果より約 40% 過小評価した。

分布ひび割れモデルと離散ひび割れモデルを併用する場合には、RUN-1 から RUN-4 までの応答時刻履歴の解析結果は、分布ひび割れの場合と同じように実験結果と良好な対応があった。RUN-5 による各解析モデルで得られた解析結果の比較を図 6、図 7、図 8 に示す。

RUN-5 による水平応答加速度については、最大耐力（4 秒頃）まで、各解析モデルで得た水平応答加速度時刻履歴は実験結果と良好に対応している。その後、分布ひび割れモデルと離散

ひび割れモデルを併用した場合の解析結果は、実験結果と良好な対応を示した。特に、4 秒頃に試験体が突然壊れ、加速度が小さくなり長周期の振動をよく再現できている。

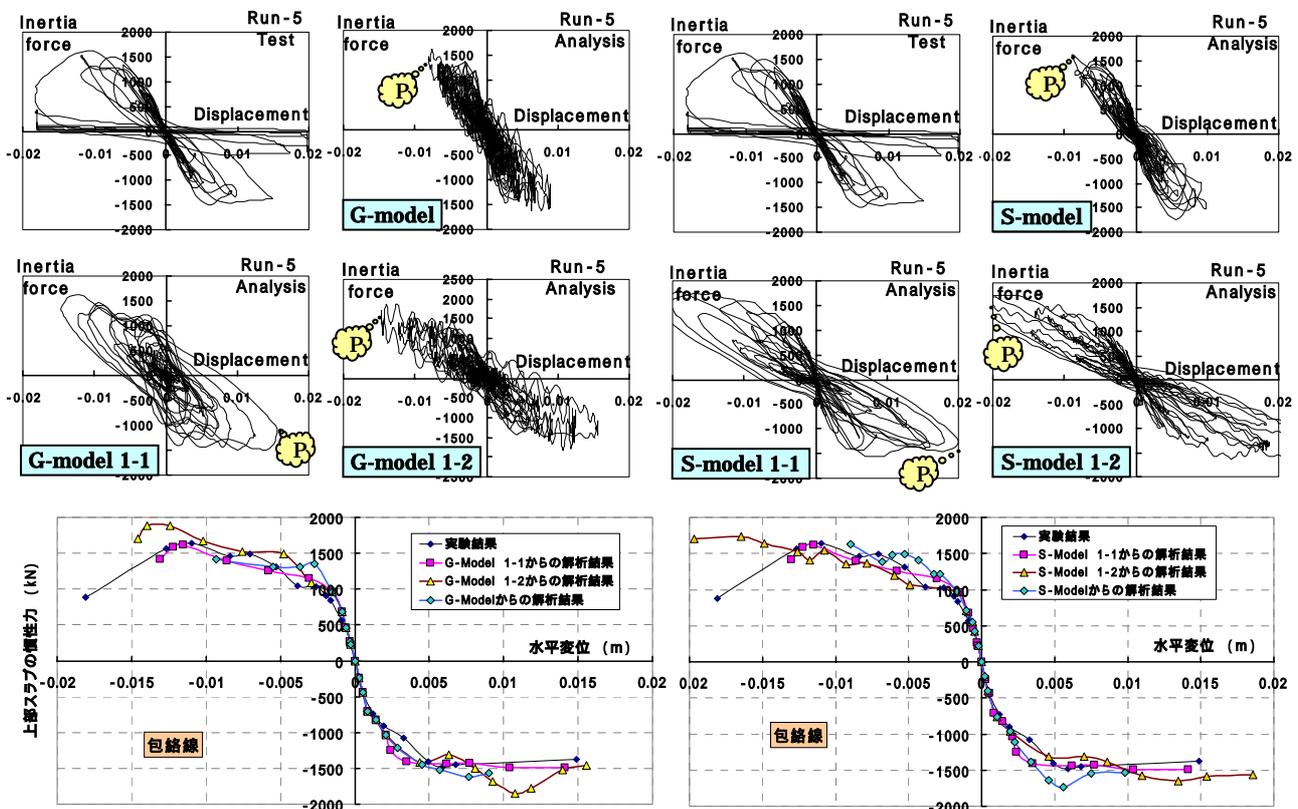
RUN-5 による水平応答変位については、分布質量の普通モデルの解析結果は、実験結果より小さい評価を示している。離散ひび割れモデルを用いた集中質量の簡易モデルの解析結果は、実験結果を大体表現できるが、水平応答変位の時刻歴は、時間的なずれが見られる。

従って、分布ひび割れモデルと離散ひび割れモデルを併用する場合の解析結果と実験結果との比較から、水平応答加速度、変位の解析結果は、分布ひび割れの場合より良好な対応にあることがわかった。

3.2 上部スラブの慣性力 - 水平変位の関係

RUN-5 時の解析と実験で得られた上部スラブの慣性力 - 水平変位の関係を、図 9 に示す。上部スラブの質量と水平応答加速度により上部スラブの慣性力を計算した。

分布ひび割れモデルのみの解析モデルで得ら



(a) 分布質量の普通モデルで得られた結果

(b) 分布質量の普通モデルで得られた結果

図 9 上部スラブの慣性力 - 水平変位の関係(慣性力: kN, 水平変位: m)

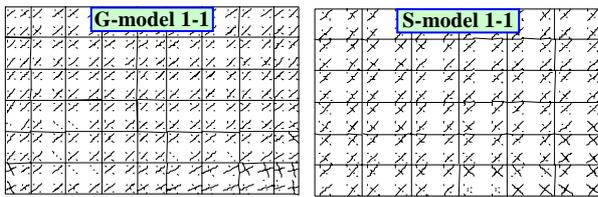
れた履歴ループの面積は実験のほうより小さいことがわかった。分布ひび割れモデルを用いるとともに、ウェブ壁の脚部分に離散ひび割れモデルを採用した解析結果は、分布ひび割れモデルのみの場合より履歴ループの面積が大きい。しかし、FEM 解析での地震エネルギーの吸収は小さめであることがわかった。

解析結果の包絡線の比較に基づいて、解析結果は実験結果と良好な対応にあることがわかった。分布ひび割れモデルのみ場合の剛性は少し高い。

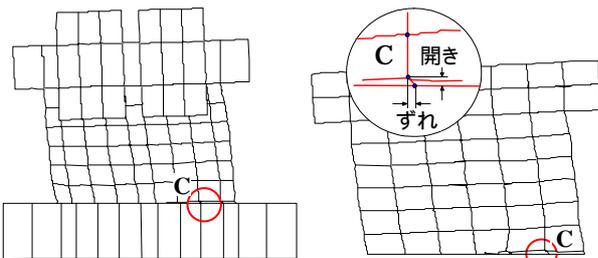
3.3 ひび割れの状況

(1) 分布ひび割れの開閉

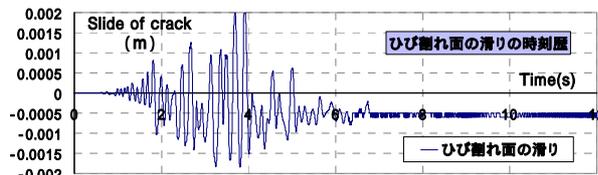
解析モデルの全体に分布ひび割れモデルを用いている。最大引張応力に達すると、ひび割れが発生する。RUN-5 の最大変位 (P 点) の時、ウェブ壁のひび割れ状況を 図 10(a) に示している。直線は開いているひび割れ、破線は閉じて



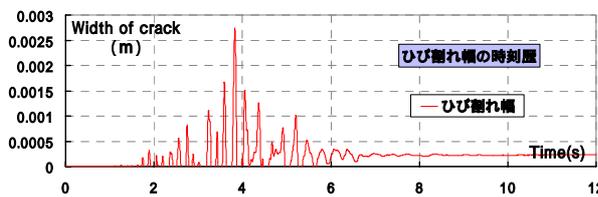
(a) ウェブ壁のひび割れ状況



(b) 変形と離散ひび割れの開き
図 10 ひび割れの状況



(a) ひび割れ面の滑りの時刻歴



(b) ひび割れ面の幅の時刻歴

図 11 離散ひび割れの C 点の開閉状況

いるひび割れを表す。

解析で得たひび割れ状況を 図 2 に示す実験でのウェブ壁のひび割れ状況と比較すると、分布ひび割れモデルによって、解析で得られたひび割れの開閉状況は、実験でのひび割れ状況を表現できると考える。

(2) 離散ひび割れの開閉

離散ひび割れは、分布ひび割れと同じように最大引張応力に達すると、ひび割れが発生する。繰返し荷重を受ける場合には、ひび割れの開き、ずれと閉じが発生する。解析で得られた離散ひび割れの開閉状況を 図 10(b) に示す。ひび割れの開きとずれが見える。

また、動的解析によって、ひび割れ面のずれ (滑りを呼ぶ) とひび割れの開き (ひび割れ幅を呼ぶ) の時刻歴が得られた。RUN-5 によるひび割れ面の滑りとひび割れ幅の時刻歴を、 図 11 に示す。従って、ひび割れ面の滑りが存在することがわかった。解析精度を高めるためには、FEM 解析でひび割れ面の滑りを考慮する必要があると考える。

3.4 上部スラブの水平応答加速度の応答スペクトル分析

減衰常数 h を 2% として、RUN-5 の時の解析と実験で得られた上部スラブの水平応答加速度の加速度応答スペクトルと変位応答スペクトルを求め、 図 12 にそれらの比較を示す。

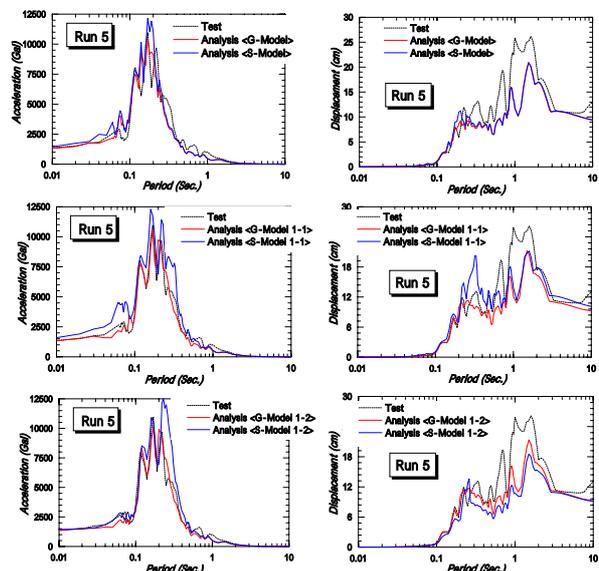


図 12 上部スラブの応答加速度の応答スペクトル

加速度の応答スペクトルの比較によって、0.2秒から0.4秒までの周期を除いて、分布質量モデルの加速度の応答スペクトルは実験結果の方とよく対応した。集中質量モデルの加速度の応答スペクトルは、実験値より高いことがわかった。また、離散ひび割れモデルを用いた場合の解析結果は、分布ひび割れモデルのみの場合より実験結果と良好に対応した。

変位の応答スペクトルについての比較により、周期0.2秒から11秒までの解析で得た変位応答スペクトルは、実験結果より約25%小さくなっている。しかし、離散ひび割れモデルを用いた場合の解析結果は、分布ひび割れモデルのみの場合より良好な対応にあると考えられる。

4 解析精度向上に向けての検討

4.1 試験体モデル化

解析結果に基づき、**分布質量の普通モデルと集中質量の簡易モデル**は、試験体の動的特性を表現できた。最大耐力まで、離散ひび割れは1箇所と2箇所に入れる場合の水平応答加速度の時刻歴は、分布ひび割れモデルのみの場合より実験結果と良好な対応があった。また、上部スラブの慣性力 - 水平変位の関係により、解析結果は、実験の結果よりエネルギー吸収を小さめに評価することがわかった。

4.2 ひび割れモデル

RUN-1 から RUN-4 までの解析で得た動的応答時刻歴では、分布ひび割れモデルと離散ひび割れを併用した場合は、分布ひび割れモデルのみの場合とほぼ同じであった。RUN-5 の時、壁の脚部分のコンクリートには、離散ひび割れモデルよりひび割れ面のすべりを考慮した解析結果は、分布ひび割れのみの場合より良好な対応を示した。特に、水平応答変位の時刻歴は実験結果との対応が良くなった。

従って、本研究で対象とした試験体に対して、解析モデルに分布ひび割れモデルと離散ひび割れモデルを併用する必要がある。

4.3 材料モデルの検討

本研究では、コンクリートの繰返し載荷時の

履歴モデルは原点からの接線剛性によって決めた。RUN-1 から RUN-4 まで、コンクリートの塑性が十分に発生していなかったため、水平応答時刻歴は、実験結果と良好に対応した。RUN-5 の時、コンクリートの塑性が十分に発生し、原点からの接線剛性の履歴モデルはコンクリートの劣化を表現できないので、解析での水平応答変位は実験結果と大きな相違が生じた。また、上部スラブの慣性力 - 水平応答変位の関係より、エネルギー吸収が小さいことがわかった。しかし、原点からの接線剛性モデルは試験体の動的特性を表現できることがわかった。

今後、繰返し荷重及び地震動を受けるコンクリートの軟化、劣化及び損傷をより適切に表現できる繰返し載荷の履歴モデルを用いて動的応答解析を行う必要である。

5 結論

(1) 分布質量の普通モデルと集中質量の簡易モデルの動的 FEM 解析により、試験体の動的特性を表現できた。

(2) 繰返し載荷時の材料モデルとした原点からの接線剛性は、試験体の動的特性を有効にシミュレーションできることがわかった。

(3) 最大耐力まで、分布ひび割れモデルのみを用いた解析モデルは、実験体の動的特性を再現できた。

(4) 最大耐力以後の大変形では、耐震壁のひび割れ面の滑りが存在するので、FEM 解析でもひび割れ面の滑りを考慮することが大切である。

参考文献

- (1) Seismic Shear Wall ISP NUPEC's Seismic Ultimate Dynamic Response Test, Comparison Report, Committee on the Safety of Nuclear Installations OECD Nuclear Energy Agency, General Distribution OCDE/GD(96)188, NEA/CSNI/R(96)10, Le Seine Saint-Germain-12, boulevard des Neiges F-92130 Issy-les-Moulineaux (France).
- (2) Dachang ZHANG, Takashi KASHIWAZAKI, Hiroshi NOGUCHI, Dynamic FEM Analysis OF Reinforced Concrete Shear Walls Subjected to Dynamic Loads, コンクリート工学年次論文報告集, JCI, Vol.24, No.2, PP73-78, 2002,6.
- (3) Nonlinear Analysis, DIANA User's Manual, Release 7, 1998,8.