

3. 7 実大振動台実験結果の設計法への反映

詳細設計法の構築にあたって、今年度様々な課題について検討を進めてきた。特に実大振動台実験による構造力学的に未解明な事項の解明は設計法構築のために重要であり、詳細なモデルを用いた時刻歴解析による事前解析（応答予測）および実験後の結果の検証と柱脚及び上部構造の挙動の解明に取り組んでいる。また実験直後および試験体解体時の詳細な損傷観察の結果との照合を進めている。まだ最終的な結論を出せる段階ではないが、設計法の構築にあたって重要と考えられる事項の中から3つの課題を取り上げ、実験結果を設計法へ反映させるための考え方および方向性について以下に述べる。

3. 7. 1 石場建ての設計法

最初に伝統的構法の設計で懸案となっている石場建ての設計法について述べる。

石場建ての設計法として、大きく二つの手法が考えられる。

柱脚の移動を拘束する設計法

- ・水平方向の移動および上下方向の移動を拘束する手法
- ・水平方向の移動のみ拘束する手法

上記2つの考え方があるが、都心の町家のように隣棟間隔をほとんど確保できない場合等は、このような設計法が必要な場合もある。

① 柱脚の移動を拘束しない設計法

ここでは、②の柱脚の移動を拘束しない設計法について、その考え方および設計の方向性について述べる。

過去に起きた地震で建物の柱脚の移動例が報告されているが、設計法の構築のためには柱脚の移動が起きても建物が安全でなければならない。そのため柱脚の移動による上部構造の地震時挙動に与える影響および安全性を要素実験および実大振動台実験により検証し、さらに詳細モデルによる時刻歴解析により実験結果の分析を行い柱脚の地震時挙動の解明を進めている。

実大振動台実験では「稀に発生する地震時には建築物にほとんど損傷が生じない」、「極めて稀に発生する地震時にはある程度の損傷は許容するが崩壊・倒壊しない」という大前提を概ね満足する結果となり、石場建ての設計が十分可能であることを実証できたと考える。

実大振動台実験で、試験体 No.1、No.2、No.4（すべて石場建て・柱脚の拘束なし）について、柱脚の移動および上部構造の挙動・損傷の概要は以下の通りである。

柱脚の移動については主として試験体 No.1・No.2 で検証を行ったが、稀に発生する地震（BCJ-L1）時には上部構造の耐力や入力地震動の種類を変えた場合も含めてすべての加振で移動は認められなかった。また、極めて稀に発生する地震（BCJ-L2 および JMA 神戸 NS）時については、試験体によっては概ねすべらない場合もあったが、全試験体の滑り量は最大で 13cm と柱径（15cm）以下で、概ね実験前の予測の範囲内であった。

柱脚の移動の影響によると考えられる上部構造の損傷については試験体 No.1・No.2 で足固めと柱の間がわずかに開く（数ミリ程度）現象や込込に曲がりや割れが生じたが、最も大きな損傷として No.4 試験体の①⑥柱(隅柱)と足固め仕口・接合部でのほぞの破断が認められた。この部分は両方向に偏心があるために柱脚の移動が大きく、複雑な応力が作用したことが損傷の主要な原因の可能性はあるが、原因については今後詳細な検討が必要である。

これらの実験結果を踏まえて設計法での考え方および方向性を以下に示す。

「設計法での考え方および方向性」

入力地震動のレベルについては、建築基準法で想定されている 2 つのレベル（稀に発生する地震および極めて稀に発生する地震）およびこれらを超えるレベルの巨大地震について、考え方および方向性を示す

◆ 稀に発生する地震時には柱脚は滑らないことを前提とした設計（注 1）

◆ 極めて稀に発生する地震時には柱脚の滑りを許容した設計（注 2）

◆ 巨大地震時には柱脚の滑りを前提とした設計（注 3）

礎石・基礎および上部構造の安全性については別途検討する（注 4）

（注 1） 建築物の耐用年限以内に数度遭遇する可能性のある地震（稀に発生する地震）に対しては、柱脚は滑らない設計とする。実大振動台実験では滑りは認められなかったが、仮に滑るケースがあるとすれば、どのような場合かを事後解析で検証し、必要があれば滑らない条件を検討する。

（注 2） 滑りを許容した設計法の構築のためには、滑りに関する定性的・定量的な検証が必要である。ここで定性的とは、滑りに関してたとえば上部構造の耐力が大きい方が滑りやすいなど、滑りに関係する事項と滑りとの関係を明らかにすることを意味する。実大振動台実験の結果は、極めて稀に発生する地震時に概ね滑らないか滑り量が柱径以内であることを確認しているが、実験後の詳細な時刻歴解析では実験結果に関するシミュレーション解析を行うほか、パラメータ（柱脚の滑りに影響を与えると考えられる摩擦係数や上部構造の耐力等）を変化させて解析を行い、滑りに関する定性的・定量的な検証を行う。滑り量をどう設計に反映させるかは今後の検討課題である。柱脚が礎石から落下しないことを原則とするが、そのための礎石の最小径についても検討する。

（注 3） 巨大地震に対しては、建築物に過大な入力作用させないために、柱脚の滑りを前提とした設計とする。このため、（注 2）と同様に詳細な解析を行い、どの程度の地震入力の低減効果が期待できるかを検証する。実大振動台実験結果からは滑り量は最大で 18.9cm 程度に収まっているが、滑り量についての検証も行い、礎石の最小径に関する推奨値を検討する。

（注 4） 礎石および基礎の安全性の確認

礎石が移動・転倒しないことの検証方法を、礎石と基礎との関係において、具体例に基づいて検討する。また、柱脚の浮き上がりによる礎石への衝撃力に対して礎石が割れないための条件を検討する。

・上部構造の安全性の確認

実大振動台実験の結果と事前の詳細解析の結果からは、柱脚が移動することで上部構造への入力低減効果が認められるが、実験後の解析において再度低減効果の検証を行う。低減効果が明確になれば上部構造が同じ構造であれば、層間変形の大きさは柱脚固定とした方が大きくなる。限界耐力計算では直接柱脚の移動を考慮した検討は行えないので柱脚固定として計算を行っているが、この計算の方が上部構造の変形が大きくなることで、安全側の検討であると判断できる。一

方で、柱脚の移動により最も大きな影響を受けると考えられる柱と足固め仕口・接合については一部で大きな損傷を受けたことから、この部分の安全性に関する検証が重要になる。

「重要な設計および検討課題」

- ・柱脚の移動に関する定性的・定量的解明
- ・石場建てによる上部構造への入力低減効果の検証（詳細なモデルによる解析）
- ・礎石および基礎の設計方法
- ・足固めと柱の仕口・接合部の安全性の検討方法
- ・足固めと柱の仕口・接合部のありかた・新接合方式の検討

3. 7. 2 偏心の扱いについて

建物の耐震性能に与える偏心の影響については、過去に偏心による振れ振動に起因すると考えられる建物被害が顕著に見られたことから、現行の設計法（許容応力度計算・保有水平耐力計算）でも重視しており「偏心率」として設計法に取り入れている。その基本的な考え方は以下の通りである。

地震時に重心と剛心が一致しないと建築物が剛心周りに回転するため振れ振動が生じ、建築物の耐震性能に大きな影響を及ぼすため規定されたもので、剛心周りの振れ剛性と偏心距離から求めることになる。この計算は「剛床仮定が成立」することが前提条件となっていて、偏心率の計算は通常「鉛直構面が弾性時の剛性」により計算している。これは、例えば、鉄筋コンクリート造の場合、耐震壁の偏りが偏心の原因になることが多いので、通常大地震時には耐震壁はせん断降伏することによるせん断剛性低下により剛性が小さくなるため偏心が小さくなる。このため偏心率の計算は弾性時の剛性に基づいて計算した方が大きな値となり、偏心率が一定値(偏心率0.15)を超えると必要保有水平耐力を大きくする必要があり、その結果として大地震時には安全側の設計となる。

4号建築物（木造）の場合

1981年の耐震規定の改定では4号建築物に関する規定はなかったが、2000年の法改正に伴って、新たに告示が追加された。

在来軸組構法でも軒の高さが9mを超える場合や、最高部高さが13mを超える場合は偏心率の規定が適用される。4号建築物の場合は、この規定に該当するのが平成12年建設省告示1352号に示されている、軸組配置の1/4ルールと考えられる。

偏心の影響が上部構造の応答に大きな影響を与えることは、詳細な解析（事前解析）により予測されていたが、実大振動台実験により明確になった。

従って、伝統的構法の場合も何らかの形で偏心の影響を設計法に取り入れる必要があるが、現行の偏心率の計算規定をそのまま伝統的構法に適用するには問題があると考えられる。その理由は伝統的構法の特徴として、一般に床の変形は無視できず剛床仮定は成立しないと考えられる。このことは平成18年度のE-ディフェンスでの実験結果からも明らかである。今年度の実大実験

でも偏心の影響を設計法に反映させるために、大きな偏心のある試験体（No.3、No.4）により実大振動台実験を行っている。

以下に伝統的構法に偏心率の考え方を導入する場合の問題点について述べる。

- ① 現行の計算のように鉛直構面が弾性時の剛性に基づいて計算すると、伝統的構法の場合は大地震時には各鉛直構面の剛性が大きく変化するため、稀に発生する地震時の剛性（弾性剛性）に基づく偏心率より極めて稀に発生する地震時の剛性に基づく偏心率の方が大きくなる可能性がある。

下図は試験体 No.3 および No.4 の構造要素の配置と層間変形角 1/50 時の等価剛性に基づいた偏心率（現行規定による）を示している。

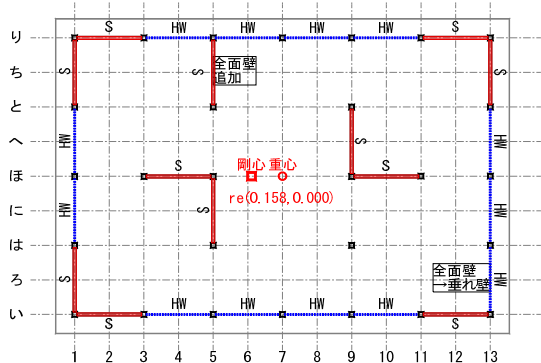


図 3.7.1 No.3(偏心率:X 方向 0.158、Y 方向 0)

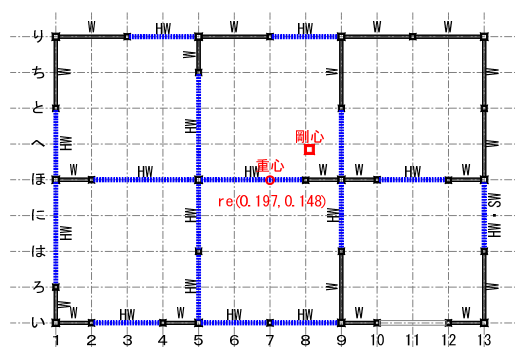


図 3.7.2 No.4(偏心率:X 方向 0.197、Y 方向 0.148)

試験体 No.4 での実験結果から各鉛直構面の層間変形を比較すると、BCJ-L1 時と BCJ-L2 時の応答比較では、⑬通りと①通りの 1 階での最大層間変形の比率は、BCJ-L1 時で約 1 : 2 であるのに対して BCJ-L2 時では約 1 : 3 強となっており、極めて稀に発生する地震時には①通りの変形がより大きくなって変形比率に変化が見られ、偏心距離がより大きくなる方向にある。このことは、鉄筋コンクリート造とは全く逆の傾向と言える。

特に構造要素の土壁については、復元力特性が最大耐力に達した後、ひび割れ発生によるせん断剛性低下のために負勾配になることで、損傷の大きな土壁の剛性低下が顕著になる傾向にある。このため変形が比較的小さく損傷がほとんどない鉛直構面と変形が大きく損傷が著しい鉛直構面の剛性差が大きくなり偏心がより大きくなる可能性がある。

また、試験体 No.4 は両方向に大きな偏心があるために柱脚の滑りにも影響していて、BCJ-L2（長辺方向加振）時に①り柱脚は長辺方向への滑りと同時に短辺方向にも大きく滑っているため、偏心が大きいと滑りについても注意が必要である。

- ② 床の剛性については伝統的構法では一般に剛床仮定が成立しないと考えられるため、水平構面（床・屋根）の変形の影響を考慮する必要がある。どのような影響があるかについては、今後の詳細な時刻歴解析の分析結果によるが、層の最大変形の検討にも影響を及ぼす可能性がある。

① 偏心率の算定方法の見直し

伝統構法では水平構面（床・屋根）の変形は無視できない。実大振動台実験で水平構面の変形が上部構造の応答にどのような影響を及ぼしたのかについて、十分な解明が必要であるが、現行の捩れ剛性の考え方については再検討が必要である。また、鉛直構面の最大変形についても、偏心および水平構面の変形の影響を考慮した検討法を提示する必要がある。

偏心率を求めるための鉛直構面の剛性については、大変形時の剛性をも考慮した手法を検討する必要がある。

② ①の結果を総合的に検討し、新たな偏心率の考え方（呼称も含めて：たとえばねじれ係数）に基づいた設計法が必要になる。

3. 7. 3 1・2階の耐力・剛性バランスと通し柱の効果について

現行の耐震基準では、偏心率と同様に上部構造の応答に大きな影響を及ぼす要因として、剛性率が規定されている。

剛性率は各階の剛性を全階の剛性の平均値で割り算した値として規定おり、0.6 以上が望ましいとしている。剛性率の小さい階は主として階の剛性に大きく寄与している構造要素が少なくなっているか、階高が非常に大きくなっていることが原因で、たとえば鉄筋コンクリート造で1階がピロティになっている場合はこの規定に抵触する代表的なものである。

4号建築物では、規定に該当するものとして1・2階の壁量規定があるが、2階建て木造住宅における過去の地震被害から、被害写真に見られるように圧倒的に1階に大きな被害が集中している。



写真 3.5.1 地震で1階が崩壊した木造建物の被害例



写真 3.5.2 地震で1階が大きく変形した木造建物の被害例

これは1階には建築物の計画上（平面・立面）開口部が多く必要なのに対して、2階は比較的開口部を少なく（または小さく）することが多く耐力・剛性が大きくなっており、結果として地震時には2階の変形が小さく1階の変形が大きくなる傾向にある。さらに偏心が大きいと変形が増幅され大きな被害が生じることになる。

伝統的構法の設計法において、1階の層間変形が過大にならないようにする手段として、1、2階の耐力・剛性バランスを考慮した設計が考えられる。建築物全体で地震エネルギーを吸収することで、1階の層間変形を低減し集中する被害を軽減できる可能性がある。このことを確認するために実大振動台実験ではNo.3試験体では1・2階の耐力・剛性バランスを考慮した試験体と2階の耐力・剛性を大きくした試験体による実験を実施し、結果の比較検討を行っている。

詳細解析による事前応答予測では、1・2階の応答への影響について次の二点が重要な検討事項となっている。

- ・1・2階の耐力バランスを良くする（2階の耐力・剛性を大きくしない）ことにより、地震によるエネルギー吸収を建築物全体で行うことで1階の変形を小さくする考え方。
- ・2階の耐力・剛性を大きくすると、通し柱効果（2階の剛性が大きい場合、通し柱の曲げ戻し効果）で1階の変形が小さくなるとする考え方。

1階の変形に対して、どちらの影響がより大きいかを実大振動台実験により確認を行っている。

No.3試験体の実験結果からは、2階の耐力を大きくした試験体では2階の変形は小さくなり、1階と2階の変形差は大きくなる。2階の耐力を大きくした試験体とバランスを考慮した試験体を比較すると、2階の耐力を大きくした試験体の方が長辺方向加振では1階の変形が少し小さくなり、短辺方向加振では逆に1階の変形が少し大きくなっている。これは実験での最大変形値を直接比較した結果であるが、両者は振動モードや固有周期が異なっているために応答せん断力に違いがあるため、比較のための条件を検討する必要がある。また、通し柱の径や本数を変えた場合や、2階の耐力をさらに大きくした場合など今後詳細な解析等により十分な検証が必要であるが、一つの方向性としてバランスを考慮した設計が有力な手法となり得る。この根拠としては、仮に1階の変形に差がない場合でも、1、2階の変形差を小さくすることで通し柱に大きな曲げ応力が生じにくく、損傷を防ぐための有力な手段になる可能性がある。

設計法で1・2階の耐力・剛性バランスを検討する場合は、偏心率同様に大変形時を考慮した設計法とする必要がある。