

汎用設計法 案

目次

1. 概要	1
1.1 適用範囲、対象建築物	1
1.2 建築物の特徴	2
2. 設計の流れ	6
2.1 設計法の基本的な考え方	6
3. 構造計画と設計のクライテリア	7
3.1 構造計画	7
3.2 地震動	7
3.3 設計のクライテリア	7
3.4 構造要素	8
4. 設計法 A（時刻歴解析）	19
4.1 解析の手法と解析モデル	19
4.2 時刻歴応答解析における解析モデルの特徴	21
4.3 各部のモデル化手法	21
4.4 入力地震動、地盤種別、液状化地盤への対応	26
4.5 減衰	26
5. 設計法 B（限界耐力計算）	27
6. 各部の検討	27
7. 地震以外の荷重・外力への対応	27
8. その他	27

1 概要

1. 1 適用範囲、対象建築物

原則として、すべての伝統的構法木造建築物の設計を可能とするために、最も高度な設計法として汎用設計法を構築する。新築の建築物の他、既存の建築物の耐震性能を把握するために本設計法を使用することができる。

【解説】

原則として、建築物規模、平面・立面・断面形状等で制約を設けず、詳細設計法の規模を超える建築物。免震構造・制震構造を対象に含める。

汎用設計法は、時刻歴解析を必要とする建築物の他に、詳細設計法の適用範囲から外れる建築物に適用することができる。例えば、詳細設計法で設計された建築物について、振れ振動の影響を詳細に検討したい（または検討すべき）場合に、設計を補完する目的で汎用設計法を部分的に使用する。

1. 2 建築物の特徴

伝統木造建築にはさまざまな建築物があり、用いられている構造要素、架構方法も異なる。構造設計にあたっては、その建物の特徴を理解して設計する必要がある。

住宅系	町家型民家、農家型民家、数寄屋・書院、住宅
住宅系大規模	住宅系本堂・本殿、庫裏、旅館・料亭
宗教建築	仏堂・社殿、塔、鐘楼・門
その他	土蔵、城郭建築

【解説】

代表的な伝統木造建築の平面、立面的特徴と耐震要素、構造解析において検討すべき点を以下に整理する。

(1) 町家型民家

平面的には、間口が狭く奥行きが長い。妻入、平入がある。

主な耐震要素は、短辺方向に、小壁付き独立柱、小壁・腰壁付き独立柱、差し鴨居架構、通し柱、土壁・板壁による全面壁が配置され、長辺方向には土壁、板壁などの全面壁が比較的壁が多く配置される。

水平構面は、2 階建の場合には、吹き抜け、屋根の葺き下ろしなど水平構面レベルが明確ではないため立体的な挙動を考慮する必要がある。特に、通り庭上部が吹き抜けの場合には、外周壁への地震力の伝達が複雑な機構となる。吹き抜け部の横架材は、部材の一体化には寄与するが水平構面としての性能は低い。

吹き抜けを有するため、剛性偏心の他に重量偏心も考慮する必要がある。

通り庭がある場合には、柱脚通しが緊結されていない場合が多い。また、隣棟間隔が狭く、建築物の許容移動量が小さいため移動量の検討に注意が必要である。

基礎は、玉石基礎やのべ石による基礎が多く建築物と基礎の緊結方法に工夫が必要となる。

特徴的な地震被害は、梁の脱落、構面毎に異なる変形があり、各部の検討が必要である。

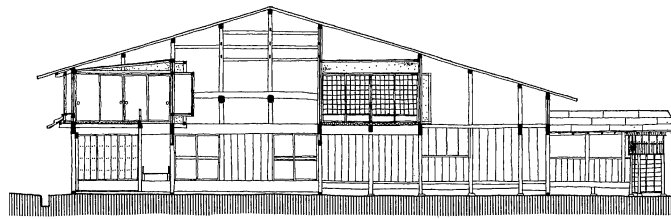


図 1.1 中村家住宅

(2) 農家型住宅

田の字平面型の平面が主で、母屋と下屋で構成されている。平屋が多いが小屋裏を作業場・倉庫として利用するものも見られる。

主な耐震要素は、小壁付き独立柱、小壁・腰壁付き独立柱、差し鴨居架構、土壁・板壁・貫による全面壁である。大黒柱など中央部の太い柱は、屋根架構との接合が簡易な場合もあり、力の流れが複雑になる場合がある。

水平構面は、土間部分には天井がない場合が多く、小屋組・屋根面を含めた水平構面の評価が必要である。また、母屋と下屋で高さが変化する点にも注意が必要である。

北側に壁が多く、耐震要素のバランスが悪くなりがちで偏心率が高くなりがちである。

柱脚は、足固めが設置されている場合が多いが、土間部分では柱間の緊結が少なく各柱の地震時挙動に配慮が必要である。

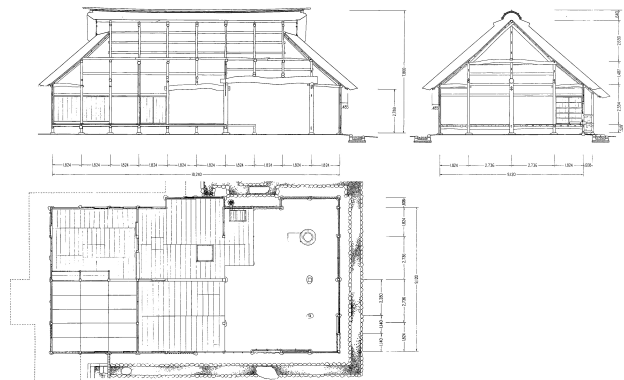


図 1.2 関家住宅主屋

(3) 数寄屋、書院

開口、建具が多く配置される開放的な建築物。主な耐震要素は、小壁付き独立柱、小壁・腰壁付き独立柱、差し鴨居架構であるが、柱径が細いため柱の折損に対する検討が必要となる。そのほか、土壁・板壁・貫による全面壁も用いられる。

水平構面は、天井・小屋組・屋根面を含めた評価が必要となる。

庭側に大開口が多く、反対側に床の間などの壁が配置され耐震要素のバランスが悪くなり偏心が大きくなりがちである。

柱脚は、石場立てであるが床レベルで足固めが設けられている。

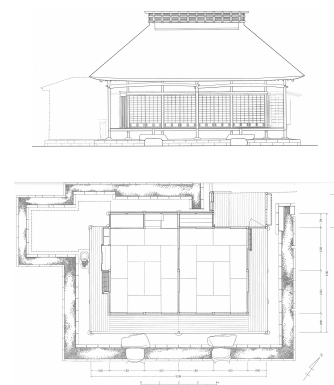


図 1.3 関家住宅書院

(4)住宅

部分2階など現代生活に対応した住宅。

主な耐震要素は、小壁付き独立柱、小壁・腰壁付き独立柱、差し鴨居架構、土壁・板壁・貫による全面壁などの他、1-2階を貫く通し柱も耐震要素として考慮することができる。

2階床レベルでの横架材のレベルが複雑になり水平構面のレベル設定を適切にする必要がある。また、部分2階の2階床と1階屋根による水平構面のレベルの違いなども立体的に考慮する必要があり、小屋組・屋根面を含めた水平構面の評価が必要となる。階段の吹き抜けや天井高を確保する大きな吹き抜けがある場合もあり水平構面の評価が重要となる。

耐震要素の配置は、北側に壁が多く、南側に少なくなり、耐震要素のバランスが悪くなりがちになる。また、部分2階の建築物では、剛性偏心だけでなく重量偏心も考慮する必要がある。

柱脚は、足固め、または土台が設置されており水平構面としての効果を期待することができる。

2階建の場合には、上下階の軸組のずれの影響の他、建築物のアスペクト比により建築物全体のロッキングの考慮も必要な場合がある。

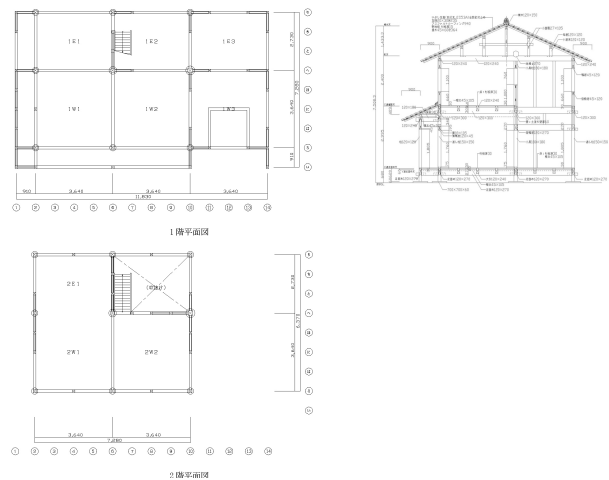


図 1.4 住宅

(5)住宅系本堂、社殿

(6)庫裏

(7)旅館、料亭

住宅と同様の構造要素を備えているが、部屋の大きさ、部材の大きさが大きくなる。

一部屋の大きさが大きくなるため、水平構面には住宅に比べて比較的高い性能が必要とされる。

平屋の場合は、農家型民家と同様に評価可能であり、2階建以上では、住宅と同様の評価が可能である。ただし、階数が大きくなると交通振動などに対して十分な剛性を確保して振動対策も必要となる。

(8) 仏堂、社殿

3間4面堂など対称性、規則性の高い部材配置の建築物。

主な耐震要素は、太い柱による柱の転倒復元力、小壁付き独立柱、小壁・腰壁付き独立柱、差し鴨居架構、土壁・板壁・貫による全面壁がある。内陣柱と小屋組は緊結されていない場合があり構造要素としての扱いに注意が必要である。

小屋組と柱は、組物を介して接続される場合があり、組物の構造性能評価が必要な場合もある。

水平構面は、小屋組・屋根面を含めた評価が必要であるが、主屋と裳階のレベル差なども評価をする必要がある。

裏側に壁が多く、耐震要素のバランスが悪くなりがちで偏心率が高くなりがちである。

床がある場合には、足固めが設置されているが、床がない場合には、外周周りのみ地覆で接続されている。この場合には、各々の柱の地震時の挙動に注意が必要となる。

柱脚は、軸力が大きいいため滑りにくいですが、礎石立ちの場合には、柱の滑り落ちによる部材の外れなどに注意が必要である。

その他、建物高さが高くなりがち。棟高 13m 超では、平面が単純でも詳細設計法適用範囲外となる。

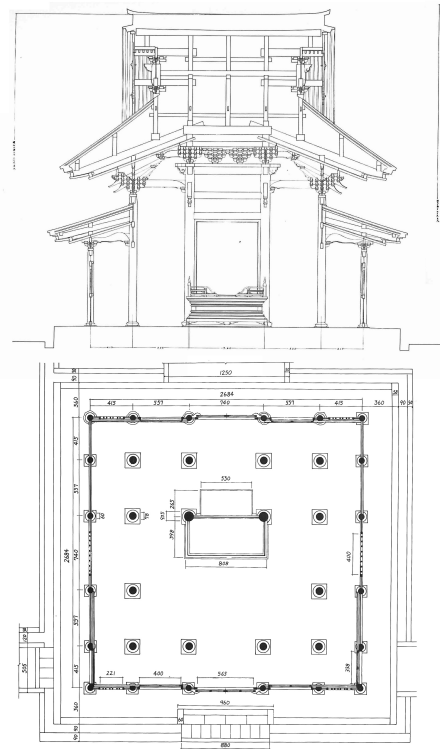


図 1.5 円覚寺舎利殿

(9) 塔（五重塔、三重塔）

多層の屋根をもつ塔状の建築物。初層に本尊を安置する等内部空間としては、全ての層にあるとは限らない。

主な耐震要素は、柱の転倒復元力、差し鴨居架構、土壁・板壁・貫による全面壁等のほか、構造要素としては組物の評価も重要になる場合がある。全体の構成は、塔身の組み上げ構法としては積み重ね構法、長柱構法、櫓構法に分類される。耐震要素として心柱の効果が注目されるが、心柱の設置方法には掘立式、礎石立ち式、初重天井式、懸垂式の 4 種類があり、その機構はまだ明らかにされていない。

また、地震力よりも風圧力が支配的になる場合が多く、風圧力に対する検討も重要となり、柱の傾斜復元力、風圧力の見付面を考えると、45 度方向に対する構造検討が必要となる。

塔状の建築物のため、各層のせん断変形だけでなく曲げ変形も考慮する必要がある場合がある。

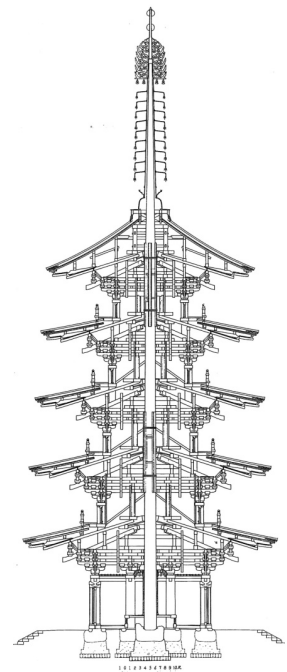


図 1.6 五重塔

(10) 鐘楼、門

楼門、二重門等大規模な門は多層のものもある。構造要素は、仏堂と同様であり太い柱、貫、板壁などがある。1層目は門の機能として開放的になるため壁は少ない。

小規模な、門は四脚門、八脚門など門柱と別に建てられる控柱の数で表わされる。

構造要素は、柱とそれを結ぶ貫、壁などとなる。屋根が大きく質量が上部に集中して、軸部の間隔が小さいため建築物全体での転倒モーメントが大きくなりがちで、地震時に、建築物全体での転倒による被害が多い。また柱脚が水平方向に拘束されていない場合には、「歩く」と表現されるように柱が傾斜復元力により抵抗しながら移動することもある。

鐘楼は、内転びの4本柱と貫によって構成されている。屋根重量が大きく、重心が比較的高いため、小規模な鐘楼では、建物全体で転倒する地震被害が多く見られる。

(11) 土蔵

倉庫や保存庫として建てられた建築物。漆業の作業場として用いられることもある。

倉庫、保存庫としての機能から、耐震性よりも高い防耐火性能が求められている。外周の壁だけでなく、屋根面もあわせて建築物全体が、土壁、漆喰で塗り固められている。

漆喰壁の重量は、非常に大きくなり耐震上は地震力の増大につながる。耐震要素は、壁であるが通常の土壁と異なり、正角の柱を3尺あるいはそれ以下の間隔で細かく建て、土壁で塗り込める。大壁の土壁は、地震時に軸部との接続が不十分で剥落することがあり、壁のうち柱に挟まれている部分の土壁しか機能しないことが多いので注意が必要である。

(12) 城郭建築

天守や櫓など、見晴らしや防御力を備える軍事建築。

軍事建築であるため、防御性が重視され高い耐震性や耐火性能が要求されたと考えられる。

複雑に屋根を重ねるため階層は、外観の屋根の数をあらわす層と内部の床の数をあらわす階の二通りで一層一階などと表せる多層建築である。

形式は、入母屋造りの櫓上に小型の望楼をのせた望楼型と上から下まで大きさが徐々に変化する層塔型に分けられる。

外壁は、下見板張と漆喰塗籠の大壁仕上げとなっている。装飾として柱や長押型を漆喰で浮かびあがらせるような意匠もあるが、構造的には漆喰大壁で塗りこめられている。

構造的には、太い柱と貫、土壁による大壁で構成される。多層建築の施工効率の面からも2層毎の通し柱が用いられる。塗り込められた土壁は、土蔵と同様に軸組との接合方法により、耐震要素として評価できる断面寸法が異なるので注意が必要である。

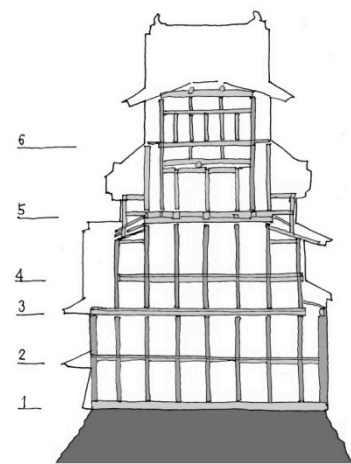


図 1.7 城郭

2 設計の流れ

2. 1 設計法の基本的な考え方

設計法の基本的な考え方・構成は原則として詳細設計法と同様であり、耐震性能検証方法については時刻歴応答解析、限界耐力計算の中から適切な方法を選択して設計を行う。

設計法 A（時刻歴解析による場合）は原則として対象を限定しない。

設計法 B（限界耐力計算による場合）は対象を限定する。

時刻歴応答解析は、法第 20 条第 1 号において、「荷重及び外力によって建築物の各部分に連続的に生ずる力及び変形を把握」して行うことと規定されている。

構造計算の基準については、令第 81 条に、荷重・外力によって建築物の各部分に生じる力及び変形を連続的に把握し、限界値（耐力及び変形限度）を超えないものとするものと規定されている。

構造形式や接合部の詳細については適切にモデル化を行い、解析上の仮定と齟齬のないようにしなければならない。

また、仕様規定が除外できるので新たな材料の使用も可能である。

時刻歴応答解析や除外された仕様規定に対する同等性の評価に当たり詳細な検討を行うことから、安全性の評価を受ける場合には、個々の建築物の実況に応じた荷重・外力や各部材の復元力特性等の設定について高度な判断を要するため、法第 20 条の規定に基づき大臣の認定を受ける必要があることとされている。

限界耐力計算は、施行令第 81 条第 2 項第 1 号ロに規定され、第 82 条の 5 にその構造計算が示されている。

「2007 年版建築物の横造関係技術基準解説書」によれば、「積雪、暴風及び地震の全てに対して、稀に発生する荷重・外力に対して建築物が損傷しないこと、極めて稀に発生する荷重・外力について建築物が倒壊・崩壊しないことをそれぞれ検証することとしている。また、地震に対する検証においては、建築物の変形を算出し、その変形に基づいて建築物の固有周期等を算出することにより建築物に作用する地震力を求めることとしている。このように、全ての荷重・外力について直接的な検証を行っていること、また、建築物に作用する地震力を、建築物の変形を算出することにより、仕様規定に基づく推定によらず算出していることから、耐久性等関係規定を除き、仕様規定を適用しないことができるとされている。」とある。仕様規定が適用されない代わりに、建築物の各部の変形を適切に算出することが必要ということになる。

参考文献：2007 年版建築物の構造関係技術基準解説書、全国官報販売協同組合、2007

3 構造計画と設計のクライテリア

3. 1 構造計画

構造設計は、構造計画とそれを定量的に確認する構造計算、そしてそれを実現する施工時の現場監理で成立する。

構造計画の基本的な要素は、鉛直荷重や地震力、風荷重といった外力に対して建築物がどのように対処するかという問題と、その建築物の用途・機能とのバランスをどのようにとるかという問題である。これまで、木造建築では様式や間取りが優先され構造計画が軽視される傾向にあったが、本来、伝統木造建築では、建築物を構成する構造要素が経験により適切に配置されていたはずであり、新たに建設される伝統木造建築の設計においても、適切な構造計画を立案する必要がある。

3. 2 地震動

地震動は、稀に発生するもの、極めて稀に発生するものの2種類を作成する。それぞれ減衰5%に対応する加速度応答スペクトルを規定の値とし、さらに地盤増幅を考慮して算出する。必要に応じて、巨大地震に対する検討も行う。この場合、地震の発生機構のばらつき等を考慮して、複数の地震波を作成してそれぞれに対して検討を行う必要がある。

また、敷地の状況を考慮したいわゆるサイト波や過去の観測記録に基づく地震波等を用いることが適当な場合があるため、安全性を確認するための地震動の作成にあたっては、建築物の振動性状とともに地盤条件等についても配慮が必要である。

3. 3 設計のクライテリア

(1) 上部構造

原則として、地震動レベルに応じた建築物の限界層間変形角および各部の損傷の程度、柱脚の条件は詳細設計法と同様とするが、建築物の要求性能にあわせて適切に設定する。

また、建築物全体の応答変形だけでなく各部の局所的な変形、破壊に対する安全性を確認する。

損傷限界の目安は、 $1/90\text{rad}$ ・ $1/60\text{rad}$ 、安全限界としては重心位置で $1/20\text{rad}$ 、最も変形の大きい構面で $1/15\text{rad}$ 程度であるが、対象建物の特徴、使用する構造要素に応じて適切に設定する。

安全限界の設定にあたっては、耐震要素において塑性率が大きい場合の負勾配領域での限界耐力計算の信頼性が重要であり、塑性率の基準点を適切に評価する必要がある。大変形時には各耐震要素は負勾配領域に達しており、この領域まで評価する場合には、建築物の損傷状況を適切に評価する必要がある。通常の木造建築の耐震要素では、 $P_{\max}$ の80%まで低下した変形までの領域を評価している。また、損傷度合による修復可能性についても考慮することが望ましい。

例えば、土壁が主体の場合には、土壁の脱落を生じない場合には負勾配を評価することができる。一方、小壁が主体の場合には、荷重変形関係の特異点は、柱の曲げ破壊と小壁の降伏によって生じるため、小壁の降伏による荷重変形の変化は土壁同様に負勾配も評価できる可能性が高いが、柱の曲げ破壊による強度低下は評価しにくい。

また、建築物の変形が増大すると鉛直荷重によって建築物の水平方向に加わる力の増加（ $P\delta$ 効果）の影響が大きくなり適切に評価する必要がある。

(2) 建築物と基礎

建築物と基礎の境界条件としては、

- 1) 水平移動、浮き上がりをともに拘束する。
- 2) 水平移動を拘束し、浮き上がりを許容する。
- 3) 水平移動を許容し、浮き上がりも許容する。

の3通りが考えられるが、水平移動を許容する場合には、想定地震力レベルに応じて適切な滑り量のクライテリアを設定する。

3. 4 構造要素

伝統的木造建築に用いられる構造要素の特徴、変形特性、破壊性状を十分に理解し、適切なモデル化を行うとともに、安全性の検討を行う必要がある。

【解説】

伝統木造建築に用いられる構造要素はさまざまであり、その特徴も独特である。解析にあたっては、その特徴を十分に理解したうえでモデル化、安全性の検討を行う必要がある。以下に代表的な伝統的木造建築の構造要素の特徴を示す。

(1) 柱（傾斜復元力）

古代建築の柱のように、高さに対する太さの比が大きい柱では、柱の傾斜に伴って、鉛直荷重が傾斜を戻す方向に働く、傾斜復元力が生じる。

柱の剛体回転に近い挙動となるが、柱の上下端接合部における柱側の木材の圧縮変形や、大斗や柱盤などの柱の上下に木部材がある場合の木材のめり込み変形が生じるため、図 3.1 に示すような水平荷重に対する荷重変形曲線を示す。すなわち、有限の初期剛性を有し、柱の剛体回転を仮定した場合の最大復元力よりはやや小さな値で最大耐力となり、その後は剛体回転の荷重変形関係に漸近する。

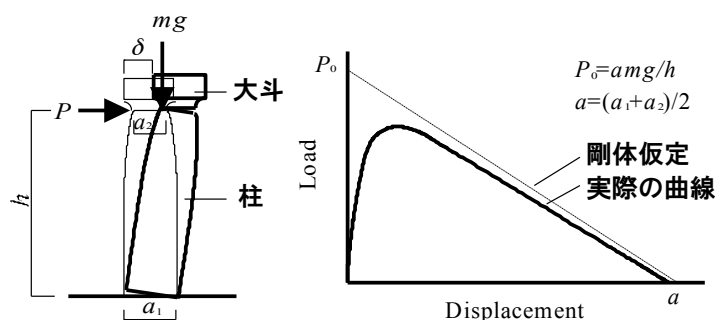


図 3.1 柱傾斜復元力の概要

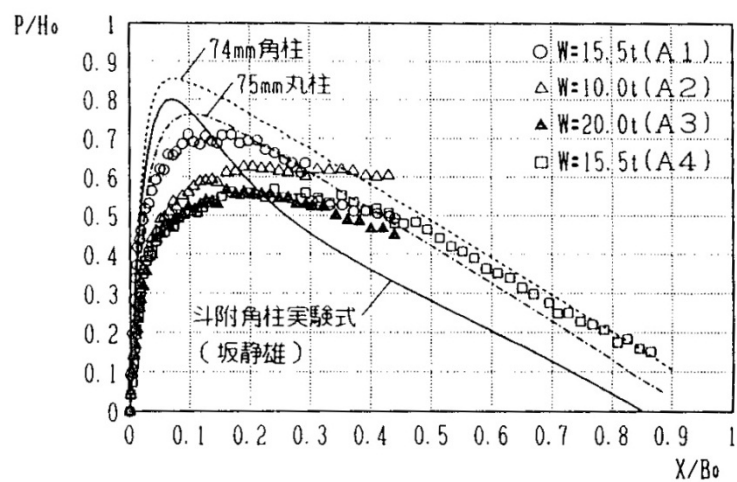
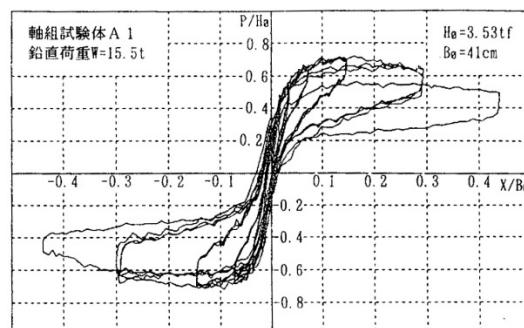
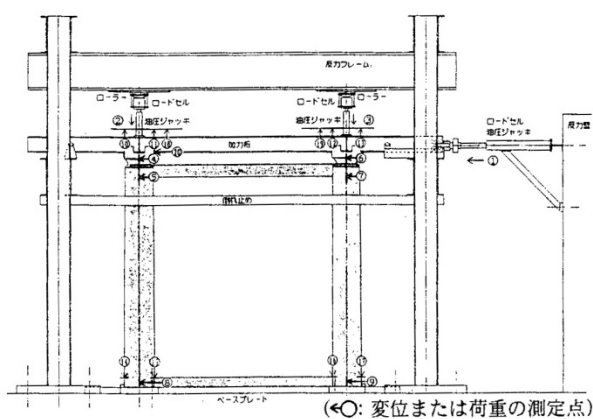
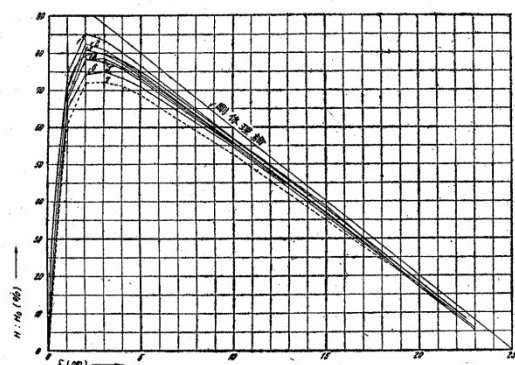
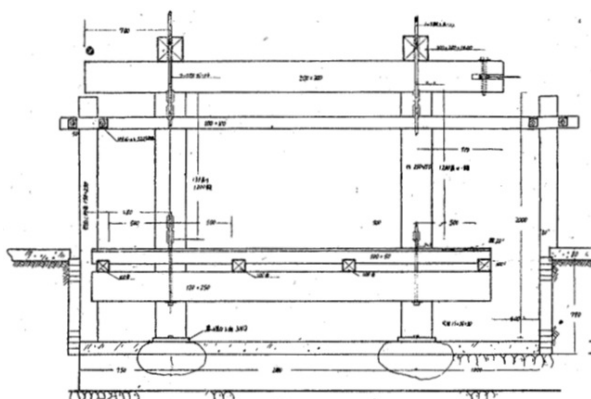
過去に行われた実験例を 2 例示す。

昭和 10 年代に、法隆寺金堂の復元に関連して、坂静雄により実大レベルの柱を用いた一連の静的加力実験が行われた¹⁾。角柱と丸柱、斗付きの場合について、2 本の柱に鉛直荷重を加えながら水平に片押し加力として行われている。柱径は 25cm である。加力方法と結果を図 3.2、図 3.3 に示す。実験結果によると、柱に加力桁（木材）を直接載せた場合には、最大水平力は剛体仮定の理論値の 85%に達し、鉛直荷重の増大及び繰返し加力の影響（疲労）により 75%程度に低下する。また、斗付き角柱についても当初 85%程度のものが、繰返し加力の影響と鉛直荷重の増大に伴う斗尻の潰れにより、75%程度に低下する。

河合は朱雀門復原案の 3 分の 2 スケールの実験を行っている²⁾。加力測定方法と試験結果を図 3.4、図 3.5 に示す。柱径は柱脚で 480mm であり、大斗斗尻幅との平均値すなわち図 3.1 の a の値は 410mm である。最大耐力は、柱脚形と大斗斗尻幅との平均値 a に対して 10%から 20%の間に生じており、その値は剛体仮定の理論値 P_0 の 70%程度である。この最大耐力の P_0 に対する比は、鉛直荷重の大きさによっても変化する。

図 3.6 に河合の実験で鉛直荷重を変えた場合及び坂による実験式を、 a と P_0 の関係で示した。

2001 年に出された文化庁の重要文化財（建造物）基礎診断実施要領では、これらの実験結果に基づいて、図 3.7 のような荷重変形関係を診断用に用いるものとして示している。



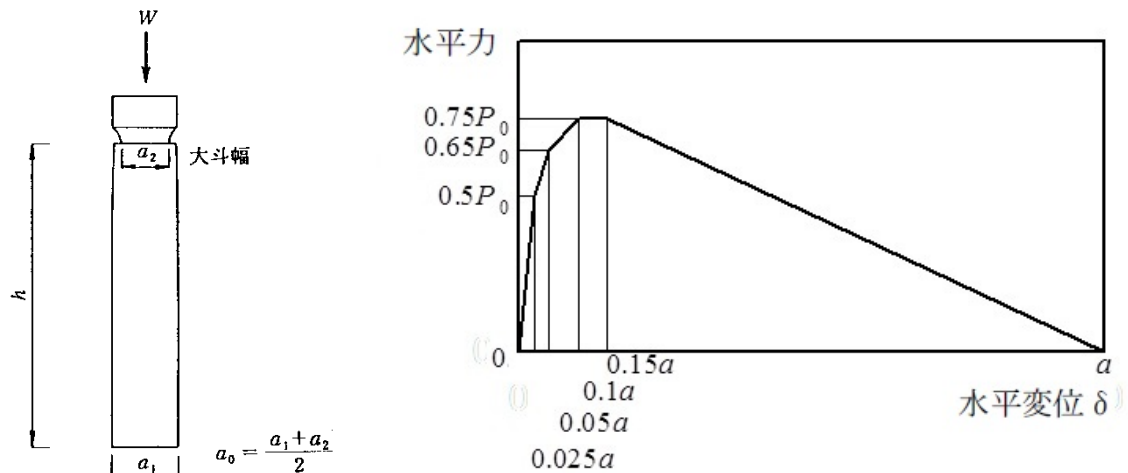


図 3.7 文化財の耐震診断指針における荷重変形関係

柱の傾斜復元力について、地震時挙動その他の特徴をまとめると次の通りである。

柱の剛体回転に近い挙動であるので、荷重変形関係の履歴曲線は非線形弾性に近い曲線となる。このため、履歴減衰は極めて小さいと考えられている。地震時の動的挙動では、水平変位がゼロの点を通る際に、柱の木口が上下の部材に衝突を起こすため、そこでのエネルギー吸収がある。その定量的評価は十分になされていない。

また、柱の傾斜復元力は、このように柱の剛体回転に近い挙動で生じるものであるため、接合部破壊等の大きな損傷にはつながらない。ただし、大変形時には、柱が礎石に接する位置で割裂を生じたり、めり込みを生じる柱上下の部材、すなわち大斗等の部材において、めり込みに伴って割裂等の損傷が生じたりする恐れがある。

振動実験では、柱が移動する現象が確認されている。柱ごとに移動の方向や移動量が異なると、建築物の損傷を生じたり不安定となったりする恐れがある。このような移動を防ぐためには、ダボを設けたり、地覆等の部材を柱両側に設けて横移動を拘束したりするなどの方法が考えられる。

また、一方向に傾斜した状態で直交方向に水平力を受けると、復元力が小さくなることが知られている。従って、3次元モデルや疑似3次元モデルを用いて、2方向の地震入力を考える場合には、両方向に上図の復元力が生じると考えるのは誤りとなる。丸柱の場合、常にXY平面上の変位ゼロの点に向かって、上図の復元力が生じることに注意が必要である。

なお、図の復元力には柱1本分の $P \cdot \Delta$ 効果が含まれた表現となっている。本来、建築物全体で $P \cdot \Delta$ 効果を考えるべきであり、その場合には、柱1本当たりの柱傾斜復元力としては、上図から柱1本当たりの $P \cdot \Delta$ 効果を差し引いた荷重変形関係を用いる必要がある。

参考文献

- 1) 坂 静雄「社寺骨組の力学的研究(第1部、柱の安定復元力)」建築學會論文集 21号 pp. 252-258、1941年
- 2) 河合 直人「古代木造建築の柱傾斜復元力と耐力壁の効果に関する実大実験」学術講演梗概集、C、構造II、pp. 1021-1022、1993年

(2) 小壁付き独立柱

土塗り小壁と柱による架構である。この場合、その耐力特性は、土塗り小壁のアスペクト比、柱径、貫の柱へ固定度により耐力特性が変動する。一般に小壁部耐力が柱の曲げ耐力に勝り、最終破壊形状は柱の曲げ破壊で決定する。文献(建築技術 2011.02、p.148)によれば、150mm角で

欠損断面のある材でも $1/10\text{rad}$ までの曲げ変形能力を有している。この結果だけから判断すれば、極端な短柱としない限り、軸力（自重）伝達に関して問題は生じないと考えられる。なお、モデル化に際しては、壁構面のアスペクト比を考慮した等価ブレース置換、柱の曲げ降伏が発生する部分に弾塑性バネを設ける必要がある。

荷重変形関係は、小壁のせん断変形と柱の曲げ変形の組合せによって表現することができる。図 3.8 のように同一荷重時の変形の和で生成されるため、柱の曲げ破壊の有無で大きく骨格曲線が変わることになる。

本来は、太い柱と小壁によって構成される耐震要素であるが、柱が折れなければ耐震要素として機能する。柱の太さと小壁の厚さ、スパンによって地震時には、さまざまな壊れ方が想定される。小壁の土壁が先行破壊する場合には、土壁の耐力が低下し、柱の曲げ拘束が小さくなり柱の折損は免れるが、耐震性能は低い。小壁の土壁が破壊するまでは、小壁の拘束によって小壁の下端で柱に大きな曲げモーメントが生じる。住宅などで小壁付き独立柱の柱が細い場合には、柱が折損する場合が多い。この場合の柱は、耐震要素であるとともに、屋根などの鉛直荷重（建物自重）を支持する重要な構造要素である。折損によって鉛直支持能力を失う場合には、倒壊の危険性がある。同様に、柱脚の回転を拘束する床、足固めなどがある場合には、床面で柱が折れる場合がある。また小壁のせん断力が大きくなると小壁下端の差し鴨居に大きな引き抜き力が生じて、柱が抜け出し、小壁が落下する可能性がある。（図 3.9）

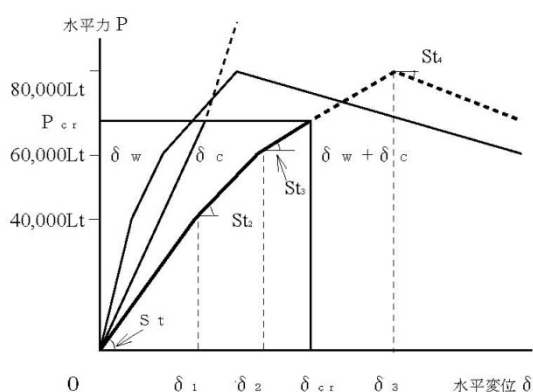


図 3.8 小壁付き独立柱の荷重変形関係

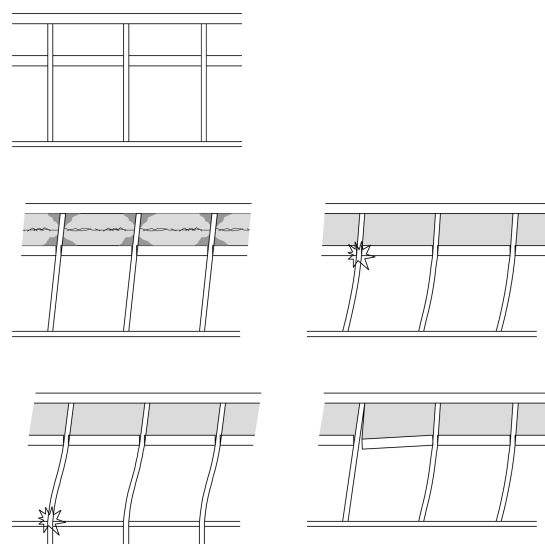


図 3.9 小壁付き独立柱の破壊パターン

(3) 通し柱

小壁付き独立柱と同様に柱の曲げ抵抗による耐震要素である。1 階と 2 階の建築物の剛性の比率に応じて 2 層を貫く柱に曲げモーメントが生じることにより各層の変形が均質化され変形量を小さく抑えることができる。しかし、1 階と 2 階の剛性比、重量比によって効果が異なるため、各層の性能を適切に評価することが重要となる。

また、柱の曲げ抵抗に期待しているため、小壁付き独立柱と同様に曲げ破壊の有無で骨格曲線が大きく変化することになる。柱の曲げ破壊に対しては、床レベルの横架材の架構形式により曲げモーメントが大きくなる部分での断面欠損が大きくなる傾向にあるため、接合方法を含めた詳細な検討が必要となる。

(4) 土壁・板壁

土塗り壁の耐力機構は、壁土、柱脚・柱頭接合部、貫の柱へのめり込みで構成される。また、土塗り壁の破壊モードは、1P 土塗り壁と 2P 土塗り壁で異なり、一般に、1P 土塗り壁では壁土の圧潰（隅角部での圧潰と貫の壁土へのめり込み）、2P 土塗り壁では壁土のせん断破壊、で決定する。ただし、土塗り壁のアスペクト比（縦横比）、貫段数等により、破壊モードは変動する。最大耐力の発生変形は、1P 土塗り壁で $1/30\text{rad}$ 程度、2P 土塗り壁で $1/60\text{rad}$ 程度であるが、軸組の耐力成分を除いた土塗り壁単体の骨格曲線を見ると、双方とも $1/60\text{rad}$ 程度で最大強度に達する。最大耐力後の挙動は、1P 土塗り壁では耐力をほぼ維持する。ことが多いが、2P 土塗り壁では耐力が低下する。軸組の耐力成分を除いた土塗り壁単体の骨格曲線を見ると、双方とも耐力劣化が発生するが、その劣化度は異なり、 $1/10\text{rad}$ 時には 1P 土塗り壁で最大耐力時の 50%、2P 土塗り壁で最大耐力時の 35%程度に劣化する。この差は、2P 土塗り壁では、土壁が小舞から剥離・落下するためである。

1P 土塗り壁では、 $1/90\text{rad}$ 時に隅角部の圧潰、貫に沿った亀裂発生、が見られる。

2P 土塗り壁では、 $1/90\text{rad}$ あたりで隅や横貫に沿った亀裂発生、 $1/60\text{rad}$ で立て貫に沿って斜めのせん断亀裂発生、が見られる。

モデル化に際しては、壁構面のアスペクト比を考慮した等価ブレース置換で良い。なお、その際、柱脚・柱頭接合部、貫の柱へのめり込みによる耐力、を含んでも良い。

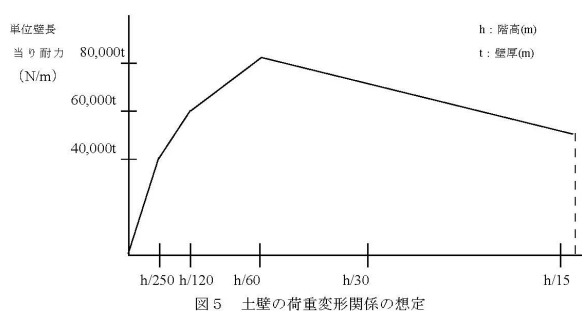


図 3.10 土壁の荷重変形関係 骨格曲線

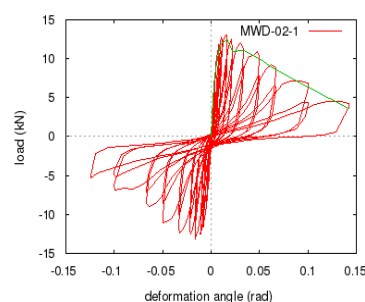


図 3.11 土壁の履歴（静的繰り返し実験）

板壁には、大壁式・真壁式、板材の張る方向、板材の厚さ、貫・間柱の有無などのパラメータがある。この種々のパラメータは、板壁の骨格曲線（剛性、最大耐力）、変形性能、破壊形状、に大きく影響を与える。一般的には、斜め張りの板壁は剛性・耐力が高いが、柱脚の破壊・板材の座屈が発生しやすい。一方、縦もしくは横張りの板壁は剛性・耐力が小さい。また、落とし込み板壁は、部材接合で用いるダボの性能に大きく影響を受ける。従って、使用する。板壁の復元力特性を再現できる等価ブレース置換を行うことが望ましい。

なお、各構面の復元力特性の設定は、実験データに基づいて各設計者が行って良い。ただし、1 ループにおける履歴吸収エネルギーを過大に見積もらないこと、および、初期剛性比例減衰を用いる場合は（ $1/100\text{rad}$ 時の割線剛性時に設定する減衰力と同程度になるように）減衰定数の設定に注意する必要がある。

(5) 接合部

伝統的木造建築における接合部は様々な形式が存在する。連結する部材間をお互いかぎ状に加工し、嵌合する様々な継ぎ手仕口や、栓を結合間の空間に打ち込むことによって部材を結合する仕様、他部材を貫通させるなど、力学的には複雑な機構を有している。主要となる力の作用方向も適用個所により様々である。特に主要な構造要素である壁からの力の伝達に大きく影響を与える

部材接合部においては、その力学的挙動を十分に考慮することが重要であり、接合部分の抜け出しによる耐力機構の影響を考慮して、適切に構造要素をモデル化する必要がある。

差し鴨居一柱仕口部は曲げに対する抵抗機構を有するため、曲げモーメントー回転角関係を回転バネ要素等により適切にモデル化することが望ましい。しかしながら、仕口部に雇ほぞを用いた差し鴨居などの場合は、曲げモーメントが作用する方向により、曲げモーメントー回転角関係が異なることが実験により示されており、このように仕口部のディテールに基づいて力学的な特性を十分に検討する必要がある。

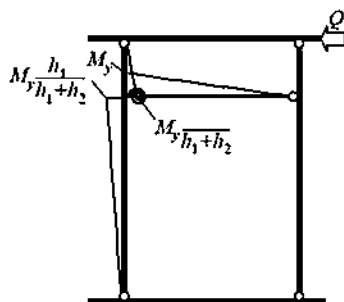


図 3.12 雇いほぞを用いた差し鴨居および柱の曲げモーメント分布

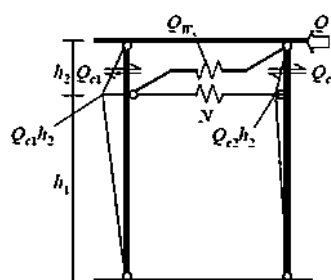


図 3.13 垂壁の単位フレームの解析モデル

また、曲げに対する抵抗が小さな仕口部においても、引張特性が重要となる場合がある。例えば、小壁の耐力機構を検討する際、小壁下の水平部材の接合部が栓等により結合されていないと仕口部の抜け出しにより左右の柱の曲げモーメント分布が異なることが確認されている。これらの仕口部の抜け出し性能が軸組みの耐力特性に影響を与えるために、仕口部に応じた引張性能についても十分な検討を要する。

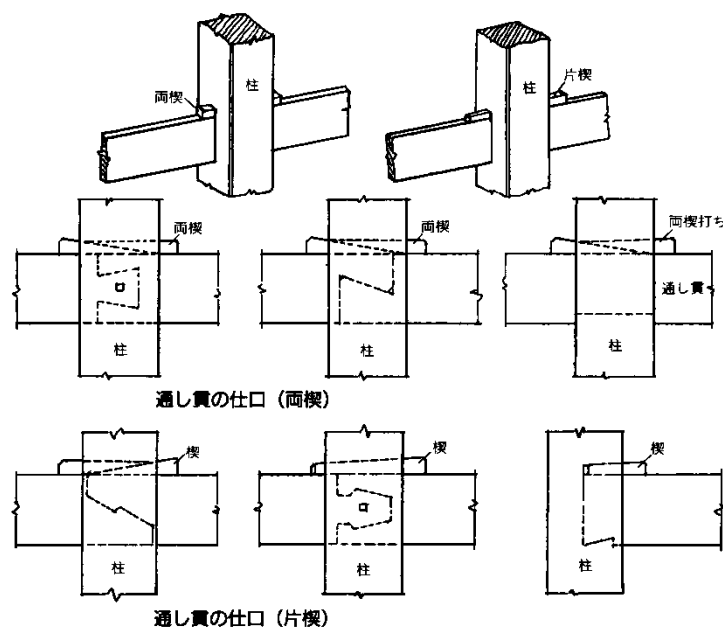


図 3.14 貫の仕口

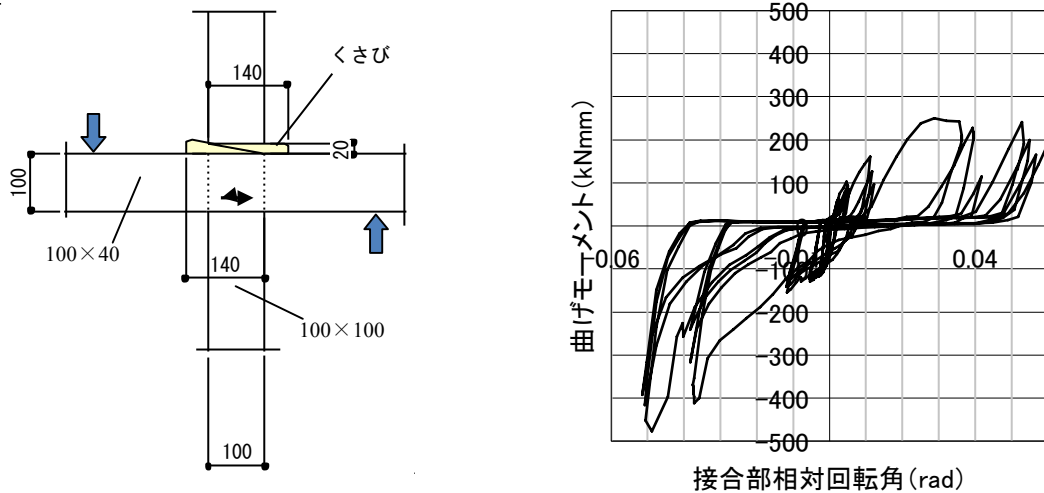


図 3.15 通し貫

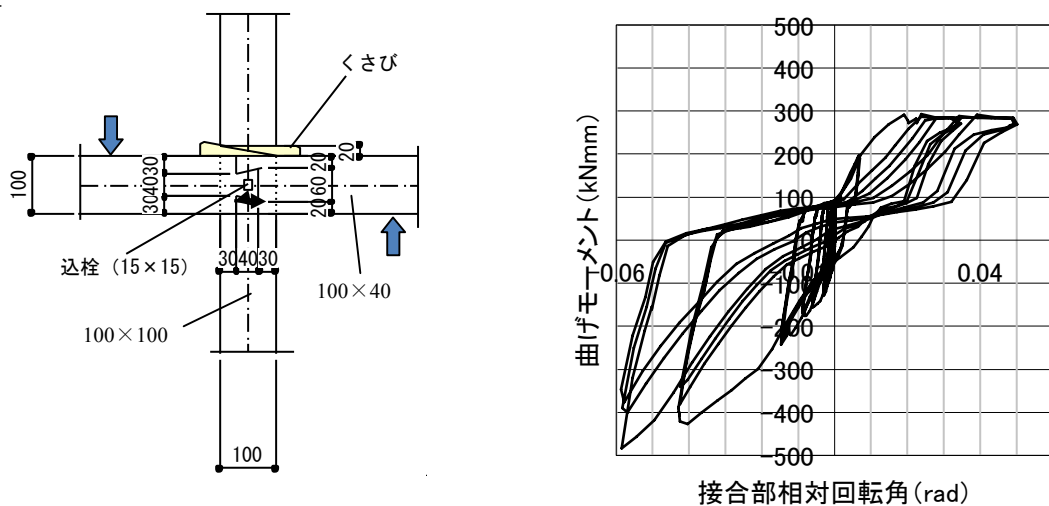


図 3.16 蟻継ぎ込栓打ち

一例として、接合部の形式の中で基礎的な接合部である貫の仕口の例を図 3.14 に示す。また、「通し貫」、「蟻継ぎ込栓打ち」の仕口試験体に対する正負繰返し曲げ実験によって得られた接合部の復元力特性（曲げモーメントー回転角関係）を図 3.15、3.16 に示す。図のように貫の仕口における復元力特性は、仕口部の離間接触によって生じるスリップ型の復元力特性を示し、仕口部のディテールによって複雑な特性を示すため、モデル化においてはこれらのスリップ挙動を適切にモデル化する必要がある。また、完全通し貫では、正負曲げに対して比較的対称形を示す復元力特性を示すものの、蟻継ぎ込栓打ちのような非対称な加工形状の場合には復元力特性も正側と負側で非対称となる場合があるので注意を要する。また、楔の緩み、抜け出しが復元力特性に与える影響は大きく、その統一的なモデル化手法は十分に確立されているとは言えない。また、込栓打ちなどの有無によって引き抜けに対する部材の抜け出しが抑えられる効果が確認されている。

(6) 組物

組物は、軸組と小屋組の間に設置された構造要素である。斗や肘木が木組で組合されて立体的に接合されている。軸組、小屋組とはダボを介して接合されている。組物間は琵琶板や土壁でふさがれている場合には、組物層としてこれらの要素とあわせて評価をする必要がある。

屋根の地震力を下部の軸組に伝達する際は、ダボと木材間の摩擦力によって伝達することになる。木材間の摩擦係数は、0.4～0.5 程度であり、組物部分のせん断バネとしては、応答加速度が0.4～0.5G 以下の場合には、組物はほぼ剛として挙動し、これ以上の応答加速度が生じる場合には、軸組と組物の間に動摩擦による滑り変形を生じることになる。

また、五重塔などアスペクト比の高い場合には、組物部分のめり込みが鉛直方向バネとなり上階の回転変形を生じさせることがある。

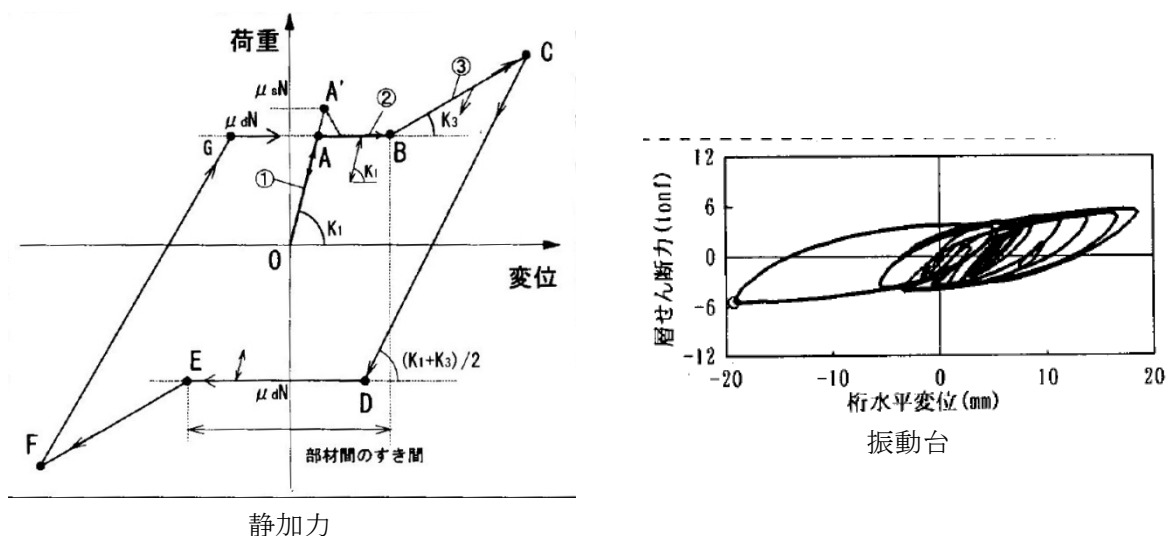


図 3.17 組物の荷重変形関係（水平力）

【参考文献】

藤田香織、木村正彦、大橋好光、坂本功：静的水平加力試験に基づく伝統的木造建築の組物の履歴モデルと剛性評価、日本建築学会構造系論文集 (543), 121-127, 2001-05-30、日本建築学会

(7) 水平構面（床）

水平構面としての床は、横架材、根太、床板、天井によって構成される。伝統的構法では、梁間方向、桁行き方向の横架材が同一レベルで接合されない場合があり、適切な水平構面レベルの設定が必要である。床が水平構面としてせん断力を受ける場合には、周辺の横架材には引張力が生じることがあり、横架材接合部の引抜きに対する検討が必要となる。

水平構面の性能の低い木造建築では、水平剛性に寄与するすべての部材の性能を積み上げていくことが正確な性能把握につながる。各要素の性能は低い、低い性能のものを集積して必要な性能を確保しようとするものである。天井面も水平構面として寄与することができる。木造建築物で用いられる棹縁天井、格天井の静加力実験（文献1）では、棹縁天井では、床倍率換算で0.36程度であり、稲子の跳ねや抜け出し、天井一竿縁の留め付け釘の疲労破壊が見られる。格天井では、床倍率換算0.36程度の性能になっている。木組が主体の格天井では、格縁相欠仕口部分でのめり込みが主な抵抗要素となるため、1/5rad.まで変形しても耐力低下がみられない。

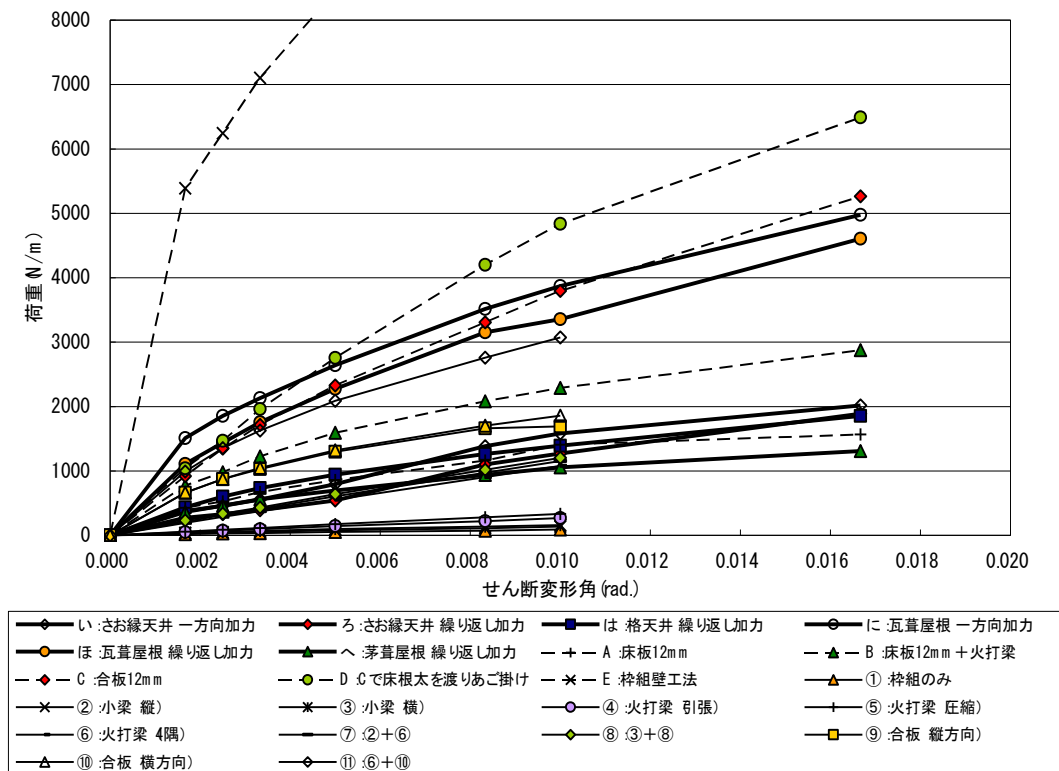


図 3.18 水平構面の荷重変形関係

水平構面は、耐力が漸増するもの、1/25-1/20rad 程度で耐力がピークとなり以後耐力が減少するものなどがある（木造軸組工法住宅の許容応力度設計 2008 年度版）。概して初期剛性が大きい水平構面は、耐力劣化する特性を持つ。

モデル化に際しては、水平構面のアスペクト比を考慮した等価ブレース置換で良い。なお、その際、横架材の引き抜けを表現したい時は、床組の方向性を考慮したモデル化が必要である。また、水平構面の復元力特性の設定は、実験データ（例えば、本委員会で作成した実験データライブラリ）に基づいて各設計者が行って良い。ただし、1 ループにおける履歴吸収エネルギーを過大に見積もらないこと、および、初期剛性比例減衰を用いる場合は減衰定数の設定に注意する必要がある。

(8) 水平構面（小屋組）

水平構面としての小屋組は、天井、横架材、小屋組、垂木、野地板などで構成される。天井を水平構面とする場合には、平面的な検討で済むが、野地板や小屋組を評価する場合には、適切な立体モデルによる検討が必要な場合がある。茅葺き屋根では、下地の竹や丸太も水平構面の要素となるが、接合部の回転剛性を適切に評価するなど詳細な検討が必要となる。

小屋組の立体トラスによる効果は、接合部に引抜き力を生じるため、接合部の検討も重要となる。

屋根材の水平剛性については、茅葺きについて河合（文献 1）、山崎・中尾ら（文献 2）、松田・腰原・坂本ら（文献 3）によるものがあり、静加力実験によると（写真 1）茅自体は剛体に近い変形をし、その下地である叉首、屋中竹、垂木竹といった部材が縄がらみにより半剛接合となり曲げ材としてせん断抵抗することが確認されている（写真 2）。床倍率換算で、0.26 相当程度となっている。瓦屋根については、河合（文献 1）によると、静加力実験から軒に近い下半分の変形は小さく、上半分の変形が大きく、小舞板、土居葺などが一体化して水平構面を形成していること

が確認されており、床倍率換算で 0.90 程度となっている。

小屋組では、茅葺きでも瓦葺きでも屋根面の水平剛性は小さく、水平構面としての性能は低い。実際の木造建築物では、屋根面の他に、小屋組が立体トラス形状になっており、水平構面としての機能を発揮することができる。ただし、小屋組に水平構面の性能を期待する場合には、部材に発生する軸力を確実に伝達することが必要であり、部材の接触で伝達可能な圧縮力だけでなく引張力に対する検討が重要であり、端部接合部の金物補強が必要とされている。

モデル化に際しては、平面要素については水平構面（床）と同様であり、小屋組を立体的に評価する場合には、接合部回転バネを用いた立体解析など接合部のモデル化が重要になる。

【参考文献】

- 1) 文化財建造物保存技術協会 「文化財建造物等の耐震性能の向上に関する試験研究」, 1999
- 2) 石橋庸子, 中尾方人, 山崎裕 「伝統的構法の農家を対象とした茅葺屋根のせん断加力試験」, 日本建築学会大会学術講演梗概集 C-1, 2005 年 9 月
- 3) 松田昌洋ら「水平力伝達機構を考慮した伝統的木造住宅の構造解析」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1, 2006 年

(9) 柱脚、基礎

建物と基礎の境界条件としては、以下の 3 通りが考えられる。

- 1) 水平移動、浮き上がりをともに拘束する（拘束していると仮定できる場合）。
- 2) 水平移動を拘束し、浮き上がりを許容する。
- 3) 水平移動を許容し、浮き上がりも許容する。

軸組工法木造住宅の壁量計算は、1) のように建築物が基礎に緊結され、柱脚などの接合部が耐力壁よりも先行破壊せず、水平移動も浮き上がりも拘束し変形しないことを前提条件として計算法が構築されている。これは、耐震性能検証を簡便に行うために建築物の境界条件に制約を加えているものである。

しかし、実際の軸組工法木造住宅でも、引き寄せ金物などの柱脚接合部は厳密にみれば完全に変形を拘束しているわけではなく、軸方向の変形を生じる。実際、接合部の変形が大きい場合には、柱脚の接合部の変形を考慮した耐力壁の性能評価が行われている。伝統木造建築でも計画的に、2) のように水平移動を拘束し、浮き上がり変形を許容する場合には、柱脚に軸方向バネを配置した解析などにより耐震性能を検証することもできる。この場合、解析モデルが想定した挙動を示す接合を行う必要があるが、伝統木造建築における柱脚のダボ接合は、水平移動を拘束し、浮き上がりを許容した境界条件として評価できる可能性がある。

伝統木造建築でいわれる「石場立て」は、3) の水平移動も許容し、浮き上がりも許容していることになる。この場合には、柱脚に軸方向バネだけでなく、水平方向のバネを設定して水平力時の建築物の挙動を明らかにする必要がある。

柱脚を基礎に緊結しない場合には、柱脚の移動、浮き上がりの有無で建築物の挙動が大きく変化する。柱脚の移動の有無、移動量は想定地震力レベル（最大加速度、継続時間）によって変化するため、想定レベル毎に目標性能を適切に設定する必要がある。

【想定地震力レベルと目標性能例】

稀地震 建物は移動しない

極稀地震 建物は移動するが、移動量は柱径の半分程度。構面間の移動差 $\leq$ 床面の弾性変形

巨大地震 建物は移動するが、礎石を踏み外さない。構面間の移動差 $\leq$ 床面の弾性変形

特に、水平移動の拘束を摩擦力にのみ期待する場合には、柱脚の移動は、柱に生じる総せん断力（各方向の成分ではない）と軸力に大きな影響を受けるため、方向毎の 1 次元入力による検討だけでなく、平面 2 次元入力や上下動との組み合わせについても適切に設定する必要がある。また、建築物の安全性は、1 回の移動量と累積移動量、残留移動量を考慮する必要がある。

上部構造と摩擦力を適切に評価することにより、建築物の移動量を算定することができるが、木、土、石といった自然材料を多く用いた伝統構法では、材料特性のばらつきが大きいいため、次のようなばらつきを考慮した性能検証も必要となる。

- 1) 上部構造の性能のばらつき
- 2) 摩擦係数のばらつき

柱脚の移動量の算定にあたっては、建築物全体での滑り量を算定するとともに局部的に大きな移動が生じることにより上部構造に大きな損傷を生じることがないように、各要素の性能のばらつきと考慮した検討も併せて行う。

- 1) 上部構造性能のばらつき

一般に、上部構造の耐力が大きくなると柱脚の水平移動量は大きくなる傾向にある。このため、上部構造の性能評価においては、耐力の下限值だけでなく上限値についても検討を行う必要がある。

1 階床重量（ M_0 ）の増加は、入力加速度が静止摩擦係数未満の場合には軸力の増加による摩擦力の増加に働くが、移動し始めるとせん断力の増加に転じるため、1 階重量、積載荷重の算定を適切にする。

- 2) 摩擦係数のばらつき

柱脚と礎石の動摩擦係数は一般に、 $\mu=0.3\sim0.5$ 程度といわれているが、自然材料であるため材料自体のばらつき、移動方向、施工誤差（傾斜）によるばらつきがある。摩擦係数のばらつきについては、建築物全体での摩擦係数のばらつきによる挙動の違いと、建築物内での摩擦係数のばらつきについて検討する必要がある。特に、建築物内での摩擦係数のばらつきは、上部構造の耐力要素が偏心していなくても、偏心入力によるねじれ挙動などが生じるため注意が必要である。

一般に、建築物内で摩擦係数のばらつきがあると、摩擦係数の小さい柱が動きやすい傾向にある。

4 設計法A（時刻歴解析）

4. 1 解析の手法と解析モデル

時刻歴応答解析においては、伝統木造の建築物の構造的特徴に応じて適切なモデル化をする必要がある。簡略化された解析モデルは、解析時間短縮や建築物全体の挙動を把握する場合には有効であるが、建築物の性状によっては地震時の挙動の問題点を捉えることができない場合もある。建物の特徴、検討項目に応じて適切な解析モデルを選択する必要がある。

4. 2 時刻歴応答解析における解析モデルの特徴

伝統木造建築の時刻歴応答解析に用いる解析モデルは、質点、構造要素に応じて以下のようなものがあるが、建物の特徴にあわせて適切なモデルを選択する必要がある。

- (1) 質点系モデル
- (2) 質点系モデル（ねじり振動考慮可能剛床モデル）
- (3) 疑似3次元モデル（パンケーキモデル）
- (4) 3次元モデル

【解説】

伝統木造建築の時刻歴応答解析に用いる解析モデルは、質点、構造要素に応じてさまざまなものがあるが、建物の特徴にあわせて適切なモデルを選択する必要がある。特に、伝統木造建築では、葺き下ろしなど層の概念が形成できない建築物、通し柱など各層で完結しない要素があり、3次元モデルが必要な場合も少なくない。

各モデルの特徴を以下に示す。

(1) 質点系モデル

最も単純なモデルは、等価線形化法に用いられる建築物を1質点に縮約した質点系モデルである。

耐震要素の配置バランスを考慮しない荷重－変形関係の単純加算による単純なモデル。

各層1質点とした質点系モデルの他、各層のバネをせん断バネの他、曲げ要素を考慮した回転バネ、通し柱など2層間にまたがる耐震要素を評価する連層要素を組み込むことにより伝統木造固有の耐震要素を評価することが可能である。

1質点に縮約しているため偏心（剛性、重量）、回転慣性などについては別途検討する必要がある

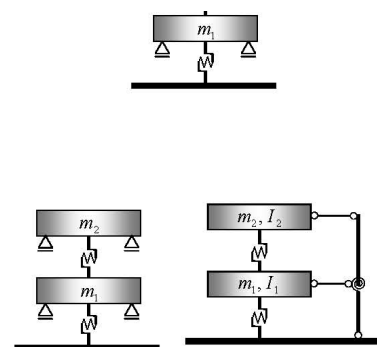


図 4.1 質点系モデル

(2) 質点系モデル（ねじり振動考慮可能剛床モデル）

この解析モデルは、各階で並進(X、Y)および回転(θ)の3自由度を持つ質点系モデルである。従って、X、Y 同時加振の解析が可能である。また、偏心による変形の増大とその壁耐力への影響も定式化内で自動的に処理されるので、偏心の影響を考慮したい場合には有用である。

モデル作成に関しては、「最新耐震構造解析」に重心周りの定式化が記載されているので、参考にされたい。

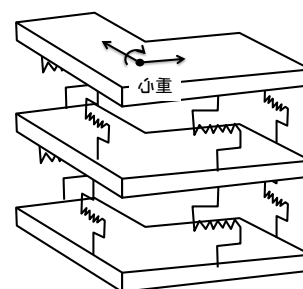


図 4.2 質点系モデル（ねじり）

なお、木質構造特有の柔床を考慮できないので、耐力壁線間隔が大きく、かつ、偏心の少ない建築物では最大層間変形を計算できない場合がある。本モデルの欠点として、柱脚の浮き上がり・通し柱の考慮がアルゴリズム上複雑になること、柔床を考慮できないことがある。

【参考文献】柴田明徳著「最新耐震構造解析」

(3) 疑似 3 次元モデル (パンケーキモデル)

水平構面のせん断変形を考慮した疑似 3 次元モデルである。構面毎に縮約されたせん断バネで水平構面を結ぶことで偏心、水平構面の変形を考慮することができる。

通し柱など連層要素については、質点系モデルと同様に水平構面をまたぐバネを用いることで評価することができる。

しかし、軸力変動、建築物全体のロッキング挙動、上下方向の入力地震動については評価することができない。

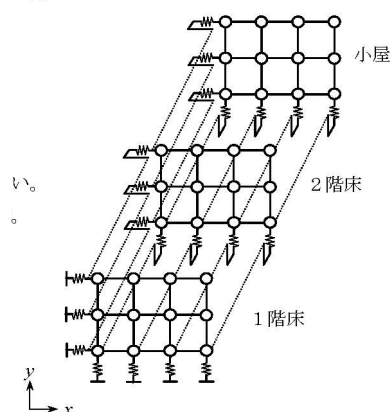


図 4.3 疑似 3 次元モデル

(4) 3 次元モデル

水平構面の変形を考慮した水平 2 次元モデル。耐力壁はせん断バネ、水平構面はせん断パネルとしてモデル化。軸組の耐力は構面の復元力特性に含めて評価。

柱脚の滑り無し。

各階につき、X 方向 4 軸、Y 方向 3 軸の格子点に集中質量を配置する。高さ方向には、3 層とする。質量は、格子点位置の各柱の負担床面積に応じて配分する。

鉛直構面のせん断抵抗については、各階平面等位置の格子点の質点間で、X、Y 方向にせん断ばねを配置する。各階レベルとも、上下 (Z) 方向変位は拘束する。耐力壁と垂壁付き独立柱の復元力を考慮する。

床構面については同一階レベルで、4 格子点で囲まれた床面ごとに、対角の質点間にトラス要素を配置し、それぞれ隣接する質点間には、軸方向には伸縮しないリンク材で連結し、床構面のせん断変形を表現する。

石場建ての摺動については、バイリニア型モデルのせん断ばねを固定面 (地盤) と 1FL (1 階床レベル) 質点との間に考慮する。

減衰については、摺動部については 0、上部構造部については、初期剛性比例型を考慮。

有限要素法による立体骨組み解析。解析モデルはトラス要素、バネ要素、曲げ要素によって構成される。鉛直構面、水平構面の面内の荷重変形特性はブレース置換により表現。バネ要素により接合部における部材相互の離間と破断を考慮。石場建ての場合は柱脚の引張方向耐力を 0 とし、圧縮方向に

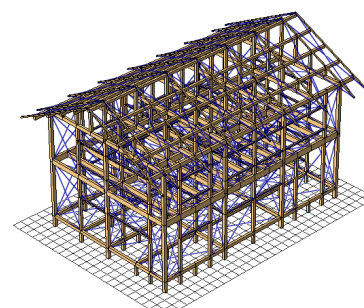
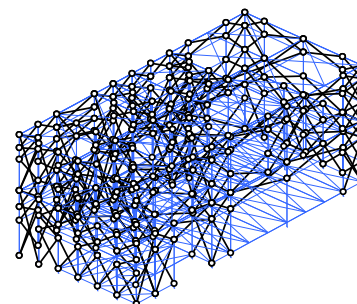
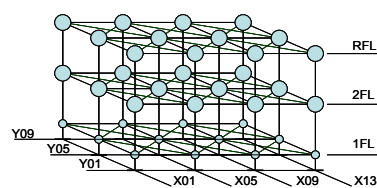


図 4.4 3 次元モデル

は礎石に対する接触剛性に相当する非線形弾性特性を設定する。加えて、柱脚の水平せん断応力が摩擦力を超える場合は水平方向の移動を考慮。

個別要素法による立体骨組解析。軸材は材端の剛塑性回転バネ（塑性ヒンジ）＋弾性梁要素の組み合わせを基本部材としてモデル化。接合部は弾塑性の回転バネと弾塑性バネを組み合わせ。土塗り壁、水平構面は、弾塑性のトラス要素でブレース置換によるモデル化。柱脚の滑りは動摩擦と静止摩擦を考慮した滑り支承バネでモデル化。

4. 3 各部のモデル化手法

時刻歴解析において個別の耐震要素の復元力特性をどのようにモデル化するかが最重要である。個々の復元力特性は、設計データライブラリ、実験データライブラリのデータが参考となるが、建築物全体の挙動把握をするとともに、各部の検討項目を検証できる適切なモデル化を行う。

3 次元立体モデルを前提とすると、各構造要素の特徴を考慮するとモデル化の概要は以下のようになる。

- ・質点は、重量偏心、回転慣性などを検討できるよう適切に配置する
- ・支点条件は、回転バネと弾塑性バネで組み合わせる。
- ・軸材は材端の剛塑性回転バネ（塑性ヒンジ）＋弾性梁要素を組み合わせた基本部材とする
- ・接合部は弾塑性の回転バネと弾塑性バネを組み合わせる
- ・各種耐力壁、水平構面は、弾塑性のトラス要素でブレース置換、せん断バネモデルとする

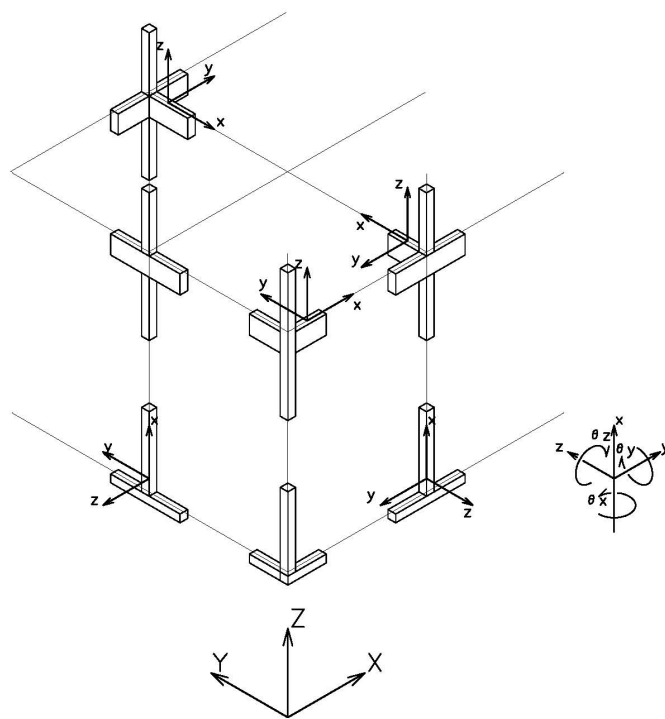
建築物全体が一様に振動しないような場合には、建築物全体での挙動と要素（構面など）毎の挙動を把握したうえで地震時の安全性の検討が必要となる。この際、用いる解析モデルにより検証できる項目には限界があるため、表 4.1 などを参考に検討項目に合わせた解析モデルを適切に選択する必要がある。

一方、簡便なモデルの方が力の流れを把握しやすい場合もあり、むやみに詳細なモデルを用いる必要はない。ただし、簡便なモデルを用いる場合には、仮定した条件が担保されていることを別途確認する必要がある。

柱の転倒復元力、柱脚の摩擦力など軸力に影響を受ける耐震要素を検討する場合には、鉛直荷重および水平力時の軸力変動を考慮できる解析モデルを用いる必要がある。

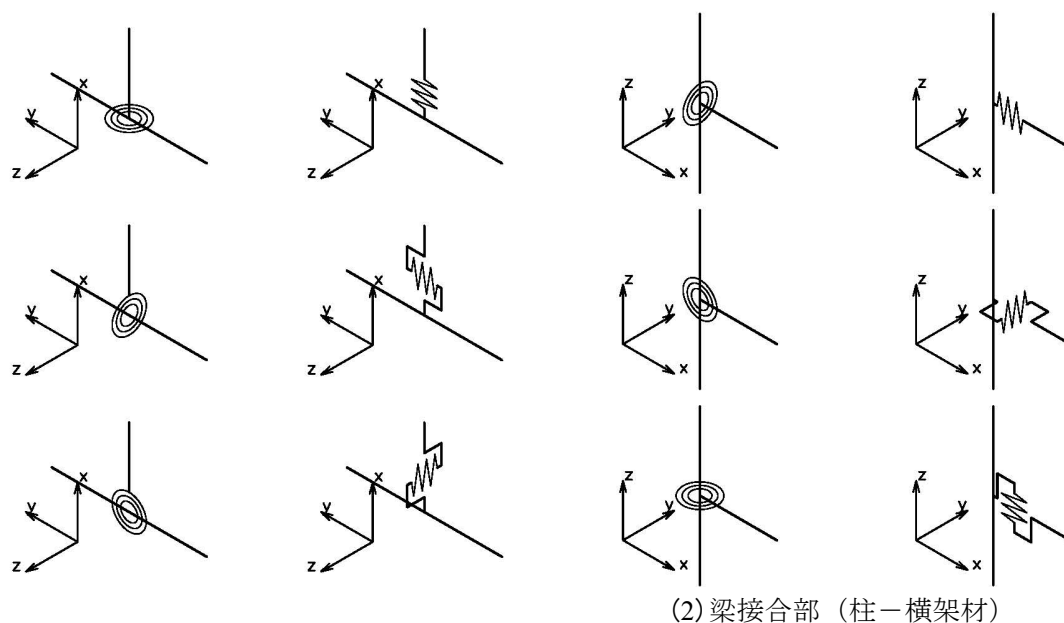
モデル化の一例を以下に示す

詳細解析モデルに入力する接合部バネは、下図のように、最大 6 自由度×2（正負）から構成されることになる。通常解析では、完全剛や完全ピンとして評価され簡略化されているものもあるが、破壊性状を考えながら自由度を下げる必要がある。



X,Y,Z 全体座標系、 x,y,z 部材座標系

図 4.5 座標系



(1) 柱脚接合部（土台－柱）

(2) 梁接合部（柱－横架材）

図 4.6 接合部バネ

(1) 軸組

軸組は折損を考慮するために図 4.7 に示したような剛塑性回転バネ（塑性ヒンジ）＋弾性梁要素でモデル化を行った。履歴特性は図 4.7 左に示した履歴則³⁾を用いた。骨格曲線の曲げモーメントがゼロとなる回転角に達すると、部材が折損したとみなし、部材間の回転バネをピン接合に変更する。このように設定することで、通し柱の折損や、小壁がついた柱の横架材接合部での折損現象を解析で表現することが可能となる。試験体の仕様と、製材品の強度データベース⁴⁾を参考に、通し柱（ヒノキ）は曲げ弾性係数 12GPa、曲げ強さ 57MPa、管柱（スギ）はヤング係数 7.5GPa、曲げ強さ：40MPa と設定した。

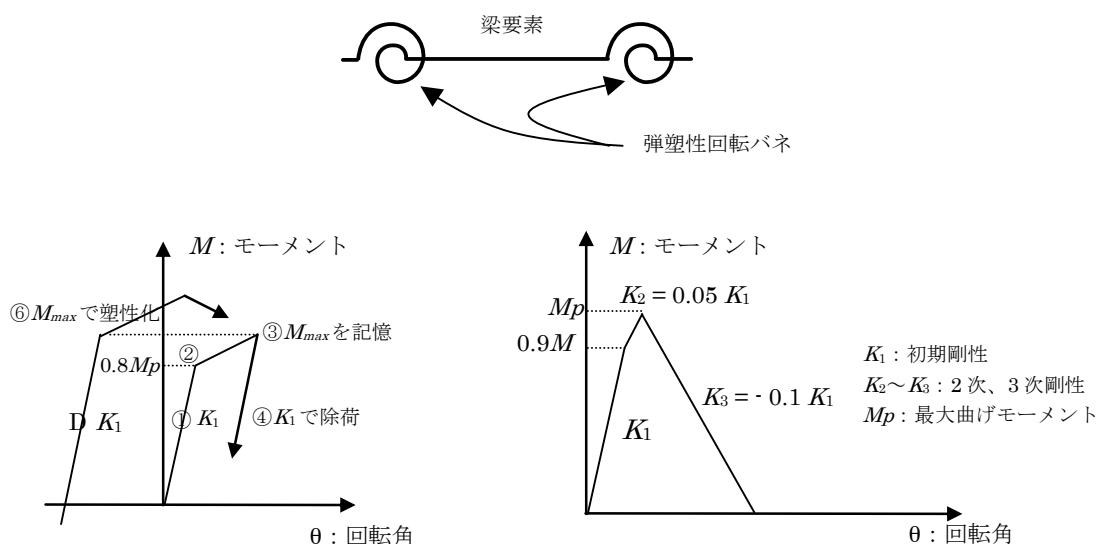


図 4.7 軸組バネの概念図と骨格曲線

(2) 接合部

軸組間の接合部は、図 4.8 (a) に示したような回転バネ＋弾塑性バネ（せん断に対しては剛）を設定した。圧縮・引張の弾塑性バネの履歴特性は図 4.8 (b) に示したような片側弾性＋片側スリップ型とした。回転バネの履歴特性は、図 4.8 (c) に示したようなスリップ型とした。回転バネは強軸、弱軸の各方向に独立に作用する。

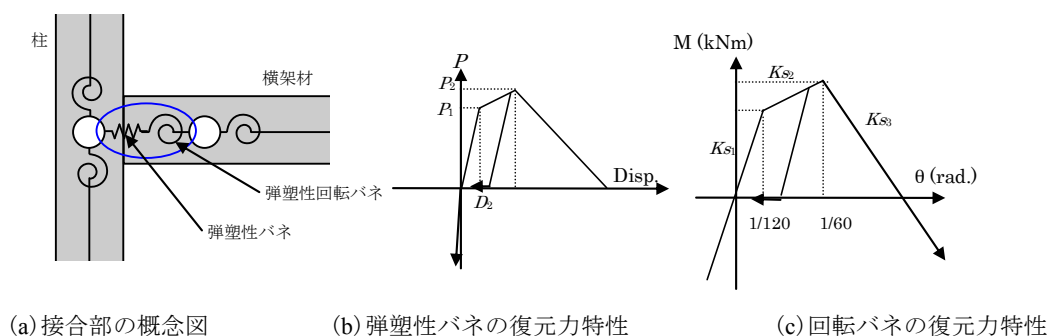


図 4.8 接合部のモデル化概要

(3) 鉛直構面・水平構面

鉛直構面は、図 4.9 に示した通り、トラスバネでブレース置換することでせん断力のモデル化を行った。履歴特性は、図 4.9 に示したバイリニア＋スリップ型履歴則を用いた。水平構面も同様にトラス要素でブレース置換することでモデル化し、履歴特性も同様にバイリニア＋スリップ型履歴則を用いた。

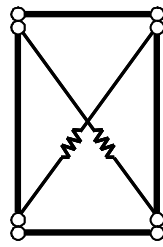


図.4.9 トラスバネによるブレース置換

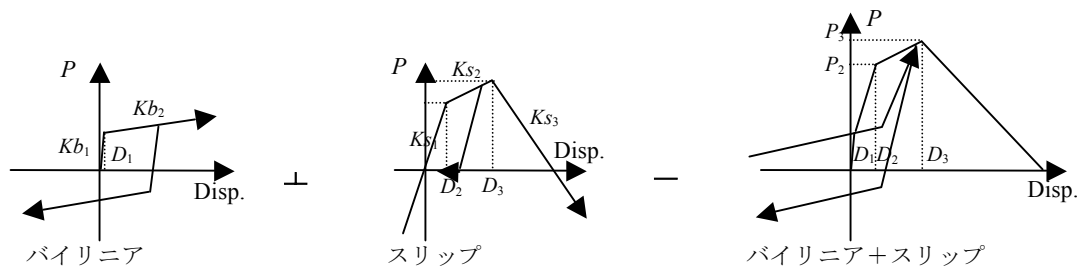


図 4.10 鉛直構面、水平構面の履歴特性

表 4.1 物理現象と解析のモデル化手法

◎ 影響大
○ 影響中
無印 影響小

○ 考慮
△ 拡張すれば可

○ モデル化可能
未 今後開発予定

部位	物理現象	把握したい情報							標準的なモデル化手法				解析WG委員の解析モデル						
		各層の応答変形	各部位の変形	偏心の影響	滑り量(全体)	滑り量(各柱)	浮き上り量	側壁の有無	等価線形化法	せん断パネモデル(串団子モデル)	擬似立体モデル(バンケーキ)	立体骨組モデル	山田串団子モデル	山田魚骨モデル	山田バンケーキモデル(剛)	山田バンケーキモデル(柔)	山田3次元線形モデル	松本2次元 or 3次元線形	中川3次元線形
建物	層の変形	◎	○	○	◎	○	○	◎	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
鉛直構面	せん断変形	○	◎	◎		○	○	◎			○	○					○	○	○
	面外変形																	×	×
水平構面	せん断変形		○	○	○	○	○	○			○	○				○	○	×	×
	面外変形																○	×	×
接合部	引張り変形		○			○	○	○				○					○	未	○
	圧縮変形		○			○	○	○				○					○	未	○
	せん断変形																○	未	剛
	回転変形		○					○				○					○	未	剛
	回転2方向で異なる特性							○									○	○	△
	ねじり変形																	○	△
部材	破壊							○				△					○	未	ピン
	引張り変形					○	○	○				△					○	○	○
	圧縮変形					○	○	○				○					○	○	○
	せん断変形																○	○	剛
	曲げ変形							○				△					○	○	○
	折損							○				△					○	未	○
	通し柱							○				△					○	○	○
	滑り	○	○	○	○	◎	○	○		△	○	○	○	○	○	○	○	○	○
柱脚	斜め方向滑り			○	○	○	◎	○				△					○	○	○
	浮き上がり					◎	○	○				△					○	未	○
	踏み出し						○	○									○	未	○
外力	2次元入力			○	○	○	◎	○			○	○			○	○	○	○	○
	3次元入力				○	○	○	○				○					○	○	○
	傾斜復元力						○	○				△	△	△			未	△	未
その他	幾何学的非線形							○		△	△	△						未	○
	P-Δ効果							○		△	△	○						未	○
建物の特徴	町家型民家										○	○							
	農家型民家								○	○	○	○							
	数寄屋書院																		
	住宅系本堂											○							
	社殿																		
	庫裏								○	○	○	○							
	現代住宅								○	○	○	○							
	旅館料亭								○	○	○	○							
	仏殿											○							
	社殿																		
	塔											○							
	鐘楼											○							
	土蔵								○	○	○	○							

部位	物理現象	必要となる実験	データ蓄積
建物	層の変形	実大建物の実験	○
鉛直構面	せん断変形	壁のせん断試験	◎
	面外変形	壁の曲げ試験	△
水平構面	せん断変形	床・小屋のせん断試験	○
	面外変形	床の曲げ試験	△
接合部	引張り変形	接合部引張り試験	◎
	圧縮変形	めり込み試験	◎
	せん断変形	接合部せん断試験	○
	回転変形		○
	回転2方向で異なる特性	接合部モーメント実験	○
	ねじり変形	接合部ねじり試験	△
部材	破壊		◎
	引張り変形	木材の引張り試験	◎
	圧縮変形	木材の圧縮試験	◎
	せん断変形	木材のせん断試験	◎
	曲げ変形	木材の曲げ試験	◎
	折損	木材の曲げ試験	◎
	通し柱	木材の曲げ試験	◎
	N-M相互作用	軸力、曲げ試験	△
柱脚	滑り	滑り実験	△
	浮き上がり		理論
	踏み出し		理論
その他	傾斜復元力		◎
	幾何学的非線形		理論
	P-Δ効果	実大建物の実験	△

4. 4 入力地震動、地盤種別、液状化地盤への対応

入力地震動は、告示の応答スペクトルから算定した地震波の他、敷地の状況を反映したサイト波を用いることが望ましい。

さらに、「構造関係技術基準」によれば、「建築物に作用する地震力については、偏心の大きな建築物の二方向同時入力、位相差の影響、高軸力や大変形化での P- Δ 効果等については、必要に応じて適切に考慮しなければならない」とある。

(1) 告示の応答スペクトルによる場合

告示 1461 号第四号において、地震動は稀に発生するもの（数度は経験することが予想されるレベル）、極めて稀に発生するもの（安全上検討が必要な最大級のレベル）の 2 種類を作成する。それぞれ減衰 5%に対応する加速度応答スペクトルと規定の値（限界耐力計算に用いるものと同等）とし、更に地盤増幅を考慮して算出する。この場合、地震の発生機構のばらつきを考慮して、複数の地震波を作成しそれぞれに対して検討を行う必要がある。

低層系の建築物に適用する場合に、高次モードを考慮する必要のないものもあることから、告示 1461 号第四号ニでは、同等の地震力（地震層せん断力）を定めてこれによることができるとする特例が設けられている。

(2) サイト波

敷地の周辺における断層、震源からの距離その他地震動に対する影響及び建築への効果を適切に考慮し定める場合の規定により、敷地の状況を考慮したいわゆるサイト波や過去の観測記録に基づく地震波等を用いることが適当とされる場合があるため、安全性を確認するための地震動の作成に当たっては、建築物の振動性状とともに地盤条件等についても配慮が必要である。

(3) 液状化地盤への対応

軟弱地盤で粘性が低く地下水位が高い場合には地盤が液状化する可能性があるが、液状化しないか液状化の程度が「軽微」である必要がある。特に、柱脚の移動を拘束しない場合には、地盤、基礎の傾斜、地盤崩壊は上部構造の地震時挙動に大きな影響を与えるため十分な注意が必要である。

4. 5 減衰

木造建築において、材料自体は脆性的な破壊を生じるため材料性能としての内部減衰は評価しないのが普通である。便宜的に、バイリニア+スリップによる履歴を想定した場合、鉄骨造と同様に減衰定数として $h=0\sim 2\%$ 程度を用いる場合があるが、復元力特性をマルチリニアなど適切に表現する場合には、減衰定数を 0 として評価するのが望ましいが弾性域での評価のために適切な数値を設定する。減衰定数は応答値に大きな影響を及ぼすため、適切な設定が重要である。

一方、材料単体ではなく、架構の塑性化による履歴ループでエネルギー吸収が行われ、比較的大きな履歴減衰を有する。しかし、柱脚滑り、柱の傾斜復元力等、履歴減衰がほとんどない要素もあり構造要素毎に個々に検討を行う必要がある。

構造の減衰の仮定法としては、初期剛性比例型、瞬間剛性比例型などさまざまな提案がされているためここでは定めない。ただし、負勾配領域を評価する場合には、瞬間剛性比例型での評価に注意が必要である。伝統的木造建築物では、変形量によって減衰性能は異なるが、建築物全体として層間変形角 $1/30 \text{ rad}$ における非線形復元力特性による履歴減衰および内部減衰などの和として等価粘性減衰定数 (h_{eq}) が、 $15\sim 20\%$ 程度がひとつの目安となる。

5 設計法B（限界耐力計算）

限界耐力計算においては、建築物の「代表変位」と「有効質量」を用いて地震時の複雑な建築物の動きを1質点系に置き換える必要がある。伝統木造建築では、葺き下ろし屋根など層の定義がしにくく、構成要素も通し柱など単純な層のせん断バネに置換できないものが多く、バネの縮約には適切な解析モデルを用いた荷重増分法または変位増分法による検討が必要となる。

また、柱脚の水平移動を拘束しない場合には、柱脚の滑りについては直接扱えないので、別途検討が必要となる。

6 各部の検討

時刻歴応答解析、限界耐力計算により、建築物の全体の変形がクライテリアを満足していることを確認するとともに、水平構面の剛性が不十分な場合には、局部的な変形にも注意をする必要がある。また、建築物全体で想定している荷重変形関係を保証すると共にその挙動を保証するために、以下のような各部材の安全性の検討を行う必要がある。特に、履歴特性の下り勾配領域まで考慮する場合には、最大変形時のみでなく最大荷重時に対しての検討も必要となる。

1) 柱の折損、2) 継手・仕口接合部の設計、3) 柱脚の設計、4) 基礎の設計

7 地震以外の荷重・外力への対応

建築物に作用する荷重・外力は、地震以外にも風圧力、積雪荷重などがあり、これらに対する安全性の検討も必要である。また、床振動や交通振動といった問題は建築物の構造性能に依存する部分もあり必要に応じて検討を行う必要がある。

時刻歴応答解析における構造計算の基準については、施行令 81 条に、荷重・外力によって建築物の各部分に生じる力及び変形を連続的に把握し、限界値（耐力及び変形限度）を超えないものとするとして規定されているが、これは地震に対していわゆる時刻歴応答解析を実施することを想定しているものであるが、その他の荷重・外力については必ずしもその必要はない。

例えば、風圧力については、各部分に作用する風圧力を施行令第 87 条の規定等をもとに静的な外力に置き換えて計算することが可能である。

8 その他

立体モデルを用いた時刻歴解析により建築物の地震時挙動を明らかにする場合、構造要素により応答に及ぼす影響度は異なる。またモデル化の精度も個々の要素によって異なる。さらに摩擦係数のようにある幅で検討すべき要素もあり、解析結果どのように評価するか、すればよいかが最も重要である。