

「伝統的構法の設計法作成 及び性能検証実験」 検討委員会

シンポジウム 金沢

日時：平成 22 年 9 月 12 日(日曜日) 13:30 ~ 17:20 (12:30 受付)

会場：金沢工業大学扇が丘キャンパス 多目的ホール

〒921-8501 石川県石川郡野々市町扇が丘 7-1

参加費：無料 (定員 250 名)

主催：「伝統的構法の設計法作成及び性能検証実験」検討委員会

共催：金沢工業大学

後援：石川県・金沢市

社団法人 日本構造技術者協会中部支部北陸部会

社団法人 石川県建築士事務所協会



「伝統的構法の設計法作成及び性能検証実験」検討委員会 シンポジウム 金沢

プログラム

12：30 ～ 受付開始

13：00 ～ 開場

13：30 開会 司会進行：金沢工業大学建築学科 教授 浦 親憲

13：30 ～ 13：45 主催者挨拶：金沢工業大学建築学科 教授 後藤 正美

来賓挨拶： 金沢市副市長 森 源二

【第一部 基調講演】

13：45 ～ 14：45

「古代を解く：唐招提寺金堂の保存修理を終えて」株式会社竹中工務店 大阪本店設計部プリンシパルエンジニア 長瀬 正

14：45 ～ 15：00 休憩

【第二部 シンポジウム】

15：00 ～

司会進行：NPO 法人 緑の列島ネットワーク 理事長 大江忍

「伝統的構法の継手・仕口について」 名古屋工業大学大学院工学研究科 教授 麓 和善

「振動論による設計法の考え方」 広島国際大学工学部建築学科 教授 斎藤 幸雄

「構造要素の評価について」 金沢工業大学建築学科 教授 後藤 正美

「E - ディフェンスの震動台加振実験について」 立命館大学グローバル・イノベーション研究機構 教授 鈴木 祥之

16：45 ～ 17：00 休憩

17：00 ～ 17：20 質疑応答・総括

目次

5 ごあいさつ

6 古代を解く： 唐招提寺金堂の保存修理を終えて

株式会社 竹中工務店 長瀬 正

11 伝統的構法の継手・仕口について

構法・歴史部会 主査 麓 和善

18 振動論による設計法の考え方

設計法部会 主査 斎藤 幸雄

25 構造要素の評価について

実験検証部会 主査 後藤 正美

28 伝統構法の実大振動台実験について

検討委員会 委員長 鈴木 祥之

平成 19 年の改正基準法以来、伝統構法の建物は確認申請の受付や工事の着工が著しく減少し、危機的状況に置かれています。そこで平成 20 年度に「伝統的構法の設計法作成及び性能検証実験」検討委員会が設けられ、伝統構法あるいは伝統的構法（以後、伝統構法）の木造建築物の設計法の確立をめざして、設計法の検討、実大振動台実験、要素実験、調査、材料実験等が行われてきました。

平成 22 年度からは、これまでの検討結果を踏まえながら、新しい委員会で石場建て構法を含む伝統構法木造建築物の設計法のさらなる検討を進めていきます。目指すゴールは、実務者が実践的に使え、日本の木の文化の中核をなす伝統構法を未来につないでいくことのできる設計法の確立です。そのために必要となるさまざまな課題を、設計法、実験検証、構法・歴史、材料の 4 部会で検討しています。

6 月 5 日に京都で開催したキックオフフォーラムに続き、今回は、より専門性の高い内容を深く掘り下げるシンポジウム形式で、検討委員会での課題となっている伝統的構法の継手・仕口の歴史的背景、振動論に基づく設計法の考え方、耐震設計で重要な構造要素について解説し、検討委員会委員長である鈴木祥之教授が、平成 23 年 1 月に実施する伝統構法木造住宅の実大振動台実験について概説します。

※この委員会は、国土交通省住宅局による平成 22 年度木のまち・木のいえ整備促進事業のうち「木造住宅・建築物等の整備推進に関する技術基盤強化」事業として実施されるものです。

ごあいさつ

本委員会全体管理責任者
特定非営利活動法人 緑の列島ネットワーク 理事長
大江忍

このたび、伝統構法の木造住宅を多く継承されている地域である北陸の金沢でシンポジウムを開催することとなり、都市では消滅し、地方からも失われつつある伝統構法の技術の復権のために取り組む本委員会の事業に対するご意見・ご要望を賜る機会を持てましたことに謝意を申し上げたいと思います。

本委員会は、本年 4 月に、新委員会として発足し、各部会で会議を重ね、伝統的構法の新設計法を作成すべく、解析のための要素実験を行い、データーを収集し、それに基づいて実大振動台実験をすることで、限界耐力計算法を基にした新しい設計法を作成することを目的に事業を進めております。

また、耐震的な面だけでなく、基準法の見直しを含めて、様々な角度から、伝統構法を分析し、各分野の専門の研究者と実務者の委員から構成し、先人が培った技術や伝統を科学的に分析しながら、データーの収集を行っております。

すでに、土壁をつけた実物大の試験体の制作にも着手し、石場建ての柱脚モデルによる摩擦係数を測定する要素実験なども進めております。

今後、継手・仕口の実験や土壁の実験、天然乾燥材の実態調査や背割による強度への影響など各委員の方々による実験や古民家や文化財の耐久性の調査や古材の非破壊調査や古文書・文化財の修理報告書による継手・仕口の分類など各部会で、積極的に進められております。

今回の委員会では、できるかぎりの広報活動に心がけております。フォーラムやシンポジウムなど一般の方々から直接意見をうかがう場や、ホームページによる進捗状況や委員会の紹介、メルマガでの情報発信、公開実験の実施をしております。来年 1 月には、実物大試験体による振動台実験をイーディフェンスにて公開で行う予定です。今年度末には、東京（3/19）、京都（3/26）におきまして、今年度の事業の報告のためのフォーラムを開催する予定です。

今後共、皆様のご指導ご鞭撻のほどよろしくお願い申し上げます。



「古代を解く：唐招提寺金堂の保存修理を終えて」

株式会社 竹中工務店 大阪本店設計部 プリンシパルエンジニア 長瀬 正

1. 唐招提寺金堂の保存修理

平成 10 年から始まった国宝唐招提寺金堂の保存修理事業が写真 1 のように 21 年の秋に落慶を迎えて無事終了した。国宝クラスの社寺建築の保存修理は、明治 30 年の古社寺保存法と昭和 25 年の文化財保護法を契機に行われているものが多い。いわゆる明治の修理と昭和の修理である。唐招提寺金堂は明治 31 ～ 32 年に大規模な修理がなされているので、一般的な保存修理のサイクルから見れば、次の解体修理まではまだ十分な時間を残すはずであった。ところが今回の修理前の調査によれば、外観上は部材に大きな損傷が生じていないが、柱の内倒れや柱上の組物の回転変形などが観察された。柱の内倒れによる変形は、高さ 5m 前後の柱で最大 12cm あり、柱の傾斜として 1/40 に達している。阪神大震災を契機として文化財建物の耐震についても関心を集めている中で柱の大きな傾きは看過できない問題であると考えられた。

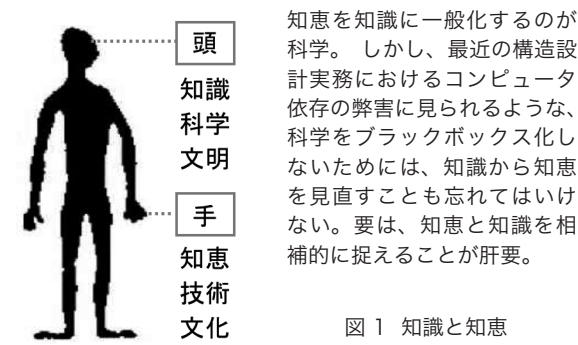
このような柱の内倒れ変形あるいは外倒れ変形は、伝統的な社寺建築に共通して見られる特徴であるが、大虹梁で高く持ち上げられた内陣空間をもつ唐招提寺金堂では特に顕著であり、明らかに構造架構の仕組みに起因するものと考えられた。明治の修理から丁度百年を経た今回の修理は、材料の経年劣化に対する部材補修というよりも、柱の内倒れの原因を解いてその補強を求めるものであった。あわせて耐震性能についても検討を加えるなど、平成の保存修理は、構造上の問題を解決することを主な目的として計画され、構造技術者の参画が求められた。そこで奈良県は技術提案コンペを行って竹中工務店をパートナーとして選定した。

2. 伝統の技

日本の伝統的な社寺建築では、定期的に屋根の葺替えを行い、併せて必要に応じた修理補強を施すことで、現在まで保存継承されている。伝統的構法による日本



写真 1 唐招提寺金堂平成の保存修理落慶法要 2009 年 11 月



	伝統木造のキーワードと解説		現代の用語
システム	解体修理	定期的な瓦の葺き替えと必要に応じた修理。	維持保全 LCM・リニューアル
	手当ての易さ	損傷する部分が決まっている。木は部分的に容易に補修できる。	損傷部位取替
	移築転用	解体運搬が容易なため、場所や用途を変えて使われている。	コバーション・リニューアル
	表わしの構造材	柱や梁、組物など構造材がそのまま表現。	構造デザイン
構造	しなやか	大きく変形できる梁構造。	変形能力
	重い屋根と太い柱	重い荷重のかかった太い柱ほど傾いても元に戻る。	傾斜復元力
	深い軒	建物重量を外に流す。跳ね出し。	天秤構造 転倒安定性
	多くの部材と仕口	接合部の滑りや回転・摩擦で地震エネルギーを吸収。	制震ダンパー
	柱脚や斗のぼぞ	離間・浮き上がり。下からの力を遮断して上に伝えない。	入力低減・ロッキング効果
	心柱	五重塔の不倒神話。	可変剛性
	重ね構造	通し柱がなく上下バラバラな動き。	逆位相相殺効果 制振
材料	ヒノキ	千年以上の耐久性。	高耐久性材料
	木の横鬼い	斗・肘木・貫のめり込み。	ダンパー
	土壁	大変形で壊れて効く。	ダンパー エコ材料
	版築層	何層にも土を突き固めた基壇。	地盤改良 エコ材料
	たたら鉄	和鋼は錆びにくく木を傷めない。	錆びない鉄

表 1. 伝統的木造の技（知恵）：伝統木造の特長の現代的解釈

の木造建築では、柱や梁それに多くの組物を解体して修理できることが、西洋の石の建築にはない大きな特徴であり、千年以上の耐用を可能にしている。さらに、解体修理は建物の保存だけでなく古人の技術を再確認して次の時代に伝承する機会とも考えられる。

国宝クラスの古代木造建造物への現代構造解析の大々的な適用は画期的なことである。筆者らは最新の構造調査・実験・解析技術を駆使して古代の技を解き明かすことを試みた。

科学は連続的かつ体系的であるが、技術は飛躍的または断続的であり、しばしば忘れられることもある。科学を人間の知識（頭）とすれば技術は人の知恵（手）といえる。「技」という漢字が細い枝のような細かい手細工のことを意味するように、技術はいつの時代でも人の手が大きく関与している。人の手が技術の基本とすれば日本の木造建築ほど「技」を育んできたものはない。伝統技術の保存継承の重要性が叫ばれて久しい。もちろん技術の伝承には、技術が手仕事であることから人材の育成によるところが大きいことは明らかであるが、古代の技（知恵）を解き明かして知識とし



写真 2 構造調査・実験

て汎用化していくことも、構造技術者としての技術の伝承の一方法であり、今回の取組の基本的な考え方であった。

「国宝・唐招提寺金堂の保存修理における構造解析を中心とした科学的手法の展開」が 2010 年日本建築学会賞（技術）に選ばれたことは、技術に対するこのような筆者らの考え方とその成果が評価されたものである。

伝統技術の強みは決して大失敗しないことである。逆に言えば、失敗を含む経験の長い時間のフィルターで濾過されたものが伝統技術となる。したがって、残っている伝統技術があれば、その技術で造ることが最も安心できる。失敗が技術を育ててきた。実験や解析による現代の技術開発は、先人の長い失敗経験を時間を短縮して急いだものであり、まだまだ熟成不足で、時々問題も起る。今回、唐招提寺金堂の保存修理を契機にして、表 1 に示すように伝統木造の特長を現代の技術から読み解く試みを行った。伝統木造が何故千年以上存続してきたかを解き明かすことは、これからの建築に大いに役立つものと期待できる。

3.文化財の補強

国宝および重要文化財クラスの歴史的建造物の構造補強に関して、先ず第一に留意すべきことは、歴史的な時間スパンで考えることである。建物意匠だけでなく構造構法も保存すべき対象となるため、これまでの解体補強に関する歴史的な変遷を経て現存する当初材と後補の挿入材を区分して、現状変更の可否を判断することが求められる。また過去数回の変更が加えられた場合には、どこまで溯って復元すべきかといった補強以前の問題もある。補強システムを伝統的な建物本来の架構システムと明解に分離することで、「ほんもの」としてのオーセンティシティを保持して、残すべきものはそのまま残して、将来の改修にも配慮することが基本とされる。構造の合理性だけを主張して解決できるものではないのである。

第二は、構造安全性の目標レベル設定である。国宝や重要文化財建造物は建築基準法の適用を受けないため、対象とする地震や風荷重レベルの設定から補強性能のグレード決定まで、独自に行うことになる。建物躯体の耐震性能を論じる場合の種々の限界値は最近の実大実験データなどによって確認できるが、建物機能としての耐震性限界値の設定は容易ではない。さらに、長期荷重に対する問題は別にして、千年以上存続してきた建物に対する新たな耐震・耐風補強は、「何故持たないかではなく何故持ってきたか」を解明した上で初めて納得されるものであろう。

4. 構造解析と構造補強

平成の保存修理における構造解析と補強設計のための調査・実験は、写真2にまとめられるように、屋根瓦測定、基壇版築層の解体前レーダー探査や解体時の載荷試験による基礎構造の確認、常時微動計測による建物および地盤特性の把握と耐震性検討への利用、解体前木材打撃試験や解体材料試験による古材物性値の検証、実大の斗組物加力試験とめり込みクリープ試験の補強解析へのフィードバックなど多岐に亘っている。構造解析には図2に示すモデルを用いた。筆者らが解析を行った10年で計算機環境は大きく進展した。重要なのはモデルの大きさではなくモデル化の方法と材

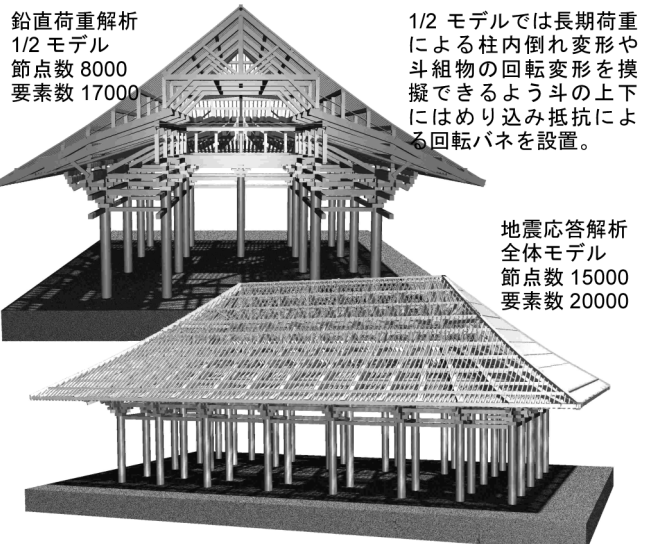


図2 解析モデル

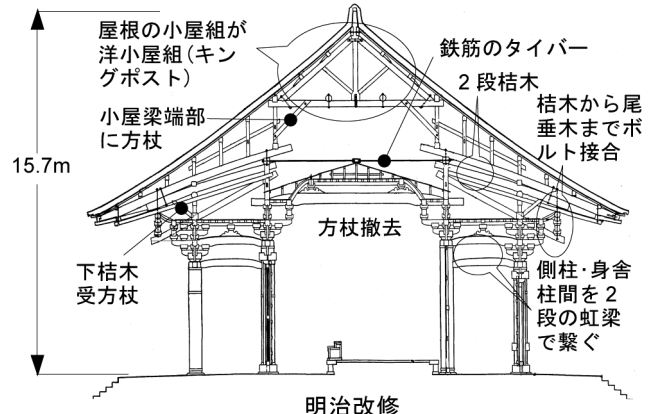
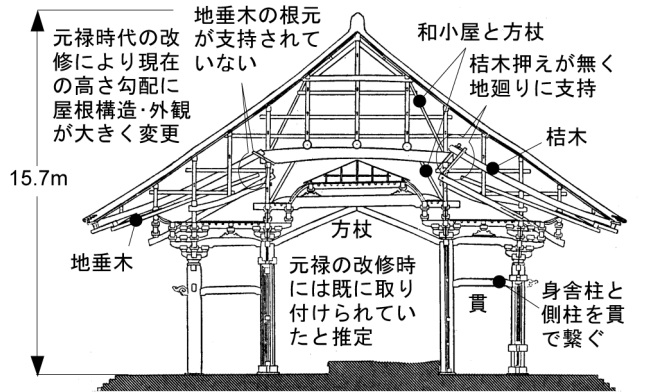
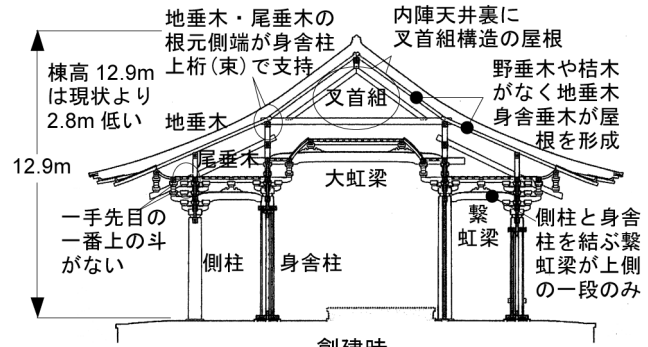


図3 架構変遷

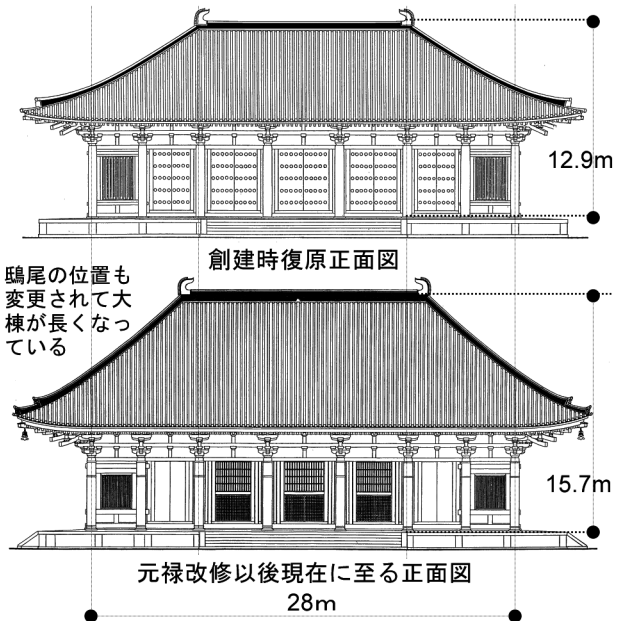


図4 唐招提寺金堂の正面図

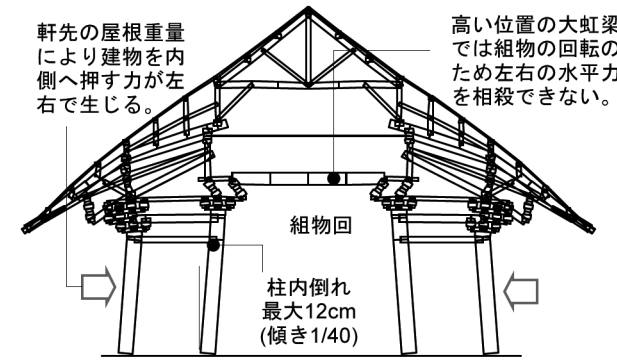


図5 改修前の屋根荷重に対する架構解析変形図

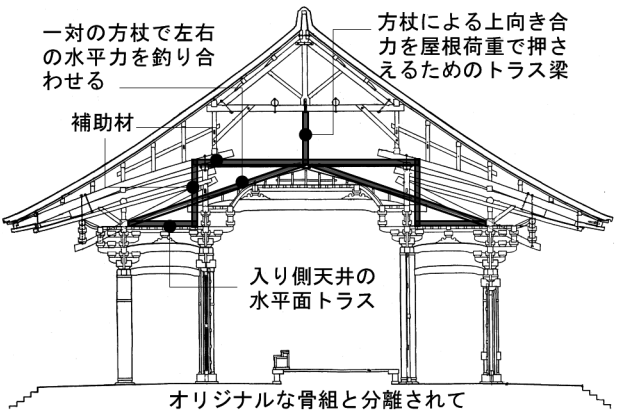


図6 構造補強

料データの根拠であることをとくに強調したい。

解析では、今回の構造補強が1200年の歴史の中でどのように位置づけられるのかを確認するため、唐招提寺金堂の創建時からこれまでの構造架構の変遷を現代の解析技術で見直すことから始めている。

唐招提寺金堂は8世紀末の創建以来、幾度かの改修によって構造および外観に大きな変更が加えられている。図3に示すように、深い軒を支える構造材が創建時では地垂木だけであったものが、元禄の改修では桔木が新たに追加されている。さらに元禄では内陣空間を犠牲にした方杖補強により対処している。このことは内倒れがかなり深刻であったことを推測させる。

唐招提寺金堂の重厚な屋根のイメージは元禄の改修によるものである。図4のように天平の軽やかな屋根がこの時に2.8メートル高くなり、屋根が厚くなった。屋根を大きくした理由として、勾配を大きくして屋根本来の機能である雨水の排水性を高めることや外観を大きく見せたいという他に桔木補強の必要によることが指摘される。深い軒を支えるための補強材である桔木を屋根の中に追加するために、屋根懷を厚くすることは、薬師寺東塔等にも見られ、当初の形に復原された西塔の白鳳の軽やかな屋根と鮮やかな対照を示している。補強のために屋根を大きくすることは、案外人々の感性に添っているのかもしれない。

明治の解体修理では、本来の形に戻すべく方杖を撤去し、その分2段桔木や当時の最新技術である洋小屋および鋼棒タイバー等の補強が施された。また元禄に追加された貫も撤去して、できるだけオリジナルな外観に戻そうとした。しかしながら、内倒れを抑えることは困難であった。

修理前の架構解析変形を示す図5をみれば、建築構造技術者にとって、この架構の弱点は明らかであり、補強方法の策定もさほど難しいことではないであろう。奈良県の文化財修理技術者との種々の議論を重ねて、内倒れ補強では、空葎きによる軒荷重の低減と、内倒れを生じる建物両側の水平力を相殺する図6の方杖機構を屋根裏に組み入れることで当初架構と明快に分離された補強システムを採用した。あわせて入り側天井に水平トラスを設けることで耐震性に配慮している。竣工時の計測により、解析の予測通りに内倒れ変形が12cmから2mmと大幅な低減が確認されたことで、構造解析の有効性が建築関係者の枠を越えて広く認識された。古代の技を解き明かすという当初の目論見がどこまで達成できたか、甚だ心許ないが、筆者らの今

回の試みが、今後の文化財保存修理において構造技術者の役割が大きく期待される状況を作りあげたのではないかと些か自負している。平成の補強に際して、創建時、元禄、明治とこれまでの大工技術者の思いを解析を通じて再確認したように、筆者らの今回の補強は未来へのメッセージであり、数百年後の次回の解体修理の際に平成の補強が再評価されることは大きな楽しみでもある。

5. 歴史と文化

何故もってきたかという問いに対して、これまでに被ったであろう地震力を建物耐力が上回っていたというのが単純な答えではあるが、それだけではない。建物を長くもたせるには、大事に使って、傷んだところはきちんと繕うという極めて当たり前のことが基本となる。日本の伝統的な寺社建築がよくも千年以上持ってきたものと言われる。これは「昔の大工は千年もつ建物を造ったのではない。千年もたせる価値のある建物を造ったのである（坂本功）」があたっている。建物を長くもたせるものは、まず第一にその建物自身の価値・魅力である。その建物と歴史に共感して、それぞれの時代の人々が次の世代に残すべく努力してきた結果なのである。そして文化財を残すためには、定期的にまず屋根の葺替えを行い、併せて必要に応じた修理補強を順次施すという修理のサイクルを活かせるような保存修理に対する社会システムも必要である。ひとつのプロジェクトの完成まで11年に亘って関わるということは、構造設計者としてはこれまでにない経験であった。唐招提寺金堂という建物が背負ってきた圧倒的な時間に思いを致すことで、建築を歴史と文化の観点から見つめなおす機会を得た。歴史という時間を経て建築ははじめて文化と成り得るのではないだろうか。その歴史はまた、優れた建築を時代を超えて伝えていく人々の努力の積み重ねでもある。構造技術者として、唐招提寺金堂の保存修理に巡り会えたことを有り難く思っている。

今回の成果は国宝唐招提寺金堂保存修理事業専門委員会（鈴木嘉吉委員長、金ノ潔委員、坂本功委員ほか）の指導のもと奈良県文化財保存事務所唐招提寺出張所との共同作業によるものであり、唐招提寺、文化庁をはじめ関係各位に深く感謝いたします。

「伝統的構法の継手・仕口について」

構法・歴史部会 主査：名古屋工業大学大学院工学研究科教授 麓 和善

1. はじめに

幕末・明治初期以来、わが国の建築学が近代化していく中で、木造建築については耐震化が最も重視された。濃尾震災の翌明治25年6月に設置された震災予防調査会が、明治27年の山形県酒田地方震災の復興家屋構造の指針として「木造耐震家屋構造要領」を発表し、さらにそれより早く明治25～26年に伊藤為吉が『建築雑誌』に発表した論文においても、従来の日本家屋構造の欠陥をあげ、筋違や土台の設置の必要性、木造各部の固定金物の考案とその使用法などを説いている。そして、これらの木構造改良手法に理論的裏付けをし、指針としてまとめたのが佐野利器の『家屋耐震構造論』（大正5年刊）で、木造家屋の章には「土台ハ柱脚ヲ連結スルニ最モ有効ナリ（中略）土台ハ側石上端ニ太杓又ハボルトニ依テ固定セラルベシ」、「柱ハ凡テ杓立トナスベク土台トノ接合ニハ鯨、筋違ボルト又ハ其他ノ鉄物ヲ用フベシ」などと記されている（日本建築学会編『近代日本建築学発達史』丸善 昭和47年刊参照）。以後、わが国の木造建築は、耐震性を高めるために、土台および柱足元を基礎に緊結し、それに合わせて接合部には、より強度の高い継手・仕口や金物を用い、継手・仕口による部材欠損部を補うために部材断面寸法を大きくしてきたといえる。これは建築構造学の発達にともなって、木造建築の耐震性能向上のために採用された考え方に違いないが、柱を礎石に緊結しない構法を、科学的に十分検証した上での結果とはいいがたい。

今回の新委員会の目的は、石場建てを含む伝統構法のすぐれた変形性能を構造力学的に解明することある。そのためには明治期以降に近代化された木造在来工法を用いるのではなく、また初めから伝統技術を用いた新工法の提案をするのでもなく、明治期以前の伝統構法、そして住宅を主対象とするのであれば江戸時代以後、すなわち江戸時代から明治期にかけて用いられていた伝統構法を用いて、その性能検証実験を行う必要がある。

このような考え方に基づいて、構法・歴史部会では、まず江戸時代から明治期にかけて著述刊行された古典

建築書や、実際の建物の事例として文化財遺構の修理工事報告書を調べることによって、本来の伝統構法を明らかにしたいと考えている。そして、今回はその第1段階として、継手・仕口について教科書的に記した古典建築書『継手・仕口雛形』に収録されている継手・仕口を紹介し、いつごろまでに、どのような継手・仕口が成立していたかを報告したい。

2. 継手・仕口雛形の紹介

室町時代末から明治初期にいたるわが国の建築界においては、具体的な特定建築の造営を目的とした設計図・仕様書とは別に、いわば建築学の教科書としての一般性を備えた建築書が多数著わされた。その総数は、600本以上にもおよぶが、このうち構法に関する「構法雛形」は約80本、さらにその中で継手・仕口に関するものは25本確認されている（若山滋・麓和善編著『日本建築古典叢書8 近世建築書一構法雛形』大龍堂書店 1993年刊参照）。以下、その代表的なものについて紹介する。

『匠家仕口雛形』（東京都立中央図書館所蔵）

幕府作事方大棟梁甲良家第5代棟利が、享保13年（1728）仲秋（8月）に記したもので、継手・仕口雛形としては最も古い史料である。内容は継手・仕口全般にわたり、斜投象による簡明な図に、部材名称および継手・仕口の名称が記されている。全25史料に記された継手・仕口の種類は共通のものをまとめると100種を超えるが、下記のとおり、その半数以上の58種がすでに本史料に掲載されている。

収録継手・仕口名称：襟輪杓差・扇杓・木口蟻・台輪留・敷面鎌継・鬘面留・二枚杓差・目違・三方襟輪・四方襟輪・追掛け大栓継・腰掛け蟻懸け・重杓・四方指鎌・略鎌・込栓鎌・合搔鎌・下げ鎌・小根杓・渡腮・太杓・竿車知継・両目違鎌継・両目違片車知鎌継・敷面鎌継・捻組・台持継・渡腮蟻懸・合掌組・竿引き独鉋・金輪

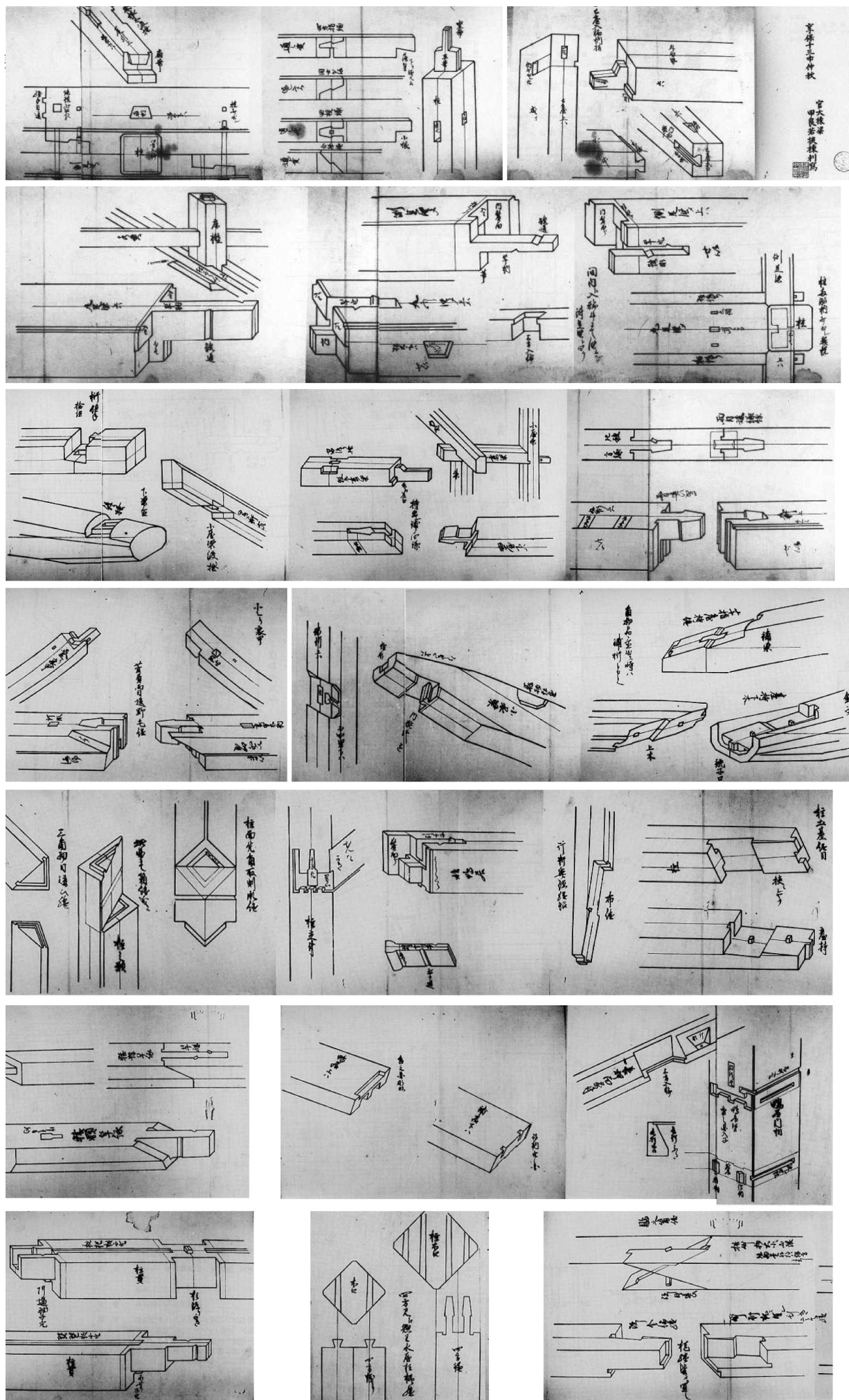


図1 『匠家仕口雛形』 享保13年(1728) 甲良若狭棟利 東京都立中央図書館所蔵

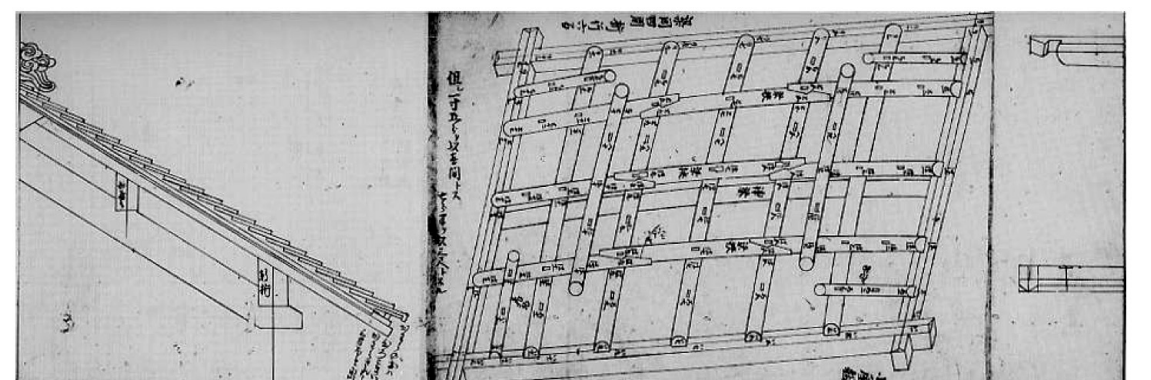
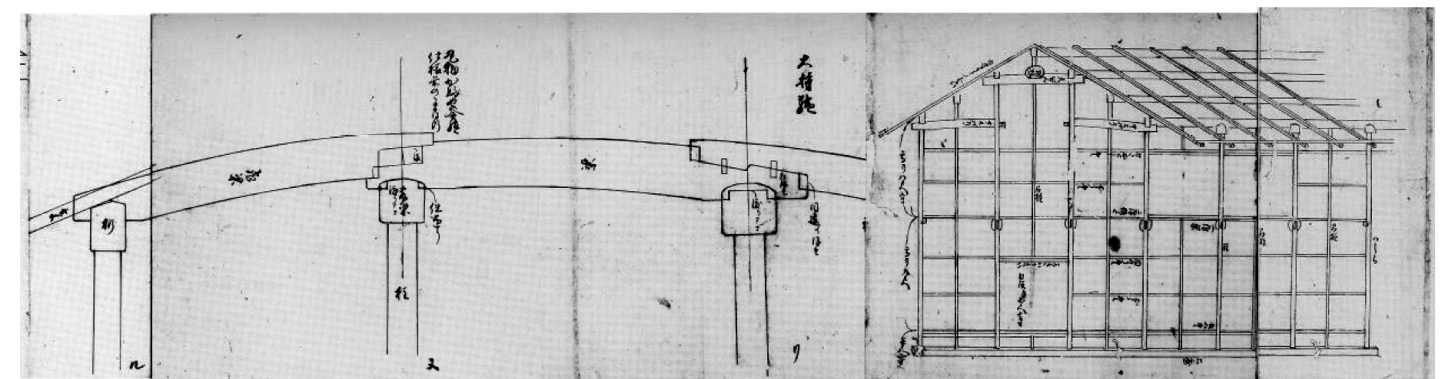
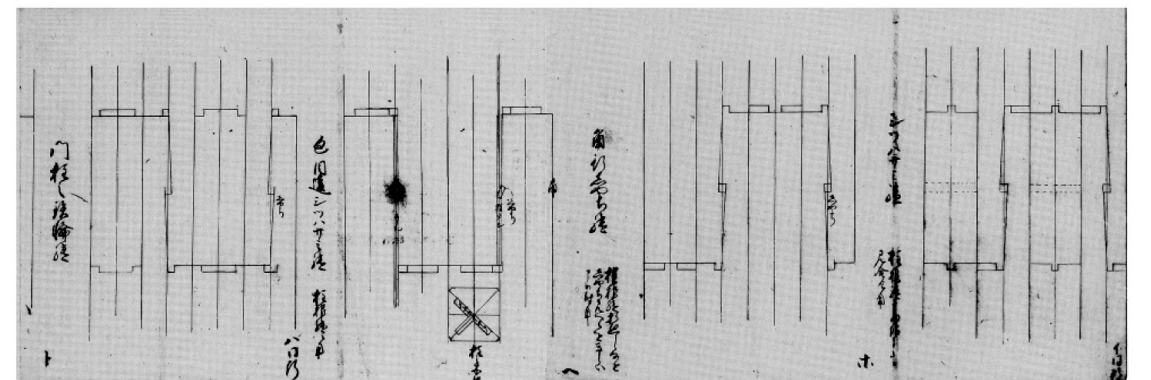
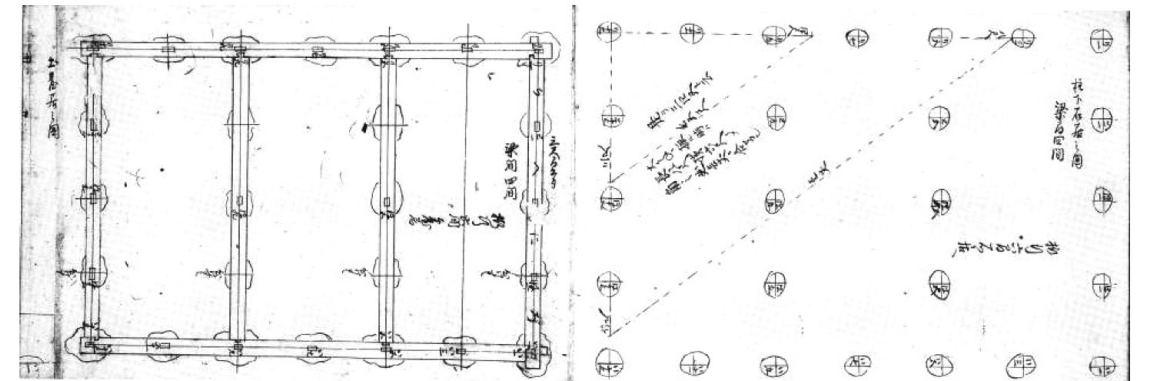
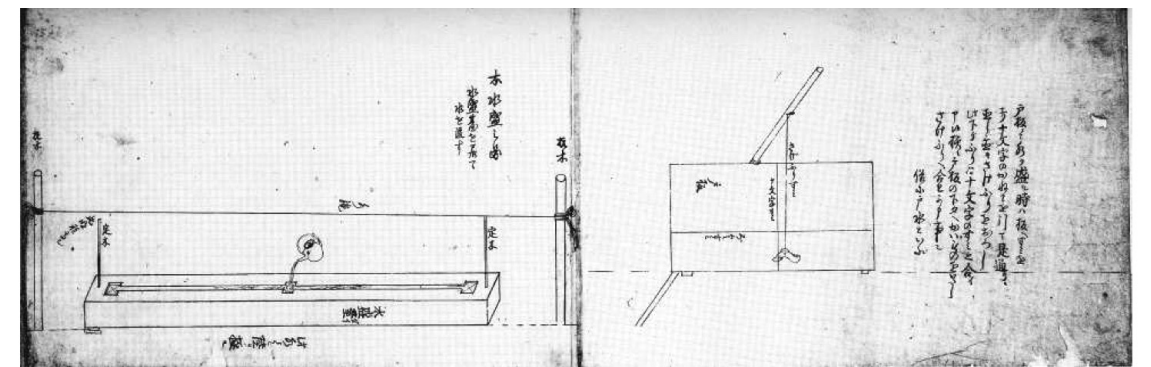


図2 『御作事方仕口之図』 享保14年(1729) 甲良志摩相員 東京都立中央図書館所蔵

尻挟み継・布継・引独鉗・箱継・三角物（矩折れ）目違継・吸付蟻・落蟻・碎（寄）蟻・雇目違・待杓・香之図大入・継留・枕捌き・千切留・芋継・半鵜竿車知継・稲子差・鵜継・隠し金輪継・吸付蟻棧・落鎌・三方目違竿車知継・四方鎌・四方蟻

本史料は継手・仕口雛形として初出ながら、斜投象による簡明な図で、記載される継手仕口数も多くて完成度が高い。したがって、『継目仕口扣』（寛政5年－1793夏、東京国立博物館所蔵）・『大工雛形規矩鑑集 蒂指口』（寛政末年－1800頃、国会図書館所蔵）・『蒂指図』（文化13年－1816以降、山下和正家所蔵）・『継手仕口絵図』（寛政11年～文政5年頃、東京大学所蔵）・

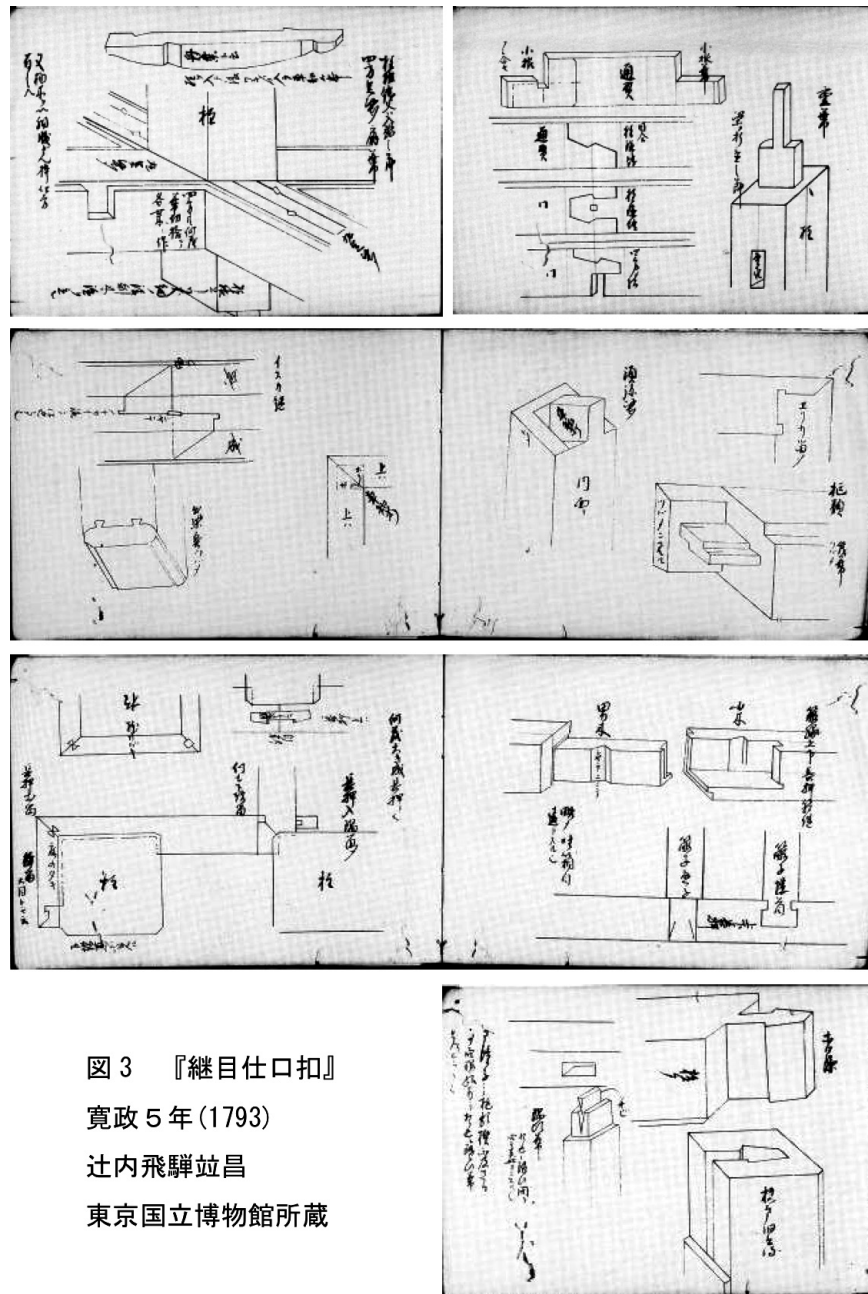


図3 『継目仕口扣』
寛政5年(1793)
辻内飛驒並昌
東京国立博物館所蔵

『組物楯規矩図』（江戸時代後期、東京都立中央図書館所蔵）・『万切組堅之仕様』（文化～文政頃－1810～1829、秋田県立秋田図書館所蔵）・『（仕口）』（文化～文政頃－1810～1829、秋田県立秋田図書館所蔵）・『継手雛形軒廻之割 完』（明治前期、東京大学所蔵）・『立川流匠家矩術 倭絵様集 参』（明治27年、東京大学所蔵）など、明治中頃にいたるまで、多くの継手・仕口雛形に引用された。

『御作事方仕口之図』（東京都立中央図書館）

幕府作事方大棟梁甲良家第4代志摩相員が、『匠家仕口雛形』の翌年すなわち享保14年（1729）3月に記したものである。建図主体に、水盛・礎石据・継手・仕口から屋根葺きまで、工程順に構法を図解したうえで、柵・門・井戸・雪隠など、多岐にわたる付属建物が収録されており、幕府作事方の標準設計の一環としてまとめられた構法書といえる。継手・仕口の図法に正投象（四面）を用いている点も、より実務的といえる。追っ掛け継・角行車知継・包目違尻挟み継・鉋子口鎌継・貝の口継などは、本史料をもって初出とする。

『継目仕口扣』（東京国立博物館所蔵）

幕府作事方大棟梁辻内家の史料で、寛政5年（1793）夏に記されたものであることから、第7代飛驒並昌の筆録と考えられる。斜投象を用いて図示し、部材名称および継手・仕口の名称が記されている。『匠家仕口雛形』と類似の図が多く収録されているが、記載順には『匠家仕口雛形』のような一貫性がない。噛み合わせ付きの小根杓・四方差に用いる舟杓・筏杓・宮島継・箱台持ち継・繫鎌継・地獄杓などは、本史料を初出とする。

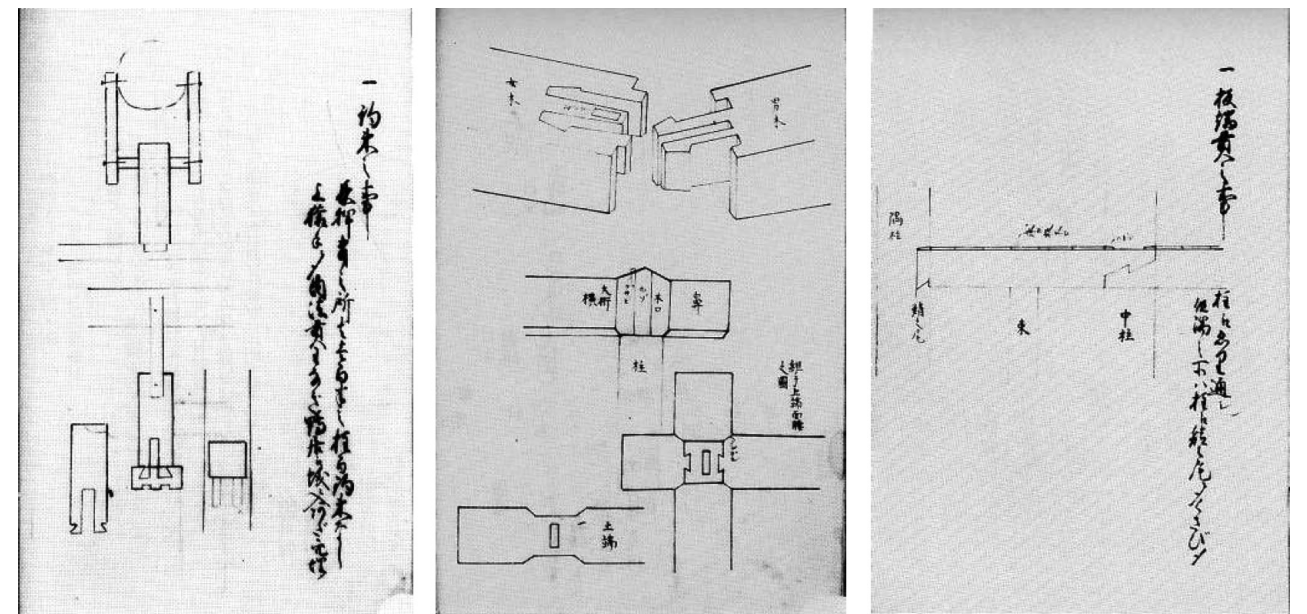


図4 『御殿向作事堅書図解』 江戸時代後期（西尾市立図書館岩瀬文庫所蔵）

『御殿向作事堅書図解』

（西尾市立図書館 岩瀬文庫所蔵）

内題に「上之部御殿堅メ仕様」と記されており、江戸時代後期に利用された御殿作事仕様の本途内容にも上・中・下の区別があるので、本史料も同じ頃のものと考えられる。内容は、継手・仕口に関するもので、部材ごとに項目をたてて説明文が付く。図は斜投象を用い、継手・仕口の名称を付記している。両目違二枚鎌継・二枚寄せ蟻などは、本史料を初出とする。

『（鎌継之図等）』（金沢市立図書館）

加賀藩御大工清水家の史料で、年代は不詳であるが、江戸時代後期のものと考えられる。一般的な継手・仕口にとどまらず、障子の組子、板の剥ぎ合わせ方、指物など、部材の接合方法を幅広く収録している点が、他書と異なる。継手・仕口は、正投象・斜投象を用い、名称および説明を付している。

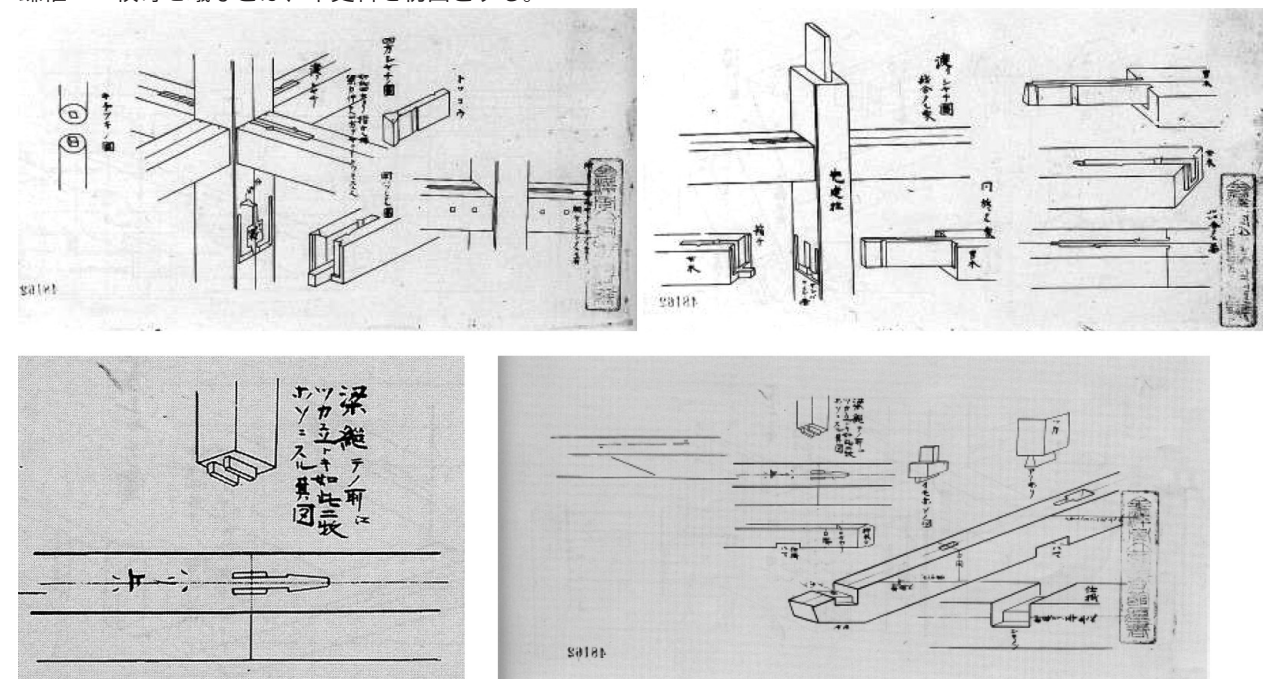


図5 『（鎌継之図等）』 江戸時代後期 清水家 金沢市立図書館所蔵

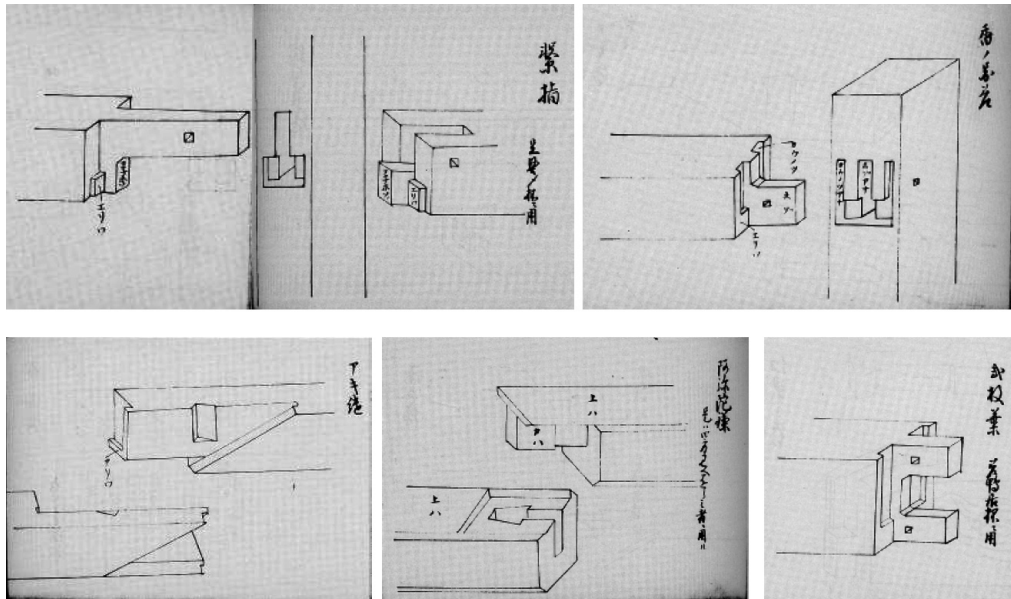


図6 『大工雛形 規矩鑑集 帯指口』 寛政末(1800)頃 若杉家 国会図書館所蔵

『大工雛形 規矩鑑集 帯指口』(国会図書館所蔵)
寛政末(1800)頃に記されたもので、大は家屋・橋から小は金具・瓦まで、大工の知るべき形を百科辞典的に網羅しているが、なかでも構法と継手・仕口に多くの紙数をさいている。継手・仕口に関しては、斜投象を用いて図示し、その名称を付している。香の図差しなどの差物の仕口や、阿弥陀鎌・安芸様継など意匠を重視した継手で初見のものが見える。

『番匠作事往来』(東京大学他所蔵)
整軒玄魚の校、落合大賀範国の図で、岐阜屋(正文堂)清七によって出版された木版本である。整軒玄魚は、宮城路成の名で『建具雛形』(嘉永5年刊)を著わすなどした当時の意匠家で、また落合大賀範国も『大工絵様 雑工雛形』(嘉永3年刊)など、嘉永(1850)頃に多くの建築書を著している。したがって、刊行年は記されていないが、本書も同じ頃に出版されたと考えられる。往来物すなわち江戸時代に寺子屋用に編纂された教科書のひとつであるため、主たる内容は建築の用語集であるが、頭書に継手・仕口の図を斜投象で示し、その名称と説明を付記している。造作材に用いる意匠的な継手を多く収録しており、特に四方金輪継・四方松川継・大筋違継・雲霞継・水流継などは、本史料を初出とする。

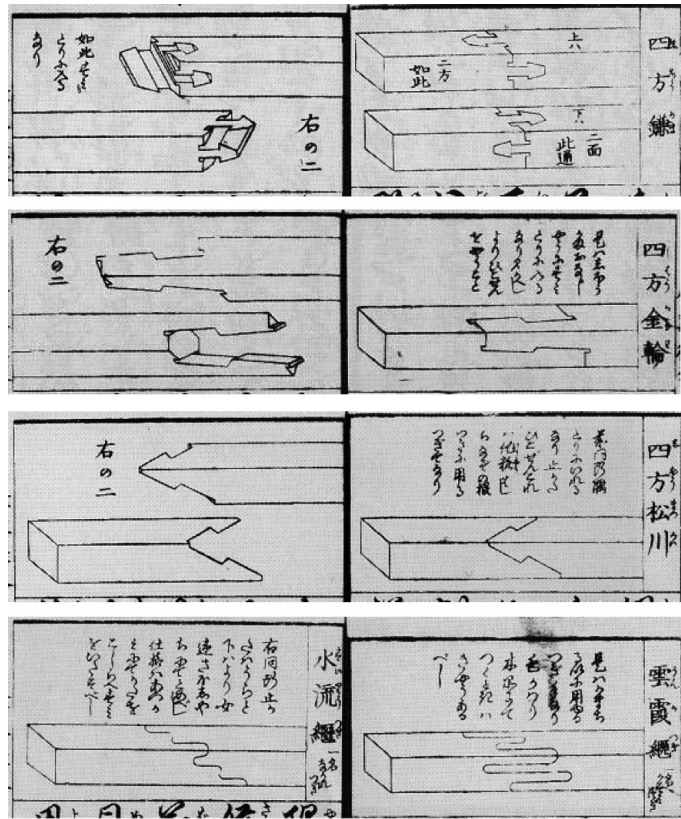


図7 『番匠作事往来』 嘉永(1850)頃 整軒玄魚(校) 落合大賀範国(図) 東京大学他所蔵

3. むすびー 古典建築書に見る継手・仕口

継手・仕口雛形として最古の『匠家仕口雛形』が、享保13年(1728)の書写であることは、中・近世の木割書の主流からすると、継手・仕口雛形は後発のものといわざるをえない。

それでは建築書として軽視されていたかという点、『匠家仕口雛形』や『御作事方仕口之図』が幕府作事方大棟梁甲良家の史料であり、『継目仕口扣』・『大工雛形 規矩鑑集 帯指口』・『継手仕口絵図』が小普請方や作事方の正統的技術陣による史料である以上、決して軽視されたものではないといえよう。

そして、史料に記された継手・仕口を総覧すると、『匠家仕口雛形』が、すでに全史料の技術的内容をほぼカバーしているほどの完成度を持っており、以後明治期にいたるまで多くの史料にそのまま引用されていることが確認できる。このことから、主として構造材の接合方法として使用される基本的な継手・仕口は、遅くとも1700年頃までには完成しており、以後明治期にいたるまでほとんど変化がないといえる。

一方、1800年頃から新たに収録された継手・仕口には、宮島継・箱台持ち継・阿弥陀鎌・安芸様継など造作材の見え隠れ面に複雑な細工を施し、化粧面には極力単純にして接合部が目立たないように苦心した継手が多い。さらに幕末になると、四方金輪継・四方松川継・大筋違継・雲霞継・水流継など、あえて継手を意匠的に見せるものが出現するにいたる。

「振動論による設計法の考え方」

設計法部会 主査：広島国際大学工学部建築学科 教授 斎藤 幸雄

現行の耐震関連計算規定とその背景

2000 年および 2007 年の法改正に伴って、現行の建物区分と耐震関連計算規定の関係は図 1 のようになっている。

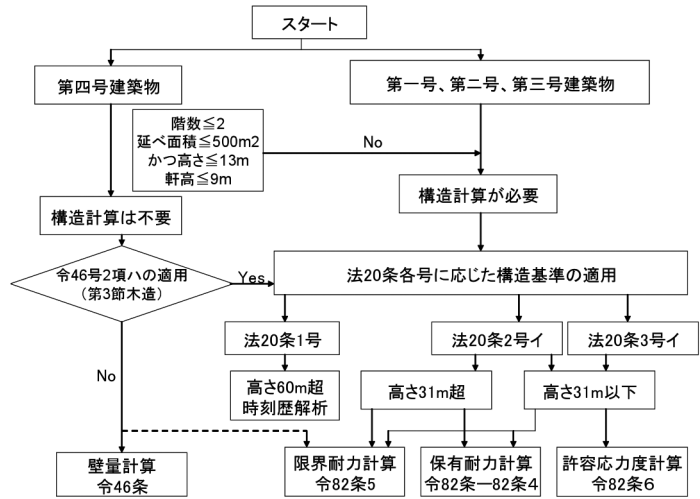


図 1 建物区分と耐震関連計算規定

現行の耐震関連計算規定では、5 種類の手法が建物の規模、構造形式等により決められている。それは①時刻歴解析 ②限界耐力計算（および告示によるエネルギー法）③保有水平耐力計算 ④許容応力度計算 ⑤構造計算不要（壁量などの仕様規定のみ）の 5 種類である。このうち限界耐力計算は 2000 年の法改正で、エネルギー法は 2005 年の告示で新たに加わった方法である。 計算方法について、⑤→④→③→②→①の順で計算内容が高度化するとされる。高度化とは言い換えれば、どこまで振動論に立脚した計算方法かということであろう。

この中で最も高度な計算とされる時刻歴（応答）解析は、わが国で 1963 年に高さ制限が撤廃されたことに伴って超高層建築物が解禁になり、その設計のために常に用いられてきた方法である。当然コンピュータによる解析が必要で、解析手法自体もコンピュータの発達に伴って進化しているが、地震時の挙動をすべて明かにできているわけではない。たとえば減衰については、1 次モードに対する内部粘性減衰の定量的な問題や高次モードに対する減衰のメカニズムなどまだ明確

でない点も残されている。また応答結果は入力地震動の振動特性に依存するため、どのような入力を想定するかが問われるが、近年問題になっている長周期地震動を含めて課題は多い。

高度な解析を精度よく実施するためには、その手法もさることながら、解析に必要なパラメータを適切に設定する必要があり、解析・計算内容と解析モデルの精度が同じオーダーでなければ、結果の信頼性が保証されない。特に地震時の挙動を求める場合は、

- ① 建物の振動モデルを必要とされる解析精度に合わせてどのように構築すべきか
- ② 入力地震動(大きさのレベルとスペクトル特性等)をどう想定すればいいか

を検討する必要がある。

しかし地震時挙動を正確に把握することは容易ではないので、③～⑤の規定では静的な計算法と仕様規定をセットにすることで、それに代わるものとしていと考えられる。限界耐力計算は簡易法ではあるが、地震時挙動を一定程度明らかにできる手法であり、伝統構法に適用する場合はその特徴を十分理解しておくべきである。

耐震関連計算規定の背景

わが国で建築物に関する法規定ができたのは、1920 年に制定された市街地建築物法が最初である。この時点では設計用地震力に関する規定はなかったが、関東大震災の翌年の 1924 年に建物に作用する地震力（水平力）算定用として震度 0.1 以上が規定された。この値は東大に設置された変位計（地震計）の記録から導かれたもので、許容材料強度を低く設定していたため、この水平力で設計すれば東大での記録よりもっと大きな地震動を記録した地域でも、終局強度で何とか耐えられると考えられたようである¹⁾。ただこの考え方は、建物の作用する地震力として地動と同じとしており、建物に入力した時の応答（増幅）を考慮していない。その後昭和の初めに建物を耐震的にするために、

剛柔論争が起きているが、佐野・武藤博士が主張した剛構造論は建物はできるだけ剛にし、一定の強度を持たせれば耐震的になるという考え方で、いわば振動論不要の考え方である。一方真島博士が主張した柔構造論は建物の剛性を小さくし固有周期を長くすることで、振動による入力を小さくできるとの考え方で、振動論的な考え方が持ち込まれている。この剛柔論争の後に、昭和 10 年に棚橋博士が建築雑誌に「地震の破壊力と建築物の対震力に関する私見」を発表する²⁾。棚橋博士は剛柔論争のどちらにも組せず、地震による破壊力よりも建物が破壊に至るまでに貯えるポテンシャルエネルギーが上回れば、建物は破壊に至らないとの考え方で、この考えの基本的な部分は限界耐力計算にも取り入れられていると考えてよい。ただ今から 75 年も前に発表されたために、当時は十分な理解が得られなかったのではないだろうか。

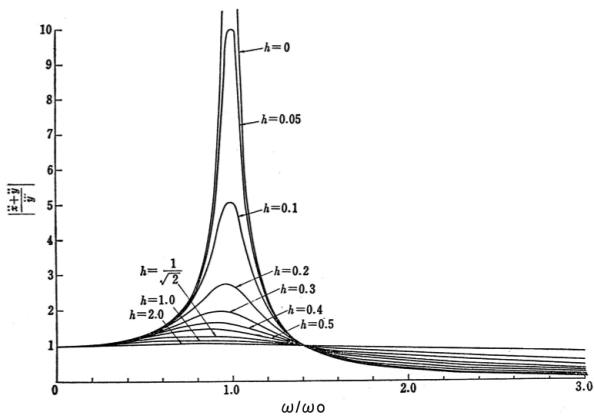


図 2 1 自由度系の正弦波（加速度振幅一定）地動に対する加速度応答倍率

図 2 は 1 自由度系の正弦波地動に対する加速度応答倍率を示したもので³⁾、この図をもとに剛柔論争を振動論的に解釈すると、地動と建物の共振は避けるとして ω （地動の振動数）より ω_0 （建物の振動数）が十分に大きく ω / ω_0 が 0 に近い領域（剛構造）では応答倍率は 1 に近く、 ω / ω_0 が $\sqrt{2}$ より大きければ応答倍率が 1 より小さくなり、 ω / ω_0 が十分大きければ（柔構造）応答はさらに小さくなる、これが剛柔論ではないか。しかし実際の地動は正弦波のように単純ではなく、また塑性状態になった場合を考えると、剛・柔論だけでは論じられない。

1950 年に制定された建築基準法でも震度法の考え方が受け継がれ、設計用震度 0.2 以上と規定されたが、これは許容材料強度が変更されたために 0.2 となった

が、市街地建築物法での 0.1 とほぼ同じレベルのものである。従ってここでも剛構造論に基いて、建物の地震時の挙動については、上下方向の震度について、高さが 16m を超える場合に 4m ごとに 0.01 を加えるだけで、上層部での増幅がわずかに考慮されただけであった。このことが阪神・淡路大震災で建物の中間層での層崩壊が多く見られた原因の一つになったと考えられる。木造においても振動論に基づくものではなく、剛構造的な考え方というよりも軸組みだけでは地震力に抵抗できないと考え、筋かいや土壁を必要量入れるべく壁量規定ができたのであろう。しかも構造要素としては、特に伝統構法では様々なものがあるが、土壁しか壁量の対象にはならなかった。これらの結果は振動論が難解なために、比較的わかりやすい手法が取り入れられたとも考えられ、やむをえなかったのかもしれない。

1981 年に改定された耐震設計法（新耐震設計法）

建築基準法制定以降も大地震がたびたび発生しているが、特に 1968 年の十勝沖地震や 1978 年の宮城県沖地震での建物の地震被害を受けて、地震時の建物の挙動に関して国家的な研究がなされ、一方で高層建築物に関する時刻歴応答解析結果の集積もあり、1981 年に耐震設計に関する計算規定が抜本的に改訂されるが、ここで初めて地震時の建物の挙動を耐震規定に取り入れることになる⁴⁾。特に設計用地震荷重として、 R_t （振動特性係数）や A_i （せん断力係数の高さ方向分布）が取り入れられたが、これらは地震時の建物の応答を考慮したものである。入力地震動のレベルも 2 段階に設定され、1 次設計用として $C_0=0.2$ 、2 次設計用として $C_0=1.0$ としている。これは、1 次設計用の地震動として最大加速度 80 ～ 100gal 程度、2 次設計用として 300 ～ 400gal 程度とし、 C_0 の値はこのような地震動が建物に入力した場合の応答結果として弾性状態であれば 2 ～ 3 倍になるとして決められたものである。それと同時に取り入れられた保有水平耐力計算は、大地震時に建物が塑性状態に入った時の挙動を直接求めるのではなく、構造種別、構造方式と架構の靱性に応じて、仕様规定的に構造特性係数（ D_s ）により建物に必要な耐力（抵抗力）を低減してよいこととしてい

る。つまり靱性のある架構では大きく塑性状態に入ること、耐力の急激な低下がなければ、履歴による減衰効果により地震エネルギー吸収しようとするものである。従って弾性応答であれば 1G になる水平力を、靱性が大きければ最大で 1/4 まで低減できる。Ds 値については、すべてのケースを想定して建物個々の応答を具体的に計算したものではないので、特に靱性が大きいとされる建物では必要とされる保有水平耐力が小さいために、Eーディフェンスでの実大実験結果によると、建築基準法を超えるレベルの地震動に対しては倒壊する可能性があることを示しており、再検討が必要かもしれない。

限界耐力計算の手法および導入の背景

1990 年代半ばの日米政府間の合意の基づき、建築基準法の性能規定化への見直しの中で、性能型設計法としての耐震安全性を検証するための方法として限界耐力計算が導入された。

限界耐力計算は入力地震動として応答スペクトルを使うために、時刻歴応答解析のように入力地震動の継続時間や時系列の変化・位相特性等の影響は求められないが、入力地震動の強さや周期特性は考慮でき、応答値として重要な最大応答加速度や最大応答変位を求めることができる。時刻歴応答解析は、詳細な解析が可能で地震時の挙動を明らかにする手段として大変有用であるが、想定した地震動に対する特解を示しているとも言えるため、

結果に対する設計者の判断が重要になる⁵⁾。

この限界耐力計算の手法を簡潔に説明すると、応答を求めるために建物を 1 自由度系（1 質点系）に縮約して、弾性状態にある場合は変形の大きさに関わらず建物の固有周期および減衰は一定であるので、入力地震動の応答スペクトルから直接応答が求まる。塑性状態に入った場合は非線形の応答になるので、固有周期も減衰も変化する。等価線形化法といわれる手法により等価固有周期と等価減衰を求め、減衰の大きさによって入力地震動の加速度応答スペクトルの低減をおこなった上で、弾性時と同じように応答を求めることができる。多自由度系の場合は、図 3 に示すように、質点の数だけモードが存在するが、60m 以下の建物であれば 1 次モードが卓越し、塑性状態に入ってもモー

ド形が安定していれば、1 次モードをもとに等価な 1 自由度系に縮約して、応答を求めても精度よく求まるとされる。

多自由度(多質点)系の変形モード

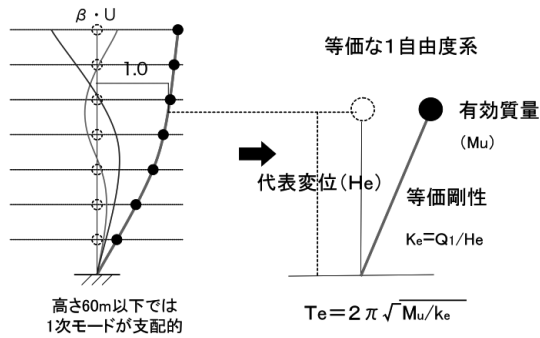


図3 等価な 1 自由度系への変換

応答を求めるためには、入力地震動としてはスペクトルの形で与える必要があるが、告示では解放工学的基盤における加速度応答スペクトルとして与え、さらに地表面での加速度応答スペクトルとしては、表層地盤を 3 種類設定してそれぞれの地盤での増幅率を求め、地表面での加速度応答スペクトルとしている。これを表したものを図 4 に示す。

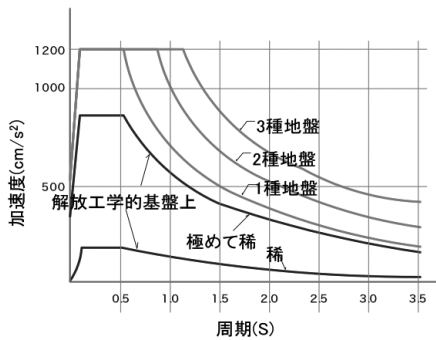


図4 告示による入力地震動の加速度応答スペクトル

地表面での加速度応答スペクトルは、構造特性係数 Rt の短周期での応答加速度を 1G とした場合と同じもので、違いは 1 自由度系と多自由度系のベースシア係数の違いを補正したものである⁶⁾。

応答の求め方と注意点

損傷限界に至るまでは建物は弾性状態にあるため、1 次モード形と固有周期および減衰は常に一定であるから地表面での加速度応答スペクトル（稀地震）から求まる。安全限界時の応答を求めるためには、塑性状態に入るために常に 1 次モード形と固有周期（等価固有周期）および減衰（粘性減衰＋履歴による等価粘性減衰）が変化するため、予め設定した層間変形角における等価固有周期と等価減衰を求め、減衰の大きさによって入力地震動の加速度応答スペクトルの低減をおこなった上で、弾性時と同じように応答を求めることができる。ここで減衰は、告示では粘性減衰と塑性状態に入ること履歴で消費されるエネルギーと同じエネルギーを消費できる等価粘性減衰を加算できるとし、内部粘性減衰として 5 % としている。しかし、木造の場合に一般に想定している復元力特性はバイリニア＋スリップ型とよばれる骨格曲線を元にしており、バイリニアやトリリニア型と比較して履歴面積が小さいことから、計算値で大きい減衰になったとしても 20 % が限度と考えるべきであろう。

建物の耐力が十分大きくなくても何故地震に耐えられるのか

この理由は以下の 2 つである。

第 1 には固有周期が長くなることで、一般に応答加速度が小さくなると考えられている。告示に示された加速度応答スペクトルによれば、地表面（第 2 種地盤）では 0.864 秒より長くなると応答加速度が小さくなってゆく。第 2 には減衰が大きくなる効果で応答加速度が小さくなる。この減衰による低減率（Fh）は告示で $Fh=1.5/(1+10h)$ で与えられ、固有周期が同じ場合でも応答加速度は、たとえば減衰が 5 % の場合と比較して、10 % の場合は 0.75 倍、15 % の場合は 0.6 倍、20 % の場合は 0.5 倍になっており低減効果大きい。安全限界時の応答層間変形は上記のことを踏まえて求めることになる。つまり、層間変形が増大することで、

等価固有周期が長くなり、これにより履歴による減衰が大きくなることで応答値（スペクトル）が小さくなってゆき、やがて建物の保有耐力と応答値から求めた地震力が一致する点が応答変形として求まる⁷⁾。これを表したのが図 5 である。

一方で安全限界時に建物の各階に作用する地震力（Psi）は安全限界時の固有周期（Ts）が 0.64 秒より長い場合は、

$$\text{Psi}=5.12 \cdot \text{mi} \cdot \text{Bsi} \cdot \text{Fh} \cdot \text{Z} \cdot \text{Gs}/\text{Ts}$$

で与えられ、応答値から求めた地震力と一致する。ここで Bsi は各階に生ずる加速度分布を表し算定式は告示に示されているが、許容応力度計算で各階の地震力を算定する際に用いる Ai（高さ方向のせん断力係数分布）と基本的には同じものであるが、加速度分布とせん断力分布の違いに注意が必要である。

縦軸を $Q_n=MuSa$ 横軸を $S_D=(T/2\pi)^2Sa$ に変換

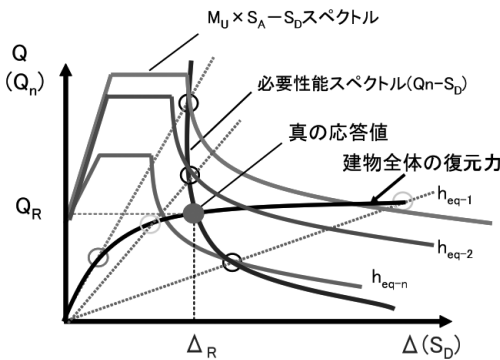


図5 限界耐力計算における耐震性能評価の手法

限界耐力計算で最も重要なのは、新耐震設計法の 1 次設計に相当する稀地震時には建物に損傷は生じない（損傷限界）、2 次設計に相当する極稀地震時には建物は倒壊・崩壊しない（安全限界）ことを明らかにすることで、それぞれの限界変形をどう設定するかについては、原則として設計者の判断によることになる。そのため限界耐力計算では「設計のクライテリア」が重要で、特に安全限界変形は、建物の構造要素と設計条件により異なるので、慎重に設定する必要がある。

伝統構法の構造・振動特性と設計法

伝統構法は多種多様で、その構造・振動特性と設計法については一言で言えるものではないが、検討委員会

で本年度対象としている住宅に的を絞ると、構造・振動特性については適切な剛性・耐力を有し、極稀地震時には構造要素が塑性状態に入り固有周期が適切に長くなることおよび履歴による減衰効果により応答を一定値以下にすることで、大地震にも耐えることが可能になると言えるのではないか。この他に寺院建築のように柱径が大きければ、柱の傾斜復元力も期待できる。しかし、実際の大地震には計算では予測しきれない挙動が起こり得ることを踏まえて、できる限り問題の少ない構造計画とすることが求められる。また柱と横架材の仕口接合部は、この部分が外れたり破壊することが起きると、柱の鉛直支持能力が失われ崩壊に至る可能性があり、設計・施工の両面で重要な部分である。

伝統構法に関してはこれまで多くの構造要素実験（静的、動的）が行われ、検討委員会においても引き続き実験が予定されている。また、Eーディフェンスにおける実大振動台実験も数度行われており、今年度も実施が予定されている。ここで常に問題になるのは、たとえば実大実験用の試験体が伝統構法と言えるかとの疑問である。部分的にまたは全体として試験体と同じ造りの伝統構法住宅は現実になかったとしても、重要なのは個々の構造要素とそれが全体の建物に組み込まれた時の地震時挙動を明らかにし、詳細な時刻歴解析や限界耐力計算でどこまで検証が可能かを確認することにある。

特に安全限界時の各部の損傷状況と安全性の確認は大変重要で、今後の設計に生かせるはずである。安全限界層間変形は一律に決めるべきものではなく、建物の設計内容に応じて設計者が設定すべきものであるが、応答層間変形とCb換算耐力の関係が予め分かっているれば設計の参考になる。図6にCb換算耐力と応答層間変形角の関係を示す。計算は平屋の建物で階高が3mと5mの場合を示す。階高が3mの場合で安全限界層間変形角を1/20と設定した場合は、Cb換算耐力が0.35程度必要ということになる。1/30以下とするとCb換算耐力が0.5以上必要でその耐力差はかなり大きい。また階高が5mあると、安全限界変形が同じとした場合、必要とする耐力はかなり小さくてよいことを示している。少し規模の大きい寺院建築物では、耐力が小さくても比較的小さい変形で収まる可能性がある。

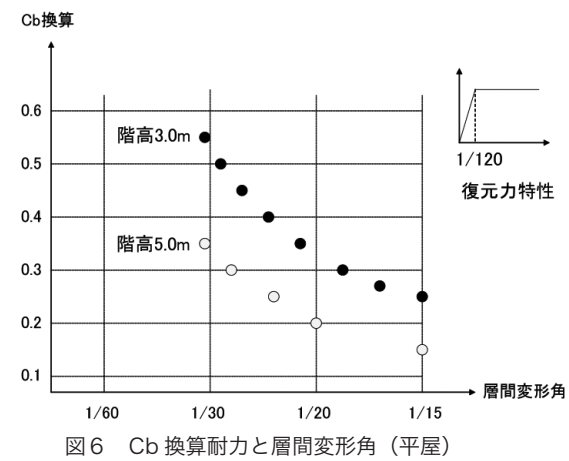


図6 Cb換算耐力と層間変形角（平屋）

このように、一定の耐力と変形性能が確保できれば、大地震時にも倒壊を免れることができ、安全限界変形を設定するために各部で許容できる損傷の程度については、今後も実験・解析を通して検討を継続してゆく必要がある。

石場建てと免震構造

石場建ての場合の地震時の挙動（特に柱脚が移動する場合）を的確に予測し、どう設計法に反映するかは今後の課題であるが、その参考に供するためにここでは免震構造（滑り支承を使用した場合）との比較を試みる。

免震構造の特徴

滑り支承は比較的軽量の建物で多く使用されており、免震部材としては他にダンパー＋バネで構成されることが多い。

滑り支承部は摩擦係数が0.1以下の小さな値のものから構成されており、柱脚を小さな地震動レベルで滑らせることで建物への入力を低減しようとするもので、最も重要なのは摩擦係数が一定値に管理され、そのため地震時の応答予測が容易に可能で、バネ等を設置することで移動量を一定値以内にコントロールでき、元の位置に戻すことも可能である。

石場建ての特徴

過大な地震入力に対しては、柱脚が移動することで建物に大きな入力が入らないで免震的效果が期待できるという考え方があるが、免震構造のように定量的な評価がむずかしく、移動量の予測が可能かの問題もある。

石場建て設計法として4つの方法が考えられる。

① 柱脚の移動をさせない設計

柱脚の動摩擦係数は0.3～0.4程度と推定されるが、Cbが摩擦係数を下回れば、柱脚が動くことはない。この場合建物の最大耐力が下回ることが条件になるため、一般の住宅での設計は簡単ではないが、規模の大きい寺院建築では十分可能な場合も多い。

② 柱脚の移動を防ぐために、何らかの方法で柱脚を留めつける設計

この設計法の実施例があるが、水平のみと上下方向も留めつける設計がある

③ 柱脚の移動を許容する設計

この場合は、柱脚の移動量を一定値以下に制限するため、そのための設計条件を検討する必要がある。限界耐力計算では直接考慮することができないので、別途検討が必要になる。また、柱脚の移動に伴って上部構造に損傷が及ばないよう設計することも必要である。

④ 柱脚にバネを設けて移動量をコントロールする設計

伝統構法になじまないとの考え方もあるが、礎石から柱が落下しないよう設計することは可能であると考えられる。

振動論と設計法

振動論と設計の考え方について論じてきたつもりであるが、振動論をそのまま設計に持ち込むのは難解なこともあり容易ではない。しかし、一旦静的な解析・計算だけで地震時の安全性を検証できるとする設計法を構築すると、どうしても解析・計算結果だけに目が向き地震時の挙動を忘れてしまう事になる。やはり重要なのは、常に地震時の挙動を念頭に置き、少しでも耐震性能の向上を図る努力とそれを設計でどう具現化するかが問われている。最後に伝統構法の設計において改めて配慮すべき事項について述べる。

偏心について

一般の建物では2次設計において偏心率の計算が義務付けされているが、伝統構法においても偏心の問題は重要である。阪神・淡路大震災後の超高層建物の傾斜測定によると、計算上はほぼ偏心がない場合でも振れた状態で残留変形が残っている⁸⁾。これは建物が塑性状態に入ると材料強度のばらつき・製作の程度や誤差・積載荷重の偏在等により振れ振動が起きていることを物語っている。伝統構法のように床が剛でない場合は、偏心の影響も含めてさらに複雑な挙動になる可能性がある。従って偏心や床の変形の影響を受けにくい構造要素の平面的な配置が望ましく、安全限界変形の設定にも余裕が必要であろう。

上下方向の剛性・耐力バランスについて

振動論的には、地震による入力エネルギーを建物全体でエネルギー吸収することが望ましい。2階建てで1階が同じ構造の場合は、2階で少しでも多くエネルギー吸収できた方が1階の変形を小さくすることが可能で、それだけ安全性が高まることになる。従って1・2階の耐力・剛性のバランスをどう設計かは重要である。一方で精度よく計算・解析するために構造計画をどうすべきかについて論じられることがあるが、これは本末転倒の論理で、やはり設計のあるべき姿を検討し、必要ならその安全性の検証を精度よく計算・解析できるように改良すればよい。

地震時の挙動と新しい設計法

Eーディフェンスで実大振動台実験が実施されるまでは、大地震時の建物の挙動を目にすることはほとんど不可能であった。しかしこれまでの木造に関する実験および今後実施される実大実験を通して、木造建物の実挙動を見る事ができるようになった今、改めて伝統構法に適した設計法の構築をすべき時期にきている。限界耐力計算はあくまでも検証法であるので、これと

は別に多くの関係者が使いやすい設計法が必要だろう。
その場合も、地震時の挙動を反映した設計ができるこ
とが望ましい。

参考文献

1. 大橋雄二：日本建築構造規準変遷史、日本建築センター、1993
2. 棚橋諒：地震の破壊力と建築物の地震力に関する私見、建築雑誌、1935.5
3. 多治見宏：建築振動論、コロナ社、2001
4. 構造計算指針・同解説　、日本建築センター、1981
5. 斎藤幸雄他：実施設計建屋における設計用入力地震波と設計用せん断力に関する考察、日本建築学会大会講演梗概集、1977.10
6. 石山祐二：応答スペクトル法によるベースシヤ係数につ
いて、日本建築学会大会講演梗概集、1987.10
7. 伝統構法を生かす木造耐震設計マニュアル：学芸出版社、2004.3
8. 鵜飼邦夫他：過大入力を受ける建築構造物の動的崩壊過
程の解明シンポジウム資料：日本建築学会 ,1996

「構造要素の評価について」

実験検証部会 主査：金沢工業大学建築学科 教授 後藤 正美

1.はじめに

一般的な各種構面の試験では、構面のせん断性能を評価することを目的とし、「接合部の破壊が先行しないこと」が前提となっている。しかし、伝統的な構法では、構面と接合部は一体として評価する必要がある。伝統的な構法に適した実験法あるいはデータ処理法が必要となる。
ここでは、一般的な試験法の概略と今回、試みる試験法の概略を説明する。

2. 構造実験の試験体について

構造要素実験では、実際の建造物の力学的な特性を評価するための基礎的なデータを取得することが目的である。
解析モデルあるいは設計モデルに応じて、・木材レベ

ルのモデル化、・接合部レベルのモデル化、・構面レベルのモデル化などが必要となる。
今回の要素実験の対象は、Eーディフェンス実験で適用される建造物で使用される構面 12 種類で土台仕様と足固め仕様の計 24 種類（図 1 参照）を対象として試験を行う。

3. 構造要素 (構面) の試験法について

一般的な試験法の模式図を図 2 に示す。一般的な試験法は、「接合部の損傷破壊を先行させない」として図 2 の (b)(c) ように補強治具を使って、接合部に作用する引き抜き力を拘束するものである。この試験では引き抜き力を拘束する治具に変動軸力が作用することとなり、正確にはこの変動軸力の効果を除去する必要があることと、実際の建物では補強金物を使用すること

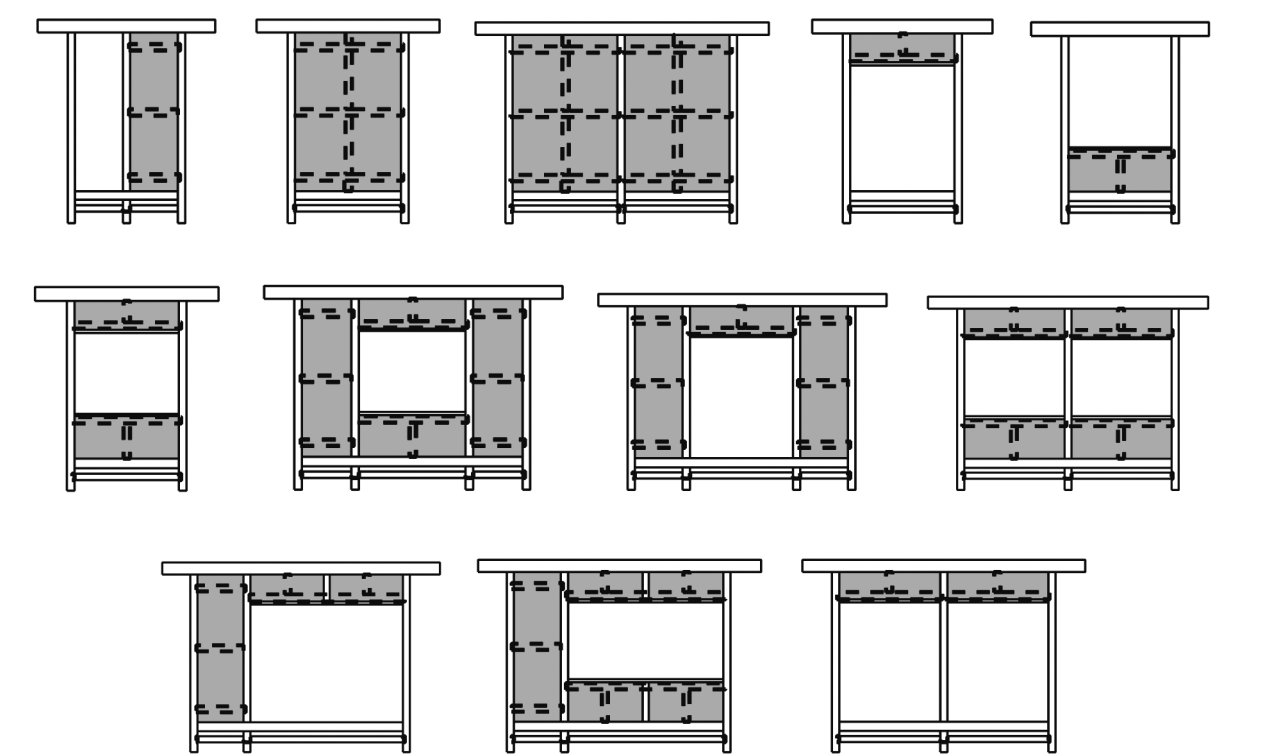


図 1 試験体一覧（足固め仕様の場合）

が前提となる。

上記の試験法では、構面と接合部を一体として扱い、補強金物を基本的には使用しない伝統的な構面の試験には適さないと考えられる。

また、足固め仕様の試験体では、反力フレームに設定するための柱脚部の留め方が課題として残っている（今回の試験では、水平移動のみを固定する方法を採用する）。

今回の試験では、構面と接合部を一体として構面の復元力特性を求めることを前提として、(a)の載荷式の試験方法を適用することとする。載荷式の試験法でも載荷荷重の設定、変形が大きくなることによるP-Δ効果などの除去あるいは試験時の安全性など幾つかの課題が残っているが、試験法として確立できるように検討する。

4. 試験結果の整理・格納について

多くの構面の実験の主目的は、復元力特性を把握するために行われる。現行の壁倍率では復元力特性を完全弾塑性モデルに置き換えて、評価している。

一般に構造物の耐震設計や地震応答解析では、図3に示すような各種のモデルが提案されている。今後の解析・設計法の開発に合わせて試験結果を適用するためには、純粋な復元力特性（変動軸力やP-Δ効果を除去したもの）のデータを蓄積しておく必要がある。

5. おわりに

伝統構法の構面の復元力特性を検出するために、最適な試験法を確立する必要がある。試験体の設置方法、試験体各部の境界条件、載荷荷重履歴や積載荷重などの項目を考慮して、各試験を実施してゆく予定である。

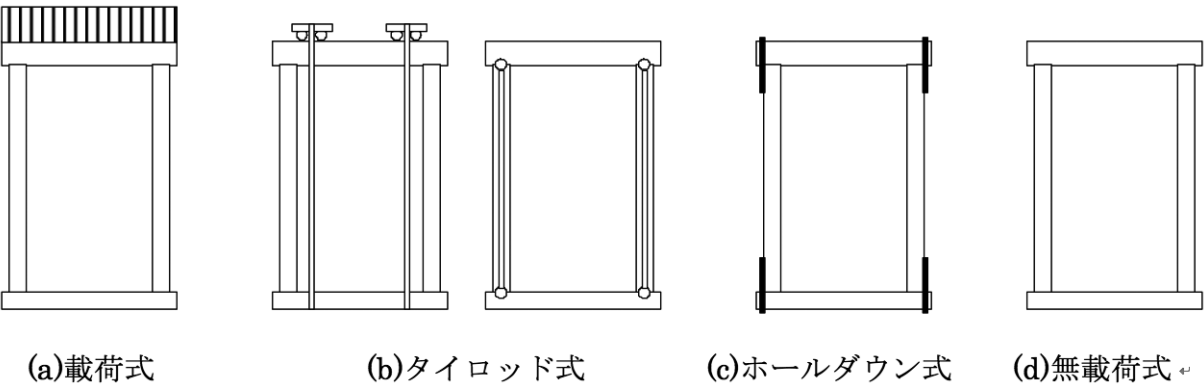


図2 一般的な実験方法

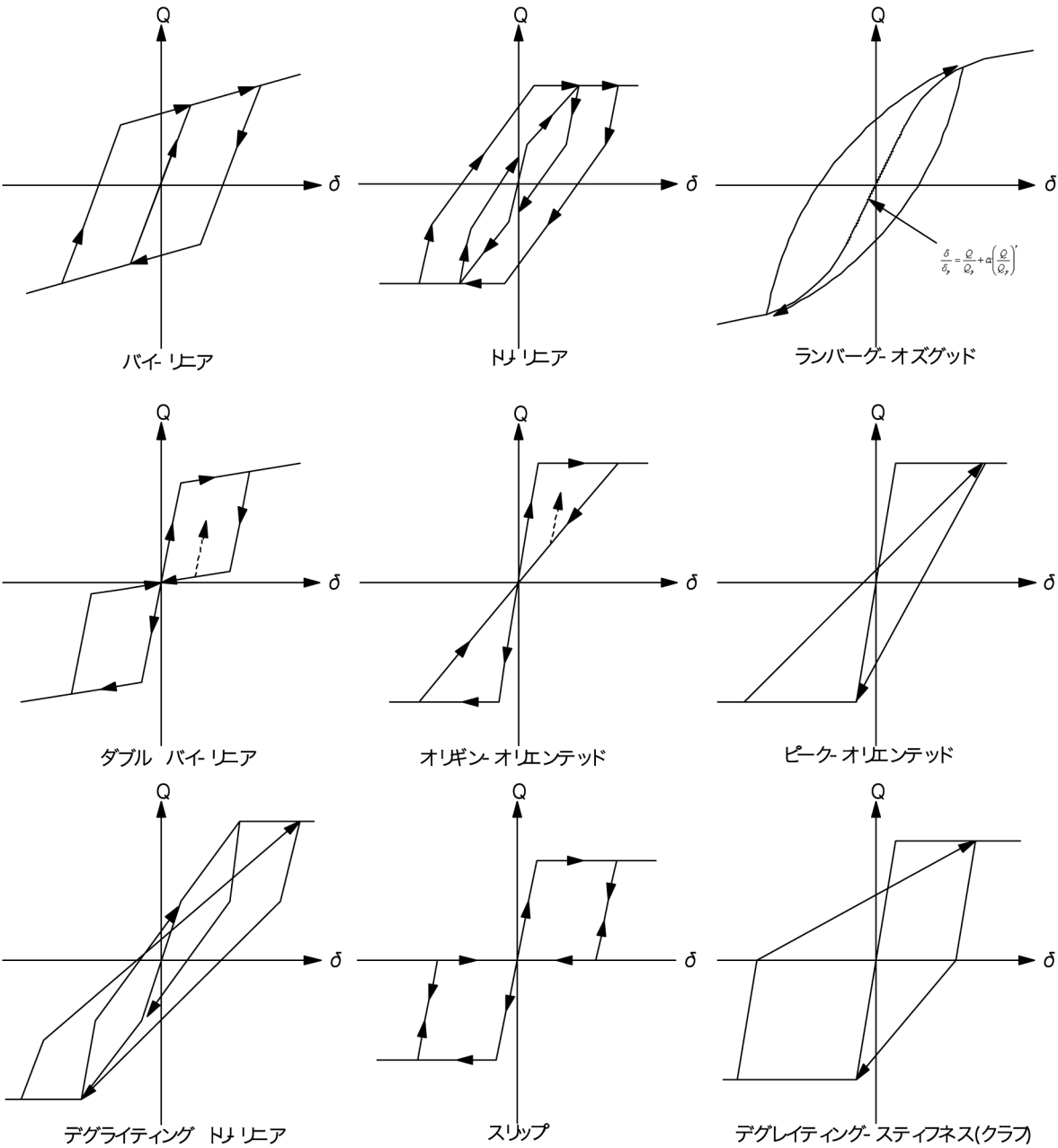


図3 一般的な復元力特性のモデル

「伝統構法の実大振動台実験についてーEーディフェンス振動台実験の目的と検討項目ー」

検討委員会 委員長：立命館大学 立命館グローバル・イノベーション研究機構 教授 鈴木祥之

1. E - ディフェンス実大振動台実験の目的

石場建てを含む伝統構法木造建物の構造力学的な課題を解明し、地震時挙動を把握することによって、伝統構法木造建物に適した設計法を構築することを目的として、石場建て構法を含む伝統構法木住宅の実大試験体を製作して振動台加振実験を実施する。

先ず伝統構法で未解明な石場建て（礎石建て）構法の柱脚の移動に注目し、平屋建て2棟の実大試験体により、柱脚の滑りの発生条件、滑り量について検証を行い、柱脚と礎石との摩擦、上部建物の耐力、入力地震動レベルとの関係を明らかにする。次に、限界耐力計算など解析的に課題となっている水平構面の変形や捻り振動による変形などの解明とともに1階と2階との耐力バランスなどが大地震時の挙動に及ぼす影響を検証するために、石場建て（柱脚フリー）と柱脚固定の2階建て試験体2棟の振動台実験を行う。

また、この実大振動台実験に関連して、中規模振動台による柱脚の滑り検証実験や実大試験体に用いられる土壁や継手・仕口接合部などの要素実験も併せて実施し、実大振動台実験の事前検証や実験後の分析に役立てる。

2. 実大振動台実験での主な検討項目

1) 石場建ての柱脚の移動

伝統構法特有の石場建ての設計法の構築を検討するためには、柱脚の移動・滑りに関する基本的な力学的特性の解明と実大建物での挙動を明らかにすることは必要不可欠である。この伝統構法の構造力学的に課題である石場建ての柱脚の移動が建物の応答や耐震性能に及ぼす影響について検討を行う。

- ・柱脚の仕様が建物の振動性状および安全性にどのような影響を与えるか
- ・動摩擦係数と滑り量の検証

2) 水平構面の変形と偏心による影響

伝統構法の構造力学的に課題である水平構面の変形による建物の挙動を明らかにするためには、要素実験などでは建物としての挙動を把握できないので実大実験により、偏心の影響を含めて水平構面の変形などが建物の応答や耐震性能に及ぼす影響について検討を行う。

- ・水平構面の変形が建物の挙動にどのような影響を与えるか
- ・鉛直構面の偏心が建物の挙動にどのような影響を与えるか

3) 解析法の検証

設計のための解析法(時刻歴応答解析や限界耐力計算)による解析結果の妥当性を検証する。特に水平構面の変形や偏心による応答への影響をどのように評価し得るかを検討する。

- ・1階と2階の耐力バランスによって建物の挙動にどのような影響を与えるか
- ・水平構面（2階床）の変形と鉛直構面の偏心が建物の挙動にどのような影響を与えるか

4) 伝統構法の設計のクライテリア

建物全体の挙動や各部の損傷の程度に関連する伝統構法の設計のクライテリアについて検討する。

- ・石場建ての柱脚が移動しない設計は可能か
- ・石場建ての柱脚が移動する場合には、移動量を制御する設計は可能か
- ・損傷限界や安全限界について検証する
- ・各部の損傷、特に柱の鉛直荷重支持力の保持や柱・横架材の仕口接合部の耐力・変形性能の維持について検証する
- ・建物が崩壊しないための条件をどう設定すればよいか

3. 実大振動台実験での試験体

1) 平屋（試験体 No.1 及び No.2）

- ・柱脚の仕様が建物の振動性状および安全性にどのような影響を与えるか

- ・動摩擦係数と滑り量の検証
- ・柱脚が移動しない設計は可能か
- ・鉛直構面の偏心が建物の挙動にどのような影響を与えるか

2) 2階建て

- ・柱脚固定（土台仕様）試験体 No.3
 - ・石場建て（礎石建て）試験体 No.4
- 試験体 No.3 及び No.4 の平面は、試験体 No.1 及び No.2 とほぼ同じ。
- ・柱脚の仕様が建物の振動性状および安全性にどのような影響を与えるか
 - ・1階と2階の耐力バランスによって建物の挙動にどのような影響を与えるか
 - ・水平構面（2階床）の変形と鉛直構面の偏心が建物の挙動にどのような影響を与えるか
 - ・柱脚が移動しない設計は可能か
 - ・建物が崩壊しないための条件（設計のクライテリア）をどう設定すればよいか（安全限界）を検証する

4. 実大振動台実験の日程

(独) 防災科学技術研究所・兵庫耐震工学研究センターとの共同研究として、実大三次元震動破壊実験施設Eーディフェンス（兵庫県三木市志染町三津田西亀屋1501-21）を用いて、以下の日程で行う。

実施時期：2010年12月24日～2011年1月24日
公開実験を予定している。公開実験日程が決まれば、下記でご案内します。

ホームページ <http://www.green-arch.or.jp/dentoh/>
「伝統的構法の設計法作成及び性能検証実験」発メルマガ

5. 実大振動台実験に関連する要素実験

実大試験体による振動台実験の実施に際し、石場建て構法での柱脚の移動に関する実験や主要な構造要素の性能評価実験を実施し、振動台実験のシミュレーション解析や振動台実験結果の分析などに役立てる。

(1) 伝統構法の柱脚の滑り検証実験

1) 伝統構法の柱脚の滑り検証実験

(その1 要素試験体)

柱脚部のみの試験体（4本柱（1×1スパン））を用いて静的水平力載荷実験、振動台実験を実施して、礎石の表面仕上げによる摩擦係数の違いや静的、動的摩擦係数について評価する。

実施時期：7月20日～30日
実施時期：京都大学防災研究所・強震応答実験室

2) 伝統構法の柱脚の滑り検証実験

(その2 2P×4P軸組試験体)

6本柱（1×2スパン）軸組試験体を用いて振動台実験を実施して、軸組の耐力壁のベースシアCb換算耐力をパラメータにして、柱脚の滑りが発生する条件等について検証する。

時期：9月14日～24日
実施時期：京都大学防災研究所・強震応答実験室

3) Eーディフェンス振動台実験の事前検証実験

2P×4P軸組試験体を用いて、柱脚の滑りの検証とともに、計測方法などについても事前に検証する。

時期：10月12日～29日（予定）
実施時期：京都大学防災研究所・強震応答実験室

(2) 土壁の検証実験

1) 土壁軸組の性能の検証実験

Eーディフェンス振動台実験の試験体 No.4 で使われる土塗り壁や小壁の性能を検証する。試験体として、半間（1P）、一間（2P）の全面土壁、小壁（垂れ壁、腰壁、垂れ壁＋腰壁）、さらにこれらの組み合わせによる2間（4P）である。試験体 No.1、No.2、No.3 で用いられる乾式土壁についても検証する。

実施時期：8月から軸組製作、9月土塗り、10月～12月に実験予定
実施場所：金沢工業大学、福山大学、鳥取環境大学、岡山理科大学、横浜国立大学

2) 壁土の材料特性の評価実験

Eーディフェンス振動台実験の試験体 No.4 で使われ

る壁土の材料特性を評価する。ここでは、壁土の材料特性の評価実験とともに、壁土の早期乾燥方法、壁土の試験体製作方法などについても検討を行う。

実施場所：金沢工業大学、豊田高専、横浜国立大学

（３）継手・仕口接合部の要素実験

設計のクライテリアを検証するためには、各部の損傷の程度を明らかにする必要があるが、特に柱・横架材の仕口接合部の耐力・変形性能の確保・維持は重要であり、Ｅーディフェンス振動台実験の試験体で使用する継手・仕口の性能を検証する。

- ・継手・仕口の変形性能を検証する
- ・繰り返し载荷による損傷を評価する

6.まとめ

伝統構法特有の石場建てにおける柱脚の滑りや床構面の変形は、要素実験からは建物全体としての挙動を把握できないため、実大建物による振動実験によって、柱脚の滑りや床構面の変形など構造力学的に解明するとともに、建物の挙動に及ぼす影響を明らかにする。設計のクライテリアを検証するためには、建物全体、各部構面の変形のみならず、各部の損傷の程度を明らかにする必要がある。

Ｅーディフェンスによる実大振動台実験や関連する要素実験により、設計のクライテリアの検証とあわせて、伝統構法の限界耐力計算や詳細な立体骨組解析などの解析法についても検証を行い、今後の伝統構法に適した設計法の構築に生かしたい。

Ｅーディフェンスによる実大振動台実験や関連する要素実験で得られたデータは、今後の設計に活用できるように公開する。

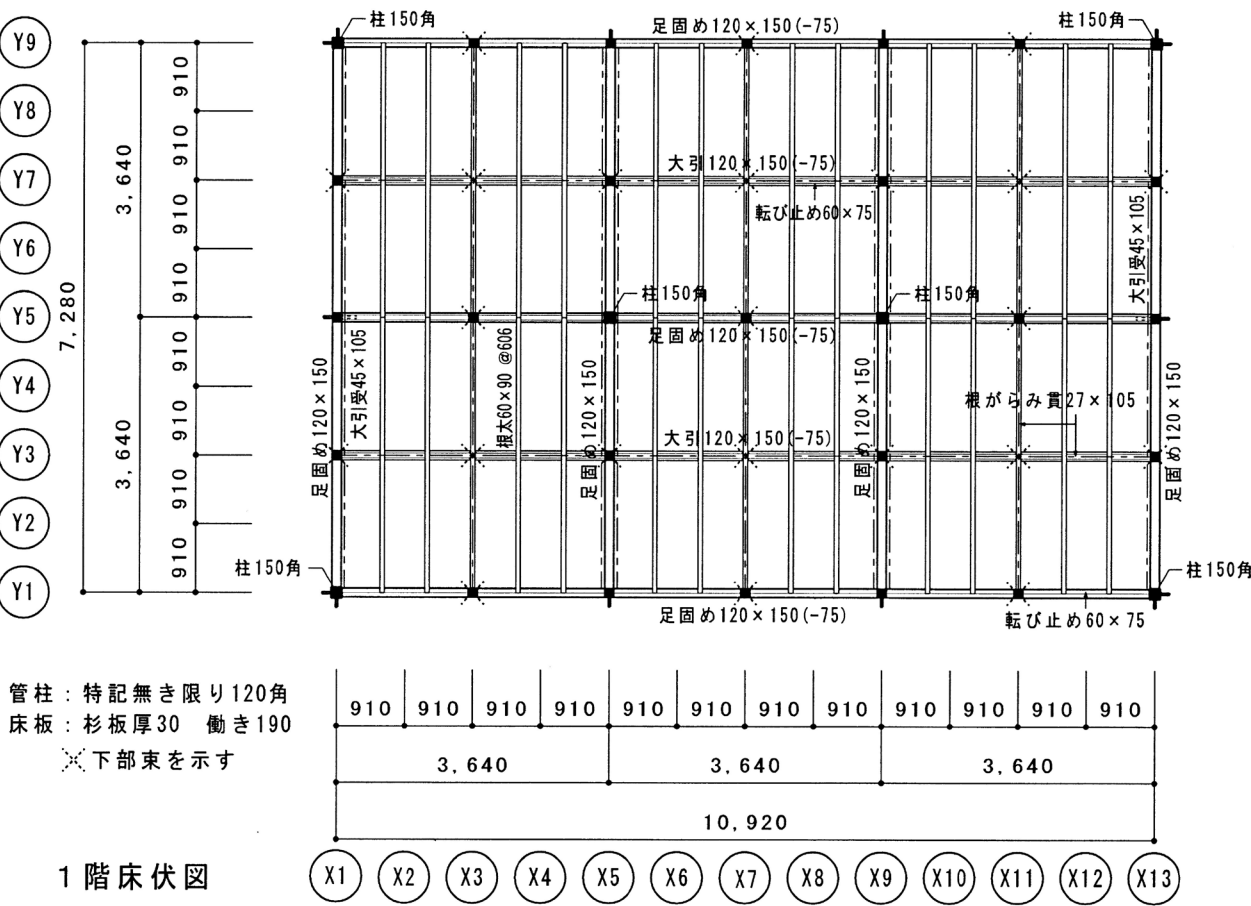


図1 試験体 No.1 - 1 階床伏図

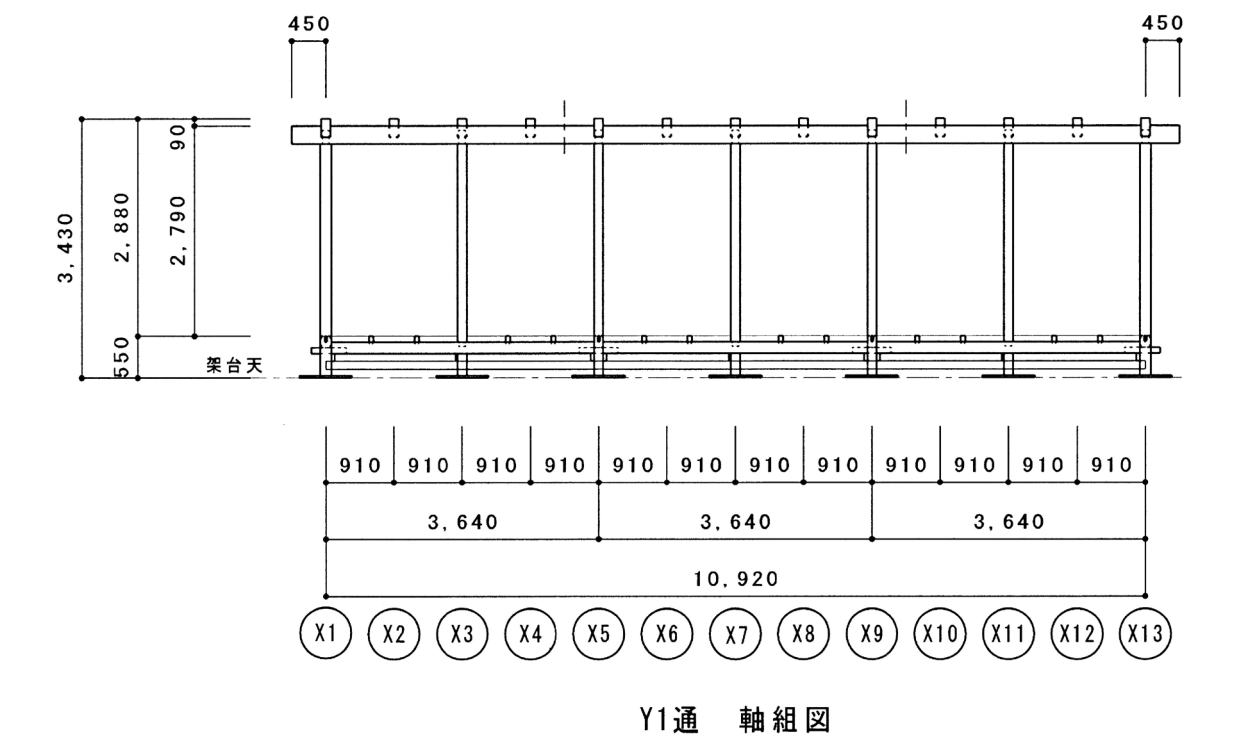


図2 試験体 No.1 - Y1 軸組図

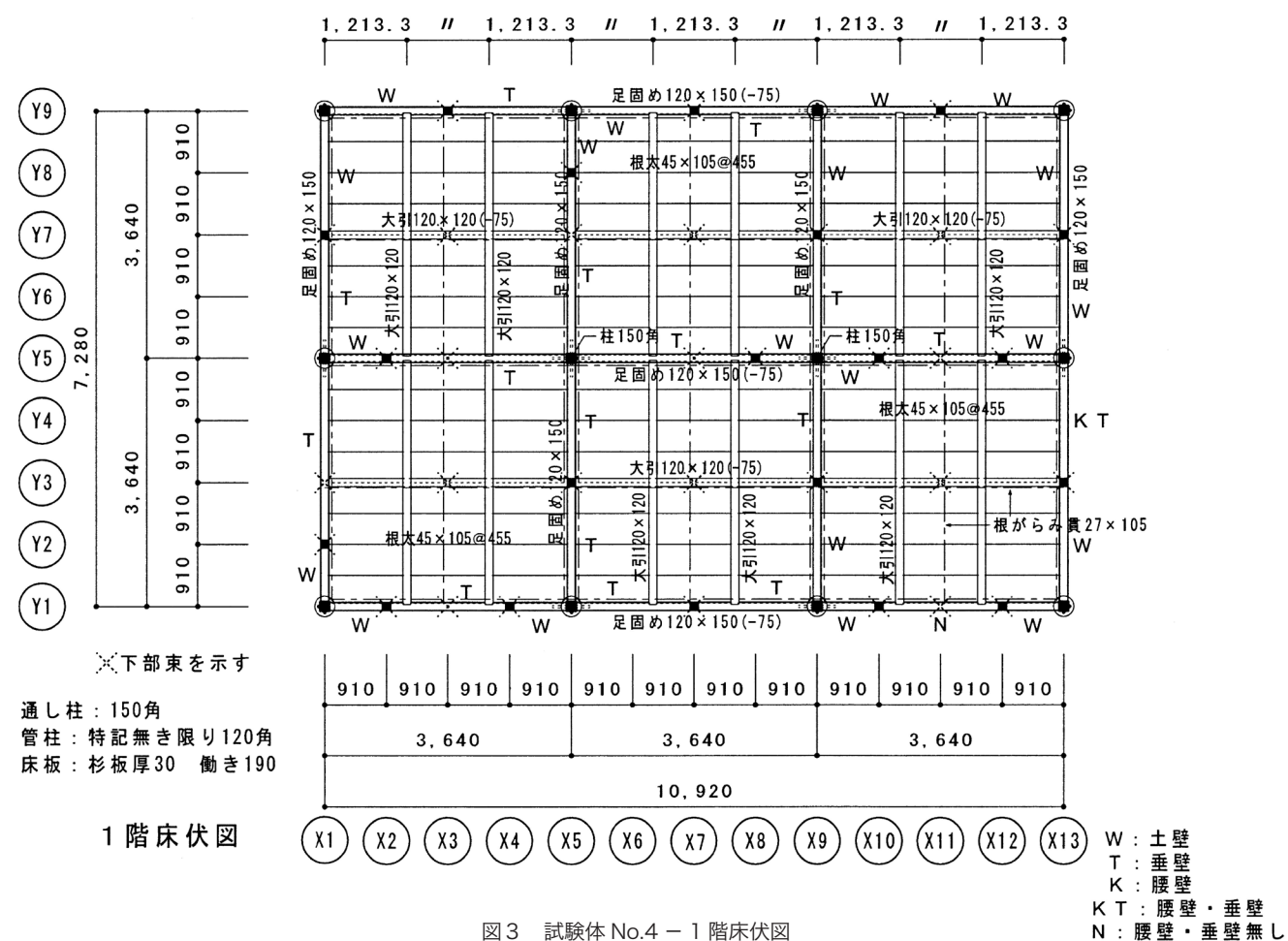


図3 試験体 No.4 - 1階床伏図

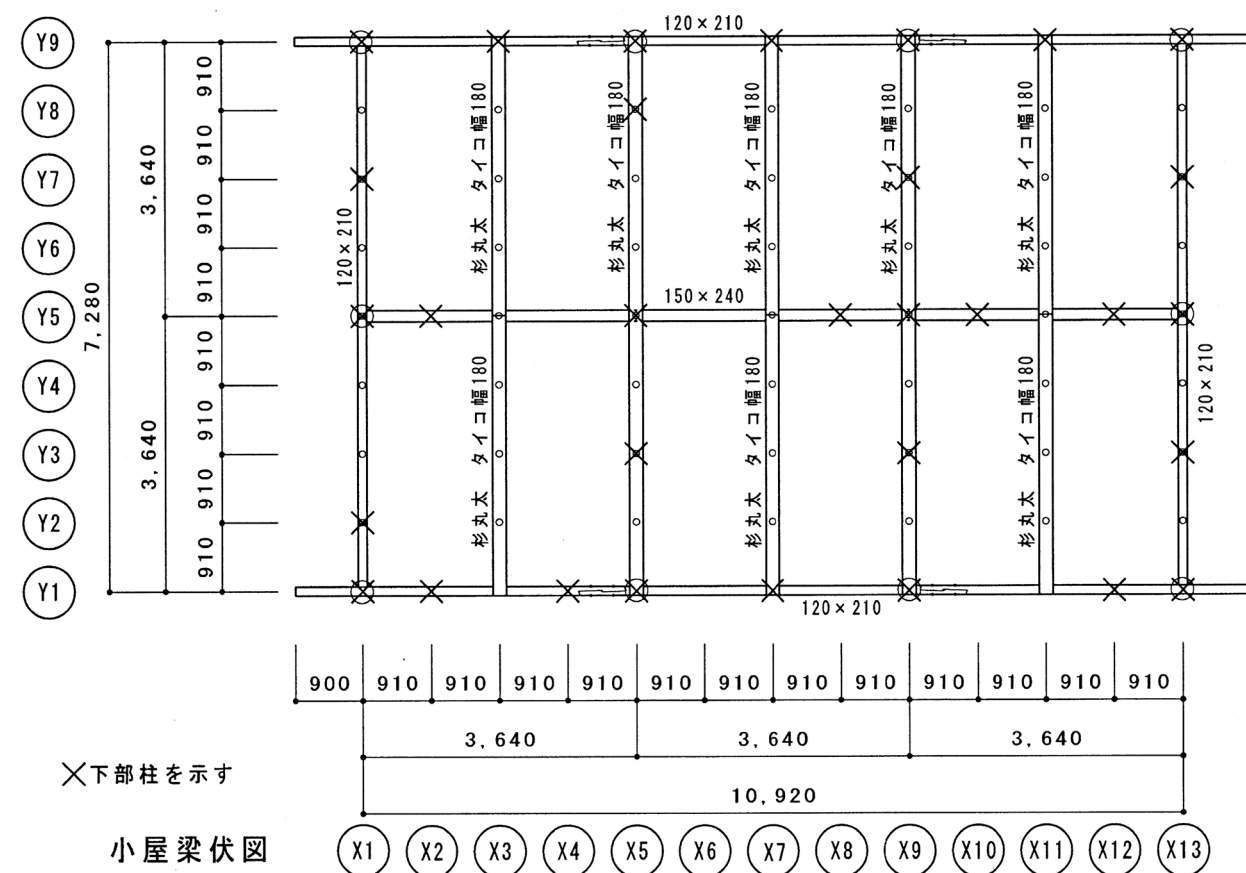


図4 試験体 No.4 - 小屋梁伏図

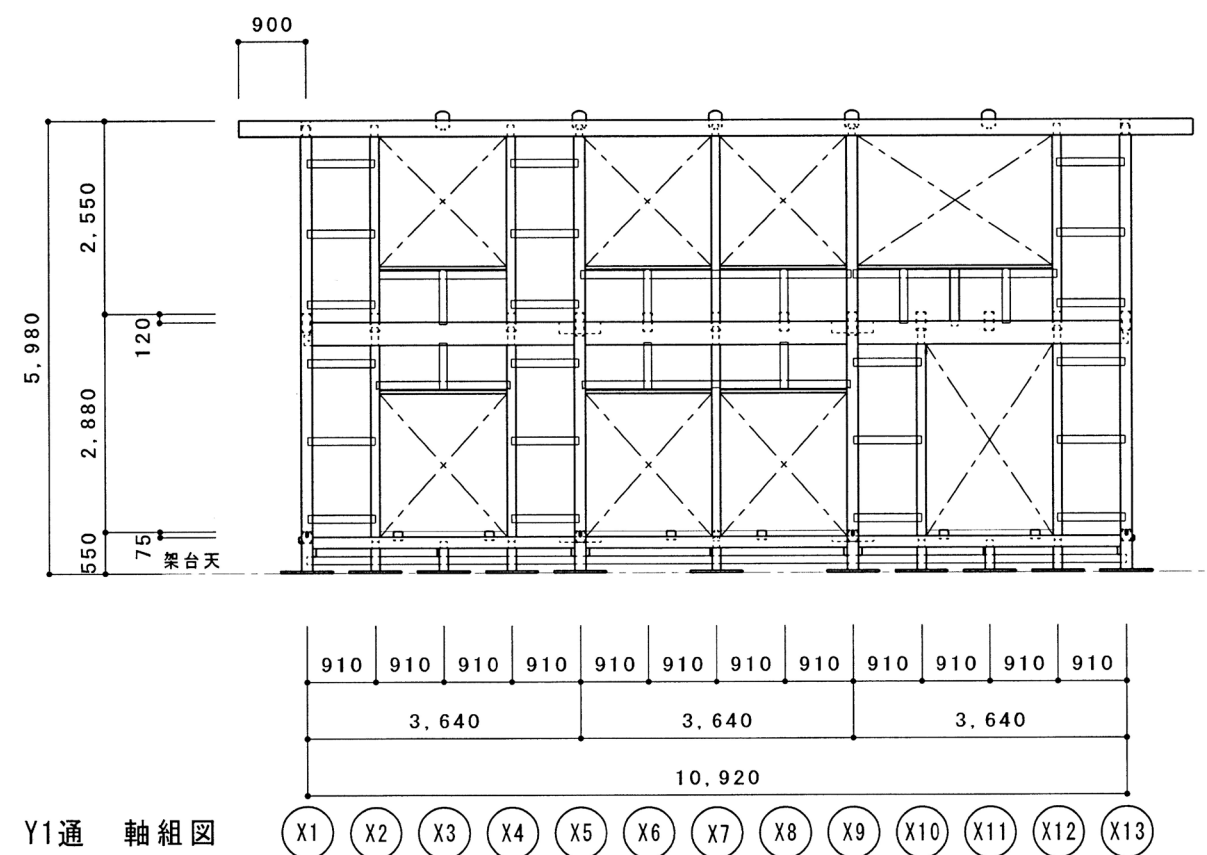


図5 試験体 No.4 - Y1 通軸組図

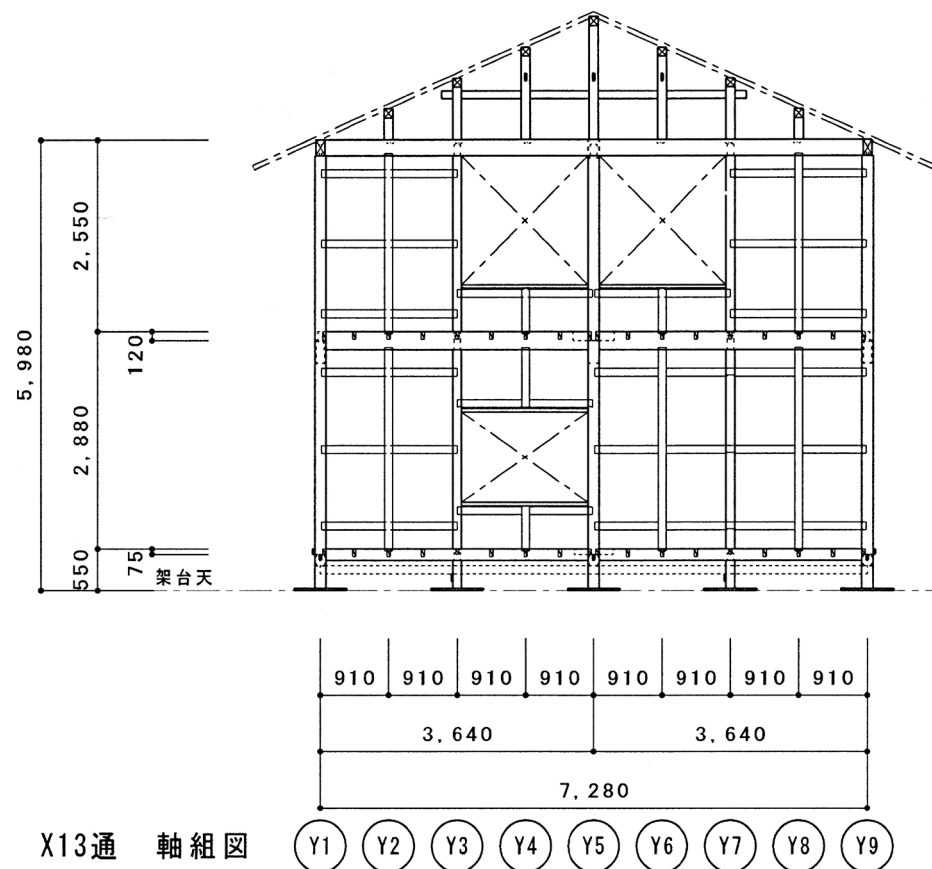


図6 試験体 No.4 - X13 通軸組図

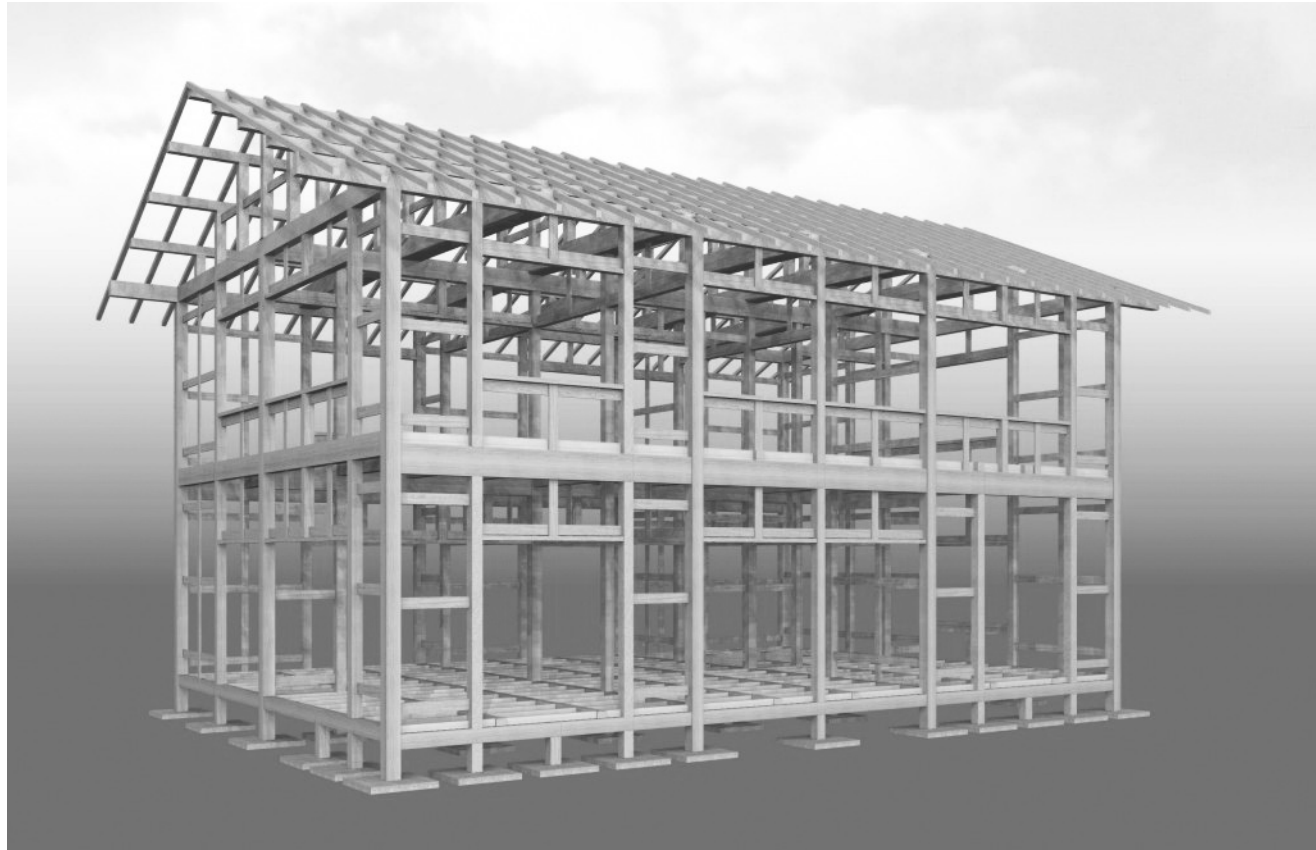


図7 試験体 No.4 のイメージ図

「伝統的構法の設計法作成及び性能検証実験」検討委員会は、 情報公開をしています。

「伝統的構法の設計法作成及び性能検証実験」検討委員会

検討委員会の概要 検討委員会の構成 部会の概要 公開実験 公開フォーラム・シンポジウム 進捗状況 おしらせ リンク

お知らせ

2010.9.2	柱脚部動摩擦の振動台実験の見学についての記事を追加しました。
2010.8.22	9月12日(日)の第一回シンポジウム 金沢の予約受付フォームを公開しました。
2010.8.22	9月12日(日)の第一回シンポジウム 金沢の詳細情報を追加しました。
2010.8.22	「部会の概要」コーナーの各部会のページに、これまでの開催日時の記事を追加しました。
2010.7.21	7月22日、23日、26日、27日に行う実証実験の見学についての記事を追加しました。
2010.7.10	6月5日のフォーラムの記録の各部会主催の講演と質疑応答に、発言録のテキストを追加しました。
2010.6.30	6月5日のフォーラムの記録に、各部会主催の講演と質疑応答のビデオを追加しました。
2010.6.19	6月5日のフォーラムの記録に、アンケート結果と開会挨拶から鈴木委員長の講演までの発言録を追加しました。
2010.6.16	6月5日のフォーラムの記録に、開会挨拶から鈴木委員長の講演までのビデオを追加しました。
2010.6.12	6月5日のフォーラムの当日配布資料を元に、部会の概要コーナーに詳細ページを追加しました。
2010.6.10	リンクページに、本サイトへのリンクバナーと、メルマガ登録ページへのリンクバナーを追加しました。どうぞご利用ください。
2010.6.6	「伝統構法新委員会 キックオフフォーラム(京都)」(6月5日(土)開催)、大勢の方々にお願いいただき、無事終了しました。ありがとうございました。当日の会場写真、国土交通副大臣 馬淵澄夫氏からのビデオメッセージ、当日配布資料を公開しました。
2010.5.27	「伝統構法新委員会 キックオフフォーラム(京都)」(6月5日(土)開催)は申込を締め切らせていただきました。ありがとうございました。予約のない方は当日会場に入場することはできませんのでご承知ください。当日の記録・配布資料・映像などは、後日、当サイトにて公開予定です。
2010.5.10	「伝統構法新委員会 キックオフフォーラム(京都)」(6月5日(土)開催)のちらしができました。参加費無料、先着300名要予約。

「伝統的構法の設計法作成及び性能検証実験」検討委員会

第一回シンポジウム 金沢

2010年9月12日(日) 13:30~17:20

9月12日(日)に金沢工業大学で第一回シンポジウム金沢を開催します。定員は250名。詳細はこちらを御覧ください。

伝統構法新委員会
メルマガ申込
mail magazine

委員会の活動や、このサイトの更新情報をお知らせするメルマガを発行します。ご希望の方はここからメルマガ登録をお願いします。

「伝統的構法の設計法作成及び性能検証実験」検討委員会

当サイトとメルマガ登録へのリンクフリーのバナーを作りました。委員会の存在を広く知っていただくためにご活用ください。こちらからどうぞ

<http://www.green-arch.or.jp/dentoh/>

(緑の列島ネットワーク Web サイト内の 1 コーナーです。「緑の列島」で検索し、TOP ページのバナーをクリックして移動してください)

当委員会で実施する実験については原則として公開で行います。

委員会主催のフォーラムやシンポジウムなどを開催し、
事業の成果等を情報発信するとともに広く意見交換を行います。

補助事業者である NPO 法人緑の列島ネットワークのホームページ内に
設置している特設サイトで情報公開をしています。

今回のシンポジウムは、インターネットによるビデオ生中継をすると共に、
配布資料、テキストデータなども特設サイトにて公開します。

今年度は、

E- ディフェンス振動台での公開実験を 2011 年 1 月に、

公開実験後のフォーラムを、

3 月 19 日 建築会館ホール (東京)

3 月 26 日 キャンパスプラザ京都 (京都)

にて行ないます。

情報をいち早くお届けするために、検討委員会発のメールマガジンを発行しています。

委員会の特設サイトのトップページからお申し込みいただけます。