



1

本日の講演内容

1. 経歴など
2. 工学院大学河合研の活動
(2011年度~2024年度)
3. 研究内容紹介
 - ・柱傾斜復元力
 - ・五重塔の地震時挙動
 - ・CLT建築の基準整備
 - ・CLT建築の実物件の実験・解析
 - ・中高層木造の地震時挙動
 - ・在来軸組構法（仕様規定と構造計算法）
 - ・地震被害調査
4. 趣味の話・その他（含、河合継手）
5. 雑感（まとめて代えて）

2

本日の講演内容

1. 経歴など
2. 工学院大学河合研の活動
(2011年度~2024年度)
3. 研究内容紹介
 - ・柱傾斜復元力
 - ・五重塔の地震時挙動
 - ・CLT建築の基準整備
 - ・CLT建築の実物件の実験・解析
 - ・中高層木造の地震時挙動
 - ・在来軸組構法（仕様規定と構造計算法）
 - ・地震被害調査
4. 趣味の話・その他（含、河合継手）
5. 雑感（まとめて代えて）

3

1. 経歴など

- 1958年3月12日 神奈川県生まれ
- 1981年3月 東京大学工学部建築学科卒業
- 1983年3月 東京大学大学院工学系研究科 建築学専門修士課程修了
- 1986年3月 同 博士課程修了（工学博士）
- 1986年4月 東京理科大学工学部第2部 助手
- 1992年11月 建設省（のち国土交通省）建築研究所 研究員（のち主任研究員、室長）
- 2001年4月 国土交通省国土技術政策総合研究所 室長
- 2004年4月 独立行政法人建築研究所 上席研究員
- 2011年4月 工学院大学建築学部建築学科 教授

4

学生時代・大学院生時代

- 東京大学・内田坂本研究室の卒業論文で、日本の継手仕口の歴史を調べる（←きっかけは、3年生の建築構法の夏休み課題＝継手を作ってくる）
- 法隆寺金堂から始まって、数冊の修理工事報告書を読み、継手仕口を拾い上げていくという地道な作業
- 建築物の中での継手仕口の選択理由を考えると、構造的な要求、組立の手順という施工上の要求、見え掛りという意匠上の要求など、様々。その中で、構造的な要求がもっとも説明しづらかった。
- 修士課程では和風継手の構造実験など、博士課程では有限要素法やマトリクス構造解析、民家の水平加力試験などを行う。

5

学生時代・大学院生時代

- 民家の水平加力実験（昭和60年）

- 柱と垂れ壁からなるフレーム
- 柔らかな水平構面

6

東京理科大学・助手（1986年～）

- 杉山英男先生の退官（東大→理科大）にともなう助手の採用
- 第2部＝夜間部なので、11時から23時ごろまで勤務
夜型の生活に拍車がかかる
- 年上の学生も含め卒論の対応、その他、木造建築研究フォーラムの活動
- この頃の研究としては、
 - ・水平構面のせん断変形を考慮した木造住宅の設計法
 - ・八甲田ホテルの設計に関わる柱梁接合部（かんざし工法）の実験的研究
 - ・川崎市立日本民家園での民家の常時微動測定
 - ・奈良平城宮跡朱雀門の復元に関わる「柱傾斜復元力」の実験および解析、

7


建築研究所（1992年11月～）

- 1993年1月に釧路で地震、応急危険度判定の講師
- 木造界があわただしくなる時期
 - ・木造の耐震性に関する国際共同研究プロジェクト
 - ・文化財研究所と社寺建築の常時微動測定
 - ・1995年兵庫県南部地震の調査、対応
 - ・建築基準法の性能規定化（→2000年基準）
 - ・木造建築物の基準改正（→2000年基準）
 - ・木質ハイブリッド構造の研究開発プロジェクト
- 木質ハイブリッド構造の研究開発プロジェクトでは幹事役を勤める。木材を使用した耐火部材の開発が行われ、今日の耐火木造、中高層木造に繋がる。
- 2000年の基準改正では、木造建築物の仕様規定の改正原案作成を担当

8

再び建築研究所（2004年～）

- 2005年、文科省の「大都市大震災軽減化特別プロジェクト」において木造住宅倒壊実験
- 2007年、イタリアの研究グループによる7階建てCLTパネル構造の振動実験
- 2009年、接合部の設計法等による違いを確認する3階建て軸組構法住宅の振動実験
- 2009年、米国の研究グループNEESWoodによる6層枠組壁工法+1層鉄骨造の振動実験



9

再び建築研究所（2004年～）

- 2004年と2006年、NPO木の建築フォーラムの事業としての五重塔の模型振動実験
- 2006年からようやく建築研究所で伝統木造の構造に関する研究予算がついた。垂れ壁と柱からなる構面の振動実験、その設計式の提案など。



10

本日の講演内容

1. 経歴など
2. 工学院大学河合研の活動（2011年度～2024年度）
3. 研究内容紹介
 - ・柱傾斜復元力
 - ・五重塔の地震時挙動
 - ・CLT建築の基準整備
 - ・CLT建築の実物件の実験・解析
 - ・中高層木造の地震時挙動
 - ・在来軸組構法（仕様規定と構造計算法）
 - ・地震被害調査
4. 趣味の話・その他（含、河合継手）
5. 雑感（まとめて代えて）

11

河合研2011年度

- 東北地方太平洋沖地震の直後に工学院大学へ
- 4月、宮澤先生、小野里研、河合研で地震被害調査に
- 4月～5月、東大稲山研と共同で木質ラーメンの実験。
- 8月、川崎市立日本民家園で三澤家と鈴木家の振動測定（常時微動測定、人力加振）
- 8月、合宿を兼ねて遠野市の福泉寺五重塔常時微動測定、強震観測準備、釜石市周辺で地震被害調査



12

河合研2011年度

- 10月、井の頭公園（井の頭自然文化園）にあるアトリエ館の常時微動測定。
- 11月、建築研究所の荒木康弘氏と共同でラーメンフレームの静的加力実験、振動実験。
- 11月、再び福泉寺に赴き強震観測データの取り出し、さらに地震被害調査を大船渡で実施。



13

河合研2012年度

- 4月、岩手県遠野市の福泉寺に行き、強震観測データの取り出しを行う。遠野ふるさと村の民家も見学。
- 7月、木質構造国際会議（WCTE2012）に出席
- 8月、再度、福泉寺に行き強震観測データの取り出し、および2回目の常時微動測定、人力加振。
- 8月、川崎市立日本民家園で、太田家、山下家の常時微動測定、人力加振を行った。



14

河合研2012年度

- 10月、齋藤木材工業と共同で、標準化を目的とした集成材接合部の加力実験を実施
- 11月～12月、建築デザイン学科の富永先生からの依頼で、弓道場、ボクシング場の接合部の実験
- 11月、宮澤先生のお誘いで株式会社サトウと共同で、凹型平面を持つ2階建て住宅の振動実験を実施した。



15

河合研2012年度

- 12月、CLTの基準策定に向けた委員会活動の一環として、接合部の高速加力実験を八王子11号館で実施。
- 12月、建築研究所（当時）の中川貴文氏と共同で、集成材フレーム、構造用合板耐力壁による試験体の振動実験を実施。
- 3月、三井ホーム株式会社からの依頼で、銅板挿入ドリフトピン接合を用いた木質フレームの加力実験を実施。



16

河合研2013年度（ここからは概要）

- 渡辺一正氏の紹介で、鳥取県鳥取市にある天徳寺本堂及び庫裏について、耐震診断・耐震改修のための基礎資料とするため、8月、常時微動測定、人力加振。
- 秋田県横手市増田町、富永研、篠沢研、村上研、田村研などが、それぞれの視点から幅広く研究対象とする。8月、内蔵を有する町屋2棟で、常時微動測定、人力加振＝河合研はいつも揺らし専門
- 高知県自治会館の構造設計に資する目的でCLT耐力壁水平加力実験を実施



17

河合研2014年度

- 9月～10月、株式会社サトウと共同で、制振壁を有する2階建て住宅の振動実験を実施
- 2月、秋田県横手市増田町の土蔵土塗り壁の試験体製作開始
- 2月、CLTの基準策定に向けた委員会会で5階建てと3階建ての振動実験。河合研の学生も参加。



18

河合研2015年度

- 6月、日本民家園で耐震改修後の鈴木家の常時微動測定、人力加振
- 9月、増田町の土蔵土塗り壁試験体の加力実験を実施
- 1月、耐震補強時に問題となる柱頭柱脚のほそのせん断加力実験（日本建築防災協会の依頼）
- 2月、株式会社ウッドワンと共同で、LVL耐力壁の基礎、CLT床との接合部の実験



19

河合研2016年度

- 7月、CLT建築推進協議会の活動（設計支援）の一環として、2017年に実際に建設されることになる建物の2層耐力壁試験を実施した
- 12月、柱傾斜復元力の静的加力実験、振動実験を実施
- 1月、株式会社サトウとの共同で、3階建て狭小間口住宅の振動実験を実施。



20

河合研2017年度

- 8月、合宿で山形に。天童市の常安寺にも立ち寄る。
- 9月～10月、高知県のCLTを用いた実物件の構造設計に関連し、接合部の回転抵抗に関する加力実験を実施
- 10月、齋藤木材工業株式会社と共同で、集成材柱の座屈実験を実施
- 11月、柱傾斜復元力の静的加力実験、この年は円形断面の柱



21

河合研2018年度

- 6月、宮澤健二先生のご紹介で、御成小学校旧講堂の改修計画に関して、筋かい壁の水平加力実験
- 10月、柱傾斜復元力の実験実施。この年は、理論式による荷重変形関係の改善を考え、木口の部分圧縮試験も併せて行った。
- 2月、前年度に行った高知県のCLTを用いた建物の接合部実験に関連して、CLTと集成材との間の圧縮性能等を確認する基礎実験を実施



22

河合研2019年度

- 7月、川崎市立日本民家園で、江向家、作田家、菅原家、三澤家（改修後）、4棟の常時微動測定、人力加振
- 8月、高知県に建てられるCLTを用いた実物件の構造設計に資するための接合部回転実験を実施
- 12月、柱の上下に横架材がある場合の柱傾斜復元力の実験を実施
- 12月、常安寺五重塔の板壁を模した落としこみ板壁試験体の水平加力実験を実施。



23

河合研2020年度

- 新型コロナウイルス感染症の拡大で、ゼミも遠隔、飲み会もWeb飲み。
- 7月、9月から11月、前年度に続きケアンズコーポレーション「外付け耐震フレーム」の水平加力実験（見学）
- 8月、一建設による3階建て住宅の振動台実験の損傷観察やデータ整理等に2人の学生が参加
- 11月、完成した常安寺五重塔を訪れ、常時微動測定、人力加振を行った。



24

河合研2021年度

- この年はゼミも広い教室を借りて対面で行えたが、実験室を使う研究の計画が立てられず、卒論は外部の実験、測定か、解析的な研究テーマとした。
- 4月、小松マテール株式会社による炭素繊維より線で補強した集成材梁の曲げ実験が石川ウッドセンターで行われ、卒業生2人が見学に
- 8月、川崎市立日本民家園で井岡家、山田家、耐震改修後の山下家の常時微動測定、人力加振を実施。



25

河合研2022年度

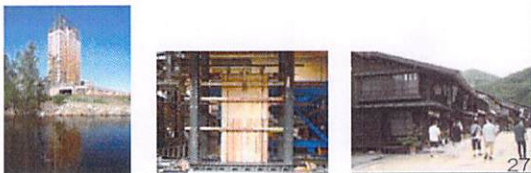
- コロナ禍も落ち着いてきて、授業は多くが対面に戻り、ゼミも対面、研究室合宿も2年ぶりに再開
- しかしながら、卒業論文はすべて解析的研究
- 例年、ゼミの一環で倒壊解析ソフトwallstatの講習会を行っており、中川貴文先生にも講師として来てもらっている。この年は7月に開催。



26

河合研2023年度

- 6月、木質構造国際会議 (WCTE2023) がソルウェーで開催され、河合の他、博士課程1人と修士2年1人が参加
- 7月~10月、大東建託株式会社と共同で、CLTパネルを用いた屋根構面のせん断加力実験を実施
- 9月、夏合宿で長野方面に行き、奈良井宿、松山城、やまびこドーム、諏訪大社などを見学、河合の希望で安曇野ワイナリーにも



27

河合研2024年度

- 4月末~5月、河合のほか、修士1名と卒業生2名で能登半島の地震被害調査
- 8月、齋藤木材工業株式会社と共同で、埋木補修をした集成材柱の座屈実験を実施
- 11月、柱傾斜復元力の減衰を調べるための自由振動実験を実施



28

本日の講演内容

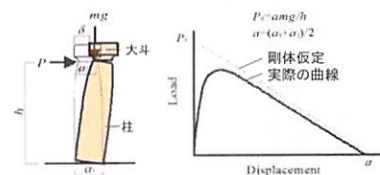
1. 経歴など
2. 工学院大学河合研の活動 (2011年度~2024年度)
3. 研究内容紹介
 - ・ 柱傾斜復元力
 - ・ 五重塔の地震時挙動
 - ・ CLT建築の基準整備
 - ・ CLT建築の実物件の実験・解析
 - ・ 中高層木造の地震時挙動
 - ・ 在来軸組構法(仕様規定と構造計算法)
 - ・ 地震被害調査
4. 趣味の話・その他(含、河合継手)
5. 雑感(まとめて代えて)

29

29

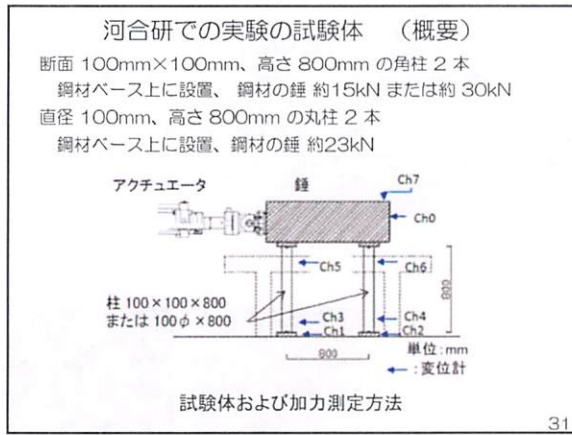
柱傾斜復元力とは

柱傾斜復元力とは、図のような太くて短い柱が鉛直荷重を受けながら水平力により柱が傾斜する際、鉛直荷重が傾斜を戻す側に働く力のこと
伝統的木造建築物の耐震性能に関する

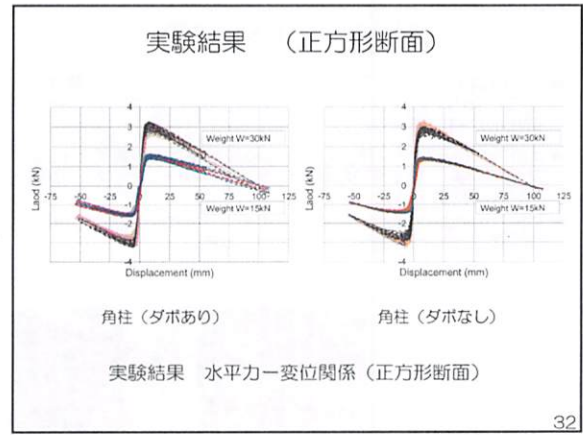


30

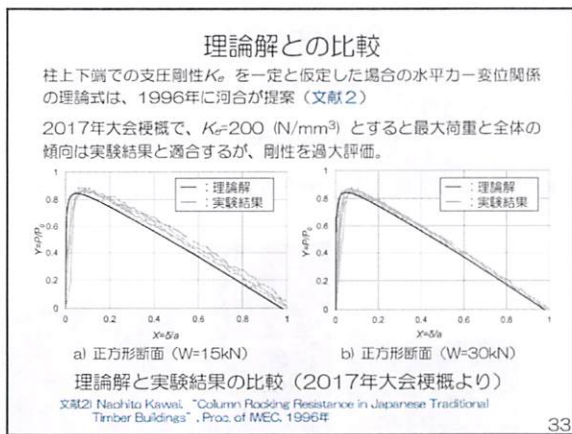
30



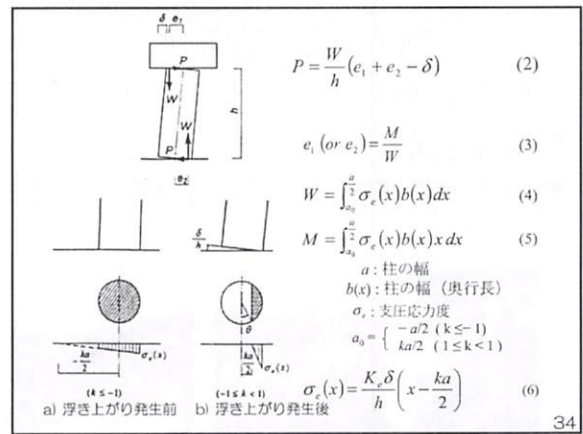
31



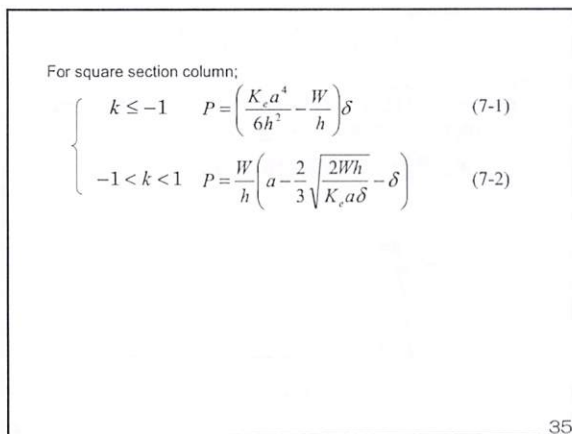
32



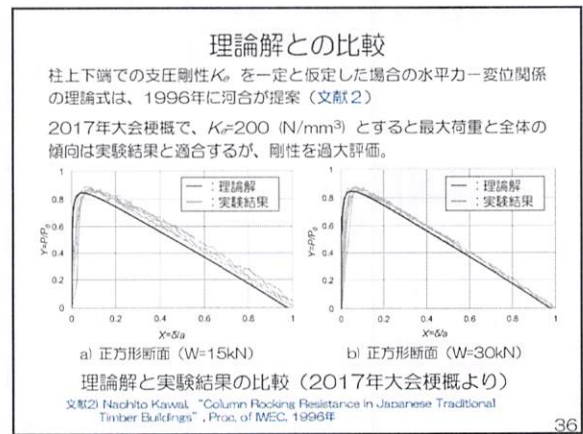
33



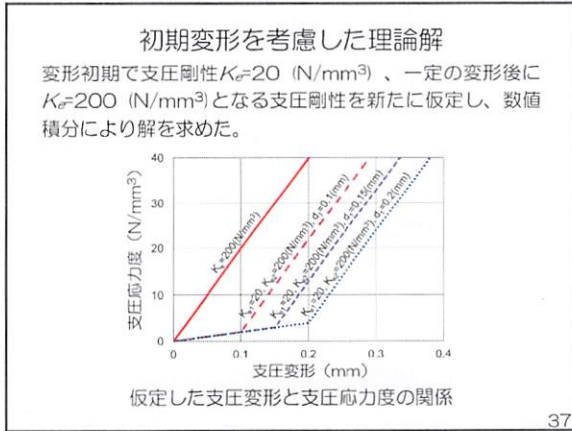
34



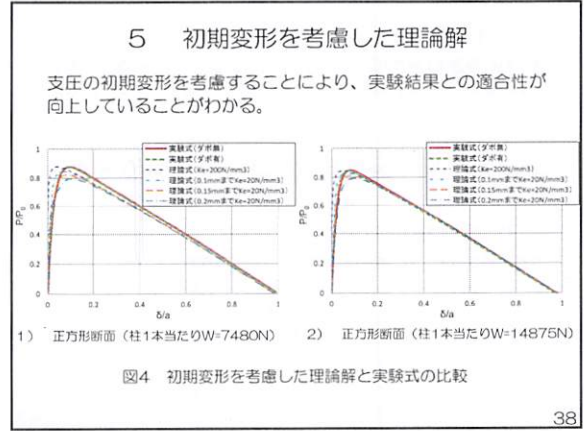
35



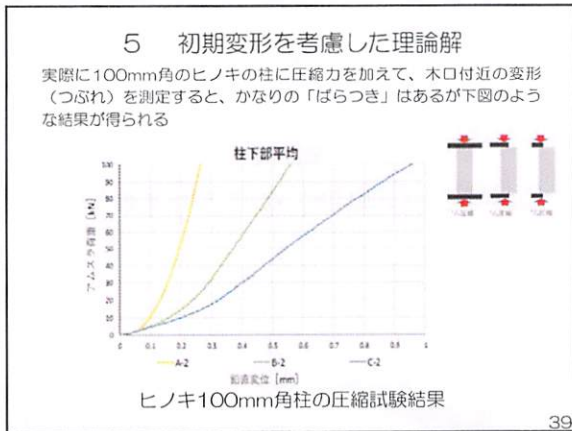
36



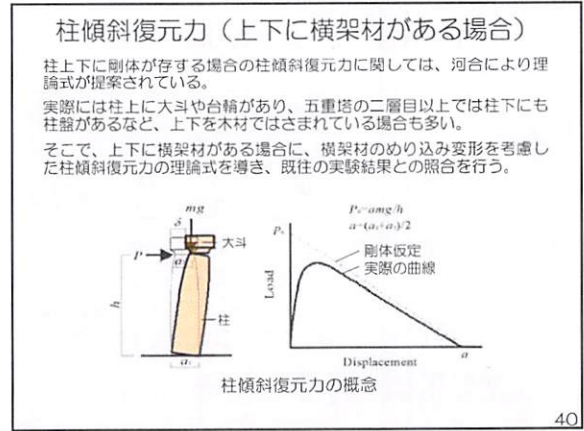
37



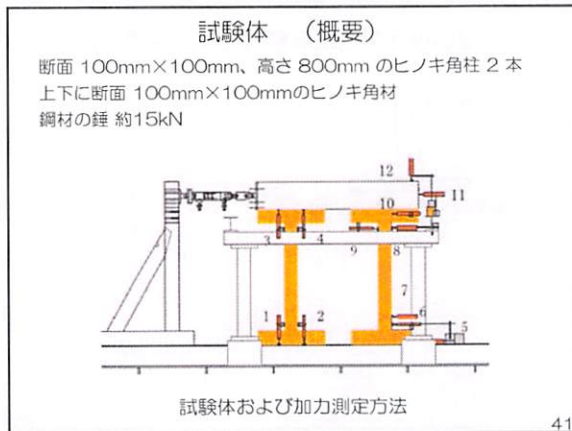
38



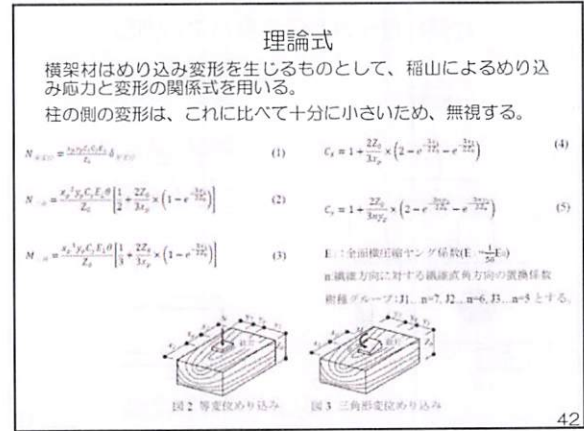
39



40



41



42

柱傾斜復元力へのめり込み式の適用

1. 柱に浮き上がりが生じる前(全面に圧縮が生じている段階)等変位めり込みと三角めり込みの和として、軸力およびモーメントを算出




図6 全面に圧縮が生じている場合の概念図

2. 柱に浮き上がりが生じた後
三角めり込みとして、軸力およびモーメントを算出

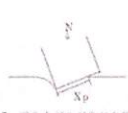


図7 浮き上がりが生じた後の概念図

43

43

実験結果と理論式の比較-1

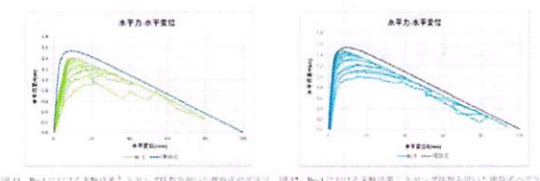


図11 Bc-1における実験結果とシヤンズ係数を用いた理論式のグラフ
図12 Bc-1における実験結果とシヤンズ係数を用いた理論式のグラフ

3) 阿部貴大「柱傾斜復元力に関する静的加力実験―柱の上下に横架材がある場合―」2019年度工学院大学卒業論文 2020年

44

44

5 実験結果と理論式の比較-2

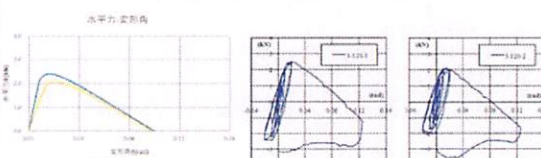


図13 理論式を用いた荷重変形関係
図14 瀧野による実験結果⁴⁾

樹種：スギ
W=33.9kN

4) 瀧野敬夫「軸力変動および横架材を有する柱の傾斜復元力特性に関する実験的研究」日本建築学会構造系論文集85巻771号 2020年

45

45

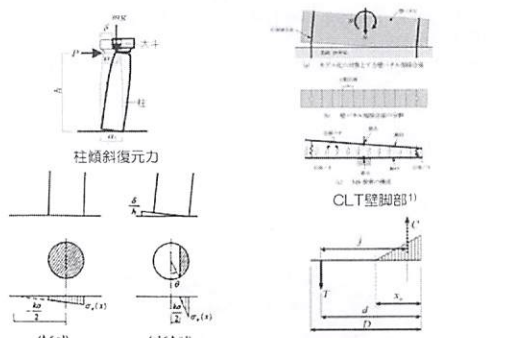
補足-1

柱傾斜復元力・集成材構造・CLTパネル構造の類似性

46

46

柱傾斜復元力とCLT壁パネル脚部



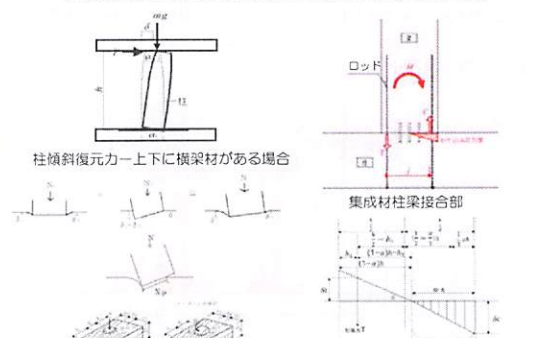
柱傾斜復元力
CLT壁脚部¹⁾

1) 2016年版 CLTを用いた建築物の設計施工マニュアル 2021年構造・材料増補版

47

47

柱傾斜復元力と集成材構造の柱梁接合部



柱傾斜復元力-上下に横架材がある場合
集成材柱梁接合部

図1 柱傾斜復元力
図2 集成材柱梁接合部

48

48

補足一 2
柱傾斜復元力における減衰について

49

49

柱傾斜復元力の減衰

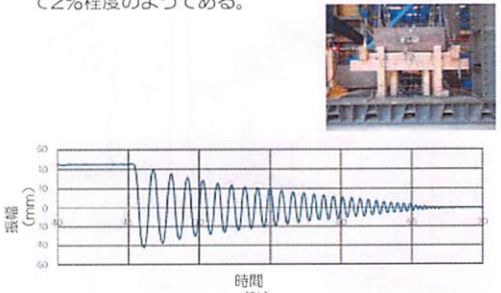
- 柱傾斜復元力の荷重変形関係は、非線形弾性に近いため、構造計算においては、履歴減衰をゼロとして計算することが推奨されている。
- しかし、振動実験の様子を見ると、変位ゼロを通過する際に、浮き上がった木口が着地する時点で衝突現象が起きており、反発係数が1ではないことによる減衰があるように感じられる。
- そのため、2024年度の蘆野馨の卒業研究では、自由振動実験を行い、減衰を把握してみた。

50

50

柱傾斜復元力の減衰（実験結果）

- その結果は、大変形領域での減衰は残念ながら期待したほど大きくなく、減衰波形から求めた等価粘性減衰定数で2%程度のものである。



51

51

本日の講演内容

1. 経歴など
2. 工学院大学河合研の活動
(2011年度～2024年度)
3. 研究内容紹介
 - ・ 柱傾斜復元力
 - ・ 五重塔の地震時挙動
 - ・ CLT建築の基準整備
 - ・ CLT建築の実物件の実験・解析
 - ・ 中高層木造の地震時挙動
 - ・ 在来軸組構法（仕様規定と構造計算法）
 - ・ 地震被害調査
4. 趣味の話・その他（含、廻り廻り）
5. 雑感（まとめて代えて）

52

52

五重塔の振動測定、振動モデル

- 五重塔は一見高くて不安定に見えるものの、地震で倒壊した記録がないとされている
- 1990年代から、法隆寺、寛永寺、日光東照宮、中山法華経寺、厳島神社、妙成寺、最勝院、海住山寺などで五重塔の常時微動測定を行った。
- 妙成寺五重塔については、簡易な振動モデルの適用を試み、常時微動測定の結果をうまく再現し得ることを、平成16年度～平成18年度科学研究費補助金基盤研究（C）研究成果報告書で述べている。

53

53

五重塔の常時微動測定と振動モデルの提案

五重塔	建設年	高さ(m)	屋根葺材	心柱形式
法華経寺	1622	30.78	銅板	懸垂式
厳島神社	1407	28.38	檜皮	初重梁上
妙成寺	1618	34.18	こけら	礎石上

微動計設置状況

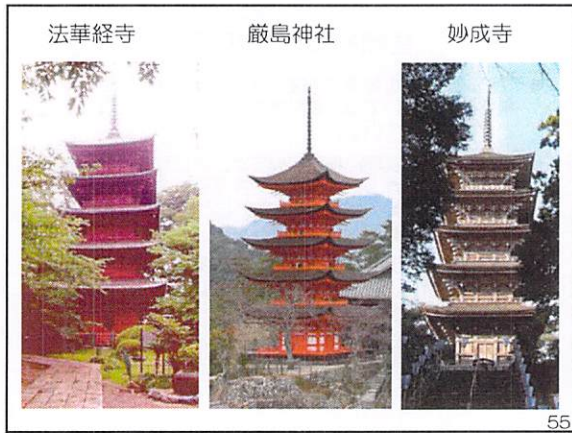


人力加振

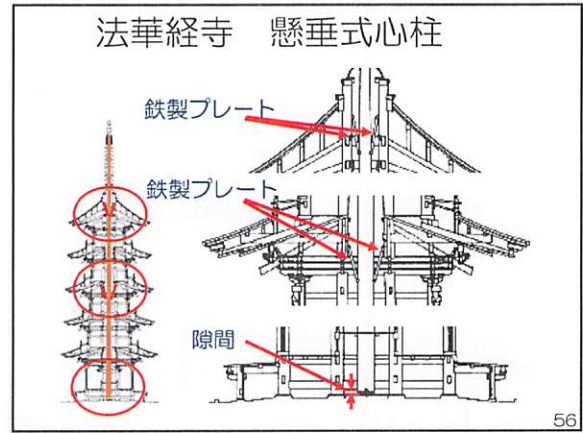


54

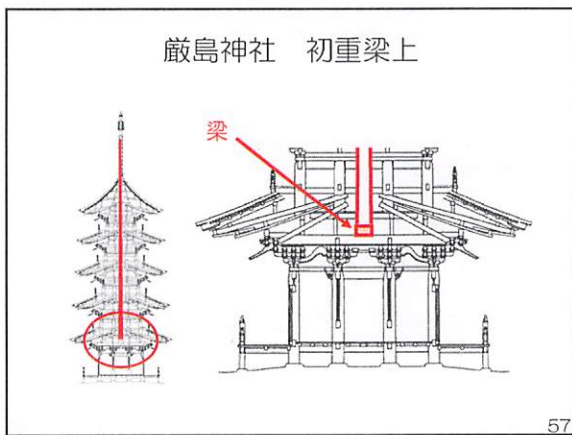
54



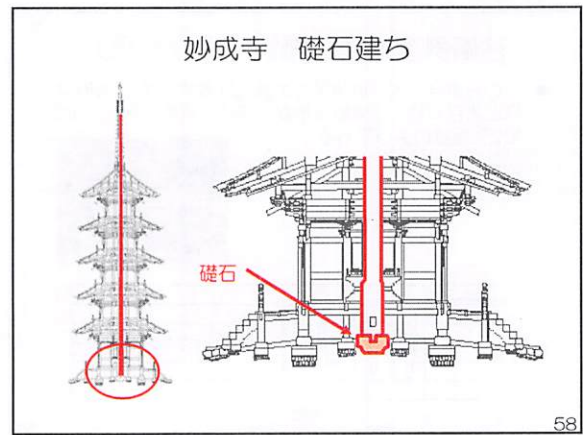
55



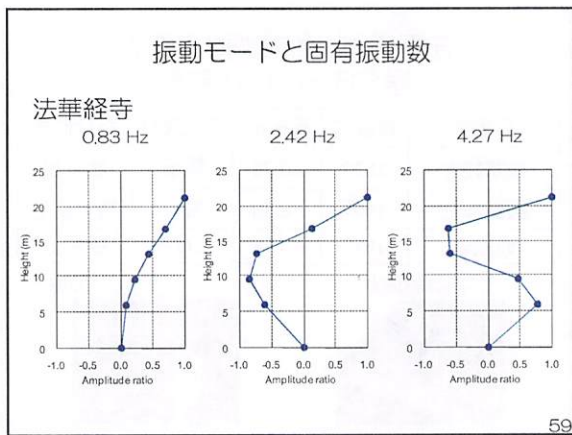
56



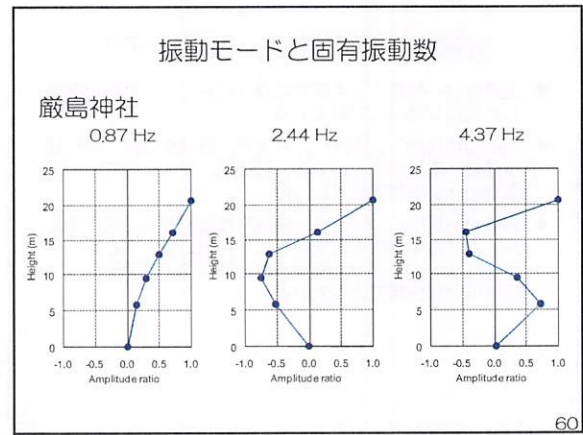
57



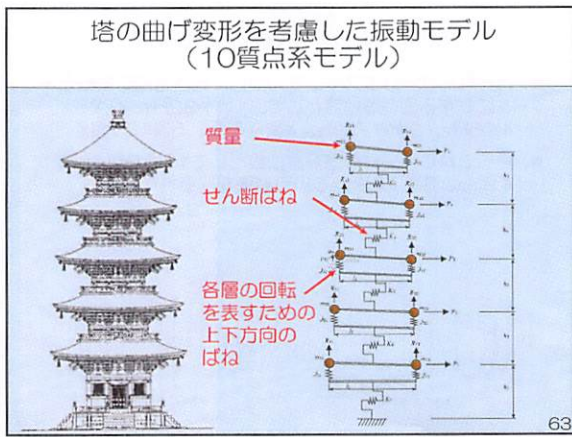
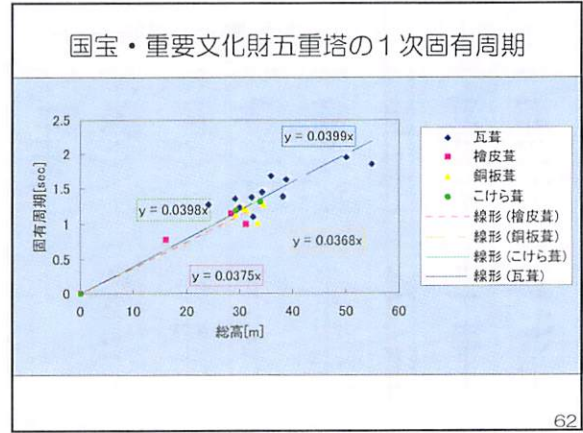
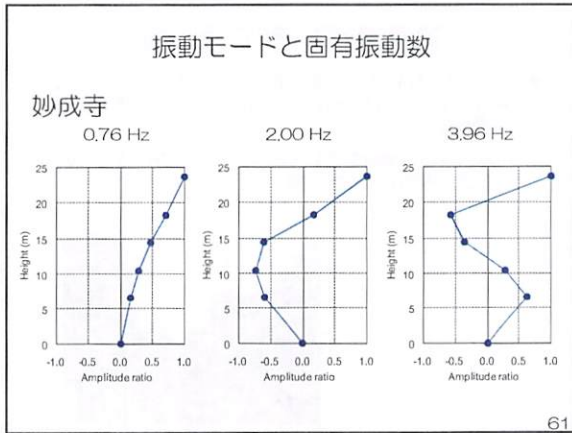
58



59



60



妙成寺五重塔の常時微動測定結果に 基づくパラメータの算出

妙成寺五重塔の常時微動測定から得られた1次から3次までの振動モードと固有振動数をターゲットとする。

①各質点は、積算で求めた各層の質量を左右で等分

$m_{11} = m_{12} = 22,500$ (kg) $m_{21} = m_{22} = 13,000$ (kg)
 $m_{31} = m_{32} = 12,500$ (kg) $m_{41} = m_{42} = 11,000$ (kg)
 $m_{51} = m_{52} = 9,500$ (kg)

②層の幅 $l_1 \sim l_5$ 、高さ $h_1 \sim h_5$ は、それぞれ以下の値

$l_1 = 4.85$ (m), $l_2 = 4.38$ (m), $l_3 = 3.92$ (m),
 $l_4 = 3.46$ (m), $l_5 = 3.00$ (m)
 $h_1 = 5.35$ (m), $h_2 = 3.94$ (m), $h_3 = 3.94$ (m),
 $h_4 = 3.94$ (m), $h_5 = 3.94$ (m)

64

妙成寺五重塔の常時微動測定結果に 基づくパラメータの算出 (つづき)

③せん断剛性は、各層の幅に比例して、上層に行くほど低下するものとした。

$$K_j = (l_j / l_1) K_1$$

④鉛直ばねの剛性は一定とした。

$$J_j = \text{const.}$$

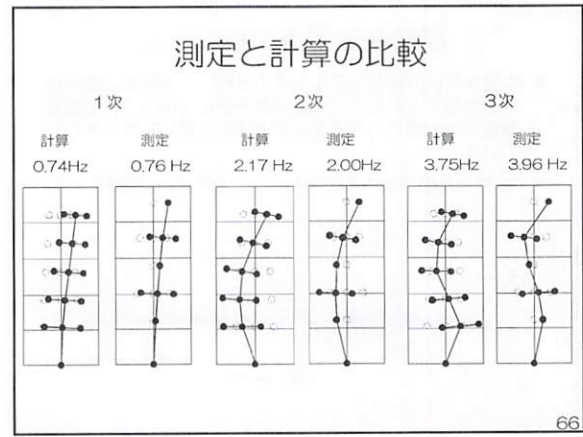
未知数は初重のせん断剛性 K_1 、鉛直ばね剛性 J_j の2つ以上の仮定で算出した結果、

$$K_1 = 1.8 \times 10^7$$
 (N/m)

$$J_j = 5 \times 10^7$$
 (N/m)

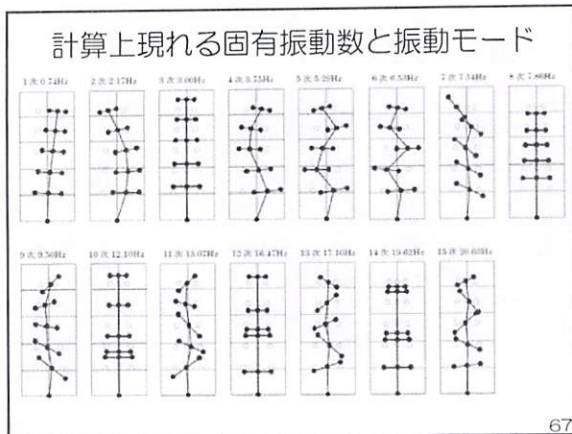
とした場合に、1次から3次の振動モード並びに固有振動数が、測定結果とよい一致を見た。

65



65

66

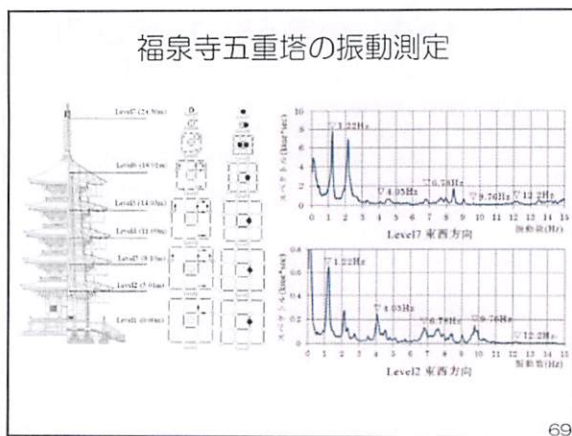


67

福泉寺五重塔の振動測定

- 平成2年に建立された遠野市の福泉寺五重塔において、2011年に常時微動測定と人力加振、および強震観測を行う機会を得た
- 中村哲平の卒業研究として、常時微動計を設置し、固有振動数、振動モードを把握している。

68



69

福泉寺五重塔の振動測定

- 得られたフーリエスペクトルから、高さ方向の振動モードに対する固有振動数として、1次1.22Hz、2次4.05Hz、3次6.78Hz、4次9.6Hz、5次12.2Hz
- さらにねじれ振動の固有振動数として1次1.95Hz、2次4.8Hz、3次7.59Hzという結果が得られた。

70

福泉寺五重塔の振動測定

- 中村は前述の振動モデルの適用を行い、各ばね定数の推定値を得るとともに、その振動モデルを用いて、強震観測結果の地盤での記録を入力とする地震応答解析を行っている
- 図はLevel6の高さでの解析結果と観測結果の比較

71

解析的研究—高さの影響

- 五重塔が地震で倒れない理由として、固有周期が長いために超高層ビルと同様、地震で共振を起こしにくいからという説明があるが、それを確認しようと2016年度の大畑実愛の卒業論文およびそれを継続して2018年度の修士論文となった研究で、高さの異なる五重塔のモデルを用いた解析的研究が行われた。
- 使用した振動モデルは前述の10質点系モデルであるが、倒壊解析ソフトwallstat上でこれを構築しなおして解析を行っている。

72

解析的研究—高さの影響

- 解析の結果、基準法で想定する2種地盤の応答スペクトルに適合する人工地震波に対しては高さの増大による変化がさほど見られなかったが（図左側）、兵庫県南部地震のJMA神戸NS成分に対しては、高さの高い場合に2次モードが現れ、高さにより最大応答変位が減少する傾向がうかがえた（図右側）。

73

解析的研究—心柱の影響

- 前述の10質点系モデルは、心柱が含まれていない塔身だけの振動モデルである。心柱を曲げ材として横に立て、五重屋根のところで塔身と接合すると、閃（かんめき）効果までは再現できないものの、心柱の存在による耐震性への影響を確認できる。
- 2019年度の東山梨花の卒業研究でこの解析的検討が行われた。妙成寺の10質点系振動モデルに、心柱を加えない場合、加えた場合について、wallstatによる時刻歴の応答解析を行っている。

74

解析的研究—心柱の影響

- 解析結果によると、応答波形は心柱ありとなしの差があまり現れないが、しかし、解析結果全体を見ると、心柱なしのほうが倒壊する割合が高かった。

75

常安寺五重塔の解析

- 天童市の常安寺五重塔については、河合研究室で建設段階から構造検討に加わった。
- この五重塔の構造計算では3次元モデルに対する増分解析が行われているので、2016年度の倉本歩の卒業論文および2018年度の修士論文では、その計算結果も参考に10質点モデルの適用を試みている。
- さらに、2021年度の中道康平の修士論文では、2019年度に卒業研究で行われた板壁の実験結果も取り入れ、構造要素の荷重変形関係を積み重ねてモデルの再構築を試みている。河合は、それを修正した解析モデルを作成し、常時微動測定の結果と合わせて、木質構造国際会議（WCTE2023）で発表した。

76

本日の講演内容

1. 経歴など
2. 工学院大学河合研の活動 (2011年度～2024年度)
3. 研究内容紹介
 - ・ 柱傾斜復元力
 - ・ 五重塔の地震時挙動
 - ・ CLT建築の基準整備
 - ・ CLT建築の実物件の実験・解析
 - ・ 中高層木造の地震時挙動
 - ・ 在来軸組構法（仕様規定と構造計算法）
 - ・ 地震被害調査
4. 趣味の話・その他（含、河合選手）
5. 雑感（まとめに代えて）

77

基準整備に向けた検討の経緯

- 1990年代に欧州で開発された木質材料CLTは、集成材に用いるのと同様の挽き板（ラミナ）を直交させて接着し、大きなパネルとするものである。
- 我が国でも2011年ごろから製造が始まり、建築基準法の技術的基準策定に向けた検討が開始された。
- 2013年には直交集成板の日本農林規格が制定され、2016年にはCLTを用いた建築物の一般的な設計法に関して、建築基準法に基づく告示が公布・施行されている。

78

構造関連の研究概要（2011～2012年度）

- 主に対象とした構造形式：
幅1mの小幅パネルを全面壁、垂れ壁等に用いて、引きボルト接合等により接合した構面による構造物
- 実験・解析の内容：
構面の水平加力実験
3階建て箱形試験体の振動台実験（5階建て想定）
3階建て箱形試験体の水平加力実験
および、これらの解析との照合



79

79

CLT構造の振動実験（2012年2月）



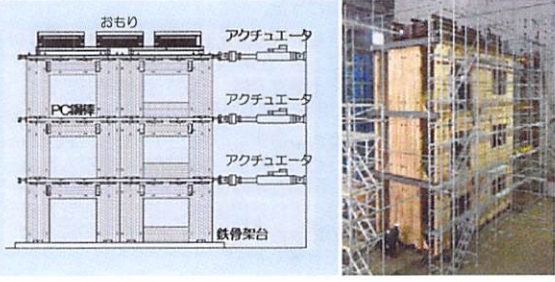
- 小幅パネルの全面壁、垂れ壁等を引きボルト接合した鉛直構面と、CLTパネルによる床を用いた構造
- CLT構造5階建ての耐震設計の可能性を確認

80

80

3層構造物の静加力実験（2013年3月）

目的：大変形時の挙動・損傷確認、立体効果の検証



81

81

3層構造物の静加力実験の結果

損傷状況（最大変形時：2層層間変形角1/14rad）

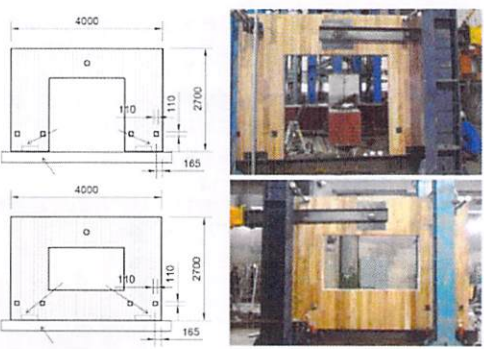


左：パネルのせん断破壊
上：床の曲げ変形

82

82

有開口大判パネルの水平加力試験




83

83

大版パネルの水平加力試験の結果（2012年度）

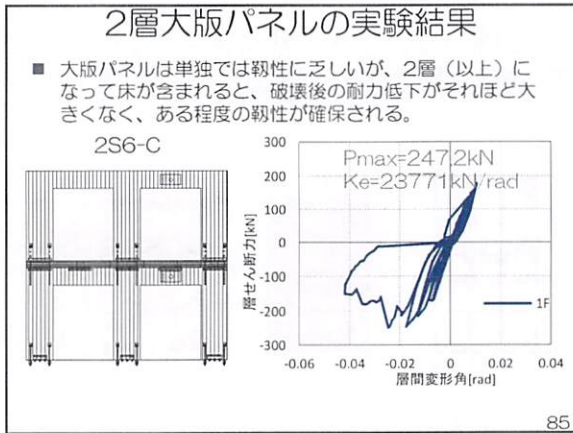
破壊性状



- 窓開口、掃出し開口とともに、パネルの開口臨隅角部でラミナの引張破壊を生じ、靱性の乏しい結果となった

84

84

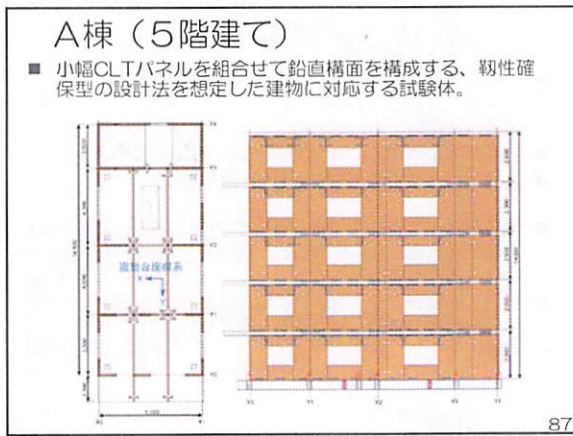


85

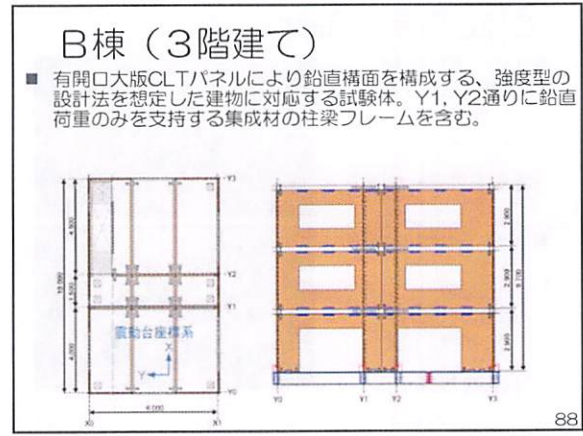
2014年度震動台実験

- 国土交通省補助事業
「CLTを用いた木造建築基準の高度化推進事業」
- 実施主体：
一般社団法人 日本CLT協会
一般社団法人 木を活かす建築推進協議会
株式会社 日本システム設計
- 共同研究：
独立行政法人 建築研究所

86



87

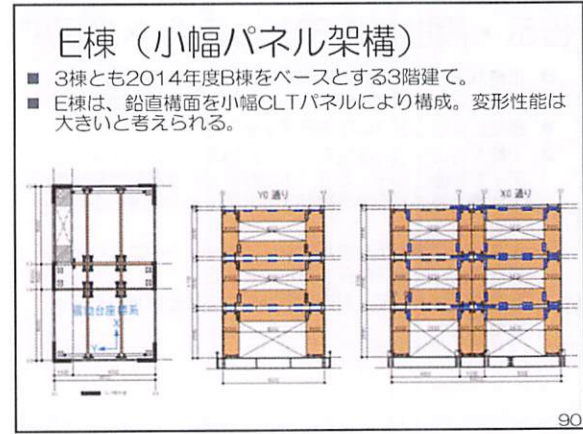


88

2015年度震動台実験

- 国土交通省補助事業
「CLTを用いた木造建築基準の高度化推進事業」
- 実施主体：
一般社団法人 日本CLT協会
一般社団法人 木を活かす建築推進協議会
株式会社 日本システム設計
- 共同研究：
独立行政法人
建築研究所

89



90

D棟（大判パネル架構一）

- D棟は、有開口大版CLTパネルにより鉛直構面を構成。
- 大地震動時に、開口隅角部からの亀裂発生を許容する設計。
- 亀裂発生後は、E棟と同様の挙動を示すと考えられる。

91

91

C棟（大判パネル架構一2）

- C棟は、有開口大版CLTパネルにより鉛直構面を構成。大地震動時にも、開口隅角部からの亀裂発生を許容しない設計。

92

92

C棟とD棟の相違点

- C棟：壁パネルの引張接合は、大版パネルの両端のみ。

亀裂を許容しない

- D棟：袖壁部分の両端にそれぞれ引張接合。垂壁の脱落防止のため柱を挿入。

亀裂を許容する

93

93

振動台実験等のまとめ

- 小判パネル架構により、比較的靱性に富む構造物が可能となり、5階建て程度の建築物で、基準法の大震動に耐える設計が可能。
- 大版パネル架構により、3階建てまでの設計が可能。
- これらに対する解析モデルの妥当性も確認。
- 大版パネル架構には、開口隅角部からの亀裂を許容しない設計法と、許容する設計法が考えられる。
- 亀裂・破断が生じた後は、小判パネル架構と同様の挙動に移行すると考えられる。

94

94

告示・設計施工マニュアルへの反映

- 小判パネル架構、大版パネル架構-1（亀裂発生を許容しない）、大版パネル架構-2（許容する）の3種類を想定。
- 震動台実験も参考に構造特性係数Dsを規定。
- 実験を再現する解析モデルを用いてパラメータスタディを実施。ルート2で（中地震動に対する検討のみで、大地震動時の）安全を確保するための応力割増し係数を規定。
- さらに同様の解析モデルを用いて、ルート1により、壁量計算的に安全を確保する方法を規定。
- 保有水平耐力計算、限界耐力計算における解析モデルを提案。

95

95

本日の講演内容

1. 登壇など
2. 工学院大学河合研の活動（2011年度～2024年度）
3. 研究内容紹介
 - ・ 柱傾斜復元力
 - ・ 五重塔の地震時挙動
 - ・ CLT建築の基準整備
 - ・ CLT建築の実物件の実験・解析
 - ・ 中高層木造の地震時挙動
 - ・ 在来軸組構法（仕様規定と構造計算法）
 - ・ 地震被害調査
4. 趣味の話・その他（含、河合鎌手）
5. 雑感（まとめに代えて）

96

96

CLT建築の実物件の実験・解析

- 一例として心の教育センターを取り上げる
- 心の教育センターは、2020年に高知県高知市大原町に建てられた教育施設で、設計は上田・細木設計共同企業体、構造設計は山本構造設計事務所
- CLTパネルの耐力壁に、両側から構造用集成材を欠き込んで抱き合わせ、柱に取り付く長押のように、回転抵抗を生じさせて水平力に抵抗することをねらっている
- 河合研では2017年度に2階梁と壁パネル交差部、R階梁と壁パネル交差部、および壁パネル脚部（RC基礎との間の接合）の3種類、計9体の試験体に対して、接合部回転抵抗の実験を実施した（石黒翔生の卒業論文）

97

CLT建築の実物件の実験・解析

98

CLT建築の実物件の実験・解析

- 接合部の実験結果からモーメント-変形角関係を求め、下図のように回転バネとしたモデルに対する解析を行って、2層構面せん断試験結果との照合を行なった。その結果、実験結果を良く再現する解析結果が得られた（山田彩織の修士論文）。

99

本日の講演内容

1. 経歴など
2. 工学院大学河合研の活動（2011年度～2024年度）
3. 研究内容紹介
 - ・ 柱傾斜復元力
 - ・ 五重塔の地震時挙動
 - ・ CLT建築の基準整備
 - ・ CLT建築の実物件の実験・解析
 - ・ 中高層木造の地震時挙動
 - ・ 在来軸組構法（仕様規定と構造計算法）
 - ・ 地震被害調査
4. 織塚の話・その他（含、河合継手）
5. 雑感（まとめに代えて）

100

中高層木造の地震時挙動

- 今日、建築基準法の下で木造でも中高層建築物が建てられるようになり、その技術の進展は目覚ましいものがある。
- 一方で、歴史が浅いこともあり、偏心率の影響、P-Δ効果の影響、構造特性Dsの算出方法など、大地震動時の安全性を担保する設計法の基本的な部分で、十分な知見が乏しい現状も否めない。

101

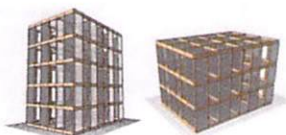
偏心率の影響

- 2009年に米国のNEESWoodプロジェクトの一環として鉄骨造と枠組壁工法の混構造7階建て、2014年度にCLTパネル工法建築物の基準整備に向けた検討で5階建ての震動台実験が行われた。
- これらの実験では、偏心率がそれほど大きくないにも拘わらず相当なねじれ振動が現れたことが気になり、偏心の問題を河合研の研究テーマとして掲げていた。

102

偏心率の影響

- 2021年度の卒業研究で、正岡由愛により中高層木造住宅の偏心率が耐震性に及ぼす影響についての解析的研究が行われた。
- 図のような3階建て、5階建ての枠組壁工法の振動モデルをwallstatで作成し、1階にのみ偏心がある場合、各階に偏心がある場合の2つのパターンで極稀地震の人工地震波に対する応答解析を行い、偏心の増大による各階の層間変位の変化を求めている。

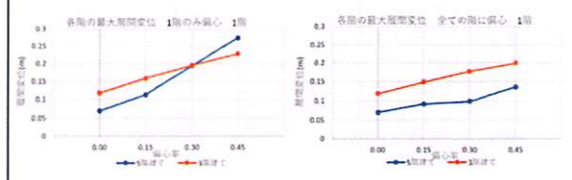


103

103

偏心率の影響

- その結果、1階にのみ偏心がある場合のほうが、各階に偏心がある場合よりも層間変位の増加が認められ、その際、5階建ての場合のほうが3階建てよりも層間変形角の増大が顕著であるという傾向が認められた。



104

104

P-Δ効果の影響

- 建物の階数が増すと重量が増すので、鉛直荷重が建物を倒す側に働くP-Δ効果の影響が大きくなるという感覚的な不安がある。
- しかし、P-Δ効果は各階の負担する重量と層間変形角のみで決まるということと、各階の負担する重量に比例して設計用地震力も大きくなるということを考えると、低層でも高層でも、耐震性能に与えるP-Δ効果の影響は同じであると考えられる。

105

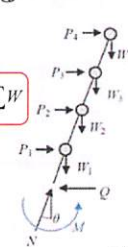
105

P-Δ効果の影響 (補足説明)

1階のP-Δ効果を考えるため、1階で仮想切断する
 ただし、簡単のため1階の柱は直線のまま傾いて、軸力のみを負担することとし、また、転倒モーメントMは別途何らかの方法で処理されているものとする

鉛直方向の釣り合いから $N = \frac{\sum W}{\cos \theta}$

水平方向の釣り合いから $Q = \sum P + N \sin \theta = \sum P + \tan \theta \sum W = \sum P + \frac{\delta_i}{H_i} \sum W$



従って、上階の変形に関係なく、1階の傾きのみで付加される層せん断力が決まり、負担する重量に比例する

106

106

P-Δ効果の影響

- 2021年度には、青木翔吾の卒業研究で、この点を確認するための枠組壁工法を対象とした解析的研究が行われた。
- 倒壊解析ソフトwallstatでは、標準的にP-Δ効果が加えられる。また、中川先生に依頼してP-Δ効果が含まれないバージョンも用意していただいた。
- 青木はこれを用いて、3階建て、4階建て、5階建てそれぞれのモデルに対して、P-Δ効果が含まれる場合と含まれない場合の双方について、等価線形化法、時刻歴応答解析のそれぞれで最大応答変位を求めた。

107

107

P-Δ効果の影響

- その結果、P-Δ効果による応答変位の増加率は、等価線形化法による場合、最大で10%程度であること、時刻歴応答解析による場合、建物の階数によってそれほど大きく変化せず、最大で22%程度（人工地震波5波の平均）であること、などを明らかにしている。

階数	重りなし		重りあり		P-Δ効果による変化率
	$\Delta_{max}[mm]$	$\theta[rad]$	$\Delta_{max}[mm]$	$\theta[rad]$	
3階	8.88×10 ²	1/34	5.82×10 ²	1/52	0.856
2階	7.73×10 ²	1/59	9.41×10 ²	1/32	1.22
1階	4.15×10 ²	1/72	4.57×10 ²	1/69	1.19

階数	重りなし		重りあり		P-Δ効果による変化率
	$\Delta_{max}[mm]$	$\theta[rad]$	$\Delta_{max}[mm]$	$\theta[rad]$	
4階	6.68×10 ²	1/45	4.94×10 ²	1/61	0.739
3階	7.50×10 ²	1/40	7.88×10 ²	1/38	1.05
2階	4.73×10 ²	1/63	5.28×10 ²	1/57	1.12
1階	4.23×10 ²	1/71	4.07×10 ²	1/74	0.963

階数	重りなし		重りあり		P-Δ効果による変化率
	$\Delta_{max}[mm]$	$\theta[rad]$	$\Delta_{max}[mm]$	$\theta[rad]$	
5階	6.30×10 ²	1/43	5.59×10 ²	1/54	0.806
4階	5.81×10 ²	1/52	6.68×10 ²	1/45	1.15
3階	4.11×10 ²	1/73	5.02×10 ²	1/60	1.22
2階	4.18×10 ²	1/72	4.35×10 ²	1/69	1.04
1階	3.02×10 ²	1/77	4.02×10 ²	1/75	1.03

108

108

本日の講演内容

1. 経歴など
2. 工学院大学河合研の活動
(2011年度～2024年度)
3. 研究内容紹介
 - ・柱傾斜復元力
 - ・五重塔の地震時挙動
 - ・CLT建築の基準整備
 - ・CLT建築の実物件の実験・解析
 - ・中高層木造の地震時挙動
 - ・在来軸組構法の仕様規定と構造計算法
 - ・地震被害調査
4. 趣味の話・その他(含、河合継手)
5. 雑感(まとめて代えて)

109

109

在来軸組構法の仕様規定と構造計算法

- 具体的な検討課題を列記すると次の通りである。
- 柱頭柱脚の接合方法：
 - ・不十分な接合とした場合の性能低下の程度
 - ・斜め45度方向入力に対する接合部先行破壊の恐れ
- 四分割法、偏心率：
 - ・偏心による割り増し係数の妥当性(偏心が大きくなっても壁量をどれだけ増せば安全といえるか)
 - ・部分2階の場合(重量偏心がある場合)の四分割法の規定の妥当性(←2025年基準で改善される)
- 斜めに配置された耐力壁の評価方法= $\cos^2 \theta$ を乗じる方法)の妥当性
- 横架材の継手を筋かいや火打ち材の近傍に設けることの問題

110

110

本日の講演内容

1. 経歴など
2. 工学院大学河合研の活動
(2011年度～2024年度)
3. 研究内容紹介
 - ・柱傾斜復元力
 - ・五重塔の地震時挙動
 - ・CLT建築の基準整備
 - ・CLT建築の実物件の実験・解析
 - ・中高層木造の地震時挙動
 - ・在来軸組構法の仕様規定と構造計算法
 - ・地震被害調査
4. 趣味の話・その他(含、河合継手)
5. 雑感(まとめて代えて)

111

111

平成23年東北地方太平洋沖地震

- 2021年4月の調査地域は振動的被害が大きい大崎市、振動的被害、津波被害ともに大きい石巻市、津波被害が大きい東松島市、陸前高田市、気仙沼市など
- 大崎市役所周辺では、砂地盤の液状化が見られ、固有周期の長い伝統的な建物に被害が見られたが、堅牢なはずの土蔵にも被害があった。
- 石巻港の周辺で津波被害が見られたが、耐震的に造られた住宅で、2階床+1m程度まで浸水痕があって残存している例があった。



112

112

平成28年熊本地震

- 新耐震以前か以後かだけでなく、2000年以前か以後かで被害率に差が現れた
- 11月になってようやく、益城町の2000年以降に建てられて倒壊した住宅などを中心に見て回る機会を得た
- 2000年以降に建設された住宅で倒壊した中には、外壁がALCで重量が大きいと思われるもの、筋かい端部や柱頭柱脚の補強が不十分なもの(2000年基準を満たしていないもの)などがあった



113

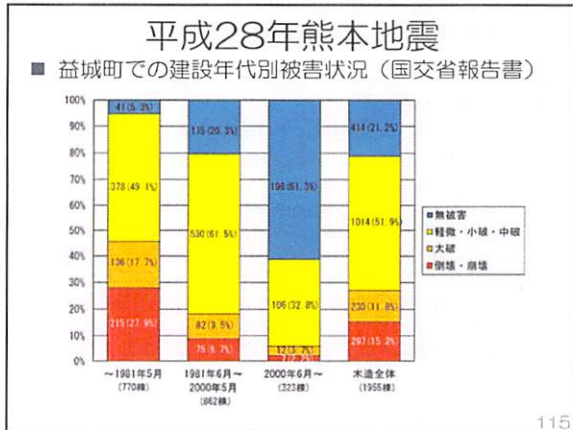
113

平成28年熊本地震

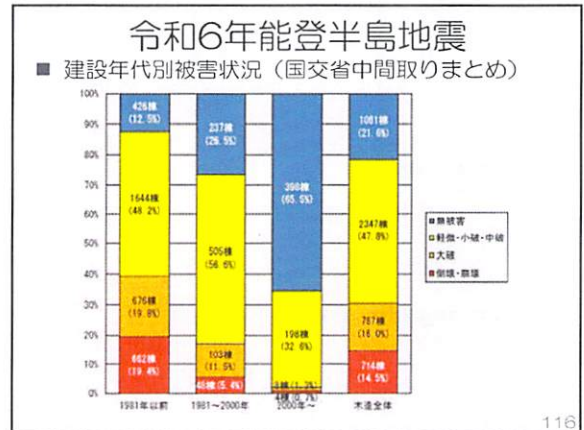
- 2000年基準を守りながら倒壊した住宅の倒壊の理由として、直下率の問題が話題になった。
直下率：1階と2階の柱や耐力壁の位置が一致している割合
- いわゆるN値計算で柱頭柱脚の接合部を設計しようとしたときに、1階と2階の柱の位置が一致していないと、その扱いが明確ではなく、杓子定規にルールを当てはめると1階には接合金物を設けなくても良いという結果になってしまふ。
- 基準解説書には、2階の柱の直下に1階の柱がない場合には、近傍の柱に引き抜き力が伝わると考えるよう注意が書かれていた

114

114



115



116

- ### 本日の講演内容
1. 経歴など
 2. 工字院大学河合研の活動（2011年度～2024年度）
 3. 研究内容紹介
 - ・ 柱傾斜復元力
 - ・ 五重塔の地震時挙動
 - ・ CLT建築の基盤整備
 - ・ CLT建築の実物件の実験・解析
 - ・ 中高層木造の地震時挙動
 - ・ 在来軸組構法の仕様規定と構造計算法
 - ・ 地震被害調査
 4. 趣味の話・その他（含、河合継手）
 5. 雑感（まとめに代えて）

117

ランニング・バッティングセンター

- 地球半周
- 研究室対抗ソフトボール大会

Googleマップ

118

あかわいん

- 阿吽（あうん）
- コレステロールとポリフェノール
- 鯉のたたきに合う赤ワイン

119

ギターとランペット

- アルハンブラ宮殿の思い出
- サイモン&ガーファンクル
- ニューオーリンズでの木質構造国際会議（1996年）

120

うさぎ

- ネザーランドドワーフ
- 正直さが潔（いさぎよ）い

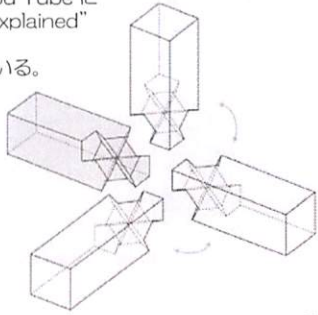


121

121

河合継手

2015年10月にカナダのMatthias Wandel という人が、You Tube に "Clever 3-way joint explained" をアップ
世界中で再生され続けている。



122

122

日本古来の継手仕口

我が国では言うまでもなく、古来より木材を建築その他に上手に使ってきており、当然のことながら、継手仕口の技術も発達を遂げてきている。

苦勞を表に見せない美意識


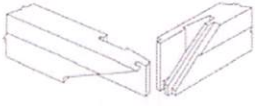



図1 法隆寺金堂の窓框の仕口
図2 円教寺常行堂の茅葺の継手

- 1) 「法隆寺國寶保存工事報告書 第十四冊 國寶法隆寺金堂修理工事報告 附図共」法隆寺國寶保存委員会、1956年
- 2) 「重要文化財円教寺常行堂修理工事報告書」重要文化財円教寺常行堂修理委員会、1965年

123

123

ところが、一筋縄ではいかない

江戸時代の大工書には四方鎌継ぎとか四方蟻継ぎ
こうしたなぞなぞのような継手仕口はいろいろあって、大阪城の追手門に使われている継手も有名。
大工さんの遊び心？

こちらは私の考案。さて内部は？

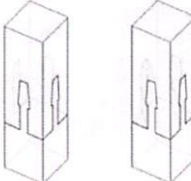




図3 四方鎌継ぎ
図4 凸凹凸凹となる四方蟻継ぎ

124

124

発想

サイコロを図のように2等分すると、断面は六角形
120度ずつ回転しても、つなげればサイコロに

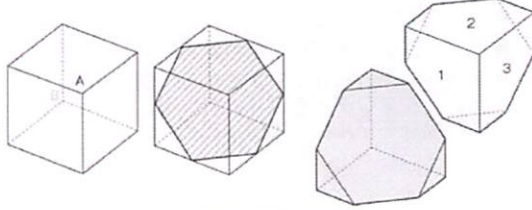


図5 サイコロを2等分した立体パズル

125

125

原型

このサイコロを長くすると、3方向に継げる継手仕口が

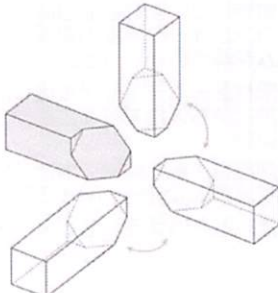


図6 3方向に継げる継手仕口(原型)

126

126

凹凸

さらに彫り込んで凹凸を付けるとできあがり。

図7 彫り込む深さとできあがりの形

127

製作

ただし、作るのは結構大変。
一箇所、底をさらわないといけない部分がある。
また、普通の継手仕口であれば一方向にだけ収めてははずして、を繰り返しつつ削っていけば何とかなるが、それを3方向同時に進めないと、3方向にきっちり収まる継手にならない。

図7 彫り込む深さとできあがりの形

128

使い方

どういふふうに使うのですか、と尋ねられることもある。
自嘲するつもりは毛頭ないが、全く実用にはならない。

正方形断面の部材に限るという制約があるし、3本、4本の部材を繋ぐことも出来ない。
四角い枠を組むぐらいは出来なくもないが、それならわざわざ面倒な河合継手を作る必要はない。
また、木材で作った場合は、付け根の部分の残り断面が少ないこともあって、強度的にはいまいとつである。
これまで、お箸、歯ブラシの柄、指輪、受付カウンター等、河合継手を使いたいだけでも、というお申し出をいくつか受けて、実際に作っていただいたものもあるが・・・

129

本日の講演内容

1. 経歴など
2. 工学院大学河合組の活動
(2011年度~2024年度)
3. 研究内容紹介
 - ・柱傾斜復元力
 - ・五重塔の地震時挙動
 - ・CLT建築の基準整高
 - ・CLT建築の実物件の実験・解析
 - ・中高層木造の地震時挙動
 - ・在来軸組構法の仕様規定と構造計算法
 - ・地震被害調査
4. 雑感の話・その他(含、河合継手)
5. 雑感(まとめに代えて)

130

雑感(まとめに代えて)

- 40年ほど前、木造の研究を始めたころは、建築物の中で継手仕口に生じる応力はよくわからなかった。コンピュータ容量の問題もあって2次元フレームを解くのがやっと。
- 今日では部材を一本一本モデル化した3次元モデルで、接合部も入れて解くことができるようになっていく
- 例えば佐畑友哉の博士論文「木造軸組住宅における横架材継手の設計法に関する研究」
- 夢が叶った、ともいえるのだが・・・

131

雑感(まとめに代えて)

- 水平構面が剛ではない民家、複雑に部材が組み合わされた五重塔、などについて、耐震性を論じるとしたら、
簡易なモデル化 or 詳細なモデル化？
- 一長一短ではある
- 昨今、詳細なモデルに走りすぎていないか？
- 本質をわかりやすく表現できる、あるいは、パラメータスタディを容易に行える、という点では簡易なモデルにも価値がある

132

雑感（まとめに代えて）

- 基準・規準についても、最後は簡単な式にまとめるべきだと、教わった記憶がある
- 今日の状況においては、もはや古い考え？
- 2025年4月施行の壁量規定ではAi分布を含む詳細な計算式が示された（簡易表もあるか）
⇒2000年の品確法ではAiは使わず近似式
- 実際の仕様（建物重量）に応じて合理的な設計を行うには、詳細な方がよい
- しかし、コンピュータを使って計算しなくても、ざっくり見当が付けられる、というメリットは？

133

133

雑感（まとめに代えて）

- パソコン（マイコン）が使われ始めた時期に研究者の道に進んで、パソコンには非常にお世話になった
- しかし、詳細な計算をすれば正解に近づくかという点には、少々疑問を持っている
- Ai（人工知能）を使った場合のブラックボックスにもなにか危ういものを感じる
- 古い人間だからかもしれないが、しかし、そういう感覚は持ち続けたい

134

134



135