

令和 4 年 10 月 28 日現在

機関番号：12201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K07804

研究課題名(和文)木質構造の接合部のクリープ破壊に及ぼす水分の影響の解明と予測

研究課題名(英文)The effect of moisture on the creep failure of timber structural joints

研究代表者

中島 史郎(Nakajima, Shiro)

宇都宮大学・地域デザイン科学部・教授

研究者番号：00344010

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：木質構造を構成する接合部のうち鋼板挿入型ドリフトピン接合について、接合部の小試験体を対象として長期継続荷重試験を恒湿と湿度変動下で行い、接合部がクリープ破壊に至る時間と破壊モードとの関係について知見を得た。接合部がクリープ破壊に至る時間は接合部の破壊モードによって異なる、また、接合部の中には木質材料がクリープ破壊に至る時間よりも短い時間でクリープ破壊に至るものがあるという知見を得た。さらに、接合部を構成する木質材料を粘弾性特性を有する無数の微細な要素としてモデル化し、微細な要素が順次破壊して接合部全体がクリープ破壊に至る過程を計算により求め、実験により得られた知見を解析により検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

木質構造の架構の耐力や剛性は多くの場合、接合部の性能で決まり、架構のクリープ破壊性状も接合部によって決まることが多いと考えられる。しかしながら、接合部の長期荷重に対する性能、とりわけクリープ破壊に関する性状については、既往の研究が少ない。例えば、継続して荷重が作用する接合部がどれくらいの期間でクリープ破壊に至るかなどについては未だ明らかになっていない点がある。本研究で得られた成果は、これまで知見がほとんどなかった木質構造の接合部のクリープ破壊に関する知見を示すもので、その学術的な意義は高い。また、木造建築物の構造安全性を確保することにおいて、その社会的な意義は高い。

研究成果の概要(英文)：Small clear test specimens with different width to pin-diameter ratio ( $l/d$ ) were loaded for creep rupture. Time to failure was discussed in terms of the effect of length to pin-diameter ratio and the effect of moisture. The time to failure of the test specimens with  $l/d$  from 6.7 to 10 was longer and that of the test specimens with  $l/d$  from 4.3 to 6 was shorter than the time to failure estimated by the Madison Curve. The test results indicated that the duration of load factor for the tested joints should be evaluated with consideration of the effect of the width to pin-diameter ratio.

The joints were modeled to estimate the time to failure of the joints. The wooded materials composing the joints were modeled as an aggregation of viscoelastic elements. The time to failure of the joints were estimated on the assumption that the accumulation of the failure of the elements leads the failure of the joints. The test results were traced with the estimated results.

研究分野：木質構造

キーワード：接合部 接合具径 荷重比 長期継続荷重試験 クリープ破壊 モデル化 粘弾性体 せん断破壊

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

木造建築物の構造体を構成する梁などの横架材に長期間、継続的に荷重（以下、「長期継続荷重」と呼ぶ）が作用し続けると、たとえその荷重の大きさが横架材の曲げ耐力よりも小さな値であっても、材の中で微視的な破壊が徐々に進行し、この微視的な破壊の蓄積量が一定のレベルを超えた時点で材が破壊することが一般に知られている。この現象は一般に「クリープ破壊」と呼ばれている。クリープ破壊は、横架材だけではなく、横架材を柱などの鉛直材につないでいる接合部においても生じる。

製材や集成材など、木造建築物の横架材として用いられる木質材料のクリープ破壊については、過去に多くの研究実績<sup>1)</sup>があり、一定の知見が得られている。しかしながら、木造建築物の構造体を構成する接合部についてはクリープ破壊に関する既往の研究が少ない。このため現在、接合部のクリープ破壊性状を木質材料のクリープ破壊性状と同じと仮定して、建物の構造設計が行われている<sup>2)</sup>。

一方、木造建築物の構造体は様々な温湿度環境下にさらされるため、木造建築物の構造体を構成する接合部も水分による影響を受ける。しかしながら、接合部のクリープ破壊に関する既往の研究が少ないため、接合部のクリープ破壊性状に及ぼす水分の影響についても未だ明らかになっていない点が多い。

さらに、木質材料のクリープ破壊のメカニズムについては、幾つかのモデル化<sup>3)</sup>が行われているが、接合部のクリープ破壊のメカニズムについては、モデル化が行われていない。このため接合部の長期許容耐力を評価する際には、幾つかの荷重レベルにおいて長期的に荷重を載荷して接合部が破壊するまでの時間を気長に計測するという膨大な手間と時間を要する試験を行う必要がある。仮に木造建築物を構成する接合部のクリープ破壊現象をモデル化することができれば、計算により接合部のクリープ破壊を予測することが可能となり、膨大な手間と時間を掛けずに、様々な仕様の接合部について長期許容耐力を評価することが可能となる。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、以下の2点について明らかにすることにある。

#### (1) 接合部のクリープ破壊性状

水分状態が一定の環境下、及び水分状態が変動する環境下に置かれた接合部のクリープ破壊性状について、実験を行い明らかにする。

#### (2) 接合部のクリープ破壊現象のモデル化

接合部のクリープ破壊現象をモデル化し、接合部がクリープ破壊する過程をコンピュータシミュレーションにより予測する手法を提案する。

### 3. 研究の方法

#### ①標準状態における接合部の長期継続荷重載荷試験の準備と開始

(1)接合部試験体を作成し、作成した接合部試験体について以下の(2)から(5)を行った。

(2)全数比重を測定し、比重の分布がほぼ等しい3つのグループを作成した（以下、3つのグループを「グループA」、「グループB」、「グループC」と呼ぶ）。

(3)(2)において作成したグループAに含まれる試験体について、全数接合部の引張試験を行い、最大接合耐力を求めた。

(4)(2)において作成したグループBに含まれる試験体について、(3)において求めた最大接合耐力に対して所定の比率を有する荷重レベルにおいて接合部の長期継続荷重載荷試験を行った。

(5)試験を行う環境は標準状態（温度 20℃、相対湿度 65%）とした。試験体が破壊するまでの時間を計測した。

#### ②湿度変動下における接合部の長期継続荷重載荷試験の準備と開始

(6)(2)において作成したグループCに含まれる試験体について、(3)において求めた最大接合耐力に対して所定の比率を有する荷重レベルにおいて長期継続荷重載荷試験を行い、試験体が破壊するまでの時間を計測した。試験を行う環境は、湿度変動環境下とした。

#### ③接合部の水分状態の変化の測定

(7)接合部試験体を作成し、各試験体について以下の(8)から(10)を行った。

(8)全試験体を湿度変動環境下に設置する。24時間ごとに全試験体の重量を測定した。また、24時間ごとに全試験体の含水率を含水率計を用いて測定した。

(9)(8)の測定を24時間の間隔で行った。

(10)(9)の測定を終えた試験体を105℃の乾燥機にて72時間乾燥し、各試験体の全乾重量を測定し、(8)において測定した重量との差から含水率を求めた。

#### ④粘弾性モデルを用いた接合部のクリープ破壊現象のモデル化

(11)木材等の力学的な特性のモデル化に一般的に使われる粘弾性モデルを用いて、接合部を構成する要素がクリープ破壊に至る現象をモデル化した。

#### ⑤標準状態における長期継続荷重載荷試験の継続と取りまとめ

(12)長期継続荷重載荷試験を継続・終了し、試験結果の最終報告を取りまとめた。

#### ⑥コンピュータシミュレーションの実施

(13)(11)において作成した要素に対するモデルを用いて、接合部全体をモデル化し、要素のク

リープ破壊が蓄積して、最終的に接合部がクリープ破壊に至る過程を個別要素法を用いて予測した。

#### 4. 研究成果

##### (1) 試験に供した試験体の概要

試験に供した試験体は製材、鋼板、ドリフトピンより構成した接合部とした。試験体を構成する製材は、樹種がヒノキの無欠点材とした。ヒノキ材の比重の平均値は 0.45、支圧強度は 22.5 N/mm<sup>2</sup> あった。同ヒノキ材の中央にスリットを設け、同スリットに鋼板（鋼板規格 SS400、厚さ 3mm）を挿入し、製材並びに鋼板に予め設けた孔にドリフトピン（鋼材規格 SS400）を挿入し、接合部試験体とした。なお、挿入するドリフトピンの本数は 1 本とした。

試験体はドリフトピン径が異なる 9 種類とした。ドリフトピンの径は 3.0mm, 3.5mm, 4.0mm, 4.5mm, 5.0mm, 5.5mm, 6.0mm, 6.5mm, 7.0mm の 9 種類とし、試験体を構成する製材の材幅は全ての試験体に共通して 30mm とした。材幅を同じとし、ドリフトピン径を変えることにより、接合部の  $l/d$  を 10, 8.6, 7.5, 6.7, 6, 5.5, 5, 4.6, 4.3 とした。一方、試験体の材厚と端部の長さについては、端距離がドリフトピン径の 7 倍以上、縁距離がドリフトピン径の 1.5 倍以上となるようにその寸法を定めた。

なお、各試験体の名称は以下、 $l/d$  で表記することとし、例えば、ドリフトピン径が 3.0mm の試験体は、" $l/d=10.0$ " と表記する。図 1 に試験体の一覧を示す。

		試験体名										
		3.0d	3.5d	4.0d	4.5d	5.0d	5.5d	6.0d	6.5d	7.0d		
寸法 (mm)	木材部分	A	14.0	15.5	17.0	18.5	20.0	21.5	23.0	24.5	26.0	
		B	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	
		C	227.5	231.0	234.5	238.0	241.5	245.0	248.5	252.0	255.5	
		D	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	
		E	47.5	51.0	54.5	58.0	61.5	65.0	68.5	72.0	75.5	
		F	23.0	23.0	23.0	23.0	23.0	23.0	23.0	23.0	23.0	
		G	24.5	28.0	31.5	35.0	38.5	42.0	45.5	49.0	52.5	
		H	7.0	7.8	8.5	9.3	10.0	10.8	11.5	12.3	13.0	
		I	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	
		寸法 (mm)	ピン	J	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5
K	30.0			30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	
鋼板部分	L			14.0	15.5	17.0	18.5	20.0	21.5	23.0	24.5	26.0
	M			3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
	N			230.0	230.0	230.0	230.0	230.0	230.0	230.0	230.0	230.0
	O			20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
	P			3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5
	Q			20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
	R			8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5

図 1 試験体の一覧

(注) 表中の試験体名は  $l/d$  の値に  $d$  を付けた表記としている。

##### (2) 短期試験の結果

図 2 に短期せん断試験により得られた試験体  $l/d=10.0$  と試験体  $l/d=4.3$  の荷重変位曲線を示す。最大荷重は試験体  $l/d=4.3$  が試験体  $l/d=10.0$  の約 3~4 倍、最大荷重時の変位は試験体  $l/d=10.0$  が試験体  $l/d=4.3$  の約 3~5 倍であった。

写真 1 に試験体  $l/d=10.0$  と試験体  $l/d=4.3$  の破壊形状を示す。試験体  $l/d=10.0$  はピンが中央で降伏するモード III で破壊し、試験体  $l/d=4.3$  はピンが降伏しないモード I で破壊した。

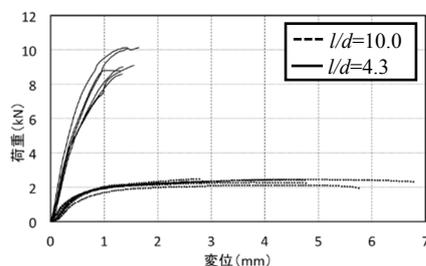


図 2 荷重変位曲線 ( $l/d=10.0$  と 4.3)



(a) 試験体  $l/d=10.0$



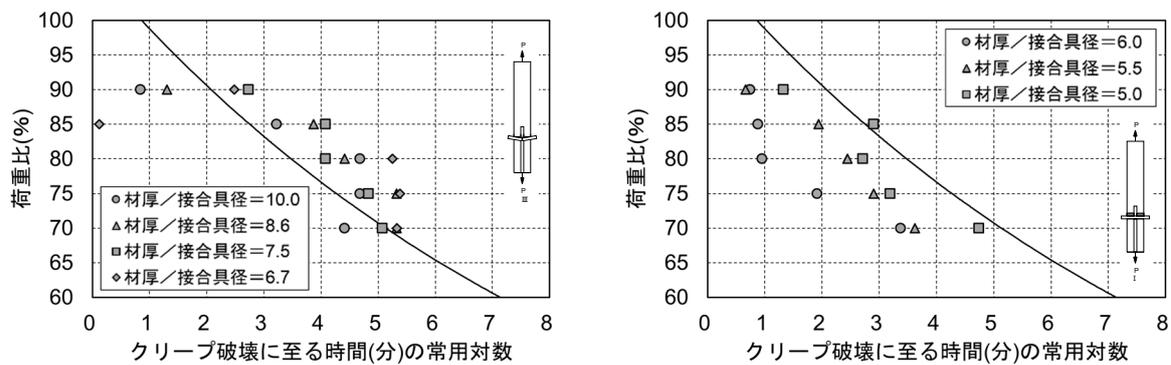
(b) 試験体  $l/d=4.3$

写真 1 短期試験における試験体の破壊性状

##### (3) 恒湿環境下におけるクリープ破壊試験の結果

図 3 に恒湿環境下において実施したクリープ破壊試験により得られた荷重比とクリープ破壊に至るまでの時間の関係を示す。

図 3(a) に試験体  $l/d=10.0$ 、 $l/d=8.6$ 、 $l/d=7.5$ 、 $l/d=6.7$  の結果、図 3(b) に試験体  $l/d=6.0$ 、 $l/d=5.5$ 、 $l/d=5.0$  の結果を示す。なお両図にはマディソン・カーブを実線にて示した。



(a)材厚／接合具径が大きい接合部

(b)材厚／接合具径が小さい接合部

図3 接合具径に対する材厚の比率（材厚／接合具径）とクリープ破壊に至る時間との関係

(解説1) 同じ荷重比の荷重を載荷した場合でも、接合具径に対する材厚の比率が小さい接合部（右図）のほうが、接合具径に対する材厚の比率が大きい接合部（左図）よりも、破壊に至る時間が短くなる。

(解説2) 木造建築物の構造設計基準で参考とされている荷重比と木質材料がクリープ破壊に至る時間との関係（図中の実線）と比較すると、接合具径に対する材厚の比率が大きい接合部がクリープ破壊する時間は概ねこれよりも長くなる（左図）が、接合具径に対する材厚の比率が小さい接合部は短くなる（右図）。

図3(a)に試験結果を示した試験体は  $l/d$  が大きく、ピンが中央で降伏するモードⅢで破壊した。 $l/d$  が大きい試験体がクリープ破壊に至る時間は、マディソン・カーブを用いて求めた時間よりも概ね長くなった。ただし、荷重比と試験体がクリープ破壊に至る時間との関係は、マディソン・カーブのような下に凸の曲線ではなく、上に凸の曲線となった。このため、荷重比が高い場合（荷重比が90%と85%の場合）と、荷重比が低い場合（荷重比が70%の場合）に、一部の試験体については、クリープ破壊に至る時間がマディソン・カーブを用いて計算した時間よりも短くなるものがあった。図3(a)に示す試験体については、すべてピンが降伏し、母材が割裂して破壊に至っていた（写真1(a)の破壊モード）。

図3(b)に試験結果を示した試験体は  $l/d$  が小さく、ピンが降伏せず木材がせん断破壊するモードⅠで破壊した。 $l/d$  が小さい試験体がクリープ破壊に至る時間は、 $l/d=4.29$  の試験体を除き、すべてマディソン・カーブを用いて計算した時間よりも短くなった。 $l/d=4.29$  の試験結果については、他の試験体とは傾向が異なり、再試験を行う必要がある。図2(b)に示す試験体については、すべて写真1(b)のようにピンが降伏せず、木材がせん断破壊することによって破壊に至っていた。

以上のように、クリープ破壊試験における試験体の破壊形状は、 $l/d$  が小さい場合にはモードⅠで破壊し、 $l/d$  が大きい場合にはモードⅢで破壊し、その破壊モードは概ね短期せん断試験における破壊モードと同じであった。また、クリープ破壊に至る時間は、破壊形状によって異なるという知見を実験により得た。さらに、モードⅠでクリープ破壊する接合部については、クリープ破壊に至る時間が、マディソン・カーブを用いて求めた時間よりも短くなるという結果を得た。なお、マディソン・カーブは、建築基準法において木材などの短期許容応力度に対する長期許容応力度の比(1.1/2)を定める際に用いている、荷重比とクリープ破壊に至る時間との関係を示している曲線である。

木質構造の接合部の設計においては、破壊モードがⅠになるように、 $l/d$  を十分大きくすることが推奨されているが、 $l/d$  が小さくなるような接合部の納まりとなった場合には、接合部がクリープ破壊に至る時間は、建築基準法において想定している時間よりも短くなる可能性が高いという結果を得た。なお、湿度変動下においては、この傾向はさらに顕著になることを、実験により確認した。

#### (4) 温湿度変動下におけるクリープ破壊試験の結果

接合部のクリープ破壊試験を温湿度変動下において実施した場合においても、 $l/d$  とクリープ破壊に至る時間との関係は、恒湿環境下において実施したクリープ破壊試験の結果とほぼ同じ傾向を示した。一方、接合部が破壊に至る時間は、温湿度変動下においてクリープ破壊試験を行った場合のほうが、恒湿環境下で試験を行った場合よりも短くなるという結果を得た。また、破壊モードⅠ（ピンが曲がらず木材がせん断破壊するモード）のほうが、モードⅢ（ピンが曲がり破壊するモード）よりも、クリープ破壊に至る時間が短く度合いが大きかった。モードⅠは木材

の破壊が主体となるモードであり、クリープ破壊に至る時間に対して温湿度変動による影響が直接及ぶため、上記のような結果となったと考えられる。

#### (5) 接合部のクリープ破壊のモデル化

クリープ破壊した接合部の破壊モードに基づいて、接合部のクリープ破壊を母材割裂破壊型と母材せん断破壊型の2つのタイプとし、それぞれについてクリープ破壊モデルを作成した。接合部を構成する木質材料を粘弾性特性を有する無数の微細な要素としてモデル化し、微細な要素が順次破壊して接合部全体がクリープ破壊に至る過程を計算により求め、実験により得られた知見を解析により検証した。以下、両モデル化によって推定した結果について、実験結果との比較において記述する。

##### ①母材割裂破壊型

解析により求めた荷重比とクリープ破壊に至る時間との関係は、上に凸の曲線となり、母材の割裂によって破壊した接合部試験体の実験結果（上に凸）と同じであった。クリープ破壊に至る時間の絶対値については、解析によって求まる値は実験値よりも小さくなった。

##### ②母材せん断破壊型

解析により求めた荷重比とクリープ破壊に至る時間との関係は、上に凸の曲線となり、母材のせん断によって破壊した接合部試験体の実験結果（下に凸）と異なる結果となった。また、クリープ破壊に至る時間の絶対値については、解析によって求まる値は実験値よりも小さくなった。

##### ③接合部のクリープ破壊のモデル化について

接合部のクリープ破壊のモデル化については、接合具（ドリフトピン）の曲げ変形、接合具の木材へのめり込み、木材のせん断破壊と割裂破壊など、複雑な応力や変形が接合具と母材（木材）に生じるため、今後、さらに詳細なモデルを検討し、クリープ破壊の推定を行う必要がある。

#### (6) 研究成果のまとめ

一連の研究により、以下の知見を得た。

- (1) 接合部がクリープ破壊する時間は、その破壊モードによって決まる。
- (2)  $l/d$  が小さく、接合具（ドリフトピン）が曲げ変形をしないで、母材がせん断型の破壊をする接合部については、クリープ破壊に至る時間が、建築基準法において想定している時間よりも短くなる可能性が高い。
- (3) 接合部がクリープ破壊に至る時間は、接合部が湿度変動下にある場合、恒湿環境下にある場合と比べると短くなる。
- (4) 接合部のクリープ破壊のモデル化については、鋼材（ドリフトピン）の木材へのめり込みなど、複雑な応力や変形が母材に生じるため、今後、さらに詳細なモデルを検討し、クリープ破壊の推定を行う必要がある。

#### [文献]

- 1) Wood L.W.: Relation of Strength of Wood Duration of Load, F.P.L. Report No.R1916, 1951.
- 2) 例えば、木質構造設計基準・同解説, 日本建築学会.
- 3) Gerhards C.C. Time-related effects on wood strength: a linear-cumulative damage theory, Wood Science, Vol.11, No.3, pp.139-144, 1979.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 田村佳暉, 中島史郎, 中川貴文, 中島昌一	4. 巻 25巻 59号
2. 論文標題 鋼板挿入型ドリフトピン接合のクリーブ破壊	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本建築学会技術報告集	6. 最初と最後の頁 151 ~ 154
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 田村佳暉, 中島史郎, 中川貴文, 中島昌一
2. 発表標題 鋼板挿入型ドリフトピン接合のクリーブ破壊性状の評価 - 木材のせん断クリーブ破壊試験とせん断クリーブ破壊のモデル化
3. 学会等名 2018年度日本建築学会大会学術講演
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田村佳暉, 中島史郎, 中川貴文, 中島昌一
2. 発表標題 鋼板挿入型ドリフトピン接合のクリーブ破壊性状の評価に関する実験的研究
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	中川 貴文 (Nakagawa Takafumi)  (60414968)	京都大学・生存圏研究所・准教授  (14301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------