

第 1 1 章 めり込みの安全限界に関する検討

11.1 むり込みの安全限界に関する検討

11.1.1 はじめに

材の部分的な横圧縮、いわゆるむり込みの特性は、バイリニア的な挙動を示した後にハードニングすることが知られている。表 11.1-1¹⁾に本論文で主に対象とする木材のむり込み基準強度の一例を示すが、このむり込み基準強度はバイリニアの降伏点を求め、それを 1.5 倍したものとの見解もある。この 1.5 倍までの挙動を観察すると、1.5 倍がバイリニア的な挙動内にあるか、あるいは 1.5 倍に至る前にハードニングに至り、ハードニングの途上にあるかの場合が考えられる。この 2 つの挙動は材厚が関係するものと考えられ、材厚が厚ければ降伏後にしばらく 2 次勾配のまま推移するであろうし、材厚が薄ければ 1.5 倍に至る前にハードニング現象に至るであろう。極大地震時にはこの基準強度を超えても安全性に問題ないと考えられているが、設計上は許容耐力、基準強度をそれぞれの設計で超えてはいけないとされている。また、過去の地震動より基礎の浮き上がりが生じることで上部構造の損傷が軽減されたという報告²⁾がある。これまで壁倍率 2.5 倍相当の壁を配した箱型試験体において、柱脚の浮き上がりを許容した振動台実験を実施してきた。

そこで本研究では、材料実験や壁振動台実験を実施し、材料実験では多数の試験体を用意し、ハードニングが生じずに基準強度を確保できない試験体の特徴を把握し、振動台実験では基準強度を超えるようなむり込みを生じさせた際に鉛直荷重支持能力を失うことなく、安全性に問題が生じないかを確認することを目的とする。さらに、柱脚の浮き上がりを許容した壁パネルでの実験も実施し、応答低減効果を把握することを目的とする。

11.1.2 むり込み実験

11.1.2.1 材料実験

(1) 実験概要 試験体製作工程を図 11.1-1 に示す。各試験体は、105mm 角、L=3915mm の RW 集成材を用いることとし、元材は全 50 体である。1 本からそれぞれ全面圧縮試験体を 3 体、鋼板部分圧縮試験体を 2 体、柱圧縮試験体を 4 体の計 9 体を取り、本報ではそれらの中から全面圧縮及び材端柱圧縮試験を対象として実施した。全面圧縮試験体は 50 体×3 体の計 150 体、柱圧縮に関しては柱にはほぞのないほぞ無試験体と、ほぞのあるほぞ有試験体を各 50 体ずつの計 100 体実施した。全面圧縮試験体図を図 11.1-2 に、材端柱圧縮試験体図を図 11.1-3 に示す。全面圧縮試験体は L=105mm とし、材料特性を把握する目的で実施した。

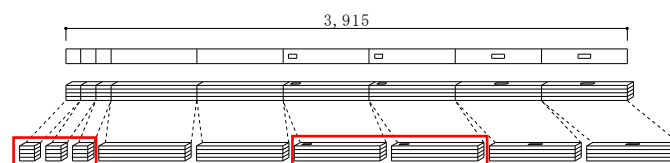


図 11.1-1 試験体作成工程図

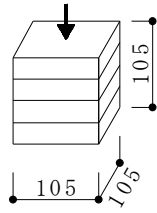


図 11.1-2 全面圧縮試験体図



図 11.1-4 加力方法

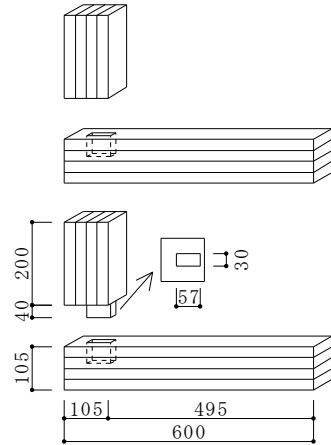


図 11.1-3 材端柱圧縮試験体図

表 11.1-1 繊維直交方向めり込み特性値

樹種	基準材料強度 N/mm^2		
	部分圧縮（めり込み）		全面圧縮
	材中間部	材端	
RW	8.1	6.6	3.0



a) 全体割裂



b) 両端割裂

図 11.1-5 全面圧縮破壊性状

また、材端柱圧縮試験体は $L=600mm$ とし、実建物を想定した接合部実験として実施した。ほぞは中柱を想定した一般的な短ほぞ（ $85 \times 50 \times 30mm$ ）とは異なり、材端圧縮試験では隅柱を想定した寄ほぞ（ $57 \times 40 \times 30mm$ ）とした。

また、RW 集成材の繊維直角方向のめり込み特性値を表 11.1-1 に示す。基準強度は、材中間部めり込みで $8.1N/mm^2$ 、材端めり込みで $6.6N/mm^2$ 、全面圧縮で $3.0N/mm^2$ となっている。また、はじめに述べたように基準材料強度は短期許容応力度の 1.5 倍としているため、短期許容応力度はそれぞれの値を $2/3$ 倍したものをを用いることとする。つまり、材中間部めり込みで $5.4N/mm^2$ 、材端めり込みで $4.4N/mm^2$ 、全面圧縮で $2.0N/mm^2$ となる。加力方法を図 11.1-4 に示す。加力はアムスラー型 200tf 万能試験機を用いて単調載荷とし、荷重が横ばいになったのち、ハードニングが生じてから、60mm を超えるまでの載荷とした。ただし、ハードニングが生じない試験体についてはこの限りではない。

式 1 に稲山による等変位めり込み基準式³⁾を示す。参考までに式 1 によって材料実験における全面圧縮、材端圧縮に関して算出すると、全面圧縮で $P_y=42.30\text{kN}$ 、 $\delta_{P_y}=1.92\text{mm}$ 、材端圧縮で $P_y=54.61\text{kN}$ 、 $\delta_{P_y}=1.49\text{mm}$ となった。

$$P_y = \frac{x_y n_y C_x C_y E_L}{Z_0} \delta_y, \quad \delta_y = \frac{Z_0 F_m}{E_L \sqrt{C_x C_y C_{xm} C_{ym}}} \quad \dots \text{式 1}$$

E_L : 全面積圧縮ヤング係数

n : 繊維方向に対する繊維直交方向の置換係数

F_m : 縁端距離を無限大としたときのめり込み降伏応力度

x, y, z, C : 形状で決定する係数

(2) 実験結果 全面圧縮試験の主な破壊性状を図 11.1-5 に示す。破壊性状は全体的に割裂が生じて圧壊しているものと、中心部には割裂が見られずに両側の割裂のみ生じているパターンが見られた。また、荷重変位関係の代表的な例を図 11.1-6 に示す。a) に示すように試験体ごとに最大で 10N/mm^2 程のばらつきが生じていることがわかる。b) に示した代表例をみると、木材の特性であるめり込み挙動ののちハードニングが生じている試験体がほとんどではあるものの、ハードニングが生じずに降伏点の 1.5 倍の耐力が確保できていない試験体も確認できた。ハードニングが生じない試験体の破壊性状としては全体的な割裂が見られ脆性的な破壊となることが多く確認できた。また、実験によって得られた特性値を表 11.1-2 に示す。降伏点で既に全面圧縮のめり込み基準材料強度である 3.0N/mm^2 を上回る応力が作用している。ハードニングが生じない試験体 H_n と生じた試験体 H で分けた場合の平均値を求めると、ハードニングが生じない試験体では生じる場合と比較して降伏荷重が低い値を示しているものの、剛性に関してはハードニングの有無に関わらず概ね一致している。

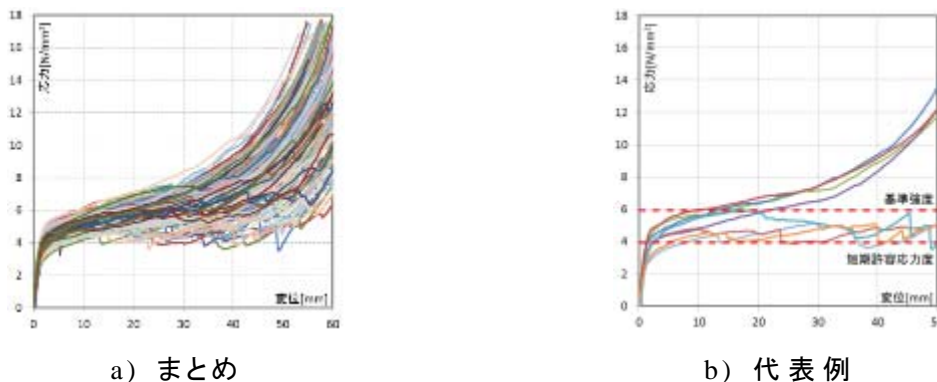


図 11.1-6 全面圧縮_荷重変位関係

表 11.1-2 全面圧縮_平均特性値

	P_v kN	δ_{Pv} mm	K kN/mm	σ_{Pv} N/mm ²
H_n	37.10	1.24	29.20	3.37
H	43.80	1.37	31.97	3.97
Ave	43.49	1.36	31.98	3.94
基準式	42.30	1.92	22.03	3.84

次に柱圧縮試験の主な破壊性状を図 11.1-7 に示す。圧縮が進展していくことで上面のラミナが広がり、柱の外側方向へと押し出される試験体や、全体が柱に対して効いているパターンが見られた。全体圧縮と同様に荷重変位関係の代表的な例を図 11.1-8 に示す。挙動としては大半の試験体で全面圧縮試験体と同様に 2 次勾配ののちにハードニングが生じているが、降伏点を超えて 2 次勾配となった際に荷重が落ちて、基準強度未満となる試験体が見られた。ほぞの有無による影響としてほぞ有試験体において、めり込みが進展していき先端がほぞ穴底面に接触する 10mm 付近での荷重上昇が生じる点が挙げられる。

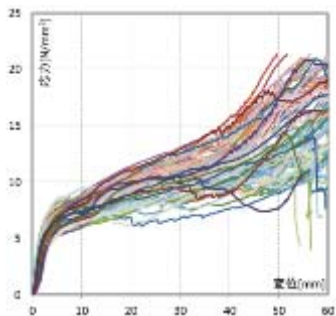


a) 中央部のみの圧縮

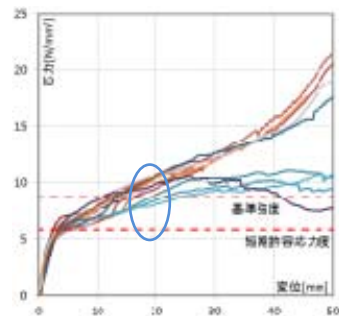


b) 全体的な圧縮

図 11.1-7 材端柱圧縮破壊性状



a) まとめ



b) 代表例

図 11.1-8 全面圧縮_荷重変位関係

表 11.1-3 材端柱圧縮_平均特性値

	P_v kN	δ_{P_v} mm	K kN/mm	σ_{P_v} N/mm ²	$\sigma_{n P_v}$ N/mm ²
ほぞ無	53.98	2.20	24.54	-	5.79
ほぞ有	53.87	2.91	18.51	4.89	5.78
H_n	51.66	2.47	20.91	-	5.55
H	54.00	2.56	21.09	4.88	5.80
Ave	53.93	2.56	21.67	4.89	5.79
基準式	54.61	1.49	36.65	4.95	5.86

材端柱圧縮試験による特性値を表 11.1-3 に示す。ほぞの有無による特性値を比較すると、降伏荷重に関しては概ね一致しているが、降伏変位で 32% 程度の差が生じている。結果的に差が生じているものの 10mm 以前の挙動は一致するはずで、ばらつきの範囲内であったと考えられる。また、ハードニングの有無による差はあまり見られなかった。基準式によって算出した値と比較すると、降伏荷重に関しては概ね一致しているが、降伏変位で 72% 程度の差が生じており、実験値の剛性が低い値を示した。原因としては、圧縮材として木柱を用いているため、土台へのめり込み以外にも柱材自体の変形が加味されているためと考えられる。

結果として材料実験により、ハードニングが生じない明確な原因を解明するまでには至らなかったが全試験体を通して、大きな節が見られる場合には節を中心にして割裂が生じ、2 次勾配がたたずに荷重が上がらないまま変形が進み脆性破壊となる傾向があり、ハードニングを生じない要因になり得るといえる。また、集成材ラミナの年輪傾斜による影響は、同一材からとった試験体でも結果にばらつきが見られることから、節の有無による影響に比べて直接設計にかかわるような影響ではないと考えられる。これらの結果から、現行のめり込み検定では短期及び終局状態に対する検討を省略しているが、ハードニングが生じずに基準強度に満たない可能性があり、安全性に支障をきたす場合があるため必要に応じた検討が求められる。

11.2 振動台実験

11.2.1 実験概要

試験体図を図 11.1-9 に示す。大きな圧縮力を発生させた際に壁自体が損傷しないように試験体は集成材パネルとし、材種はカラマツ集成材 E105-F300 とした。土台には前述した、めり込み材料実験で用いた RW 材と同一材とした。試験体パネル寸法は高さ 2800mm、厚さ 105mm、幅 910mm である。また集成材パネルの脚部には柱相当の加工を施し、ほぞは材料実験と同様に中柱を想定した一般的な短ほぞと、隅柱を想定した寄ほぞとした。土台寸法は想定した柱種類により異なり、中柱を想定した試験体の土台はめり込みに対する端部の余長を十分にとるために $L=1600\text{mm}$ とし、隅柱を想定した試験体では柱と土台の面を揃えるよう $L=910\text{mm}$ の土台を用いた。中柱試験体は全

1 体、隅柱試験体は全 3 体実施した。柱脚金物には引抜力に耐えうるよう、60~80kN 程度で降伏する高耐力の金物を使用した。隅柱想定試験体ではせん断抵抗要素として。M12 ボルトを中央部に 3 本配した。

試験体設置図を図 11.1-10 に示す。隣接したフレームは錘設置用フレームであり、載荷した錘によって生じるせん断力のみを伝達機構によってパネル側へと伝達するという仕組みである。パネルに生じる鉛直荷重の影響を抑えつつせん断力のみを増加させるために本方法を採用した。フレーム寸法は、芯々距離で高さ 2752.5mm、幅が 2630mm である。柱間隔が左右で異なるのは、錘設置用のボルト孔の位置と伝達機構のピンの位置をずらすためである。伝達機構は、パネル、フレーム側ともにピン接合とし、さらに柱頭柱脚接合部の HD 金物の止め付け部分にゴムワッシャーを取り付け、フレームにはせん断力になるべく生じないような機構とした。加振は動的アクチュエーターをスライダーに取り付け、振動台形態とした架台に試験体を設置し実施した。また、本実験では試験体パネル上部及びフレームにはそれぞれ約 10kN 程度の錘を載荷して試験を実施した。

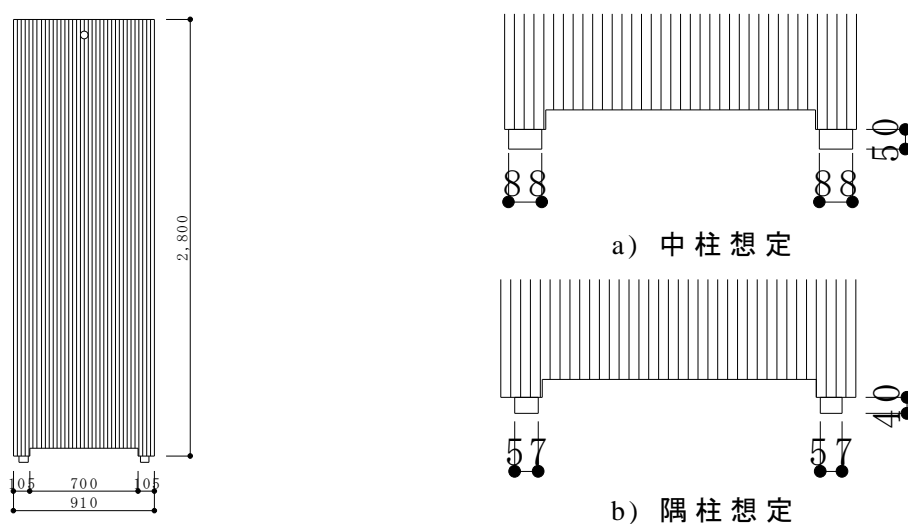


図 11.1-9 試験体パネル図

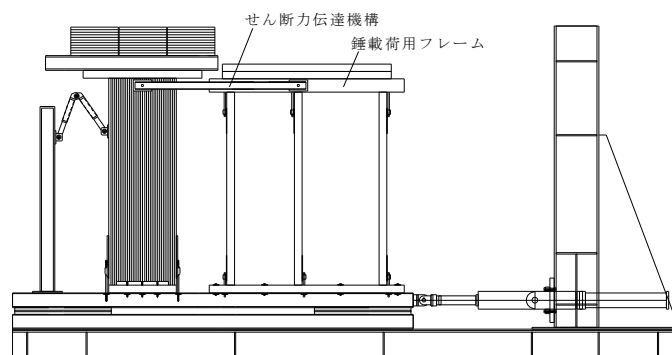


図 11.1-10 試験体設置図

表 11.1-4 基本加振スケジュール

No.	入力地震波	入力倍率	最大加速度
001	BSL	100%	510 gal
002	JMA 神戸	70%	574 gal
003	JMA 神戸	100%	820 gal
004	JMA 神戸	125%	1025 gal

基本的な加振スケジュールを表 11.1-4 に示す。入力加振波は人工地震動の BSL 波と観測波の JMA 神戸波とした。入力倍率は BSL 波で 100%、JMA 神戸波で 70%、100%、125%とした。計測項目としては、パネル及びフレーム上部に加速度計を設置して各重量を掛け合わせることでせん断力をもとめた。また、柱脚の圧縮力は直接計測できないためロードセルによって柱の引抜力を計測して、引抜が生じた際に逆側の柱に生じる圧縮力との釣合いが成立するとして、ロードセルによる計測値を用いて圧縮力とした。なお、ロードセルの初期時導入軸力は全試験体において約 10kN で統一することとする。

11.2.2 実験結果

各加振によるめり込み状況を図 11.1-11 に示す。中柱想定、隅柱想定の間試験方法においても、BSL20%加振におけるめり込みの目視による確認はできなかったため、弾性範囲内であったといえる。また、中柱試験体では JMA 神戸 70%加振後で目視によるめり込みが確認できた。その後、JMA 神戸 100%、JMA 神戸 125%とめり込みが進展していき、最終的に 10mm 程度のめり込みが生じた。JMA 神戸 125%で柱脚金物が破壊してしまい試験終了としたが、パネル側への損傷は見られず、鉛直荷重支持能力自体には問題は生じなかった。それに引き換え隅柱試験体において、BSL100%加振でめり込みが生じて土台が面外方向にはらんでいるのが確認できた。中柱想定試験体との違いとして隅柱想定試験体用の土台には土台上面に座掘りを設けているが、めり込みが進展するにつれて座掘り箇所からラミナの剥離が生じた。中柱と比較して、過大なめり込みが生じたため JMA 神戸 100%加振までで終了とした。全加振終了時に倒壊には至らなかったものの柱脚ボルトの降伏が確認でき、倒壊寸前の状況であった。さらに最大変位で 160mm 程度、77mm の残留変形が生じており、鉛直荷重支持能力を保持してはいるものの、十分であったかの判断は難しいところである。

各試験体でまとめた圧縮力-めり込み変位関係を図 11.1-12 に示す。各加振で得られた結果を試験体ごとに示す。図に示したバイリニア曲線はそれぞれ材料実験によって得られた結果の平均値である。なお、中央柱圧縮試験の結果は以前実施した試験結果を用いることとする。中柱試験体において、降伏荷重が 10kN 程低い値となっているが、挙動としては概ね一致している。また材料実験の結果と比較して、隅柱 1 では概ね一致しているが隅柱_2 及び 3 で低い耐力となっている。耐力低下の要因のひとつとして、前述したとおり

座掘りを設けているため、めり込みが生じた際に端距離を確保しきれなかったことが影響していると考えられる。また、極大地震入力時に荷重低下は生じなかったものの、最大変位で中柱試験体では 14mm 程度であるのに対して隅柱試験体では 42mm 程度と 3 倍近いめり込み変位が生じており、土台への損傷が増大された。

めり込み振動台実験によって得られた特性値を表 11.1-5 に示す。中柱と隅柱の結果を比較すると、降伏点は中柱で 22% 大きな値となっており、剛性にいたっては 2 倍程度高くなっている。端距離の有無によって大きな差が生じる結果となった。

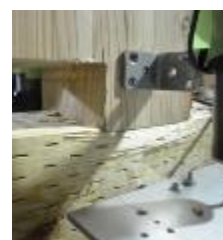
等変位めり込み基準式によって求められた P 及び δ_p と比較すると、中柱試験体においては実験値で $P_y=63.50\text{kN}$ 、 $\delta_{p_y}=2.16\text{mm}$ で、基準式で $P=64.49\text{kN}$ 、 $\delta_p=1.26\text{mm}$ となっており、降伏荷重に関しては概ね一致しているが、降伏変位に関しては 71% の誤差が生じている。これは、静的加力と振動台実験による速度効果が加算された違いによるものであると考えられる。隅柱試験体では実験値で $P_y=52.04\text{kN}$ 、 $\delta_{p_y}=4.09\text{mm}$ で、基準式で $P=52.12\text{kN}$ 、 $\delta_p=1.56\text{mm}$ となっており、中柱試験体と同様に降伏荷重に関しては概ね一致しているものの、降伏変位で 162% の差が生じた。これは、材料実験との比較の際と同様に、座掘りが影響したと考えられる。結果として、振動台実験ではめり込みによって基準強度に達することなく荷重低下することは見受けられなかったが、隅柱試験体においては支持能力への影響が生じるほどのめり込み変位となった。



JMA 神戸 70%



JMA 神戸 100%



JMA 神戸 125%

a) 中柱想定



BSL100%



JMA 神戸 70%



JMA 神戸 100%

a) 隅柱想定

図 11.1-11 各加振めり込み状況

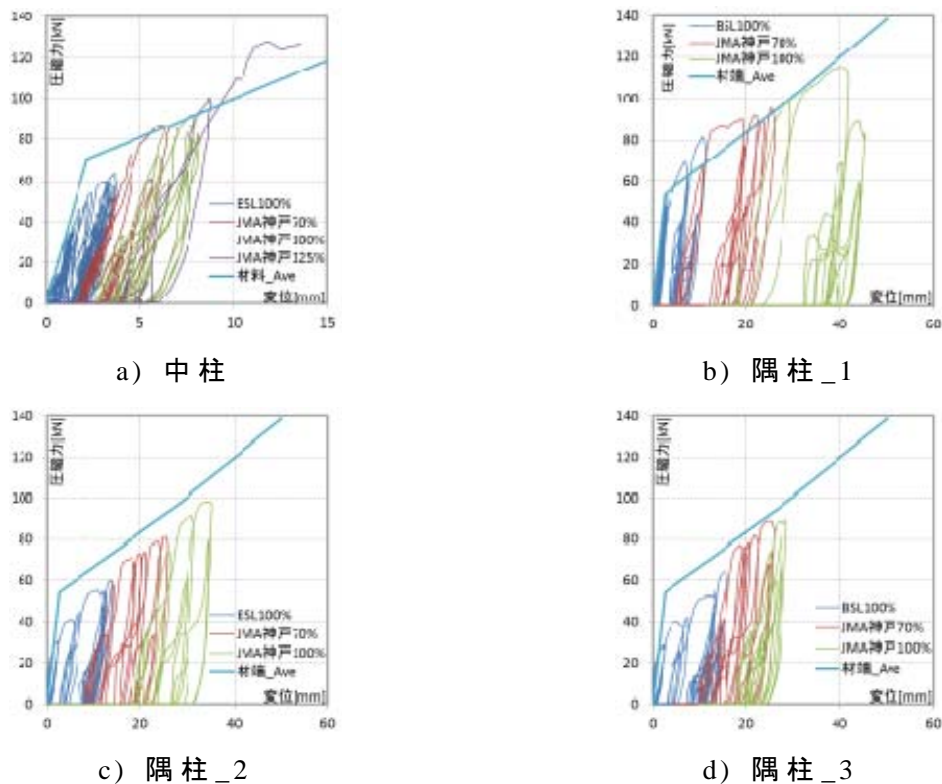


図 11.1-12 圧縮力-めり込み変位関係

表 11.1-5 めり込み振動台実験_特性値

	P_y kN	δ_{Py} mm	K kN/mm	σ_{Py} N/mm ²	σ_{Py_n} N/mm ²
中柱	63.50	2.16	25.30	5.76	7.58
隅柱_1	68.31	3.61	18.92	6.20	7.33
隅柱_2	46.41	4.59	10.10	4.21	4.98
隅柱_3	41.39	4.07	10.16	3.75	4.44
隅柱 Ave	52.04	4.09	13.06	4.72	5.58

11.3 まとめ

中柱接合部については、めり込み基準強度を上回る荷重が作用した際にはハードニングを生じ、鉛直荷重支持能力を失うことにはならない。一方、端部接合部で基準強度を上回る荷重が作用した際にはハードニングがおこらず、荷重が頭打ちとなる場合がある。その発生確率は低いものの存在する。よって、端部接合部についてはめり込みに対する基準強度の検討を省略しても安全側にいつもある、とは言い難い結果となった。

参考文献

- 1) 日本建築学会：木質構造設計規準・同解説、2006.12.
- 2) 林康裕：直接基礎構造物の基礎浮上りによる地震被害低減効果、日本建築学会構造系論文集、NO.485、pp.55-62、1996.7.

- 3) 稲山正弘：木材のめり込み理論とその応用、東京大学 学位論文、1991.12.
- 4) (財)日本住宅・木材技術センター：木造軸組構法住宅の許容応力度設計（2008年版）、2008.6.

