

木造土台-基礎アンカーボルト接合部のせん断耐力(第1報) 在来軸組構法におけるアンカーボルト接合部の1面せん断試験*1

名村佳代子*2, 矢永国良*2,3, 佐々木義久*2, 小泉章夫*2, 平井卓郎*2

Lateral Resistance of Anchor-Bolt Joints Between Timber-Sills and Foundations I.

Single-shear tests of anchor-bolt joints of Japanese post and beam constructions*1

Kayoko NAMURA*2, Kuniyoshi YANAGA*2,3, Yoshihisa SASAKI*2,
Akio KOIZUMI*2 and Takuro HIRAI*2

Lateral resistance of single-anchor-bolt joints was examined experimentally for ordinary specifications of Japanese post and beam constructions. Tested bolts were 12 or 16 mm in diameter and lead-hole clearances were 0, 3, and 6 mm. The specimens with 12 mm bolts were loaded parallel and perpendicular to the grain, and the specimens with 16 mm bolts were loaded only parallel to the grain.

The principal test results were as follows. (1) Anchor-bolt joints loaded perpendicular to the grain had much lower maximum resistance, much smaller maximum slips and much lower energy capacities. (2) Maximum lateral resistance and maximum slips of the anchor-bolt joints with 16 mm bolts varied over a wide range. (3) The energy absorption capacities of the anchor-bolt joints with 16 mm bolts closely resembled those of the joints with 12 mm bolts in spite of their larger maximum lateral resistance and initial stiffness. (4) Safety factors calculated from the fifth percentile lower limit maximum resistance and the short term allowable resistance were larger for the joints with 12 mm bolts than for the joints with 16 mm bolts.

Keywords: maximum lateral resistance, initial stiffness, energy absorption capacity, lead-hole clearance, length/diameter ratio.

在来軸組構法のアンカーボルト接合部を想定し、直径12 mm または16 mm のアンカーボルトを用いた1面せん断耐力試験を行った。荷重方向は繊維方向・繊維直交方向の2種類を設定し、さらに、先孔径および土台の割裂しやすさを変化させ、比較検討を行った。

繊維直交方向荷重では、繊維方向荷重に比べて、最大荷重、安全率が非常に小さかった。繊維方向荷重では、直径16 mm のボルトを用いた場合に、最大荷重と最大荷重時変位のばらつきが大きくなった。また、直径16 mm のボルトでは、最大荷重と初期剛性が比較的大きいが、地震性能に関係するエネルギー容量は直径12 mm のボルトと同じ程度であった。さらに、直径12 mm のボルトでは安全率が非常に大きかったのに対し、直径16 mm のボルトでは安全率の低いものがあった。これらの結果から、実際の耐力性能を考えると、許容せん断耐力の大きい直径16 mm のアンカーボルトを少数使用するより、直径12 mm のアンカーボルトを多数使用する方が、安全余裕が大きくなるといえる。

*1 Received March 22, 2004; accepted July 23, 2004. 本研究の一部は第53回日本木材学会大会(2003年3月, 福岡)において発表した。

*2 北海道大学大学院農学研究科 Graduate school of Agriculture, Hokkaido University, Sapporo 060-8589

*3 中国木材(株) Chugoku Lumber Co. Ltd, Kure 737-0134

1. 緒 言

近年まで、木造住宅の耐震・耐風性能は、耐力壁や柱脚接合部など、木造本体部分の耐力で決まり、本体最下部の土台と基礎をつなぐアンカーボルト接合部には安全性に余裕があると考えられてきた。しかし、平成12年の新建築基準法や品確法（住宅の品質確保の促進等に関する法律）の施行を契機に、兵庫県南部沖地震以降の高耐震志向がいつそう強まり、木造本体部分を強化した住宅が増加している。その結果、より大きな力が耐力壁からアンカーボルト接合部に伝わり、アンカーボルト接合部が構造耐力上の弱点となる危険性が生じている。しかし、アンカーボルト接合部の変形性能や終局耐力に関しては、直接の検討例が少ない。本研究では、アンカーボルトに加わる力のうち、せん断力について検討を行った。一般にボルト接合部では、ボルトの有効長さの直径に対する比である径長比や、アンカーボルトから木口までの距離、加力方向、先孔径によりそのせん断耐力特性が変化することが知られている¹⁻⁸⁾。そこで、本研究ではそれらの点に着目し、在来軸組構法で用いられるアンカーボルト接合部を想定した1面せん断試験を行った。

2. 試験方法

2.1 試験装置および材料

Fig. 1のような試験装置を用い、アンカーボルト接合部の1面せん断試験を行った。

鉄筋コンクリート基礎の代わりに鋼板を用い、Fig. 2のようにアンカーボルトを固定した後、あらかじめ先孔を開けた土台をアンカーボルトに通し、座金とナットにより締め付けた。なお、ナットの締め付け具合は、初期応力が生じない程度に調節した。また、摩擦の影響を低減するため、土台と鋼板の間には市販のオリーブ油を塗布した。土台には、エゾマツ材（含水率：平均10.67%、標準偏差1.27%、比重：平均0.42、標準偏差0.0089）を用いた。土台には、

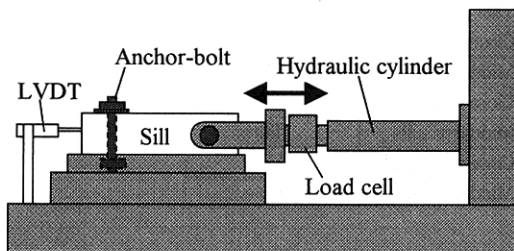


Fig. 1. Single-shear test of anchor-bolt joint.

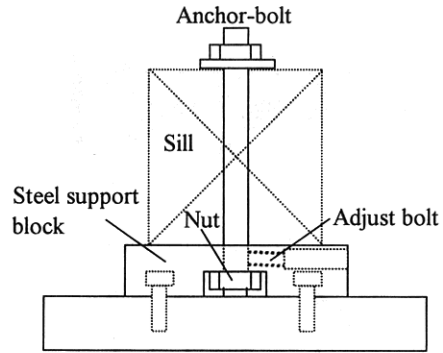


Fig. 2. Steel support block used to fix an anchor-bolt.

市販の105 mm 正角材を用いたが、ねじれ等の狂いを取り除き正確な直方体に仕上げた結果、最終的に断面寸法は95 mm 角となった。アンカーボルトは在来軸組構法を想定し、 $\phi = 12$ mm（径長比約8）と $\phi = 16$ mm（径長比約6）の2種類を用いた。実際の構造物では実径がこれよりも細い転造ボルトが用いられることがあるが、本試験では実径12 mm または16 mm で、SS400 鋼のものを用いた。

荷重方法を Fig. 3 に示す。荷重方向は、繊維平行方向（以下L方向とする）・繊維直交方向（以下T方向とする）の2条件とした。ただし、 $\phi 16$ のボルトを用いた試験についてはL方向のみ試験を行った。

試験用アンカーボルトの配置は、Fig. 3 に示すように、土台の木口に近い部分を想定したもの（以下Sとする。端距離は $7d =$ 木質構造設計規準⁹⁾に定められる最小の距離）と、土台中央部を想定したもの（以下Lとする。試験用ボルトから支持ボルトまでの距離は、L方向荷重では $15d$ ・T方向荷重では $10d$ ）の2条件とした¹⁰⁾。

試験条件Sについては、単調荷重を加えた。この時、最大荷重に達した後は、荷重が最大荷重の50%程度に減少するまで荷重を加え続けた。ただし、油圧シリンダーのストロークまたは変位計の測定長の都合上、最大荷重の80%程度までしか荷重を加えられなかったものも一部あった。

試験条件Lについては、3段階の荷重レベルで各3回ずつの繰り返し荷重を加えた。繰り返し荷重後は、荷重が最大荷重の50%程度に減少するまで荷重を加えた。なお繰り返し荷重は、木質構造設計規準⁸⁾より計算した短期許容耐力を参考に、12LLでは5 kN、12TLでは3 kN、16LLでは8 kNの1倍・2倍・3倍とした。

Fig. 3 に示すように、12TS では荷重を加える際の

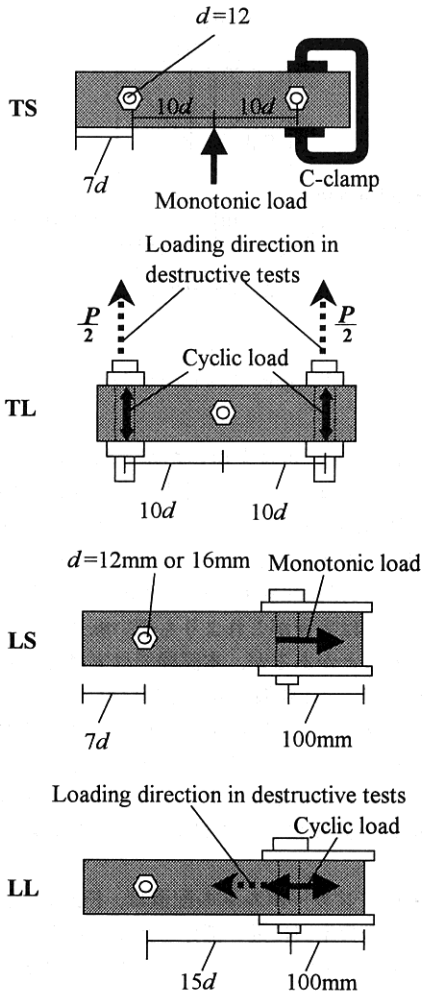


Fig. 3. Specimen configurations.
Notes: The second letters of the specimen names, S and L show the specimen configuration for anchor-bolts placed close to sill ends and anchor-bolts placed distant from sill ends, respectively.

バランスを考え、ボルト接合部を2箇所とした。その際、より弱い方の接合部が破壊してデータが弱い側に偏ることを防ぐために、片側をCクランプにより固定し、必ず同じ側が破壊するようにした。

先孔径はボルト径+0 mm・ボルト径+3 mm・ボルト径+6 mmの3条件とした。以下、先孔径とボルト径の差を先孔クリアランスと呼ぶことにする。

以上により、Table 1に示すような計18種類の試験条件を設定し、各6体ずつ試験を行った。

なお、以下では上記の記号を組み合わせることで試験条件を表すものとする。例えば、φ12のボルトでL方向加力・試験条件S・先孔クリアランスが0 mmの場合、これを12LS0と表す。

3. 結果と考察

3.1 荷重-すべり曲線

試験の結果得られた荷重-すべり曲線を Fig. 4 に示す。

3.1.1 T方向

T方向では、初期割れ発生後も、割れの進展をとめないながら荷重が増加し、最終的に残った断面が曲げ破壊した(Fig 5)。初期割れの程度によっては、Fig 5のような荷重低下が検出しにくいものもあった。その場合は、破壊音に対する荷重記録とその後の割れの進展に対する視覚的な確認により、初期破壊荷重を定めた。

Fig. 6のように、ボルトから荷重点までの距離が長くなると、曲げ破壊を起こす時の荷重が小さくなるため、初期割れ発生後の余剰耐力は期待できないと考えられる。図中の有効梁せいを土台幅の1/2と仮定し、エゾマツの甲種構造材2級の基準曲げ強度28.2 N/mm²を用いて試算した結果、ボルト間の距離が約250 mm以上になると、試算された最大曲げ荷重が実際に初期割れを生じた荷重の平均値を下回った。一般的なアンカーボルト間距離はこれより大き

Table 1. Testing specifications.

Bolt diameter	Loading direction	Loading method	Assumed location in sill	Notation in Fig. 3	Lead-hole clearance
12 mm	Parallel to the grain	Monotonic	Close to sill end	LS	0, 3 and 6 mm
		Cyclic ¹⁾	Middle of sill	LL	
	Perpendicular to the grain	Monotonic	Close to sill end	TS	
		Cyclic ²⁾	Middle of sill	TL	
16 mm	Parallel to the grain	Monotonic	Close to sill end	LS	
		Cyclic ³⁾	Middle of sill	LL	

¹⁾ Quasi-static cyclic loading at 5, 10 and 15 kN.

²⁾ Quasi-static cyclic loading at 3, 6 and 9 kN.

³⁾ Quasi-static cyclic loading at 8, 16 and 24 kN.

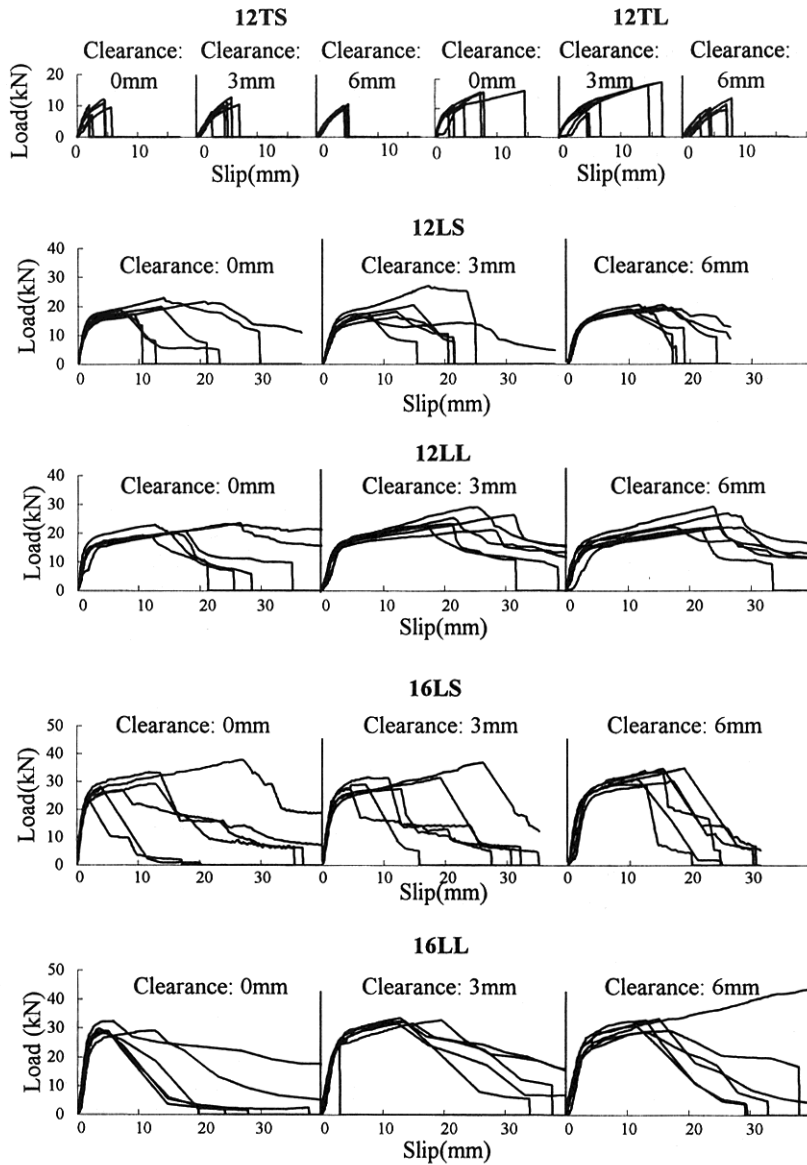


Fig. 4. Load-slip curves.

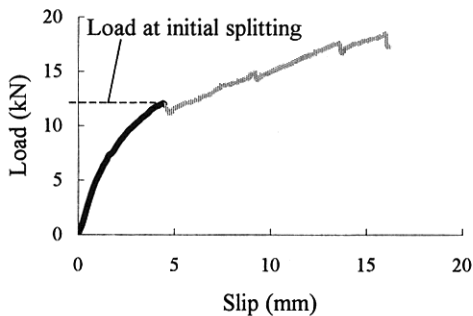


Fig. 5. Typical load-slip behavior of an anchor-bolt joint loaded perpendicular to the grain.

いと考えられるため、今回の実験では、繊維直交方向荷重では最初に割れの発生した荷重を最大荷重とした。

T方向では、Fig. 4に見られるように、全体的に初期割れ発生時の荷重及び変位が大きくばらつく傾向があった。これは、初期割れの発生が個々の試験体の材質に依存していることが原因だと考えられる。

3.1.2 L方向φ12とφ16の比較

Fig. 4に見られるように、径長比が約6と比較的小さいφ16では、ボルトの曲げ変形が比較的小さく

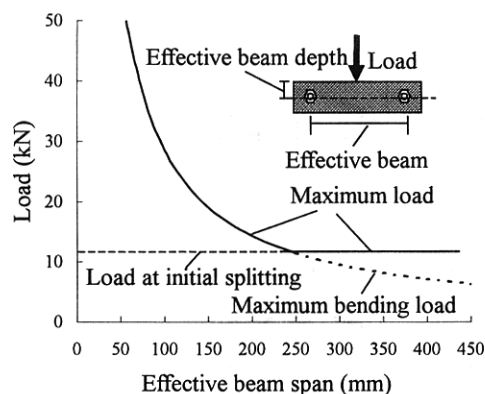


Fig. 6. Relationship between the effective beam span and the maximum load.

面圧面積が大きいので、径長比が約8である $\phi 12$ に比べ初期剛性が大きく初期直線域も大きかった¹¹⁾。 $\phi 16$ では、脆性的で降伏後すぐに破壊に至るものが見られた。一方で、降伏後もすぐには破壊に至らず、最大荷重時の変位が大きくなったものもあった。そのため、 $\phi 16$ では、最大荷重と最大荷重時の変位のばらつきが大きくなった。

特に、16LS0の実験では、最大荷重時の変位が、1.7 mmから27.0 mmまでと、大きくばらついた。また、16LS3の場合でも、3.5 mmから26.1 mmとなった。

全体的には、先孔クリアランスが大きくなるほど個々の試験体によるばらつきが少なくなる傾向が見られた。これは次のような理由によると考えられる。先孔クリアランスが0の時には先孔の傾斜や曲がり、土台の狂いなどによって、土台をアンカーボルトに留め付ける際にボルトの接触面付近の木材に繊維直交方向の初期引張応力が生じる。この初期引張応力は加工精度に影響され、大きくばらつく。先孔クリアランスがあるとこのような初期応力が軽減されるため、ばらつきが減少すると考えられる。

3.1.3 座金のめり込み抵抗による、降伏後の荷重の上昇

L方向では、おおよそ変位8 mm付近から荷重すべり曲線が立ち上がった (Fig. 7)。これは、座金が土台にめり込む際のめり込み抵抗により、荷重が増加するためであると考えられる^{7, 8)}。この効果は、径長比が大きく曲げ変形がより顕著な $\phi 12$ のアンカーボルトでよく現れた。

3.2 最大荷重・最大荷重時の変位

最大荷重 P_{\max} を Fig. 8 に、最大荷重時の変位 $D-P_{\max}$ を Fig. 9 に示した。

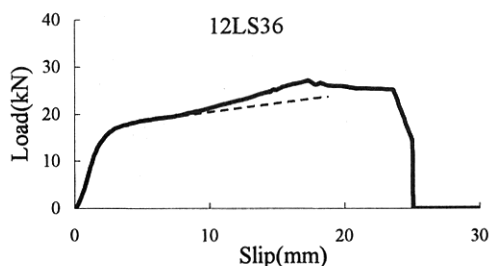


Fig. 7. Increase of the lateral load due to embedment of the washer into the sill.

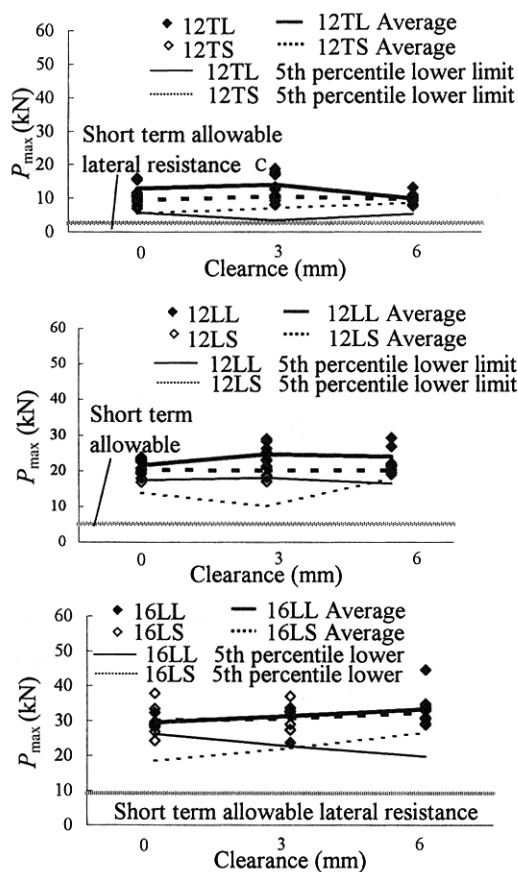


Fig. 8. Maximum load.

3.2.1 L方向とT方向の比較

T方向では、L方向に比べて、最大荷重と最大荷重時の変位がともに小さかった。後者は、先孔クリアランスがある場合の有効耐力を大きく減少させる要因になり得る。実際の構造物におけるアンカーボルト接合部の配置例を Fig. 10 に示す。実際の構造計算では、各耐力壁線の合計せん断耐力が大きくなると、その直下にあるアンカーボルトの合計せん断

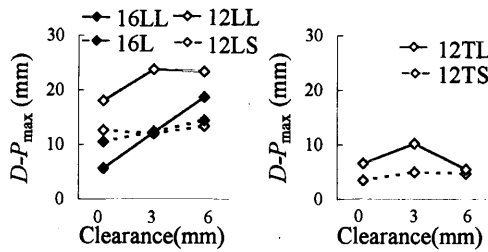


Fig. 9. Slip at maximum load ($D-P_{max}$).

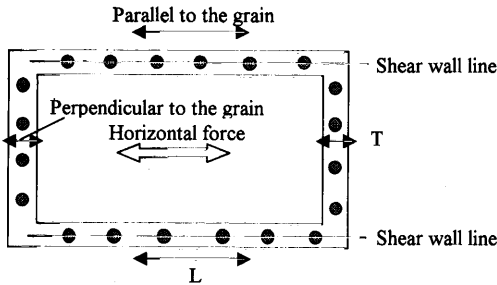


Fig. 10. An example of the arrangement of anchor-bolts.

耐力だけでは不足し、同方向にある全てのアンカーボルトの合計せん断耐力が総必要せん断耐力を満たせば良いとされることが多い。それでもせん断耐力が不足する場合は、Fig. 10のT方向荷重を受けるアンカーボルトのせん断耐力の一部も加算することがある。しかし、この実験の結果をみると最大荷重時の変位が小さいT方向のボルトの耐力は除外した方が無難であると考えられる。この定量的評価については、今後の検討を要する課題である。

3.2.2 L方向φ12とφ16の比較

最大荷重と最大荷重時の変位を、L方向についてφ16とφ12で比較した。

Fig. 8に見られるように、φ12では、条件Lの最大荷重が試験条件Sの最大荷重を大きく上回った。径長比が大きい(約8)φ12では、径長比の小さい(約6)φ16のボルトに比べてボルトの曲げ変形が大きく、面圧応力分布が偏るため、土台の初期割裂が一部にとどまり、ボルトの軸方向全体に渡っては急激に割裂が進まない。そのため残った部分の拘束効果により、その後も荷重が増加する^{7, 8, 12)}。初期破壊から終局破壊に至るまでの荷重・変位の増加は、木口までの距離や割裂の拘束条件に影響される。

一方、φ16では、φ12に比べて実験条件の違いによる耐力差が少なかった。径長比の小さいボルトでは、比較的ボルトが曲がりやすく、ボルトの軸方向全体にわたって面圧応力の偏りが少ない。そのため、

初期割裂が軸方向全体に一気に進展する傾向が強くなり、木口までの距離や割裂の拘束条件の影響が小さかったと考えられる。

Fig. 9に見られるように、最大荷重時の変位も、φ12では試験条件Lの方が試験条件Sの場合より大きくなったが、φ16では差が見られなかった。その結果、全体ではφ12・試験条件Lで最も大きくなり、他の3条件では同程度となった。

3.3 初期すべり係数

荷重-すべり曲線において、降伏点と原点を結んだ直線の傾きを初期すべり係数¹³⁾とし、Fig. 11に示した。

3.3.1 クリアランスによる初期すべり係数の低下

初期剛性は、クリアランスの増加に伴い小さくなる傾向があった。これは、クリアランスがある場合、Fig. 12のように荷重-すべり曲線の初期部分がS字を描くことが原因である。先孔にクリアランスがあると、はじめにボルトが先孔に接する際の有効面圧面積が小さいが、ボルトが木材にめり込むと有効面圧面積が増加し、グラフが徐々に立ち上がることになると考えられる¹⁴⁾。

3.4 エネルギー容量

最大荷重に到達後、荷重が $0.8P_{max}$ に低下するまでの荷重-すべり曲線と、x軸とに囲まれる面積をエネルギー容量とし、Fig. 13に示す。

3.4.1 L方向とT方向の比較

T方向では、L方向に比べて P_{max} 、 $D-P_{max}$ が小さかったため、エネルギー容量も非常に小さくなった。

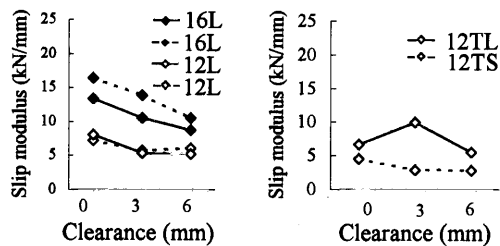


Fig. 11. Initial slip moduli.

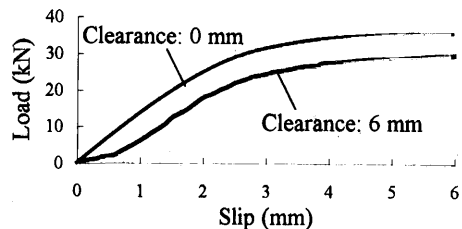


Fig. 12. Decrease of initial stiffness due to lead-hole clearance.

3.4.2 L方向φ12とφ16の比較

前述のとおり, 最大荷重と初期剛性は, 径が大きく, かつ径長比の小さいφ16の方が当然大きくなった。しかし, φ12では, 土台中央部のアンカーボルトを想定した試験条件Lの場合, Fig. 9に見られるように $D-P_{max}$ が大きくなった。そのため, Fig. 13 左図に見られるように, φ12とφ16のエネルギー容量の大小関係は, 試験条件, 先孔径によって異なる結果となった。

実際の建物では, 土台端部のアンカーボルト (試験条件S) と土台中央部のアンカーボルト (試験条件L) が複数組合わさった, アンカーボルト列全体として地震力に抵抗する。また, 先孔径も施工者によって違いがあり, 特定はしにくい。これらの点を考えると, 耐震性能に関係するエネルギー容量に関しては, φ16もφ12も同程度と見なすのが安全であると言える。

3.5 安全率

試験結果から75%信頼水準における5%下限値を求め, 木質構造設計規準による短期許容耐力 (12Lでは5.3 kN, 12Tでは2.6 kN, 16Lでは8.1 kN) と比較し安全率を算出した。その結果を Fig. 14 に示す。

3.5.1 T方向

T方向では, 全体的に安全率が低くなり, 試験条件Lでは安全率が2を大きく下回った。ただしこの結果は, 試験結果に最大荷重の大きいものが含まれ, 標準偏差が大きくなったことも影響している。

3.5.2 L方向φ12とφ16の比較

安全率2を基準として考えると, 16LS0, 16LL6ではぎりぎりのものがあり, 12LS3では安全率2を下回った。しかし, 12LS3と16LL6では, 突出して最大耐力の大きかった試験体が1体ずつあり, 標準偏差が大きくなったことが影響しているため, このデータを除いて考えると, Fig. 15 のようになり, 12LS3と16LL6では, 安全率が十分2を越えた。一方, 16LS0では, データが全体的にばらついており, 5%下限値の値は妥当だと思われる。また,

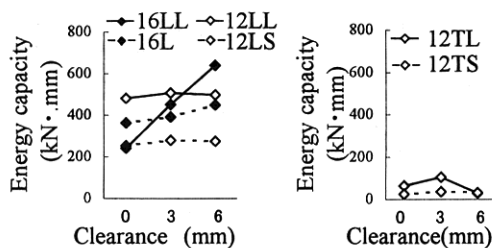


Fig. 13. Energy capacities.

12LLでは安全率が3を超え, 非常に安全性の高い結果となった。

以上を考えあわせると, 安全率やエネルギー容量の点からは, 径長比の大きいφ12のボルトを用い, 割裂の生じにくい施工条件とした場合に, 安全性が高くなるといえる。

4. 結 論

本研究では, アンカーボルト接合部に対し, ボルト径, 荷重方向, 先孔径, ボルトの位置を変化させた1面せん断試験を行い, 以下の結論を得た。

- (1) T方向ではL方向に比べて, 最大荷重, 最大荷重時の変位, エネルギー容量が小さく, 安全率も低かった。
- (2) φ16では, 最大荷重と最大荷重時の変位のばらつきが大きくなった。
- (3) L方向について比較すると, φ16では, 最大荷重と初期剛性がφ12に比べて大きかったが, エネルギー容量はどちらも同じ程度だった。
- (4) 安全率はφ16で低いものがあった。

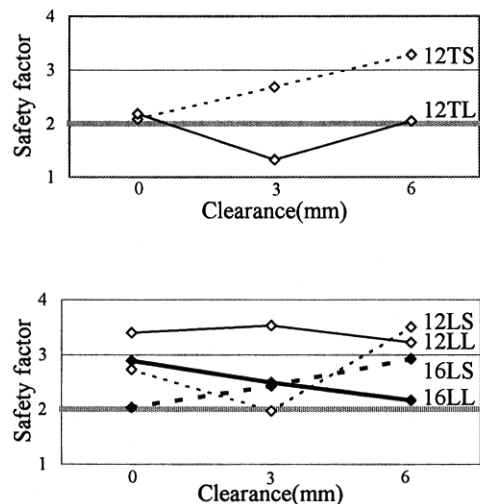


Fig. 14. Safety factors (calculated from all test data).

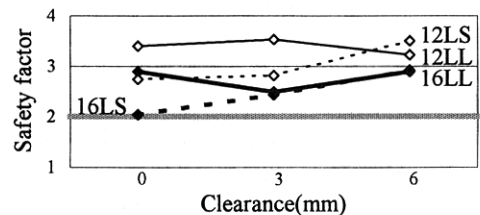


Fig. 15. Safety factors (calculated by excluding particularly strong data).

以上により、実際の耐力性能を考えると許容せん断耐力の大きい $\phi 16$ のアンカーボルトを少数使用するより、 $\phi 12$ のアンカーボルトを多数使用する方が、安全余裕が大きいといえる。

文 献

- 1) 平井卓郎, 沢田 稔: 木材学会誌 **28**, 137-142 (1982).
- 2) 平井卓郎, 沢田 稔: 木材学会誌 **29**, 118-122 (1983).
- 3) 川元紀雄, 小松幸平, 金谷紀行: 木材学会誌 **38**, 37-45 (1992).
- 4) 川元紀雄, 金谷紀行: 木材学会誌 **37**, 16-23 (1991).
- 5) 川元紀雄, 小松幸平, 原田真樹: 木材学会誌 **38**, 1111-1118 (1992).
- 6) T. Hirai: *Mokuzai Gakkaishi* **39**, 1027-1035 (1993).
- 7) 平井卓郎: 北大農演研報 **47**, 215-248 (1990).
- 8) 平井卓郎: 木材学会誌 **37**, 1017-1025 (1991).
- 9) 日本建築学会: “木質構造設計規準・同解説”, 日本建築学会編, 丸善, 2002.
- 10) 平井卓郎: 北大農演研報 **46**, 959-966 (1989).
- 11) T. Hirai, M. Sawada: *Mokuzai Gakkaishi* **28**, 543-547 (1982).
- 12) 平井卓郎: 木材学会誌 **37**, 303-308 (1991).
- 13) (社)日本ツーバイフォー建築協会: “2002年枠組壁工法建築物構造計算指針”, 枠組壁工法建築物設計の手引・構造計算指針編集委員会編, 工業調査会, 東京, 2002.
- 14) 平井卓郎: 北大農演研報 **46**, 967-988 (1989).