

智積院講堂の土壁の耐力実験

非常勤研究員 西澤英和

はじめに

京都市東山区の真言宗智積院では興教大師850年御遠忌記念事業として、講堂の復興が計画され新築工事が行われた。この講堂はわが国の伝統的な様式による本格的な木造社寺建築で、18間×9間の比較的大規模な書院造の平屋建である。

その構法は伝統的手法によるものであるが、現在の構造設計基準に照らせば地震などの水平荷重に対する強度上の問題点が指摘されるところであり、復興に際して基礎構造をRC造とし真壁内部に鋼製筋違を配置するなどの近代的な手法による構造補強が施された設計となっている。

この構造設計は、既知の構造力学的知見に基づいて関連法令や規準に適合する形で行われたものであり、計算上は十分な安全性が確保されていることが認められるが、現在の設計規準は近代的構法による建築物を念頭に整備されてきたもので、本物件に見られるような大規模な伝統的木構造物は実例が極めて少なく、法的にも対象外となることが多いため、その適用性について十分な検討が尽くされていないわけではない。また実架構の力学的挙動も解明されていない部分も多く残されており、学術的にも更なる研究の必要性がとらえられているところである。

本工事に先立ち現場にて鋼製筋違を製作、これを活用して力学的性能の確認実験を行った結果について報告する。ここで、特に本建造物の構造的に充分把握されていない問題として以下の点に着目することが重要と考えられる。

- (1) 柱と貫から構成される木造軸組の水平剛性・耐力
- (2) 上記軸組に木舞下地と土壁仕上げとした真壁を取付けた状態での壁体の面内剛性と耐力
- (3) 上記木造壁体に鋼製筋違を取付けた状態での剛性

また、この壁体には筋違補強により十分な強度が期待されるが、大地震などの荷重下ではかなりの面内変形が生じ、真壁の仕上げに塗られた漆喰にひび割れが生じることが予想される。さらに、筋違が座屈した場合にその面外変形により土壁の剥離も予想される。これらは、変形性能が低い壁土が構造体の変形に追随できないことにより避けられない問題であるが、構造的性能とは別に美観・機能上の要求からひび割れや剥離がいかなる変形レベルで生じるのかを把握することも重要で、この点も実験的に明らかにした。

このような木造建築の実大載荷実験は前例が少なく、特に耐力や変形性能が複雑で未解明の部分が多い壁体部の挙動を確認できる点でその成果が期待されるものである。

実験を行った、縦横約4mの実物大の京壁（中塗仕上げ）について紹介する。

実験の目的は、室町様式の書院風大講堂を伝統木構造の技法によって復原するにあたって、土壁がどの程度の強度を有するのか、また壁内に鋼製筋違を設置するとどのような力学的特性を示すのかを、施工試験を含めて検討することであった。当該建物は内陣の背面側に3面の壁はあるが、南面の縁回りは吹抜けで舞良戸の開閉機構のみを有している。構造的には長期荷重は木造軸組で支持するものとし、水平力は土壁もしくは筋違内蔵の土壁面で抵抗する計画である。このため、天井面には水平筋違を設けている。また、架構の全体的な捩れ変形を防止するため、平面の隅角部の舞良戸については、これを造りつけとして庭園側からは舞良戸の外観とし、室内側は後述の補強筋違内蔵の土壁漆喰仕上げとしている。

実験は復原建物と同じ詳細とした。すなわち、柱断面は8寸角、柱間1,970mmで地覆より軒廻りまでの高さは約4mである。貫は4段、縦棧1か所で、下地は「本四ツ」で真竹の4ツ割を用い、シュロ縄で小舞をかいた。これを基本系（SPEC2）として、これにPL-6×65の鋼板筋違を設置したものを（SPEC1）、さらに土壁と筋違のない木組と小舞下地のみを（SPEC3）の計3種類である。土壁は工期の関係から「ドロコン」を用いて荒壁1寸とし、裏返しとともに、中塗9分厚で仕上げた実験を行った。乾燥期間は初夏であるが、野帳場のため雨養生を施した。

また、図1に示すように実施施工を考慮して、チリ回りについては、a. ノレン、b. ひげこ打ちの2種類、貫伏せについては古来工法として茅・緒・藁・長鬚子+藁のほか、現代工法として寒冷沙のほか新素材を何種類か採用した。

載荷方法を図2に示す。現場の布基礎上に壁面を構築し既存建物より反力をとって、柱頭に油圧ジャッキにより水平力を載荷した。また柱には鉛直力を加えないので柱の浮き上がりに抵抗させるために大型の羽子板金物を柱の両側より挟んで下端を上記布基礎に結合した。図3は参考までに鉄板筋違の詳細を示す。筋違は本来地覆もしくは布基礎に定着する方が優れているが、本実験では架構の終局耐力の確認を目的としており、羽子板金物で基礎に引抜き力を伝達できるのでこのようなディテールを採用した。

図4に載荷荷重—水平変位関係を示す。上段はSPEC1, 2, 3の一方方向単調載荷試験の結果である。図中、縦軸は水平力、横軸下段は水平変位、横軸上段はせん断変形角である。

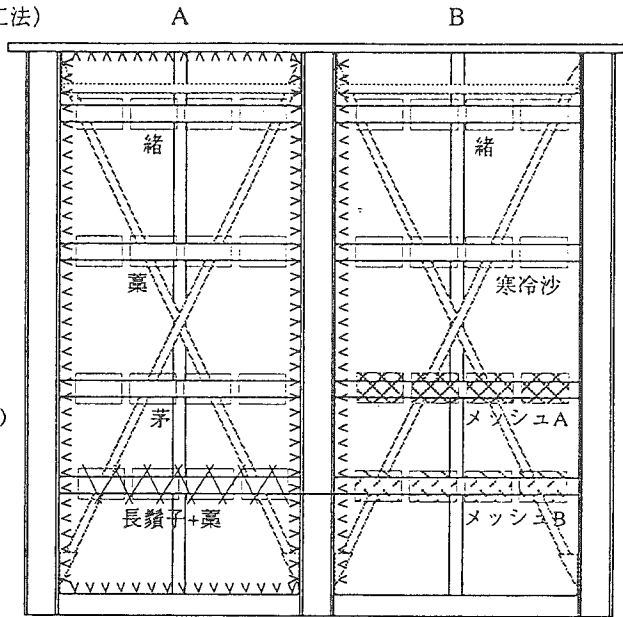
軸組と木舞のみのSPEC3は、変形角1/20において約1.0tの抵抗性を有するが、剛

北西面 (A) (古来工法)

1. 棧竹木舞かき
(縄: 藁縄)
2. 荒壁つけ
3. 貫伏せ
漆喰塗り
追かけ中塗土
かや(寒冷沙)
上段: 茅
下段: 茅と長緒
4. むら直し
貫伏せ面まで
5. チリひげこ打ち
(間隔50~60)
6. チリひげこ伏せ
チリ廻り(漆喰使用)
7. 底うめつけ送り
8. 中塗り

貫伏せ上段より

- ① 緒
- ② 藁
- ③ 茅
- ④ 長鬚子+藁



南西面 (B)

1. 棧竹木舞
2. 荒壁つけ
3. 貫伏せ
YN塗り
追かけ中塗土
メッシュ伏せ込み
上段: NSネット
(メッシュA)
下段: ノンクラック
(メッシュB)
4. むら直し中塗り
5. チリひげこ打ち
チリ廻り
(聚楽土使用)
6. 底うめ中塗り
7. 中塗り土

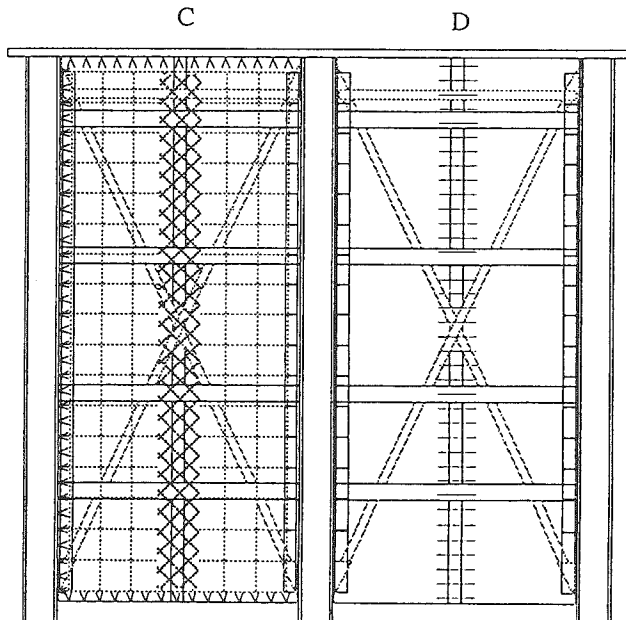
貫伏せ上段より

- ① 緒
- ② 寒冷沙
- ③ メッシュA
- ④ メッシュB

西面

南東面 (C)

1. 棧竹木舞
2. 荒壁 うら返し
3. 貫伏せ
(緒, 藁, 麻)
漆喰塗り追かけ
中塗り土の上伏込み
(メッシュA)
4. むら直し中塗り
5. チリのれん打ち
及びチリ廻り(漆喰)
5. 底うめ中塗り
前面NSネット
(メッシュA)仕込み
て中塗り



北東面 (D)

1. 棧竹木舞
2. 荒壁 うら返し
3. 貫伏せ
(中塗土での貫伏せ)
貫上に中塗り藁仕込み
4. チリのれん打ち
及びチリ廻り
(聚楽土使用)
5. 底うめ中塗り
6. 中塗り

東面

図1 壁詳細図

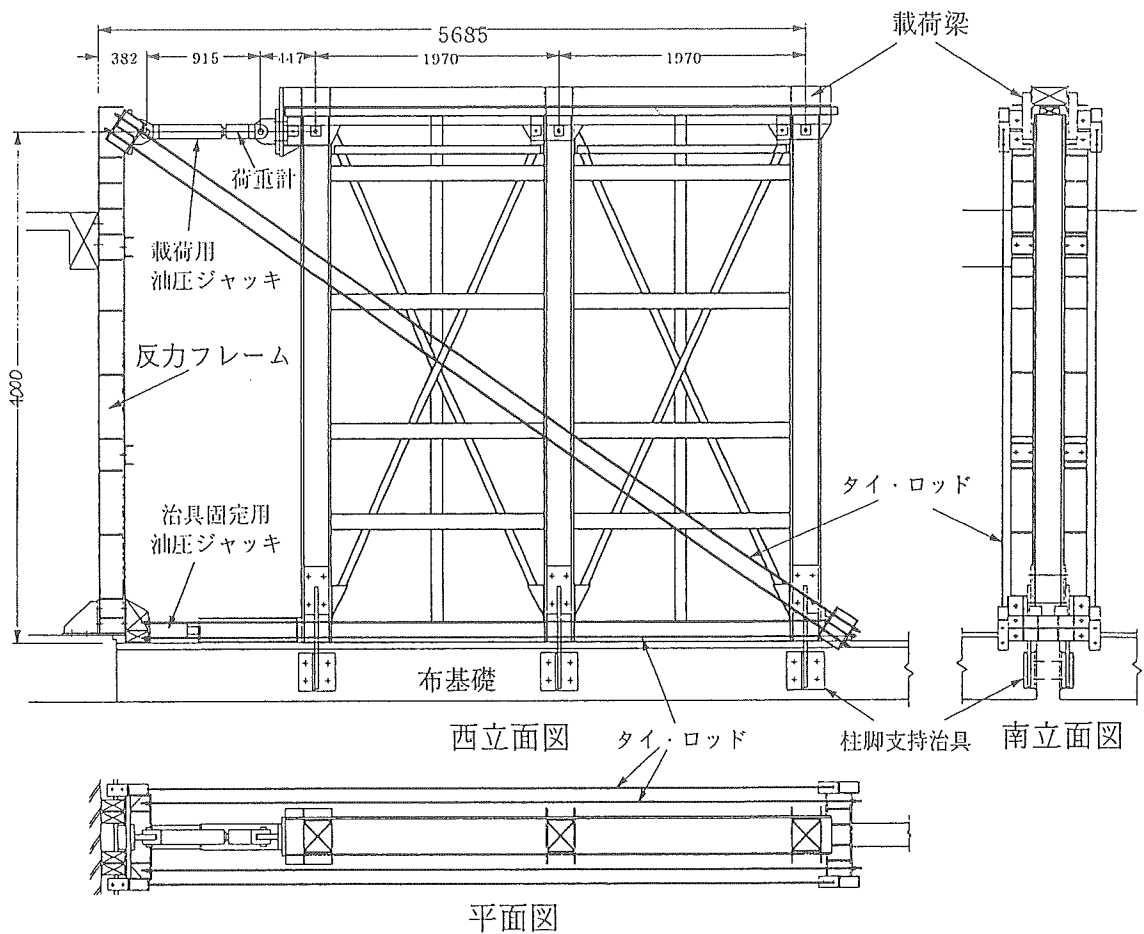


図2 載荷方法

性は他の試験体に比べて数十分の一のオーダーに過ぎない。これに対し、土壁を付けたSPEC2では変形角 $1/40$ 程度で柱芯間の実長約4mに対して最大耐力4.5tに達し、 $1/100$ では約3.4t、 $1/50$ で4.2tであった。下段は上段の実験より（SPEC1-SPEC2）、（SPEC2-SPEC3）として、それぞれの筋違のみと土壁のみの耐力曲線を求めたものである。これより本実験では変形角 $1/150$ 程度までの微小変形範囲では土壁の方が筋違より剛性が高いこと、および筋違の耐力は計算値とほぼ一致することを確認された。

土壁のみの終局耐力は3.5tで有効内法壁長約3.5mより、 0.95 t/m となる。壁厚は11.4~10cmとすると終局せん断応力 $\tau \approx 1.0\text{ kgf/cm}^2$ 程度の値となる。

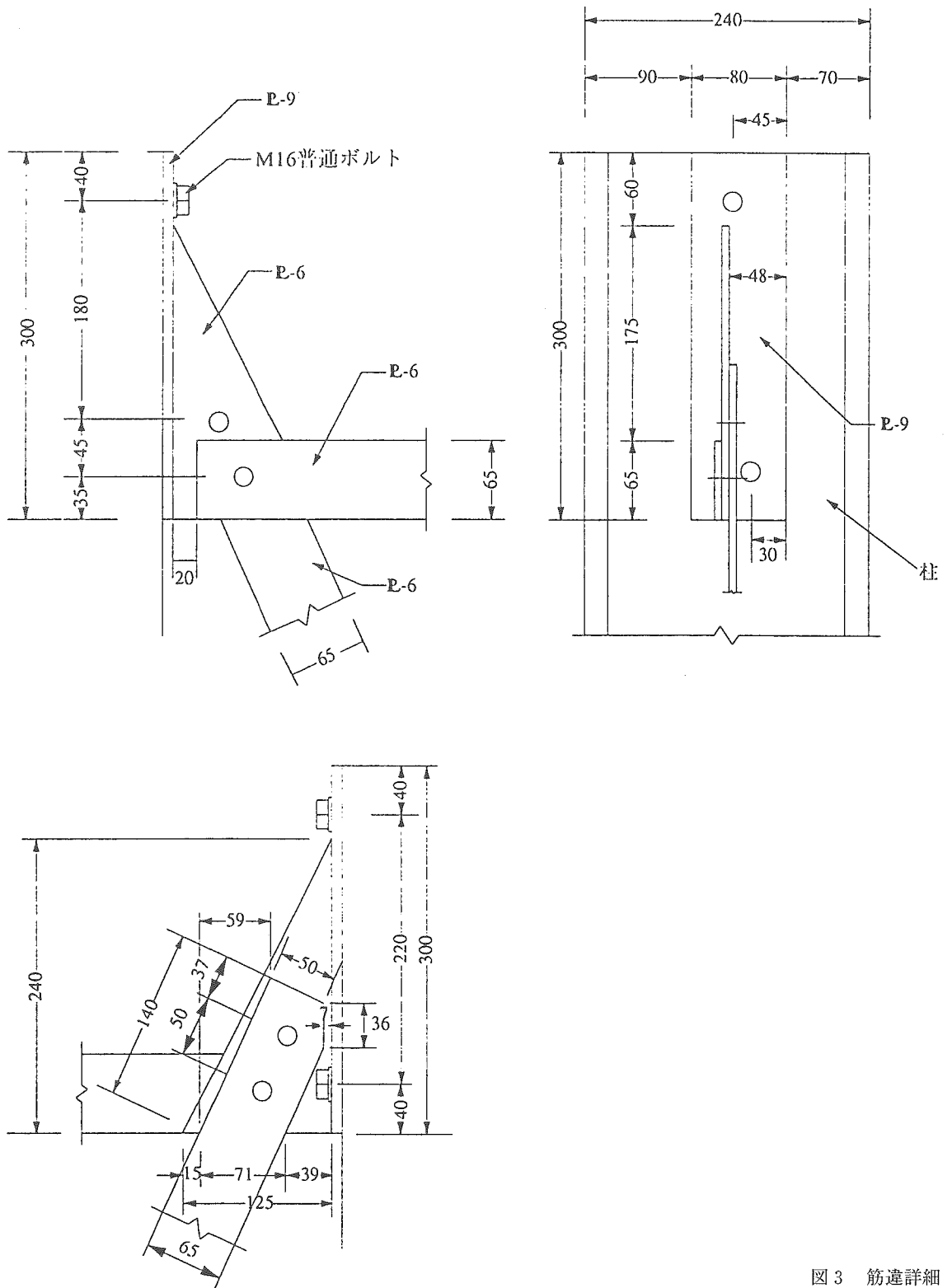


図3 筋違詳細

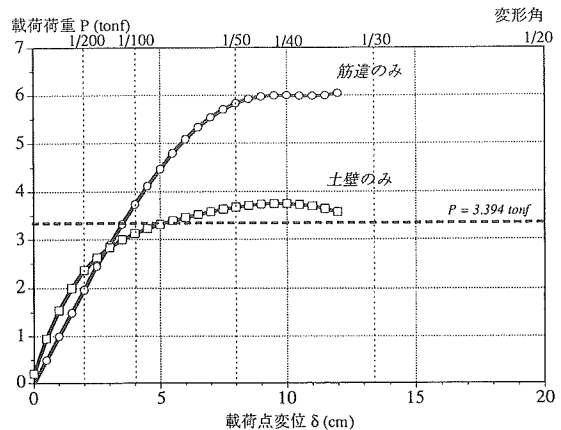
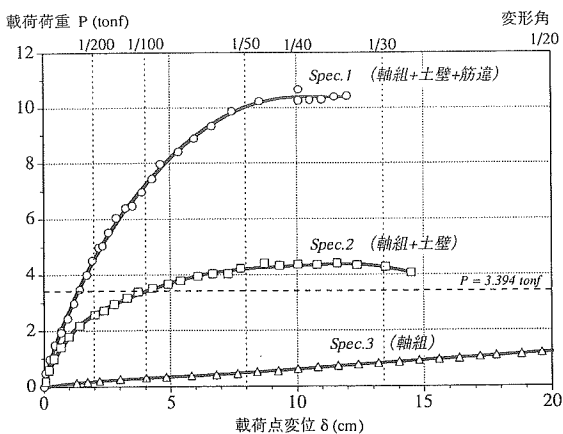


図4 載荷荷重—水平変位関係

図5に土壁と筋違内蔵土壁のそれぞれについて最大変位を加えた時に生じた亀裂分布のスケッチを示す。筋違付真壁では亀裂密度が低く、圧縮筋違の座屈部位近傍のみに集中する傾向を示す。なお、本試験体の筋違を4つの木舞で両面を挟んでいるが、これによって座屈が有効に拘束されることがわかった。

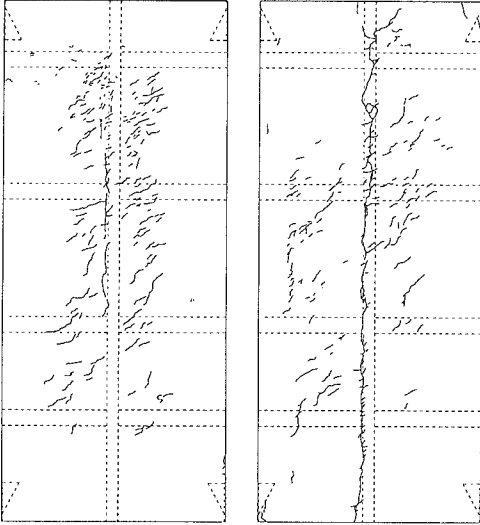
一方、土壁のみでは貫周辺に亀裂が進展する傾向が強い。

図6は貫伏せおよびチリ回りの処理法による初期亀裂の確認変位と亀裂の明確になる変位を比較検討したものである。これより以下の傾向が認められた。

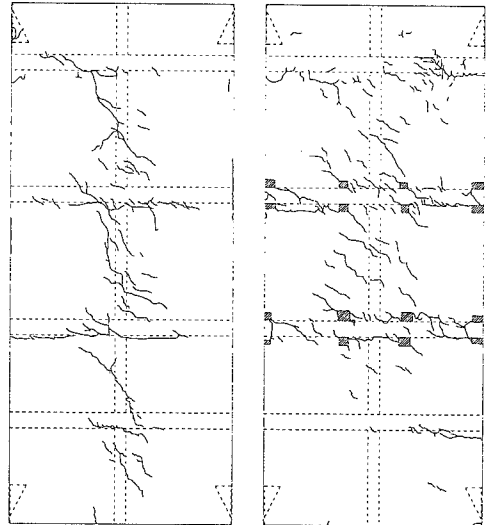
- ①ノレン、ヒゲコなどは大変形時の亀裂分散効果は少ない。乾燥亀裂の分散など主として意匠面での効果は大きい、これによって壁体の強度が向上するものではない。
- ②貫伏せに関しては、ワラ、カヤなど使用材種によって大きく性能が異なり、最近の素材の中には良好な性能を示すものがあった。

このように正統的な技法で作られた京壁のせん断強度は、現行基準値より実際は数倍から10倍程度大きいようである。また最大耐力はおおむね3～2.0%程度の変形で生じ1%の変形時の耐力に比べて4割程度大きいので、現行規定のように1%程度の変形で弾性的な設計を行っておくと、最大耐力までの約2倍程度のエネルギー吸収能力が期待できる。

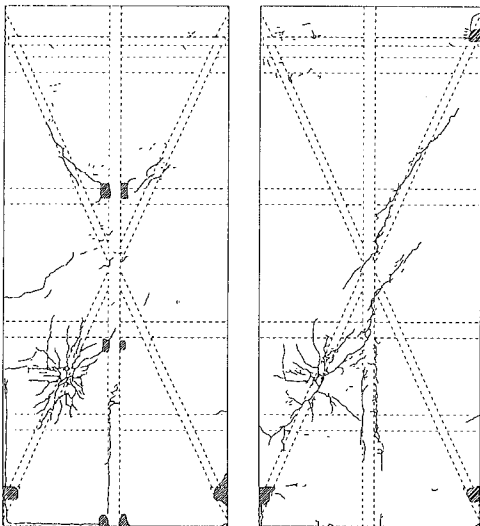
東 面



西 面



東 面



西 面

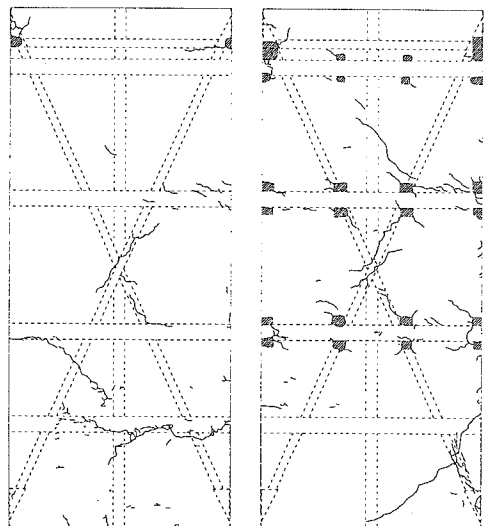


图 5 龟裂分布

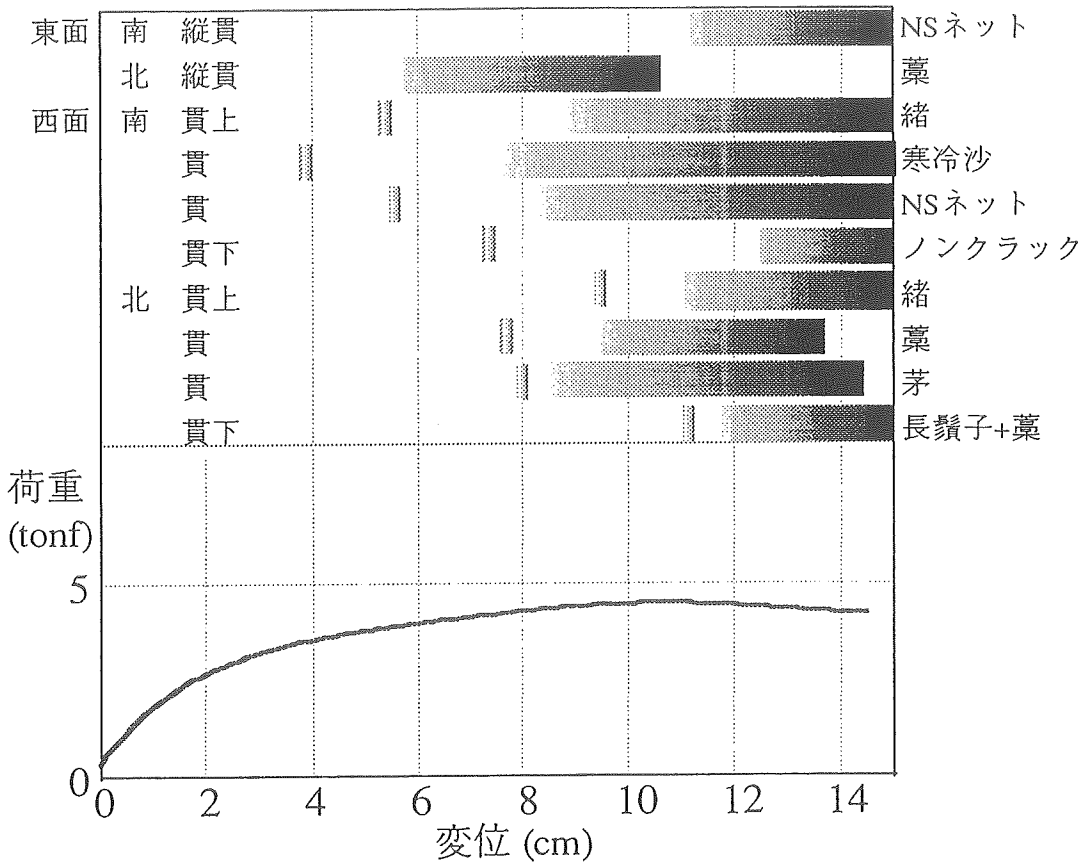


図6 チリ・貫伏せの効果比較