

論文 アラミドストランドのプレテンション緊張材への適用性の検討

佐藤 剛*1 中井裕司*2 熊谷紳一郎*3

要旨：本研究はアラミドストランドの曲げ引張試験、付着伝達長試験、PCはりの載荷試験により、アラミドストランドのPC部材への適用性を検討するために行われた。その結果、アラミドストランドの曲げ引張強度は曲げ角度が6度を超えると低下し始め、18度では母材強度の約60%程度となること、付着伝達長は約60cmであること、アラミドストランドを緊張材として用いたPC部材の曲げ耐力は、従来の曲げの計算手法により算定可能であること、アラミドストランドを緊張材として用いたPC部材のせん断耐力は、弾性係数を考慮した補正により精度良く算定出来ることが確認された。

キーワード：アラミドストランド、曲げ性状、せん断性状、付着伝達長

1. はじめに

連続繊維補強材は、高強度、高耐久性、軽量、非磁性という特性を持ち、鋼材に代わるコンクリート用補強材として活用されることが期待されている。これまで筆者等はAFRPロッドをプレストレストコンクリート構造物の緊張材に適用するための研究を行い、その有用性に関する報告を行ってきた[1]。本稿においては、新しく開発されたアラミドストランドのプレテンション用緊張材への適用性を確認するために幾つかの実験を行ったのでここに報告する。

2. 実験概要

2.1 使用材料

アラミドストランド

表-1 アラミドストランドの力学的特性

呼び直径 (mm)	呼び断面積 (mm ²)	引張強度 (kgf/mm ²)	弾性係数 (kgf/mm ²)	リラクゼーション率 (%)
12.4	92.4	176	4300	8.63

本実験に使用したアラミドストランドの力学的特性を表-1に示す。引張強度はPC鋼線とほぼ等しく、弾性係数はPC鋼線の約1/5である。

コンクリート

本実験に使用したコンクリートの配合を表-2に示す。セメントは早強ポルトランドセメントを使用し、設計基準強度は500kgf/cm²である。

表-2 コンクリートの配合

設計基準強度 (kgf/cm ²)	スランプ (cm)	水セメント比 W/C (%)	単位セメント量 (kg/m ³)	絶対細骨材率 S/a (%)	単位水量 W (kg/m ³)	細粗骨材 全量 (kg/m ³)	単位細骨 材量 S (kg/m ³)	単位粗骨 材量 G (kg/m ³)	単位混和 材量 M (kg/m ³)	粗骨材細 大寸法 (mm)
500	6±1.5	37	440	41	163	1775	726	1049	5.28	20

2.2 局部曲げ試験

プレテンション方式では曲げ上げ等により、緊張材は局部的な曲げによる影響を受ける場合がある。FRP緊張材は鋼材に比べると局部曲げにより引張強度が顕著に低下することが指摘されている。そこで局部曲げによるアラミドストランドの引張強度低下率の確認を行うために、以下に示す実験を

*1住友建設（株）技術研究所研究員（正会員）

*2住友建設（株）技術研究所主任研究員（正会員）

*3住友建設（株）土木部次長

行った。

図-1に供試体の形状寸法を示す。実験は局部曲げ角度 (θ) を要因として行った。図-2に示すように $D/d=5$ とし中央の治具を上下させることにより θ を変化させ、片側からジャッキで載荷した。

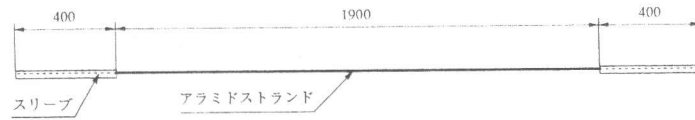


図-1 供試体の形状寸法

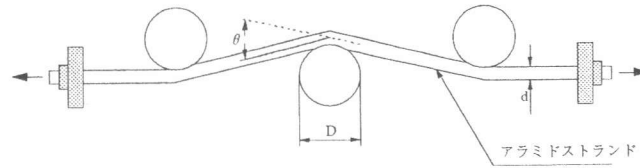


図-2 局部曲げ引張試験の概念図

2.3 付着伝達長試験

より線状連続繊維棒材の付着強度は、PC鋼より線と同等以上である [2]。しかし、アラミドストランドをプレテンション用緊張材として用いる場合の付着伝達長は明らかにされていない。そこでコンクリート表面歪の測定結果からアラミドストランドの付着伝達長を推定し、プレテンション用緊張材として利用するための基礎資料を得ることを目的として以下に示す実験を行った。

供試体寸法は高さ200mm、幅200mm、長さ2000mmとし、アラミドストランドを供試体図心に平行に2本配置した。なお、付着割裂防止のために $\phi 9$ スパイラル筋を緊張材周りの全長にわたって配置した。

目標導入緊張力は $19.4tf(0.6Pu)$ とし、図-3に示す様に $C.T.C.=80mm$ で供試体上面に貼付した歪ゲージによりコンクリート表面歪を測定した。

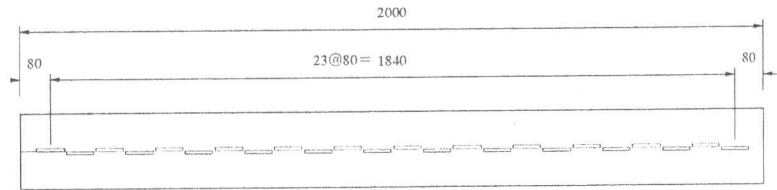


図-3 コンクリート歪測定方法

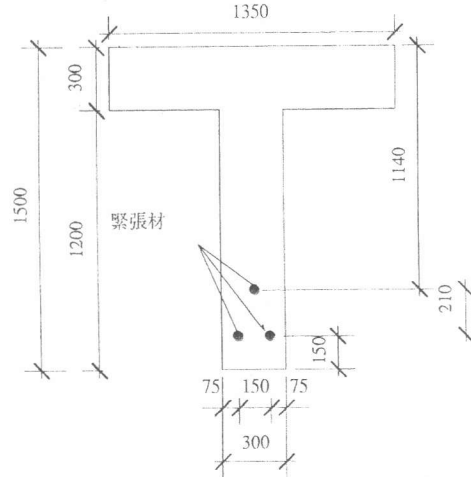


図-4 供試体断面形状

2.4 PC単純梁の載荷試験

FRP緊張材は鋼材と異なり塑性変形能のない脆性材料のため、どのような設計概念に基づいてPC部材を設計するかが問題となる。本実験は、アラミドストランドをプレテンション用緊張材として用いたPC梁の載荷試験を行い、その耐荷性状の評価を行うことを目的として実施した。

2.4.1 供試体

供試体の断面形状を図-4に示す。桁高500mm、ウェブ幅100mm、有効桁高450mm、上フランジ幅450mm、フランジ厚100mmとし、全長は4000mmである。図-5にアラミドストランドの配置図を示す。アラミドスト

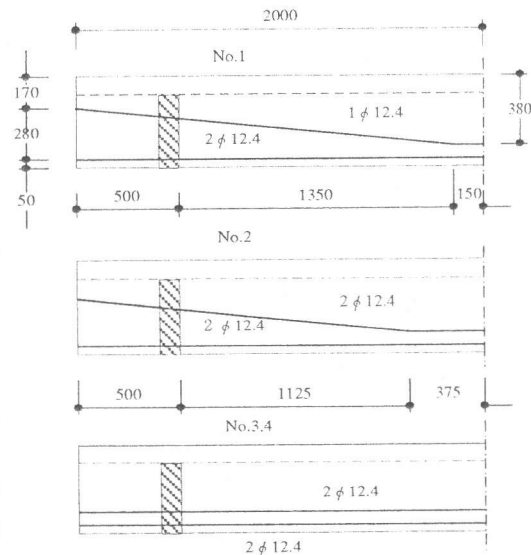


図-5 アラミドストランドの配置図

表-3 供試体の諸元

供試体	軸方向筋 断面積 (mm ²)	設計緊張 導入力 (tf)	設計緊張 応力 (kgf/mm ²)	配置	せん断スパン 比	破壊形式
No.1	277.2	29.3	106(0.6Pu)	BU ^{*1}	3.0	曲げ
No.2	369.6	29.3	79(0.45Pu)	BU	2.5	せん断
No.3	369.6	29.3	79(0.45Pu)	ST ^{*2}	3.0	せん断
No.4	369.6	29.3	79(0.45Pu)	ST	2.5	せん断

*1：曲げ上げ配置 *2：直線配置

ランドは桁下縁に2段に分けて配置した。No.1は上段1本下段2本、その他は上段2本下段2本である。曲げ上げは上段の緊張材に施し、曲げ上げ角度はNo.1が約7度、No.2が約9度である。なおスターラップ等の補強筋は配置していない。

2.4.2 実験要因

供試体の諸元を表-3に示す。緊張材の有効緊張応力、せん断スパン比(a/d)、緊張材の曲げ上げの有無を実験変数として4体作製した。

2.4.3 荷重方法および測定項目

荷重方法および測定項目を図-6に示す。スパン長は3000mmの単純支持とし、せん断スパン比は2.5および3.0とする4点对称荷重とした。曲げひび割れが断面図心を超えた時点および明確なせん断ひび割れが発生した時点で除荷し、以後破壊まで単調に荷重した。

測定項目は、供試体の変形を支点部の他に5点、緊張材の滑り込みが2点、梁上縁のコンクリート歪が9点、下縁のコンクリート引張歪が5点、純曲げ区間の曲げひび割れ幅が2点、下縁から200mmのせん断ひび割れ幅が2点、下縁から50mmの純曲げ区間およびせん断区間の軸方向変位、また、せん断スパン図心におけるコンクリート表面主ひずみである。

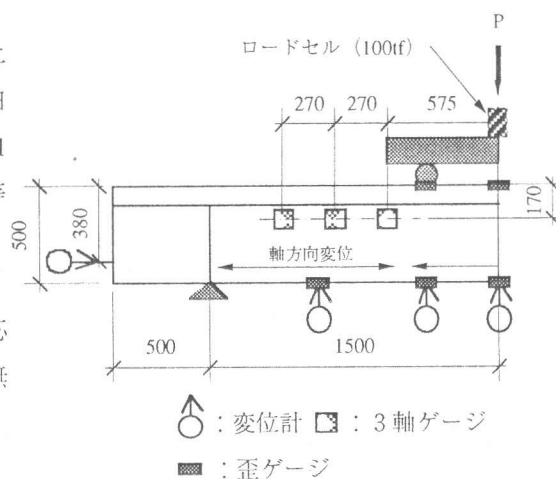


図-6 荷重方法および測定項目

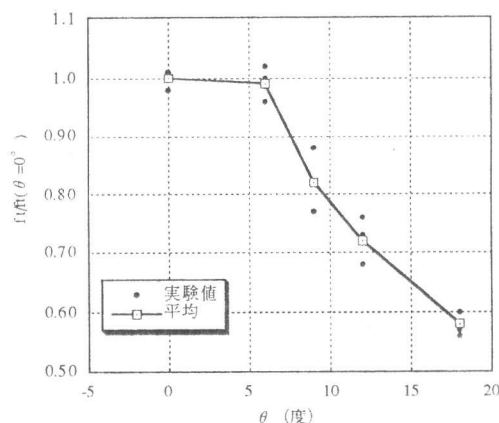


図-7 局部曲げ引張試験結果

3. 実験結果および考察

3.1 アラミドストランドの曲げ引張性状

図-7にアラミドストランドの局部曲げ引張試験の結果を示す。縦軸は対母材強度比、横軸は曲げ角度である。θ=6度を超えると急激に引張強度は低下し、θ=18度では母材強度の約60%であった。なおθ=6度までは定着部近傍の破断が確認されたが、θ=9度を超えるとすべての供試体で局部曲げ部において破断が生じた。実構造物においてアウトケーブルまたはアンボンド方式で使用する場合にデビエーターとストランドとの間に滑りが生じ、緊張力を受けた状態で繰り返し曲げを受けることが考えられる。上試験の結果からは、そのような繰り返し曲げを避けるような施工が必要と思われる。

3.2 アラミドストランドの付着伝達長さ

実験結果を図-8に示す。横軸は供試体長手方向の位置、縦軸はコンクリートひずみと弾性係数から算出した軸方向の応力度を示す。なお実験時のコンクリート強度は520kgf/cm²であった。

実線で示した解析値は、付着応力度が自由端に向かうにつれて指数関数的に減少することを考慮し、さらに、導入緊張応力の伝達長が60cmであると仮定した場合のコンクリート表面応力度である。

実験値と解析値はほぼ一致しアラミドストランドの付着伝達長は約60cmで完了しているものと推測できる。

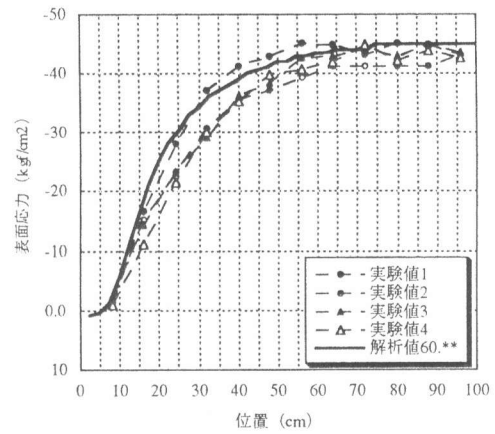


図-8 付着伝達長試験結果

3.3 アラミドストランドを用いたPC梁の部材特性

載荷試験結果の一覧を表-4に示す。曲げひび割れ発生荷重は梁下縁のコンクリート応力が引張強度に至る荷重とし、せん断ひび割れ発生荷重は、全断面有効としたせん断スパン圆心における引張応力度が引張強度に至る荷重とした。曲げ耐力はコンクリート標準示方書に従い安全係数を1.0とした荷重である。せん断耐力は検討断面をせん断スパン中央として以下の式-1により求めた。

$$P_{scal} = 2 \cdot (V_c + V_{p1} + V_{p2}) \cdot \dots \cdot \text{(式-1)}$$

$$V_c = 0.94 \cdot f_c^{1/3} \cdot (100P_w)^{1/3} \cdot (100/d)^{1/4} \cdot [0.75 + 1.4/(a/d)] \cdot b_w \cdot d$$

$$V_{p1} = P_e \cdot \sin \alpha$$

$$V_{p2} = 2 \cdot M_o/a$$

表-4 載荷試験結果の一覧

供試体	コンクリート			曲げひび割れ			せん断ひび割れ			終局耐力						
	圧縮強度 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	弾性係数 (kgf/cm ²)	Ptest	Pcal	Ptest/Pcal	Ptest	Pcal	Ptest/Pcal	Ptest	Pbcal	Pscal	Pscal (e)	Ptest/Pbcal	Ptest/Pscal	Ptest/Pscal (e)
No.1	490	37.3	333000	16.0	16.5	0.97	-	26.7	-	30.9	29.3	33.6	31.3	1.05	0.92	0.99
No.2	503	38.2	325000	18.4	19.5	0.94	37.10	27.5	1.35	44.1	46.0	37.8	36.0	0.96	1.16	1.23
No.3	548	39.8	345000	16.5	16.7	0.99	26.10	28.7	0.91	31.9	38.3	33.3	32.0	0.83	0.96	1.00
No.4	541	40.3	351000	19.6	20.3	0.97	31.70	29.0	1.09	37.1	46.0	40.6	38.0	0.81	0.91	0.98

3.3.1 破壊およびひび割れ性状

No.1供試体は曲げ破壊、No.2～No.4供試体はせん断破壊により終局に至り、計算による予測と一致する破壊形式を示した。No.1供試体は上段緊張材の破断と同時に下縁かぶりコンクリートが崩落する、急激な破壊性状を示した。理論的には下段緊張材の破断が先行するが、ベントアップにより局部曲げ引張状態になった上段緊張材の強度が低下し、破断が先行した。No.2およびNo.4供試体は支点近傍から伸びるせん断ひび割れが卓越し、せん断スパン部分の載荷点と支点とを結ぶコンクリート部分が飛び抜ける急激な破壊性状を示した。No.3供試体は緊張材の引き抜けにより付着割裂を生じ、せん断区間の下縁かぶりコンクリートが崩落した。下縁緊張材の一本が自由端で約9mm貫入していた。図-9に各々の供試体のひび割れ状況を示す。斜線部はコンクリート崩落箇所である。ひび割れの分散性は良く、アラミドストランドの付着性能は良好であることがうかがえる。

3.3.2 耐荷性状

(1) 曲げ耐力

連続繊維補強材を用いたPC部材の最大耐力は、連続繊維補強材の破断もしくはコンクリートの圧壊で決まり、従来の曲げの計算手法によりかなり精度良く算定できることが確認されている [1]。本実験で曲げ破壊性状を示したNo.1供試体の終局耐力と計算曲げ耐力はほぼ一致し、緊張材にアラミドストランドを用いた場合でもその妥当性が確認された。

(2) 緊張材の曲げ上げ配置の影響

図-10にNo.2、No.4供試体の荷重変位曲線を示す。緊張材の曲げ上げを施していないNo.4供試体は、 $P=36\text{tf}$ でせん断ひび割れが卓越した後 $P=37.1\text{tf}$ で終局に至った。一方、緊張材の曲げ上げを施したNo.2供試体は、 $P=39.7\text{tf}$ でせん断ひび割れが卓越した後 $P=44.1\text{tf}$ で終局に至った。No.2供試体において式-1に示した V_c は約 5tf であり、卓越したせん断ひび割れ発生後の耐力の増加は、緊張材の曲げ上げによる効果であると思われる。

(3) a/dの影響

図-11にせん断スパン断面図心付近における最小主応力を示す。縦軸は最小主応力を作用平均せん断応力度で除し無次元化した。横軸はせん断スパンについて支点側から載荷点に向けて表わしている。

$a/d=2.5$ の供試体と比較して $a/d=3$ の供試体の主応力度が高い値を示している。 $a/d=2.5$ の場合せん断力を支持する圧縮パスがアーチ状に形成され、 $a/d=3$ の場合はダウエル効果による耐荷機構となるためであると推測される。

(4) プレストレスの影響

プレストレスの効果はデコンプレッションモーメント M_0 によって評価される。図-12の横軸は M_0/a 、縦軸は終局荷重から V_c と V_{p1} を差し引いた値を示している。実験値は $V_{p2}=2M_0/a$ に近似しており、 $V_{p2}=2M_0/a$ による評価が妥当であることがわかる。

(5) 弾性係数の影響

図-13に終局耐力を計算せん断耐力で除した値を示す。一般に連続繊維補強材を用いた梁のせん断耐力は鉄筋コンクリート梁のものよりも小さくなると言

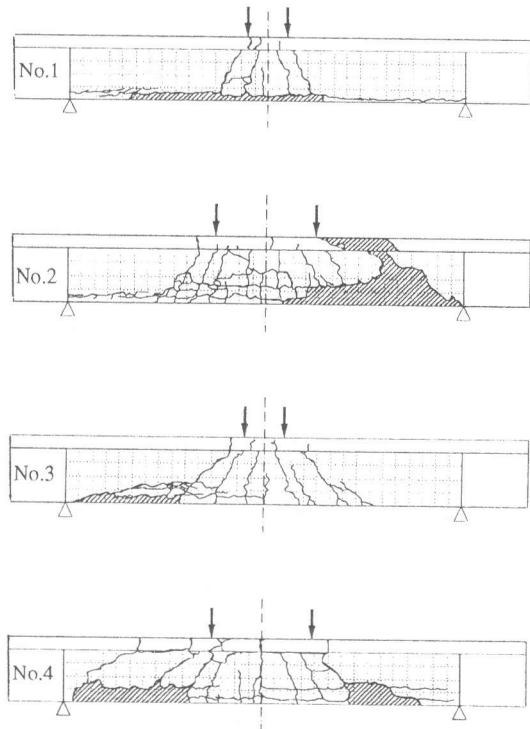
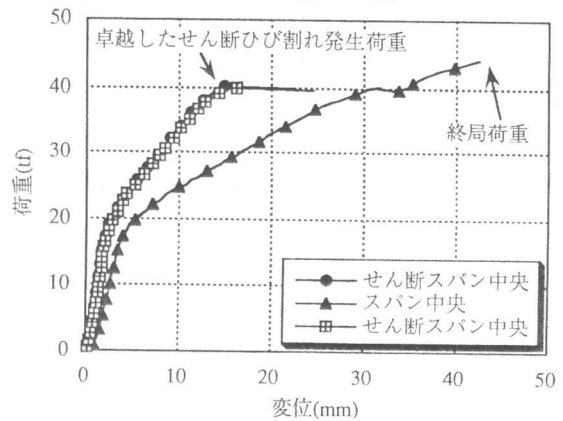
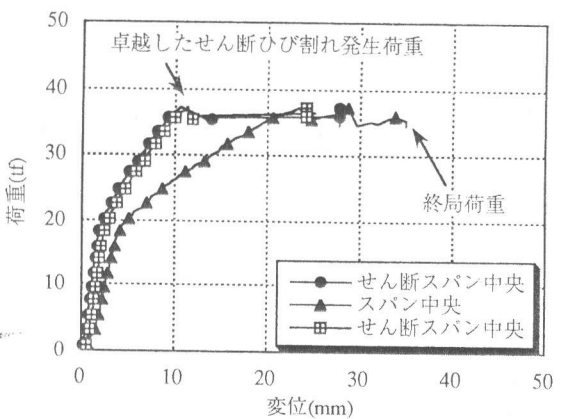


図-9 ひび割れ状況



(a) No.2供試体



(b) No.4供試体

図-10 荷重たわみ曲線

われており [4]、本実験においても同様の傾向を示している。この耐力低下現象に対して弾性係数による補正を考慮し V_c の値を割り引く方法が提案されている。図に示す様に弾性係数で補正した計算値は実測値と整合性が良い。以上のように、本実験の範囲内でアラミドストランドを緊張材に用いた $a/d=2.5\sim 3.0$ のPC梁のせん断耐力は、式-1を用い弾性係数を考慮することにより精度の良い算定が可能であることがわかった。

4. 結論

本研究の範囲内で確認された知見をまとめると以下ようになる。

- (1) $D/d=5$ の場合アラミドストランドの曲げ引張強度は、 $\theta=6$ 度を超えると低下し始め、 $\theta=18$ 度では母材強度の約60%程度となる。
- (2) アラミドストランドの付着伝達長は、約60cmである。
- (3) アラミドストランドを緊張材として用いたPC部材の曲げ耐力は、従来の曲げの計算手法により算定可能である。
- (4) アラミドストランドを緊張材として用いたPC部材のせん断耐力は、弾性係数を考慮する事により精度の良い算定が可能である。

【参考文献】

- [1] たとえば、中井ら：FRP緊張材を用いたプレストレストコンクリート梁の曲げ終局限界状態について、コンクリート工学年次論文報告集，13-2，pp.749-754，1991
- [2] 丸山ら：異形加工したFRPロッドの付着特性、コンクリート工学年次論文報告集，第11巻，1989年
- [3] 迎ら：AFRPロッドを用いたPC構造物に関する研究（その3），住友建設（株）技術研究所所報，pp46-47，1989
- [4] 辻ら：FRPで補強したコンクリートはりの曲げおよびせん断性状，コンクリート工学年次論文報告集，10-2，pp.547-552，1988

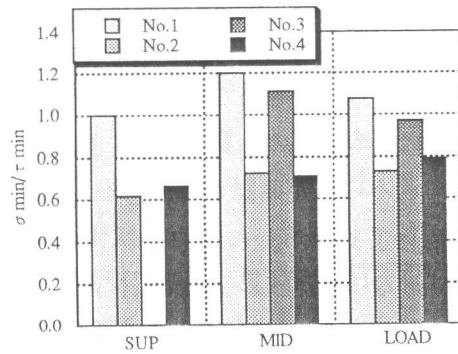


図-11 図心における最小主応力

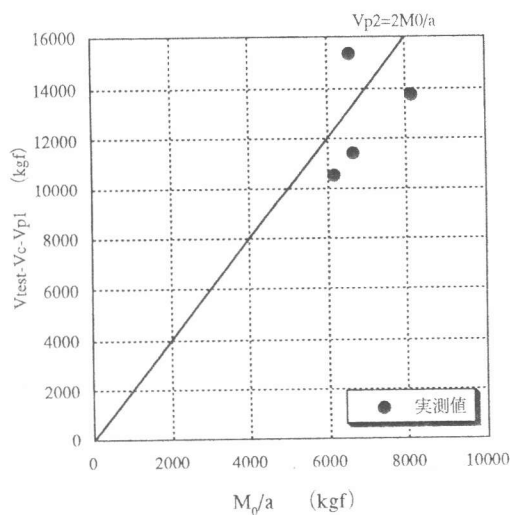


図-12 プレストレスの影響

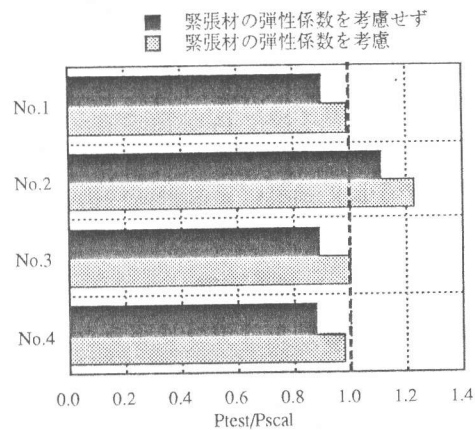


図-13 せん断耐力の計算値と実測値の比較