

プレストレスによる木桁の接合法

A JOINT SYSTEM FOR TIMBER BY PRESTRESS

久保田努*、渡辺浩志**、三井康司***

Tsutomu KUBOTA, Hiroshi WATANABE and Yasuji MITSUI

*株式会社長野技研 (〒390-12 松本市新村2326)

**ピーシー橋梁株式会社本社技術部 (〒150 東京都港区西新宿3-24-9)

***工博 信州大学教授 工学部社会開発工学科 (〒380 長野市若里500)

Of late years, wooden components are being more widespreadly adopted in the structure of civil and architectural construction. A concern to find an effective connection technique for wooden construction has been raised, especially for the field or section where the stress caused by intensive bending moment may influence powerfully. Even though some methods have been introduced so far, the technique or method is needed much facility since steel-girder is easy to construct and of the strength as base member.

On the other hand, it is known that the joint method by prestress has been employed to joint with precast concrete segments. This paper reports some experimental and analytical studies on the effect of prestress on timber joint. Based on the studied results, some feasible design methods are proposed, and the approach how to use these methods practically is also introduced in detail.

Key Words: wooden construction, prestress, joint of wooden-girder

1. まえがき

木構造において解決しなければならない問題の一つに接合法、特に、大きな曲げモーメントや引張力の作用する箇所での現場接合がある。最近は大規模な建築物や長いスパンの橋なども造られているが、これらの多くは集成材の特長である曲がり部材を生かしたアーチ構造である。アーチ構造は曲げや引張が生じないか若しくは小さい位置での連結が可能であり、木材に適した構造である。しかし、全ての構造をアーチ形式にできるわけではなく、木材をコンクリートや鋼と同列の材料として使用するためには、断面力の大きな位置での接合法の開発が不可欠である。

接合法は古くからの方法に加えて各種の方法が考えられているが、鋼桁の高力ボルト継手のような、母材と同等の強度を保証しかつ施工性の良い方法は、未だ見あたらない。この原因は、ほとんどの接合法が部材軸方向の引張応力を強度の低い木材のせん断強度を介して伝達する機構としているためである。ゆえに、接合法の開発としては次の三つの方向があると思われる。

- ① 接合部のせん断強度を増加させる。
- ② 木材繊維を直接接合させる。
- ③ 接合部に引張応力を生じさせない。

本研究は、接合部に引張応力を生じさせない方法として、部材接合部にプレストレスを与えて接合する方法に

ついて実験・検討したものであり、概念的にはプレストレストコンクリート橋などで用いられている、プレキャストセグメントをプレストレスを与えて一体化する工法と同じである。

本工法を木材に用いる場合には、木材の加工法、特にPC鋼材配置のためのダクトの製作と、プレストレスの導入の効果およびその持続性が重要と考えられる。本文では、プレストレスの導入効果についての実験結果を示すと共に、ダクトの製作方法ならびに実際に適用する場合に考慮すべき事柄など、本工法適用の可能性について検討した結果を報告する。

2. 供試体

(1) 集成材

供試体は14cm×21cm×220cmのからまつ集成材であり表-1に集成材の分類・規格、表-2に供試体番号と実験目的、図-1に形状寸法、図-2にひずみ計測位置を示す。

(2) PC鋼材

PC鋼材は丸棒A種2号(SBPR785/1030)φ23mmを使用した。定着具はコンクリートに用いられている規格のものをそのまま使用し、支圧板の大きさは120×120×24mmである。

表-1 集成材の分類・規格

種 類	同等級ラミナで構成する構造用集成材
樹種・等級	針葉樹B1類 からまつ 1級
長期許容曲げ応力度	130 kgf/cm ²
同 せん断応力度	10 kgf/cm ²
繊維方向ヤング係数	100×10 ³ kgf/cm ²

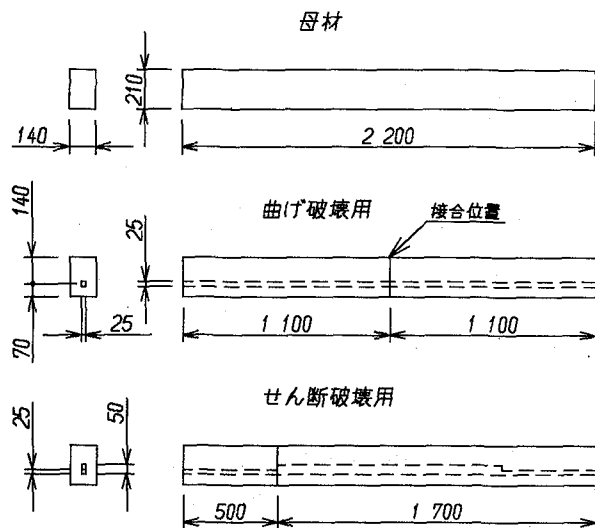


図-1 供試体の形状寸法

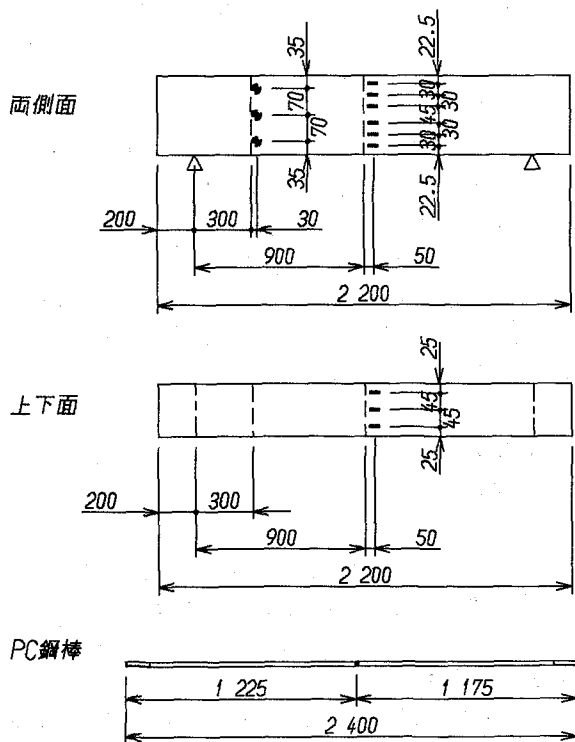


図-2 ひずみ測定位置

表-2 供試体番号と実験目的

No.	実 験 目 的
1～4	純曲げによる接合面の破壊強度を計測するためのもの。接合面は支間中央。
5～8	P C鋼材の付着効果を計測するためのもの。エポキシ樹脂をグラウト。他は同上。
12～15	接合面のせん断(ずれ)破壊強度を計測するためのもの。接合面は支点から30cmの位置。
9～10	上記のすべての供試体に使用する接合面整正用接着剤の影響を調べるためもの。接着剤のみで接合。9の接合面は支間中央、10は支点から30cmの位置。
16～19	母材の強度を計測するためのもの。

(3) ダクトおよび供試体の製作

ダクトは、図-3に示すように、断面縦方向に2分割し両側に溝を彫った後接着し、25×25mmの直線状矩形孔を形成した。本供試体程度の長さの直線孔ならば、ドリル孔も可能であるが、実際に適用する場合の長さおよびP C鋼材の曲線配置を考慮したものである。

孔の位置は断面核端である。せん断破壊試験用の荷重載荷側部材は木部がP C鋼材に接触しないように25×50mmとした。(図-1参照)

このようにして作成した二つの部材を直列に並べ、P C鋼棒を挿入、硬質の硬化性樹脂を接合面に塗布、直線性を保つように固定した後、仮締を行った。樹脂は接合面の不陸および切断角誤差を吸収するためのものである。

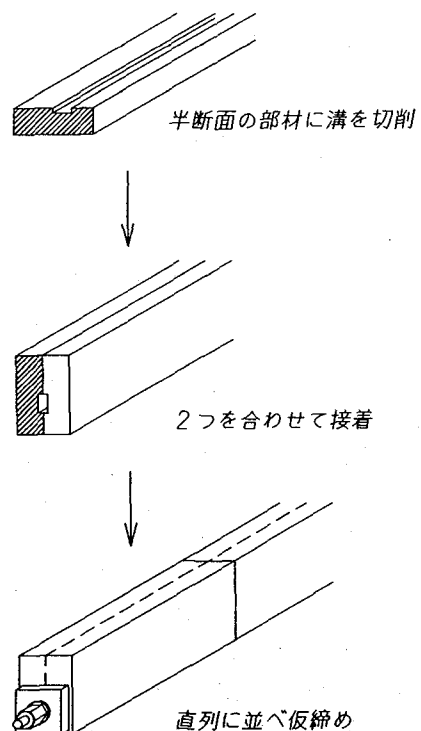


図-3 供試体の製作方法

3. 実験方法

(1) プレストレス導入試験

図-4に概念図を示す。緊張力の管理は支圧板とセンターホールジャッキの間においた圧縮センターホール型荷重計により行った。最終導入プレストレスは部材下縁が 130kgf/cm^2 （表-1の許容値）となる値を目標値とし、 18.7tf とした。

計測項目は、たわみ（ダイヤルゲージ）と木材およびP C鋼棒のひずみ（ひずみゲージ）である。

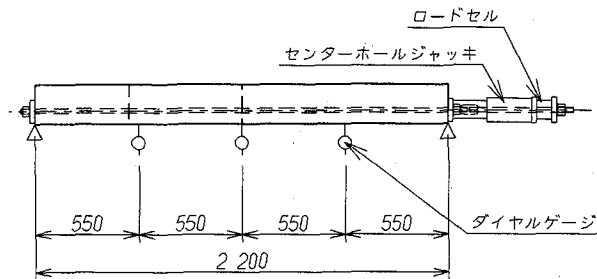


図-4 プレストレス導入試験

(2) 曲げおよびせん断試験

図-5に荷重載荷図を示す。支間は 180cm とし、荷重は支間中央をはさんで 30cm の位置の2点載荷である。実験は荷重制御で行い、前述のロードセルにて試験機の荷重ゲージをチェックした後、試験機のゲージ読みによった。いずれの供試体も破壊するまで荷重を増加した。

計測項目はプレストレス導入試験と同じ位置のひずみである。No. 1~4の供試体についてはクラックゲージにより、接合部下端が開く瞬間の荷重を測定した。

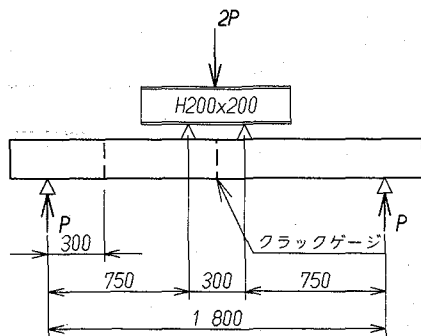


図-5 荷重載荷図

4. 実験結果および考察

4. 1 プレストレス導入試験

各プレストレス値に対するたわみの計測値を図-6に示す。弾性係数を $100,000\text{kgf/cm}^2$ と仮定した場合の梁理論による計算値 0.202mm/tf (FEM解析では 0.196mm/tf) に対して、 $0.150\sim 0.193\text{mm/tf}$ (14~18tf間割線) という結果となった。この値から算出される弾性係数は $135\sim 105\times 10^3\text{kgf/cm}^2$ となる。

図-7は最終導入力による梁中央断面のひずみ分布で

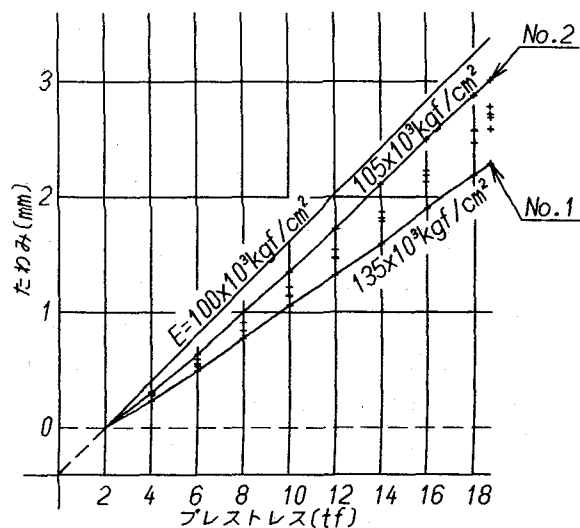


図-6 プレストレス - たわみ

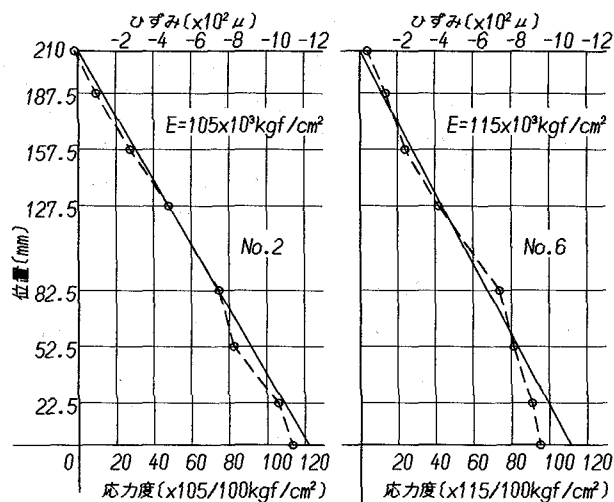


図-7 最終導入力による中央断面ひずみ分布

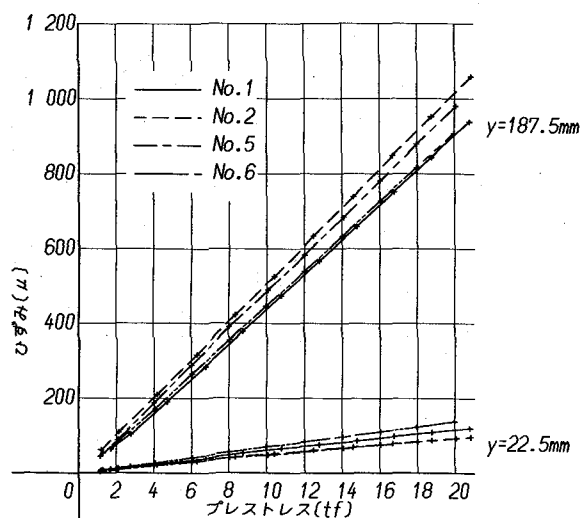


図-8 プレストレス - ひずみ

あり、図-8は梁上面および下面から22.5mmの位置の各プレストレスによるひずみを示したものである。

応力度目盛りは便宜的に弾性係数を $100,000\text{kgf/cm}^2$ としたときの目盛りである。以下本文中において、応力度は示さないが、前記のたわみから求めた弾性係数から算出される応力度は、ひずみを直接的に換算した値に対して5~35%高い値となる。

以上の結果および図から、ひずみ(応力度)分布および荷重-ひずみ(応力度)の関係は線形であり、弾性体とみなせる。ゆえに、許容圧縮応力度レベル内においてはプレストレスに関しても弾性理論の適用が可能であり、プレストレスは接合部に有効に導入されていると認められる。

4. 2 曲げおよびせん断試験

(1) 母材

荷重(曲げモーメント)による梁中央断面各位置のひずみの計測結果を図-9に示す。図中(y=)で示す値は下縁からの距離(mm)である。

低応力下ではほとんど弾性的な性状を示し、応力レベルが高くなるにつれて非線形性が顕著となり、過去の同様な実験の結果と同じ傾向を示す。ただし、図-10は荷重 P が 1.0tf および 5.0tf の時のひずみ分布を示したものであるが、荷重が増大するにつれて中立軸が下がり、圧縮側のひずみも不整となっている。また、図-9の引張側の図心に近い位置($y=82.5\text{mm}$)のひずみの伸びが小さくなる傾向を示す。原因は木材繊維の強度が圧縮の

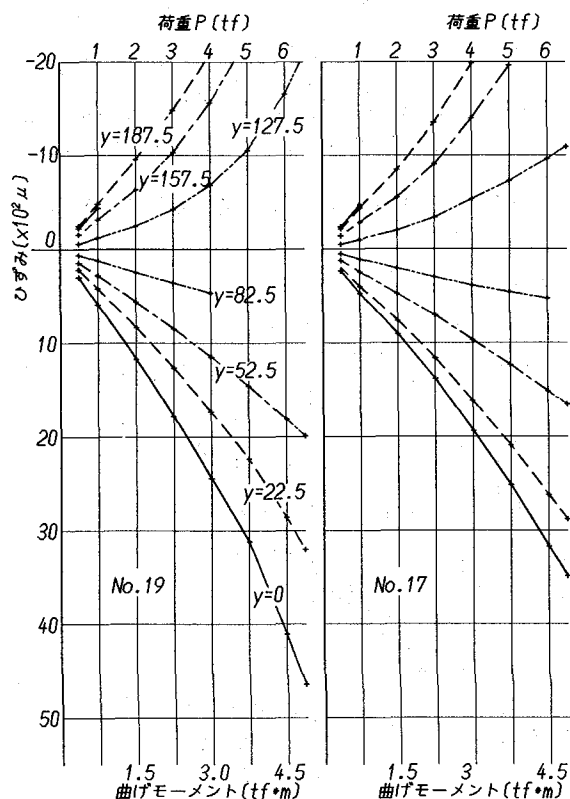


図-9 荷重 - ひずみ (母材)

方が弱いためともみえるが、木材の繊維直角方向の強度が低いために、荷重載荷点がめり込む現象(除荷後に戻りがあり正確に計測できなかったが、10mm程度)を反映しているとも考えられる。つまり、荷重の増加につれて圧縮側断面が減少していった場合も図のような結果となり、いずれにしても本実験結果からは正確な比例限度は求められなかった。

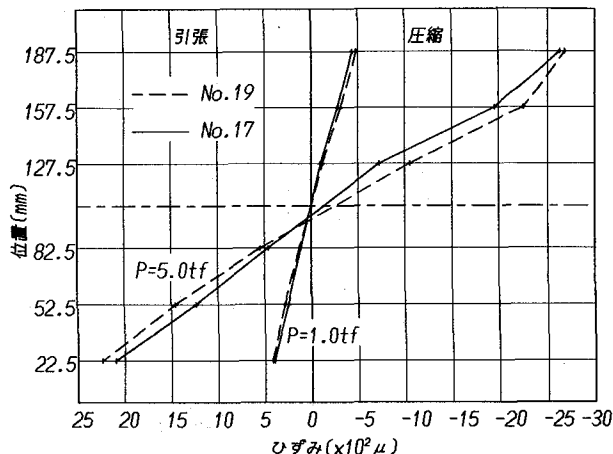


図-10 ひずみ分布 (母材)

(2) プレストレス導入部材 - 曲げ破壊

図-11~13に曲げによる梁中央断面各位置のひずみの計測結果を示す。ひずみはプレストレスによる値を考慮していない。また、めりこみの影響が大きい圧縮縁のデータは表示していない。

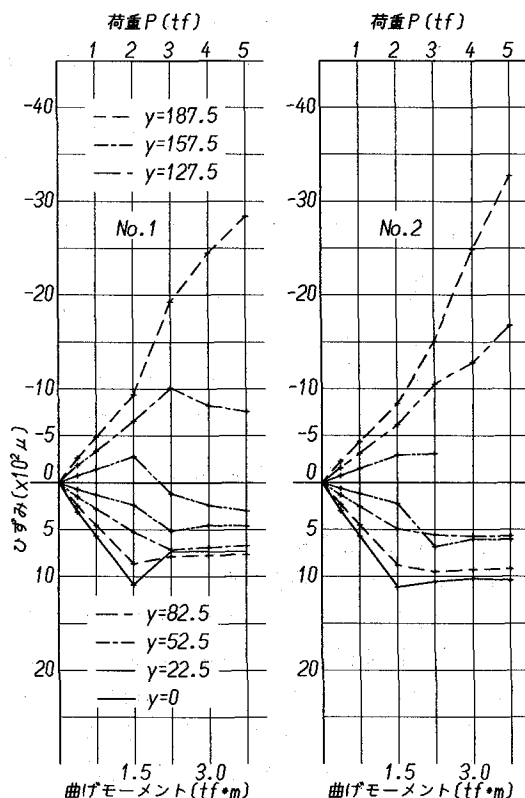


図-11 荷重 - ひずみ (プレストレス導入材)

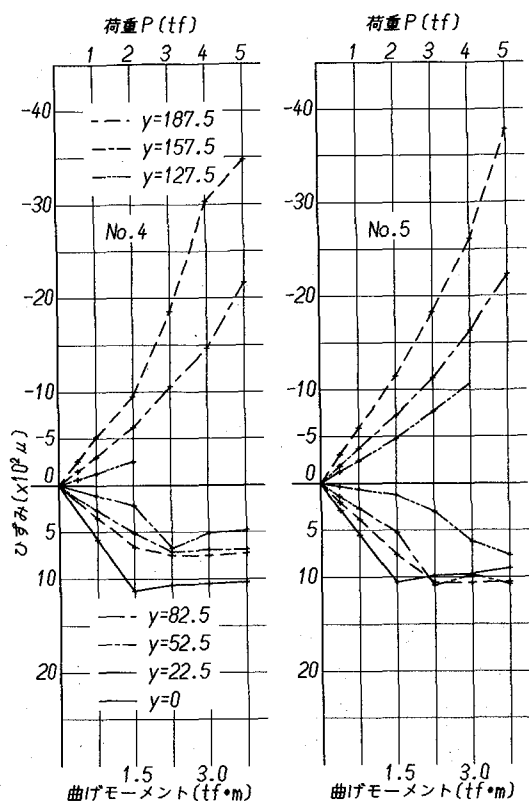


図-12 荷重 - ひずみ (プレストレス導入材)

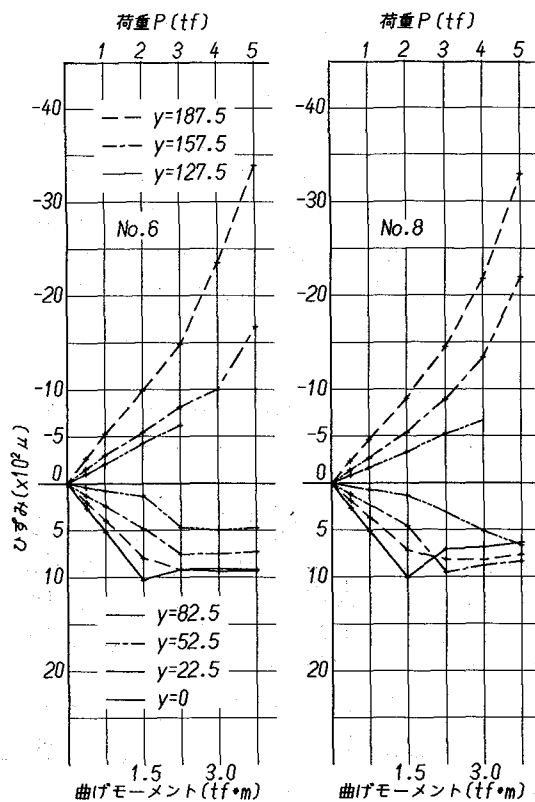


図-13 荷重 - ひずみ (プレストレス導入材)

載荷重 P が 2.0tf までは線形的な挙動を示す。計算上は 2.067tf がプレストレスによる応力度を打ち消して下縁の応力度がゼロとなる値である。ひずみの値も導入プレストレスによる値とよく一致する。この限度を越えると下縁が開口し、引張側は順次抵抗断面から除かれ、中立軸が圧縮側にシフトしていくと考えられるが、グラフもこの様子を示している。

グラウトの有無による差異は、荷重 2.0tf までの範囲をみると、グラウトを行わないアンボンドのものが図心に対してほぼ対称のグラフとなっている (図-11 および図-12 の No. 4) のに対し、グラウトを行ったもの (図-12 の No. 5 および図-13) は、圧縮側にシフトする (中立軸が下にある) 傾向を示し、木材との合成断面で抵抗していることが認められる。

図-14 の左はグラウトを行った No. 5~8 のひずみ計測値の単純平均 (接合部開口後の引張側は省略している) であり、図-14 の右の計算値 (弾性係数はプレストレス導入試験からそれぞれ求めた値の平均値 $116,000 \text{ kgf/cm}^2$ として計算) と比較して、ほとんど差がない。

以上から、プレストレスが接合断面の抵抗力に寄与していることが確認され、下縁が開口した後は、コンクリートの引張強度を無視する、いわゆる鉄筋コンクリート理論が適用できる。これは、プレキャストセグメント工

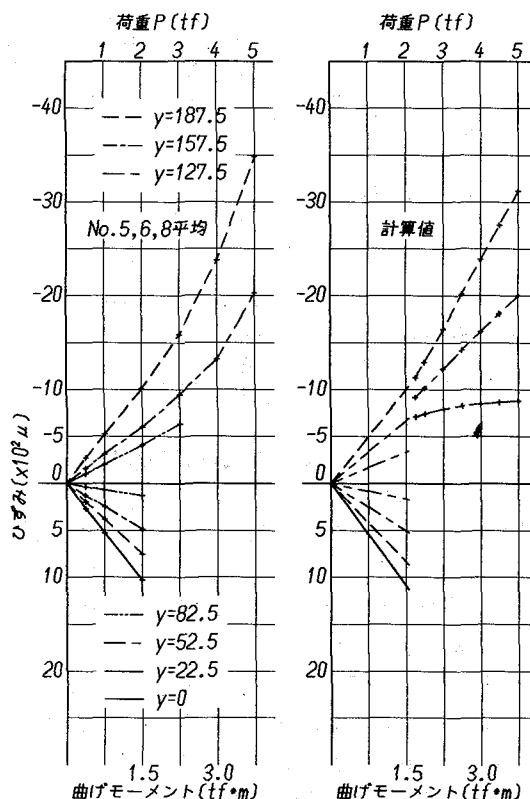


図-14 荷重 - ひずみ (グラウト部材平均、計算値)

法によるプレストレストコンクリート桁の場合と全く同じであり、設計荷重に対する計算、破壊抵抗曲げモーメントの計算などは、基本的にはプレキャストセグメント工法の設計において行われている計算方法が適用できると考えられる。

(3) プレストレス導入部材 — せん断破壊

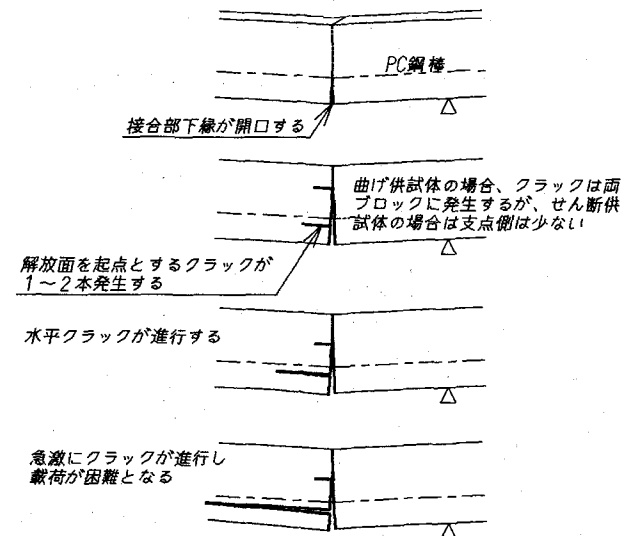
本実験の条件下では、実験の目的とした接合部のずれは観測されず、破壊形態は純曲げと同様となった。

定量的にはプレストレスの大きさと抵抗力の関係を純せん断試験などにより確認する必要があるが、プレストレスが接合部の摩擦抵抗の増加に有効に作用していると認められる。

(4) 破壊荷重

表－3に実験目的別の破壊荷重の平均値、図－15に接合部材が破壊に至る過程の模式図を示す。

表－3 破壊荷重		P(tf)
供試体No.	実験目的	平均破壊荷重
1～4	曲げ破壊用	5.04
5～8	曲げ破壊グラウト	5.43
9～10	不陸整正用接着剤	0.44 0.70
12～15	せん断破壊用	6.43
16～19	母材	7.96



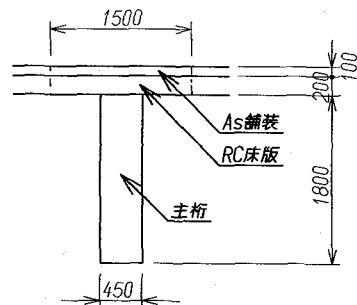
せん断試験において、ずれを生じずかつ接合部の曲げモーメントは中央部の40%と小さいにもかかわらず接合部から破壊が始まったことから、開口した接合面の破壊強度は、本接合法においても木材のせん断強度および繊維に直角方向の強度の支配を受けると考えられる。逆に、より大きなプレストレスを導入すること、木口のクラックを防止する策を講ずること、適当な材料でグラウトを行うことなどにより、破壊強度を増加させることも可能と思われる。

5. 実構造物への適用の可能性

5. 1 接合部設計の試算

(1) 設計条件

試算は、支間24.0mのRC床版をもつ車道橋（B活荷重）の中間桁を想定し、桁間隔1.5m、横分配はなく、接合位置は支間中央としている。また、断面常数は総断面による値であり、許容値の各種低減も行っていない。図－16に想定断面を示す。



図－16 想定断面

(2) 死荷重による曲げモーメント

$$A_s \text{ 舗装} \quad 0.10 \times 2.30 \times 1.50 = 0.345 \text{ tf/m}$$

$$RC \text{ 床版} \quad 0.20 \times 2.50 \times 1.50 = 0.750 \text{ tf/m}$$

$$\text{主桁自重} \quad 0.45 \times 1.80 \times 0.80 = 0.648 \text{ tf/m}$$

$$\text{死荷重計} \quad wd = 1.743 \text{ tf/m}$$

$$Md = 1.743 \times 24.0^2 / 8 = 125.5 \text{ tf}\cdot\text{m}$$

(3) 活荷重による曲げモーメント

$$L \text{ 荷重} \quad p1 = 1.000 \times 1.50 = 1.500 \text{ tf/m}$$

$$p2 = 0.350 \times 1.50 = 0.525 \text{ tf/m}$$

$$\text{衝撃係数} \quad i = 0.25$$

$$M1+i = \{10.0 / 4 \times 1.500 \times (24.0 - 10.0 / 2) + 0.525 \times 24.0^2 / 8\} \times (1 + 0.25) = 136.3 \text{ tfm}$$

(4) 断面常数

$$\text{断面積} \quad A = 45 \times 180 = 8100 \text{ cm}^2$$

$$\text{断面係数} \quad Z = 45 \times 180^2 / 6 = 2.43 \times 10^5 \text{ cm}^3$$

(5) 荷重による応力度

全死荷重による応力度

$$\sigma_d = 125.5 \times 10^5 / 2.43 \times 10^5 = 51.6 \text{ kgf/cm}^2$$

主桁自重による応力度

$$\sigma_g = 51.6 \times 0.648 / 1.743 = 19.2 \text{ kgf/cm}^2$$

活荷重による応力度

$$\sigma_l = 136.3 \times 10^5 / 2.43 \times 10^5 = 56.1 \text{ kgf/cm}^2$$

死荷重＋活荷重

$$\sigma_s = 51.6 + 56.1 = 107.7 \text{ kgf/cm}^2$$

(6) プレストレスーその1

記号は全て正の値をとるものとする。

P:プレストレス力

e:プレストレス鋼材の図心からの偏心距離（下が正）

設計荷重時の条件を計算式で表すと

$$P / A + P \cdot e / Z - \sigma_s \geq 0 \quad \text{— ①}$$

次に、接合時の条件を計算式で表すと

$$\text{上縁 } P/A - P \cdot e/Z + \sigma_g \geq 0 \quad \text{--- ②}$$

$$\text{下縁 } P/A + P \cdot e/Z - \sigma_g \leq \sigma_{ca} \quad \text{--- ③}$$

①②③式を $P=f(e)$ の形とすると

$$P \geq \sigma_s \cdot A \cdot Z / (A \cdot e + Z) \quad \text{--- ①'}$$

$$P \leq \sigma_g \cdot A \cdot Z / (A \cdot e - Z) \quad \text{--- ②'}$$

$$P \leq (\sigma_{ca} + \sigma_g) \cdot A \cdot Z / (A \cdot e + Z) \quad \text{--- ③'}$$

これらをグラフで示すと図-17となる。

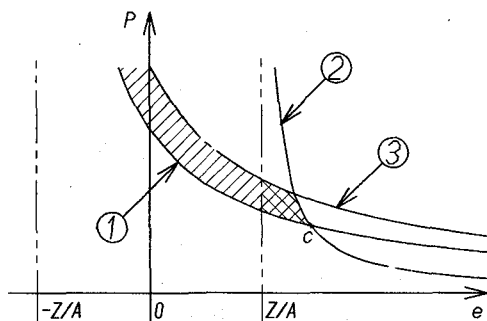


図-17 プレストレスと偏心距離

漸近線は、①'③'式は $(-Z/A, 0)$ 、②'式は $(Z/A, 0)$ つまり、核の両端を通る。

条件を満足するプレストレスの大きさと偏心距離は、図のハッチング部分であり、プレストレス時にかかる荷重による応力 σ_g の影響(効果)は二重ハッチ部分で示される。

ここで、①'②'として、最も効率の良いc点の値を求めると

$$e = Z/A \cdot (\sigma_s + \sigma_g) / (\sigma_s - \sigma_g)$$

全体に占める桁自重の割合を示すパラメータ $\alpha = \sigma_g / \sigma_s$ を導入し、 $e_0 = Z/A$ とすると

$$e = e_0 \cdot (1 + \alpha) / (1 - \alpha)$$

と表される。

実値を代入すると

$$\alpha = 19.2 / 107.7 = 0.178$$

$$e = 30 \times 1.178 / 0.822 = 43.0 \text{ cm}$$

$$P = \text{①'式より } 358.5 \text{ tf}$$

となる。

このように、コンクリート桁の場合と異なり、全荷重に対し主桁自重の占める割合が小さいため、プレストレスの導入を1回とすると偏心距離を大きくとれず、効率的でない結果となる。

(7) プレストレスーその2

次に、1回目の緊張は死荷重に対して行い、設計荷重に対して再度緊張する場合について計算する。

1回目は(5)における $\sigma_s = \sigma_d$ として、

$$\alpha_1 = 19.2 / 51.6 = 0.372$$

$$e_1 = 30 \times 1.372 / 0.628 = 65.5 \text{ cm}$$

$$P_1 = \text{①'式より } 131.3 \text{ tf}$$

2回目は、別のケーブルを配置するなどして、偏心距離も移動する方法も考えられるが、ここでは上記のケーブルを再緊張するものとする、

$$P_2 = \text{①'式より } 274.0 \text{ tf}$$

となる。

5. 2 PC鋼材

(1) PC鋼材の種類および定着方式

前節の結果から、緊張は2回行う方式が適当と考えられる。必要プレストレス(PC鋼材)は1回の方式より20%以上減少し、断面欠損も少なくなり有利となる。再緊張できるPC鋼材としては、鋼棒は簡便であるがダクト径をカップラー径に合わせる必要があり断面欠損が大きい。このため鋼線が適当であり、再緊張可能な定着システムが望ましいと思われる。

(2) グラウト

グラウトの有無は、接合部に関しては直接関係ないがダクトをPC鋼棒挿入に必要な最小寸法とする場合は、桁の変形によりPC鋼材が木材に接触するため、ボンド、アンボンドにかかわらず、支圧力の緩衝のためにグラウトは必要と思われる。グラウト材としては実験に使用したエポキシ樹脂などは防錆の意味からも適当と考えられる。

ダクト寸法を大きくとり、外ケーブル方式とする場合や大きなクリープが予想され、将来再緊張する必要がある場合はグラウトしない(できない)こととなる。

(3) PC鋼材の本数および配置

図-18に前記張力を満足する配置例を示す。

鋼材はポリエチレン二重被覆アンボンドPC鋼より線SWPR7B 7本より12.7mm×7本/組×4組で設計荷重時の許容張力は315tfである。ダクトの径は75mm程度となる。

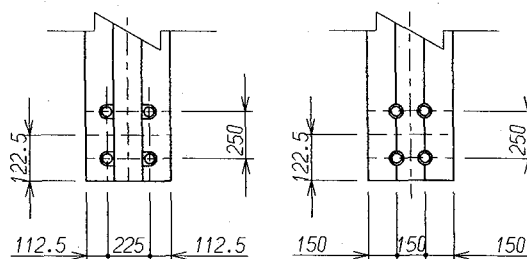


図-18 鋼材配置

(4) 定着部

支圧板の大きさは木材繊維方向の許容支圧応力度の設定値にもよるが、20cm~25cm角程度となり、配置は図-19のようになる。図の右側の場合はケーブルを曲げ上げることになり、ケーブルによる支圧の課題がある。

定着体の保護、端部のエッジの保護を考えると、桁端は図-20に示すようなボックス構造が適当である。

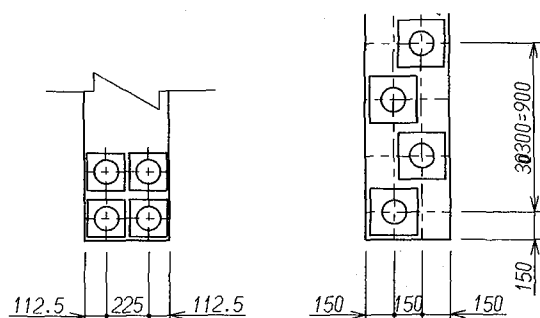


図-19 定着体の配置

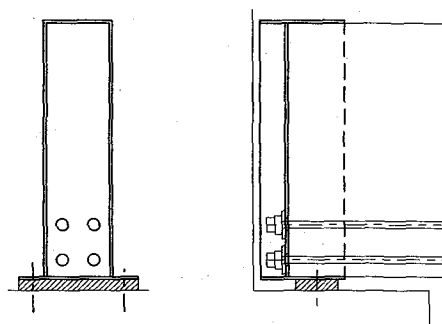


図-20 桁端部の構造

(5) ダクトの製作

本実験で行った溝彫り方式によれば、P C鋼線の曲線配置も可能である。なお、プレストレスを導入すると断面幅方向に割裂力が作用する。この時、ドリル孔であれば問題は少ないと思われるが、提案のような作成方法では、張り合わせた部分に割裂力が働くことになる。このため横締めボルトを併用するなどして接着を確実に行う必要がある。

5. 3 接合部の構造

木材の内部では、軸方向のほとんどの応力を木材組織の密部が負担していると考えられる。接合部の両側の木目は、桁をロングラインで製作し接合部で切断した場合ほぼ一致するが、別々に製作したものを直接タッチさせた場合、図-21のように確率的に極めて小さな面積を介して力を伝達することになる。密部全断面を有効に利用し、大きなプレストレスを導入するためには、ある程度の厚さと硬さを持ったものをはさむことが必要と思われる。

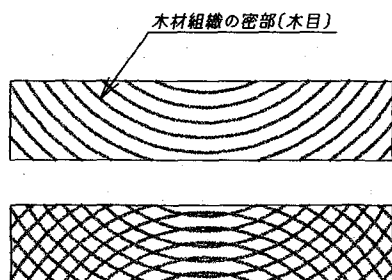


図-21 接合部の木目

実験では、プレストレスを与えた場合、せん断方向のずれ破壊抵抗はかなり大きいことが確認されたが、これは木目による粗面の効果と思われ、鋼板などをはさんだ場合、この抵抗力は小さくなると予想される。ゆえに、接合面の確実な力の伝達とせん断キーの機能の両者を満足する構造として考えらるゝのは、図-22のような桁端と同じボックス構造である。

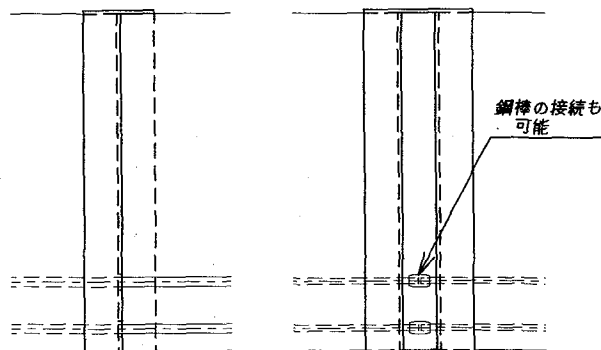


図-22 接合部の構造

6. まとめ

本研究では、プレストレスによる木材の接合方法を実験的に検討した。また、想定設計を行って細部構造についても検討し、本工法の可能性を探った。得られた結論は以下のとおりである。

- (1) 木材の許容応力レベル内においては、プレストレスに関しても弾性理論の適用が可能である。
- (2) プレストレス接合した木材は、やはりプレストレス接合されたプレキャストコンクリートセグメントと同様の挙動を示す。
- (3) 本方式の接合部の設計は、基本的にはプレストレストコンクリート構造の設計で行われている計算方法で設計が可能である。
- (4) 実構造への適用については、さらに確認・検討すべき問題があるが、現在の材料・技術で解決可能な範囲と考えられる。
- (5) 以上、木材のプレストレスによる接合法は実用的な方法として可能性がある。

参考文献

- 1) 道路橋示方書・同解説、日本道路協会
- 2) 木橋づくり新時代、(財)日本住宅木材・センター
- 3) 木質構造設計規準・同解説、日本建築学会
- 4) プレキャストブロック工法によるプレストレストコンクリート道路橋設計・施工指針(案)、建設省土木研究所構造橋梁部橋梁研究室、(社)プレストレスト・コンクリート建設業会
- 5) 佐久間博文、大熊幹章：長軸ボルトを併用した新しい集成材構造の開発(第1報)、木材学会誌 Vol. 42 No. 5, P476-482(1996)

(1996年9月6日受付)