

(7) 高強度コンクリートとFRPロッドを併用したPCはりの曲げ解析

群馬大学大学院 ○石田 知子
 群馬大学 辻 幸和
 群馬大学 橋本 親典

1. まえがき

約160年前のポルトランドセメントの発明以来、コンクリートの性能は、飛躍的に改善されてきた。近年では、圧縮強度が 1000kgf/cm^2 といった高強度コンクリートが容易に製造できるようになった。しかしながら、コンクリートは引張力に弱く、かつ脆性的である点についてのコンクリート自体の改質は、きわめて困難である。そこで、補強材を用いることで、コンクリートに作用する引張力を分担させる技術が発達してきた。その補強材の例としては、鉄筋や鉄骨以外に、PC鋼材およびFRPロッドが挙げられる。FRPロッドは、高強度であり、耐食性に優れ、非磁性体であるなどの優れた品質を持つが、付着力が小さいという弱点がある。そこで、PC鋼材とは異なる付着性状や、ヤング係数を持つFRPロッドの品質が、高強度コンクリートを用いたPCはりに及ぼす影響を検討する必要があると考えられる。

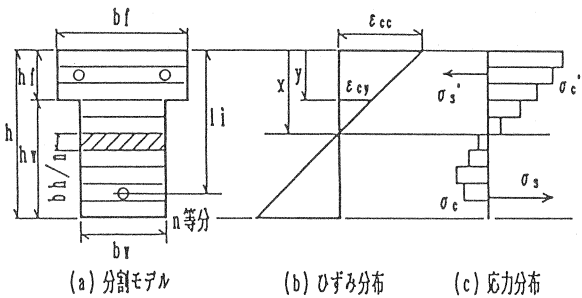
本研究は、ポストテンション方式のPCはりにおいて、緊張材とグラウト間の付着の有無を考慮し、コンクリートの圧縮強度、緊張材のヤング係数、およびプレストレスの導入量が、PCはりの曲げひびわれ発生荷重、曲げ破壊形式、および曲げ破壊モーメントなどの曲げ性状に及ぼす影響について、解析的に検討を行った結果について報告するものである。

2. 解析方法

解析には、図-1に示すように、部材断面を中立軸と平行に細分割する積層モデルを用いた。解析に用いたはりの断面形状および荷重方法を図-2に示す。断面形状は、矩形とT形の2種類とした。荷重方法は、支間長が80cm、最大曲げモーメントが一定となる区間が17cmの2点集中荷重とした。

機械的プレストレスの導入量は、緊張材の引張強度(f_{pu})に対する緊張時の有効引張応力(σ_{pe})の比 σ_{pe}/f_{pu} で示した。

構成材料の応力-ひずみ曲線を図-3に示す。コンクリートの応力-ひずみ曲線は、Hognestadの2次曲線を採用し、コンクリートは曲げひびわれが発生するまで引張力を受け持つものとした。補強鋼材としての鉄筋は、Bilinear形とし、降伏強度までの引張力を緊張材とともに受け持つこととした。また、FRPロッドの応力-ひずみ曲線は、直線とした。そのヤング係数を解析の要因にとった。



(a) 分割モデル (b) ひずみ分布 (c) 応力分布
 図-1 解析に用いた積層モデルの説明図

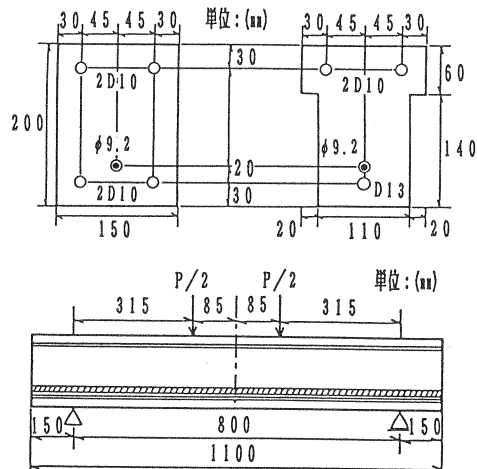
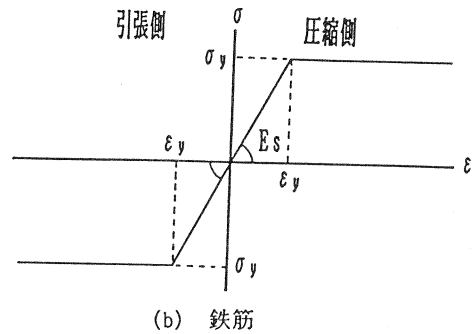
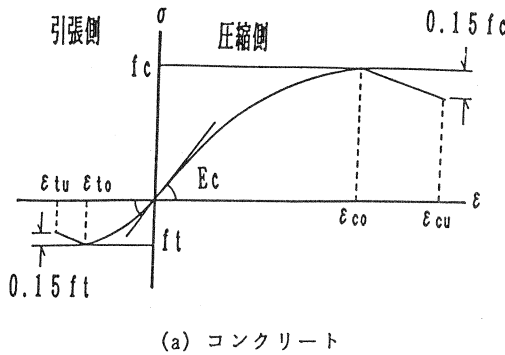


図-2 解析に用いたはりの断面形状および荷重方法



また、解析にあたって、以下の仮定を設けた。

- (1) 断面内の応力は、それぞれの層において一定の値となり、その大きさは各層の図心位置で代表させる¹⁾。
- (2) 緊張材が、グラウトとの付着によって周囲のコンクリートと完全に一体化されていると仮定した場合、(以下、付着有と略称する)には、ひずみ分布は平面保持に従うとする。
- (3) 緊張材の付着作用がないと仮定した場合(以下、付着無と略称する)には、載荷による緊張材の伸びと緊張材位置のコンクリートの部材全長にわたっての伸びが等しいという変形の適合条件を満足させる解析方法を用いる²⁾。

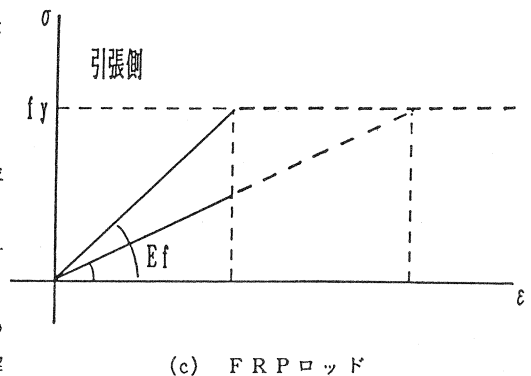


図-3 構成材料の応力-ひずみ曲線

3. 緊張材のひずみ

図-4は、緊張材のひずみの増加量と外力による曲げモーメントとの関係を、緊張材の付着の有無を考慮した解析値とともに示したものである。コンクリートの圧縮強度が、500kgf/cm²の矩形断面について、機械的プレストレス導入量 σ_{pe}/f_{pu} が、0.14の低レベルの場合と0.70の高レベルの場合である。

曲げひびわれ発生までの荷重段階においては、実測値は付着有とした解析値にはば一致している。しかしながら、曲げひびわれ発生以降の荷重段階においては、実測値は、付着有の解析値からはずれ、付着無とした解析値に近いひずみ変化を示している。このような現象は、プレストレス導入量に関わらず、またT形断面の場合においても等しく認められた。このことから、断面形状およびプレストレスの導入量に関わらず、曲げひびわれの発生に伴う断面内の応力状態の急変により、緊張材とグラウトとの付着力の低下が生じているものと思われる。したがって、はりの曲げ性状には、緊張材とグラウトとの付着の有無が、様々な影響を及ぼす。

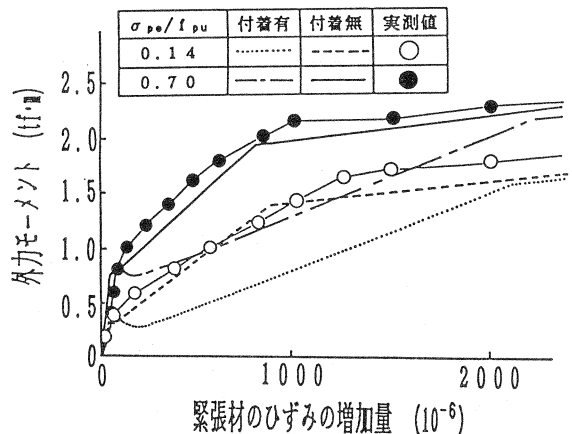


図-4 緊張材のひずみの増加量と外力モーメント

4. 曲げひびわれ発生モーメント

図-5は、緊張材とグラウト間の付着の有無を考慮し、圧縮強度が、曲げひびわれ発生モーメントに及ぼす影響について示したものである。この図より、曲げひびわれ発生モーメントの増加は、圧縮強度の増加にともない、大きくなっていることが認められる。これは、曲げひびわれ発生モーメントは、すなわち、コンクリートの引張縁が引張破壊ひずみに達したときのモーメントであるため、圧縮強度の増加にともない、コンクリートの引張破壊ひずみに達する応力度が増加することが主な原因である。

また、緊張材の付着の有無が、曲げひびわれ発生モーメントに及ぼす影響は、ほとんど認められず、曲げひびわれ発生モーメントはほぼ同値を示している。これは、破壊時における緊張材のひずみに対し、曲げひびわれ発生におけるひずみが微小であることが原因であると考えられる。

コンクリートの圧縮強度を600kgf/cm²と一定とし、緊張材の緊張レベルを0.14, 0.42, 0.70と変化させた場合において、ヤング係数が曲げひびわれ発生モーメントに及ぼす影響を、図-6に示す。この図より、緊張材の緊張レベルが増すと、曲げひびわれ発生モーメントも増加していることが認められる。緊張材の緊張レベルが高いほど、コンクリートの圧縮縁に与えるプレストレスが大きくなるためである。また、いずれの緊張レベルにおいても、ヤング係数が増加すると、曲げひびわれ発生モーメントも増加するものの、微小である。この現象は、付着無においても等しく認められた。

以上のことにより、曲げひびわれ発生モーメントは、緊張材の緊張レベルが高いほど、また、コンクリートの圧縮強度が大きいほど、大きな値を示すが、ヤング係数および緊張材の付着の有無による影響は、ほとんど認められないことが確認された。

5. ヤング係数が破壊モーメントに及ぼす影響

図-7と図-8は、緊張材とグラウト間の付着の有無を考慮し、ヤング係数が破壊モーメントに及ぼす影響について示したものである。

図-7は、コンクリートの圧縮強度が400kgf/cm²のT形断面において、プレストレス導入量を0.14, 0.42, 0.70と変化させた場合について示したものである。付着有の場合でも、ヤング係数が小さいと、緊張材

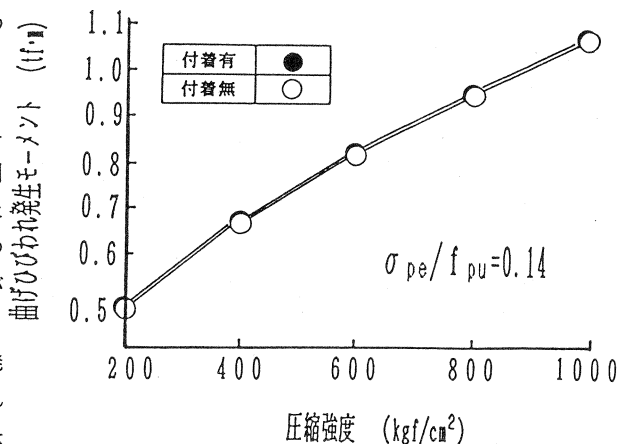


図-5 コンクリートの圧縮強度が曲げひびわれ発生モーメントに及ぼす影響

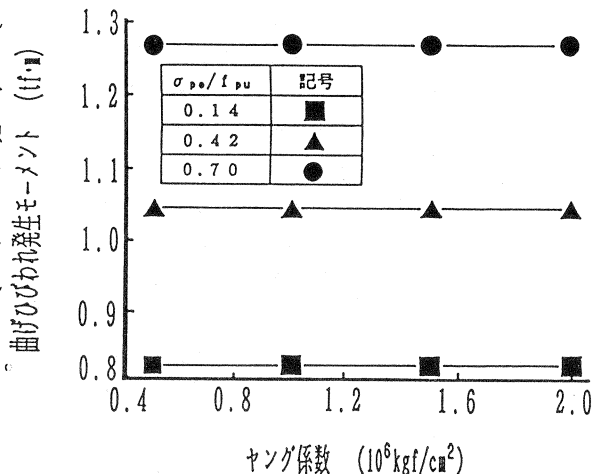


図-6 ヤング係数が曲げひびわれ発生モーメントに及ぼす影響

の応力度は、引張強さに達せず、コンクリートの圧縮縁が先に破壊ひずみに達し、曲げ圧縮破壊となる。しかし、ある程度ヤング係数が増加すると、緊張材の応力度が引張強さに達した後破壊する曲げ引張破壊となっているため、プレストレスの導入量に関わらず、破壊モーメントは一定となる。これに対して、付着無の場合は、ひずみ分布が平面保持に従わないため、緊張材の応力負担分が小さく、曲げ圧縮破壊となりやすい。そのため、破壊モーメントは、ヤング係数の増加とともに大きくなり、またプレストレス導入量の影響を受けやすい。

図-8は、プレストレス導入量 σ_{ps}/f_{pu} が0.42のT形断面において、コンクリートの圧縮強度を変化させた場合について示したものである。付着有の場合、コンクリートの圧縮強度が1000kgf/cm²と高強度のものを使用すると、曲げ引張破壊となるため、ヤング係数の増加に関わらず破壊モーメントは一定の値を示す。この現象は、付着無の場合においても、ある程度ヤング係数の値が増加すると認められる。これに対して、コンクリートの圧縮強度が400kgf/cm²となると、付着有の場合、ヤング係数が小さいほど曲げ圧縮破壊となりやすく、破壊モーメントは低下する。付着無の場合は、前述したように、緊張材の応力負担分が小さいため、引張破壊となるためにはより大きなヤング係数を必要とする。以上の現象は、矩形断面においても等しく認められた。

これらのことより緊張材のヤング係数が、破壊モーメントに及ぼす影響は、緊張材の付着性状と強い相関性があり、付着有とした場合、特に高強度コンクリートを使用した場合においては、曲げ引張破壊となるため、ヤング係数の影響を受けないのに対して、付着無とすると、ヤング係数が小さいほど曲げ圧縮破壊となりやすく、破壊モーメントは小さい値となることわかる。しかしながら、このことは、視点を変えると、降伏域を持たないFRPロッドを緊張材として用いる際は、ヤング係数が小さい方が緊張材が破断することにより破壊する脆性的な破壊にならないとも考えられる。よって、FRPロッドを使用する場合は、その破壊形式についても考慮するべきであると思われる。そこで、破壊形式が破壊モーメントに及ぼす影響について、次項で述べることにする。

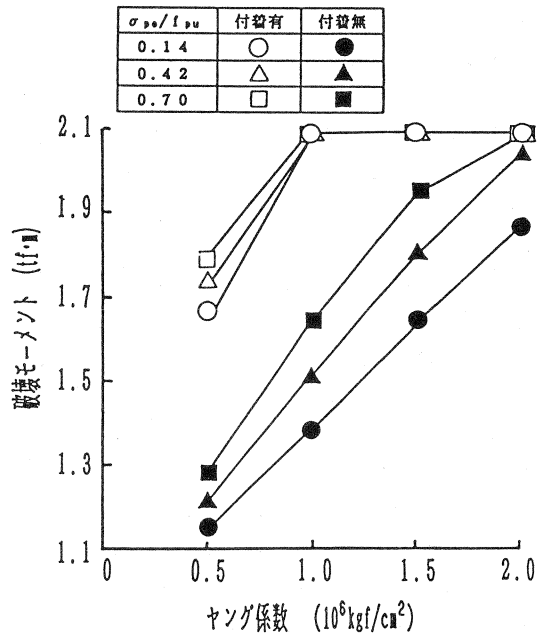


図-7 ヤング係数が破壊モーメントに及ぼす影響 (圧縮強度一定)

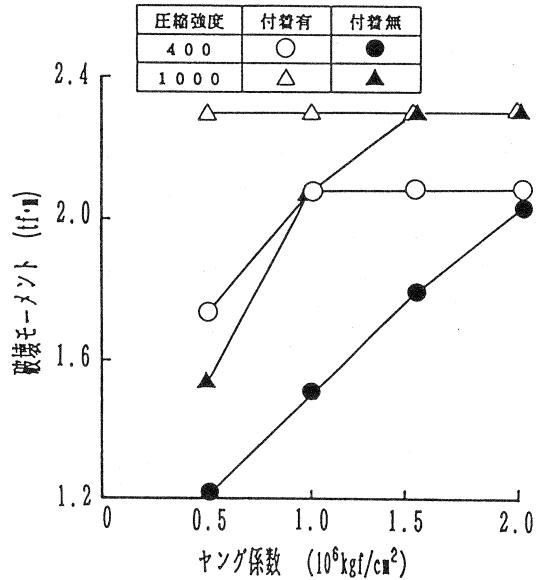


図-8 ヤング係数が破壊モーメントに及ぼす影響 (σ_{ps}/f_{pu} 一定)

6. 破壊形式による破壊モーメントの違い

FRPロッドは、PC鋼材とは異なり、降伏域がなく、FRPロッドの破断と同時にやはり破壊する。そのため、その特性が、破壊モーメントに及ぼす影響について調べる必要があると考えられる。そこで、緊張材とグラウト間の付着を考慮し、PCはりのように緊張材降伏後もやはり破壊せず、コンクリートが圧縮破壊するまで載荷できる場合(以下、破壊形式Aと略称する)と、FRPロッドを使用したはりのように緊張材が破断ひずみに達すると同時に破壊する場合(以下、破壊形式Bと略称する)の2ケースについてコンクリートの圧縮強度を変化させて解析した。その結果を図-9, 10, 11に示す。

図-9は、圧縮強度が破壊モーメントに及ぼす影響について示したもので、プレストレスの導入量 σ_{pe}/f_{pu} が0.14、緊張材のヤング係数が $0.5 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ の矩形断面の場合である。付着の有無に関わらず、破壊形式Aの場合は、コンクリートの圧縮強度の増加に伴ない破壊モーメントが増加している。これに対して、破壊形式Bの場合は、破壊形式Aの場合と比較すると、コンクリートの圧縮強度の増加に伴う破壊モーメントの増加量はわずかである。このことから、破壊形式Bの場合、やはりFRPロッドの破断とともに破壊するため、FRPロッドの引張強度以上にコンクリートの圧縮強度が勝っていれば、圧縮強度は、破壊モーメントには大きな影響を及ぼさないとと思われる。よって、緊張材としてFRPロッドを使用する場合、ある程度以上コンクリート自体の圧縮強度を増加しても、破壊モーメントに対してはあまり効果は期待できず、むしろFRPロッドそのものの品質の強化が必要であると考えられる。

緊張材のヤング係数が、 $0.5 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ と低レベルの場合と $2.0 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ と高レベルの場合において、圧縮強度が破壊モーメントに及ぼす影響について、破壊形式を考慮し、付着有の場合を図-10に、付着無の場合をそれぞれ図-11に示す。図-10の付着有の場合において、破壊形式の違いによる破壊モーメントの値の差は、ヤング係数が、 $0.5 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ と低レベルの場合は、コンクリートの圧縮強度が増すにつれ徐々に大きくなる

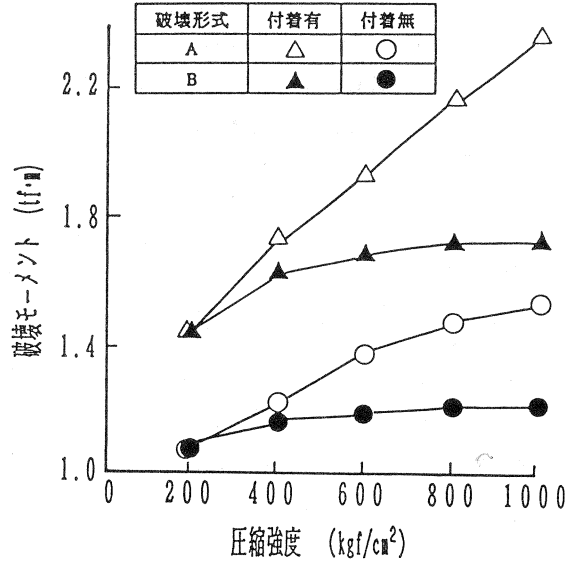


図-9 破壊形式の相違が破壊モーメントに及ぼす影響 (付着の有無を考慮)

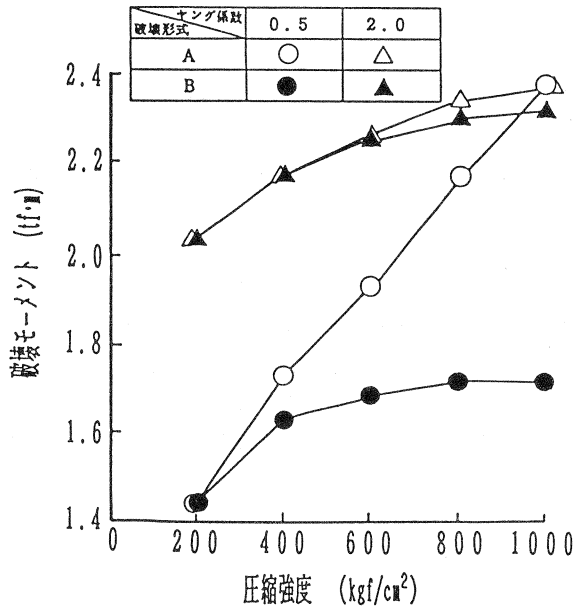


図-10 破壊形式の相違が破壊モーメントに及ぼす影響 (付着有)

のに対し $2.0 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ と高レベルの場合になると、圧縮強度の増加に伴う変化はわずかであり、破壊形式の違いによる破壊モーメントの値の差も微少である。緊張材のヤング係数を増すことで、緊張材の破断時の外力モーメントの値がコンクリートの圧縮破壊時の破壊モーメントの値に近づいたことが判る。

これに対して、付着無の場合を示した図-11によると、ヤング係数が、破壊形式の違いによる破壊モーメントの値の差に及ぼす影響は、付着有の場合に比べ、顕著には現れてはいず、ほぼ同様な影響を及ぼしている。これは、緊張材とグラウト間の付着が無い場合、ひずみ分布は平面保持に従わず、緊張材の伸びひずみの増加量が、緊張材位置のコンクリートの部材全長にわたっての伸びひずみと等しくなるという適合条件を用いているためである。すなわち、緊張材の応力負担が、付着が有る場合に比べ小さく、そのため、緊張材のヤング係数が破壊モーメントに及ぼす影響が、緩和されたのである。

このことより、破壊形式を考慮すると、FRPロッドを用いた高強度コンクリートのはり、FRPロッドがグラウトとの付着によって周囲のコンクリートと完全に一体化し、FRPロッド自体もコンクリートの高強度化に伴い、ある程度強化されたものを用いた場合に、PCはりにおけるFRPロッドの補強効果が最も発揮されると思われる。

7. まとめ

ポストテンション方式のPCはりにおいて、はりの曲げ性状には、ヤング係数、機械的プレストレスの導入量、コンクリートの圧縮強度などの要因が影響を及ぼし、いずれも緊張材とグラウト間の付着性状と強い相関性がある。付着無しとした場合、プレストレスの導入量が小さくなるにしたがい曲げ圧縮破壊を生じやすくなる。そして、破壊モーメントは低下し、その影響は、ヤング係数が小さいほど、コンクリートの圧縮強度が小さいほど著しい。付着有の場合、付着無に比べ、緊張材の応力負担分が大きいいため、曲げ引張破壊が生じやすい。しかしながら、この現象は、降伏域を持たないFRPロッドを緊張材として使用した場合、破壊形式が異なるため適応できない。FRPロッドの破断と同時にはりも破壊するため、破壊形式が、従来のRCはりやPCはりで生じる曲げ引張破壊となることはない。よって、緊張材のヤング係数を増加させることが、破壊モーメントの向上につながるとは一概には言えず、緊張材の破断とともに破壊する脆性的な破壊を防ぐためには、むしろヤング係数を小さくする必要があるとも考えられる。このことは、高強度コンクリートを使用する場合、特に注意を要する。

【参考文献】1)辻・岩井・奥泉・橋本：グラウトの付着性能を考慮したPRCはりの曲げ性状

コンクリート工学年次論文報告集, pp.161~166.12-2,1990

2)六車・渡辺・西山：アンボンドPC部材の曲げ終局耐力に関する研究

プレストレストコンクリート, Vol. 26, No. 1, pp10~16, Jan. 1984

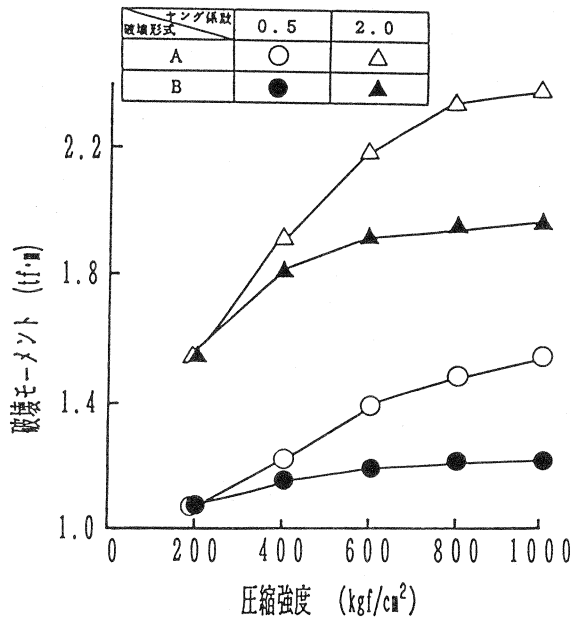


図-11 破壊形式の相違が破壊モーメントに及ぼす影響 (付着無)