

既設コンクリート構造物（特に柱部）の補修方法

大阪管理部 調査設計課 河野紀利

同部 同課 藤井康男

要 約

かぶりコンクリートが剥離して、鉄筋が露出してしまうほど損傷した橋脚に対して床版補修で用いる鋼板接着工法により補修を行った。すなわち、損傷部分を鋼板で覆い、エポキシ樹脂を注入する補修方法である。この補修方法による効果を明らかにするために、種々の供試体を作成し、圧縮・曲げ・ねじり等の作用する荷重状態で実験を行った。また、エポキシ樹脂の代わりにプレパックドコンクリートを用いた補修方法による実験も併せて行い、それらの補修あるいは補強効果についての比較・検討を行った。

この実験の結果から、若干の問題点はあるものの、エポキシ樹脂あるいはプレパックドコンクリートを用いた鋼板接着工法は、健全状態（何らの損傷も受けていない状態）より剛性が増加し、十分な補修・補強効果が得られた。

まえがき

近年、コンクリート構造物の損傷、劣化について多くの事例が報告されており、床版に限らず、主桁などの梁部材や橋脚などの柱部材において、コンクリート表面に無数のひびわれが発生し、さらに損傷が進行して大きなひびわれが認められた例もある。このような状態が著しくなるとコンクリートによる鉄筋の防食効果が期待できず、構造物の耐力低下はもちろんのことながら、安全性・耐久性を著しく低下させることになり、構造物としての機能を維持していくためには補修・補強など何らかの措置が必要とされる。その中で、かぶりコンクリートが剥離する程損傷を受けた鉄筋コンクリート柱部材の補修方法の一つとして用いら

れているものに、コンクリート表面を鋼板で覆い、エポキシ樹脂を注入する工法がある。しかし、この工法は従来からコンクリート床版に対して施工されてきた工法で、かなり実績を有しているものの、鉄筋コンクリート柱部材に対する補修としての効果は明らかでない。

本報告は、軸方向圧縮力・曲げ・ねじりが作用する鉄筋コンクリート柱部材に対するこの工法と、併せてエポキシ樹脂の代わりにプレパックドコンクリートを用いた工法による実験を行い、それらの補修あるいは補強効果について比較・検討を行ったものである。

1. 実験概要

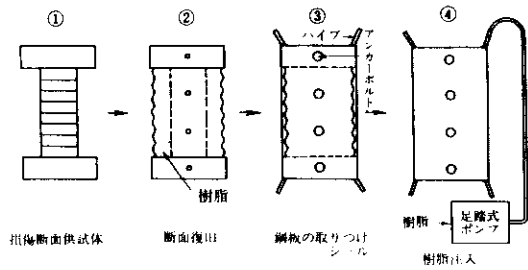


図-1 エポキシ樹脂を用いた補修方法

1-1 実験計画

鉄筋コンクリート柱部材の補修効果を評価するにあたり、構造物の受ける力学的条件により2シリーズにわけて実験を行った。

まず第1は、鉄筋コンクリート柱部材がラーメン構造となっている場合は当然のことながら、他の部材においても軸圧縮力のみだけでなく、曲げモーメントが作用するような場合である。すなわち、曲げと軸力の組み合わせ荷重を受けるような状態を想定し、これを「シリーズA」とした。

次に、通常の荷重状態ではコンクリート構造物に作用するねじりモーメントは、2次的な影響要因であるとして一般に無視するが多いが、地震力・風圧・遠心力などがラーメン構造の面外方向に作用する場合に大きなねじりモーメントが発生する場合があります。これによって被害を受けた構造物もあることが報告されている。一般に、このような時にねじりモーメントは、曲げモーメントなどと共に発生することが多い。したがって、鉄筋コンクリート柱部材が曲げとねじりの組み合わせ荷重を受けている状態を想定し、これを「シリーズB」とした。

また、供試体としては、健全断面供試体、かがりコンクリートが剥離した状態（損傷断面供試体）、エポキシ樹脂による補修を行った状態（E補修断面供試体）、プレパックドコンクリートによる補修を行った状態（P補修断面供試体）の4種類を想定した。

1-2 補修方法

鉄筋コンクリート柱部材が損傷を受けて、かぶり

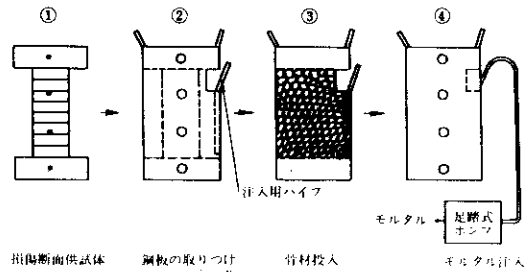


図-2 プレパックドコンクリートを用いた補修方法

コンクリートが剥離した状態に補修を行うものと想定した。

1-2-1 エポキシ樹脂による補修方法

補修方法の概略を図-1に示す。まず、損傷断面供試体(①)の損傷部分を充填用樹脂により断面を復旧した(②)。樹脂が硬化するのに要する24時間を経た後アンカーボルトにより鋼板を取りつけた(③)。次に、注入時のエポキシ樹脂の漏洩を防ぐため、鋼板とコンクリートとの境界箇所をシールした。その際、注入用パイプと空気抜きパイプを取りつけた。シール剤が硬化した後、注入用樹脂を鋼板とコンクリートの間に足踏み式ポンプを用いて注入した(④)。この方法は、実構造物に施工した鋼板接着工法に準じたものである。

1-2-2 プレパックドコンクリートによる補修方法

補修方法の概要を図-2に示す。まず、損傷断面のままの状態アンカーボルトを設置し(①)、供試体にかぶり厚さ分の空間を確保したうえで鋼板を取りつけた(②)。次にモルタル注入用パイプと空気抜きパイプを取り付け、鋼板とコンクリートの間隙をシールした。シール剤が硬化した後、損傷断面内にあらかじめ鋼板に設けておいた骨材投入口より、粒径10~15mmの範囲に調整した砕石を密度が一樣となるように詰めた(③)。砕石投入完了後、樹脂により骨材投入口をふさぎ、足踏み式ポンプを用いてモルタルを注入した(④)。モルタルの注入については、骨材の間隙全体にいきわたるよう最下部より上方へ向け、骨材間隙中

表-1 補修材料の物理的性質<単位kg/cm³>

	圧縮強度	引張強度	弾性強度
エポキシ系パテ材	599.6	199.9	6.00×10 ⁴
エポキシ樹脂	599.6	349.8	2.50×10 ⁴
プレパクトコンクリート	358.9	—	2.63×10 ⁵

の気泡を追い出しながら行った。なお、モルタルには早強セメントを使用し、流動性および硬化時のプレパクトドコンクリートの強度を考慮して、W/C=45%とし、高性能減水剤をセメント重量の0.25%混入した。

また、補修に使用したエポキシ樹脂およびプレパクトドコンクリートの物理的性質を表-1に示す。

1-3 供試体

鉄筋コンクリート柱部材の補修効果を評価するため、供試体は以下のものを作成し、荷重試験を行い、コンクリートひずみ、鉄筋ひずみ、供試体の変位などの測定を行った。

1) 健全断面供試体

鉄筋コンクリート柱部材が何らの損傷も受けず健全な状態を維持している供試体。

2) 損傷断面供試体

鉄筋コンクリート柱部材のかぶりコンクリートが剥離した供試体。ただし、軸方向鉄筋より内側については健全な状態を維持しているものとする。

3) 補修断面供試体

かぶりコンクリートが剥離した上記損傷断面供試体に、エポキシ樹脂またはプレパクトドコンクリートを用い、鋼板接着工法により補修を行った供試体。

これらの供試体の各シリーズにおける形状、寸法について以下に述べる。

1-3-1 シリーズA

供試体は、空港線福島第1工区の既設立体ラーメン橋脚をモデルとしており、概要は図-3に示すとおりである。

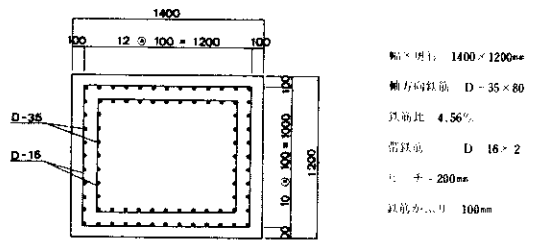


図-3 モデルとした橋脚の断面配筋図

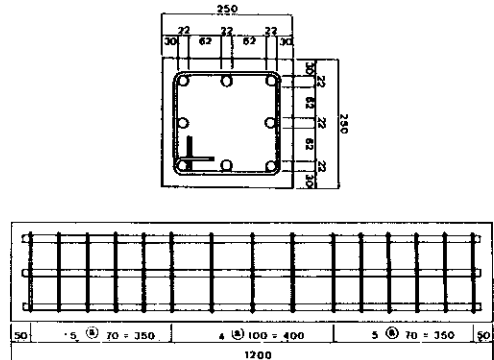


図-4 A. 健全断面供試体詳細図
(偏心なし、偏心0.17、曲げ)

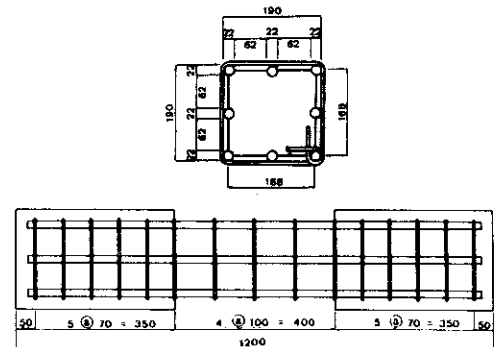


図-5 A. 損傷断面供試体詳細図
(偏心なし、偏心0.17、曲げ)

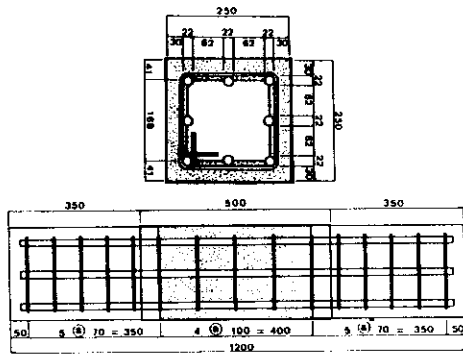


図-6 A. 補修断面供試体詳細図
(偏心なし、偏心0.17、曲げ)

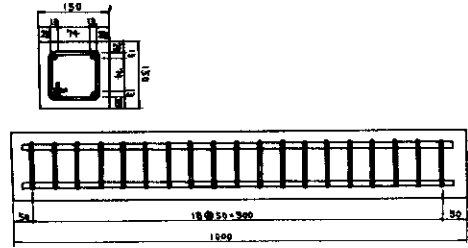


図-8 B. 健全断面供試体詳細図

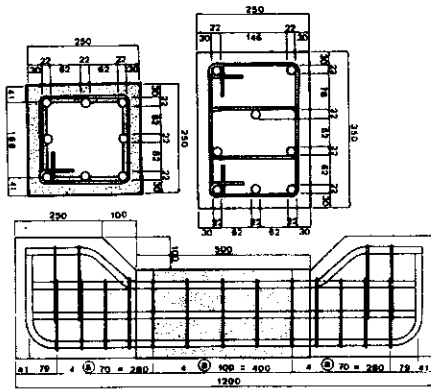


図-7 A. 補修断面供試体詳細図
(偏心0.50)

これに対して、供試体寸法は、載荷装置の能力、供試体打設・運搬および載荷装置への設置などの観点から、250×250×1200mmとした。この結果、幅、奥行きなどの物理的な寸法は、モデルとした立体ラーメン橋脚の約1/5となっている。これにともない、鉄筋、かぶり、骨材などの寸法も同じ縮尺とすることが理想であるが、物理的な制約や施工上の問題から、断面鉄筋比および帯鉄筋比のみを同一とすることとし、軸方向鉄筋としてSD30、D22を8本、帯鉄筋としてはSR24、φ6を100mmピッチで配置した。また、偏心0.50の供試体は、断面縁部に載荷重を受けるため、両端に100mmの張出し部を設け、せん断破壊を防止するために帯鉄筋のほか軸方向鉄筋を折り曲げて補強した。各供試体の寸法を図4～7に示す。

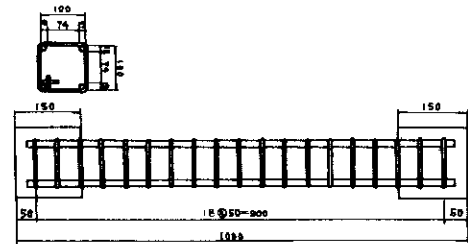


図-9 B. 損傷断面供試体詳細図

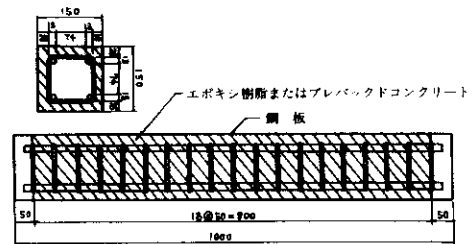


図-10 B. 補修断面供試体詳細図

1-3-2 シリーズB

供試体の寸法は、幅×奥行きを150×150mm、長さを1000mmとした。これは、ねじり載荷治具の形状的な載荷能力によるものである。軸方向鉄筋としてはSD30、D13を4本、帯鉄筋としてはSR24、φ6を50mmピッチで配置した。また、

鉄筋かぶりは25mm（シリーズAでは30mm）としたが、これは損傷断面供試体に補修を行ううえでの作業性、補修効果の評価に必要とされる補修厚、およびシリーズAの供試体の断面より小さくなったことを考慮したものである。

各供試体の寸法を図8～10に示す。

また、補修用の鋼板厚については両シリーズとも、入手および施工可能な限り薄いものとして1.6mm（SS41）とし、鋼板はアンカーボルト（M8×60）で固定した。E補修供試体において、注入する樹脂厚は、既設の4mmに対して2mmとした。これは、樹脂厚と鋼板厚をほぼ同等とし、かつ均一な施工が可能となる最小厚である。

1-3-3 打設および養生

供試体は、一打設に必要な全量を練り混ぜた後に打設し、締固めは内部振動型棒状バイブレーターを用いて、材料分離が起こらない程度に十分行った。なお、損傷断面供試体および補修断面供試体の損傷部は、あらかじめ発砲スチロールを埋め込んでおくことにより人為的につくりだした。供試体は打設の翌日に脱型し、室内で1週間湿布養生を行い、それ以降は載荷試験当日まで室外にて気中養生した。また、補修断面供試体のための補修は打設1ヶ月後に行い、20℃の恒温室にて1週間以上の養生日数を確保することとした。

これらの供試体については、養生日数による強度のバラツキを少なくするため、コンクリート打設時から載荷試験当日まで1ヶ月以上の間隔を設けた。

1-4 載荷条件

載荷条件は、次に示す2通りとした。

1-4-1 シリーズA（曲げと軸力の組み合わせ荷重を受ける場合）

鉄筋コンクリート柱部材が軸力と同時に曲げモーメントを受ける場合、柱断面の応力分布は種々なるものとなるが、断面の応力状態を典型的に分類すると、図-11に示す3種類を考えることができる。すなわち、次のようであるが、このような応力分布は載荷位置によって調節することができ、それぞれ、偏心なし、偏心0.17、偏心0.50によって得ることができる。

- ① 荷重が断面図心軸上に作用し、応力分布は等分布荷重と考えられる状態（偏心なし）
- ② 荷重が核内に作用し、断面内に引張力が発生しない限界の状態（偏心0.17）
- ③ 荷重が核外に作用し、断面内に引張力が発生する状態で、最大圧縮応力と最大引張応力の絶対値の比が2：1（偏心0.50）

試験は、許容荷重まで載荷後、一旦除荷し、次に破壊まで載荷を行う繰り返し載荷とした。載荷は常に段階載荷とし、載荷量のステップ幅は、偏心なしおよび偏心0.17の場合は5t、偏心0.50の場合は2tとした。なお、許容荷重の計算は、コンクリートの許容応力を80kg/cm²、鉄筋許容応力を1800kg/cm²として行い、健全断面供試体の各載荷条件において、コンクリートあるいは鉄筋のどちらかが許容応力に達した時の荷重を許容荷重とした。

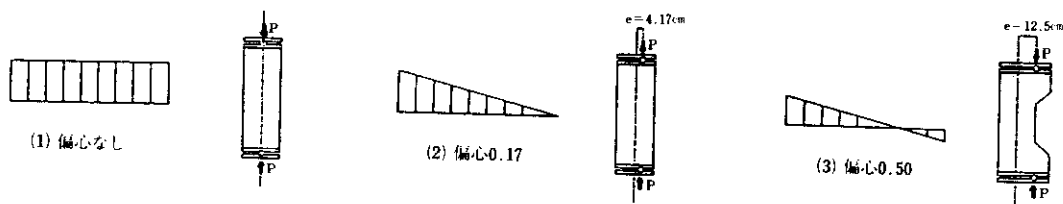


図-11 各載荷様式における断面応力分布図（シリーズA）

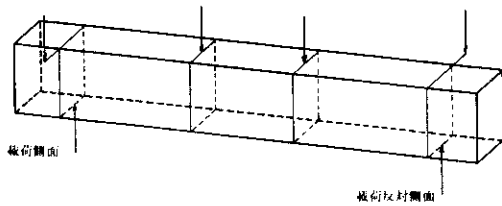


図-12 ねじり+曲げ載荷装置概念図
(シリーズB)

1-4-2 シリーズB (曲げとねじりの組み合わせ荷重を受ける場合)

曲げとねじりを受けるはりに関する既往の実験によると、終局強度にはねじりモーメント (M_t) と曲げモーメント (M_b) との比 ($K_o = M_t/M_b$) の影響が顕著であることが報告されている。したがって、曲げとねじりを受ける載荷実験として、以下に示すように純ねじり試験と純曲げ試験に加えて、ねじり支配型および曲げ支配型の破壊を示すと考えられるモーメントの組み合わせを各1種とし、計4種について実施した。曲げとねじりとのモーメントが組み合わせられて作用する場合としては、破壊に対しねじりが支配的とされる $0.3 < K_o < 0.8$ の範囲、および曲げが支配的とされる $0.1 < K_o < 0.3$ の範囲からそれぞれの中央値の $K_o = 0.6$ および $K_o = 0.2$ を用いることにした。

- ① 純ねじり (ねじりモーメントによる破壊)
- ② ねじり支配型 $K_o = 0.6$ (曲げモーメントが作用するがねじり型の破壊)
- ③ 曲げ支配型 $K_o = 0.2$ (ねじりモーメントが作用するが曲げ型の破壊)
- ④ 純曲げ (曲げモーメントによる破壊)

荷重の概要は図-13に示すとおりであり、シリーズAと同様、許容荷重まで繰り返し載荷を1回行い、以後破壊に至るまで載荷を続けた。なお、曲げとねじりの複合載荷の破壊荷重は、 M_t/M_b が一定に保つことができなくなった荷重とした。また、許容荷重は、健全断面供試体の各載荷試験において、最初のひびわれが発生した荷重とした。

2. 実験結果

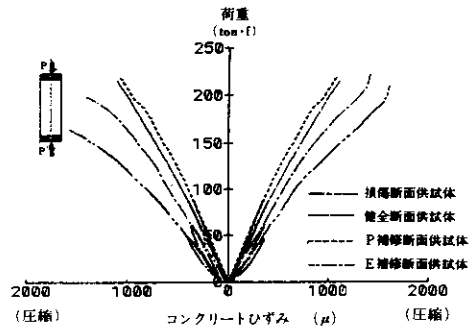


図-13 荷重とコンクリートひずみの関係 (偏心なし)

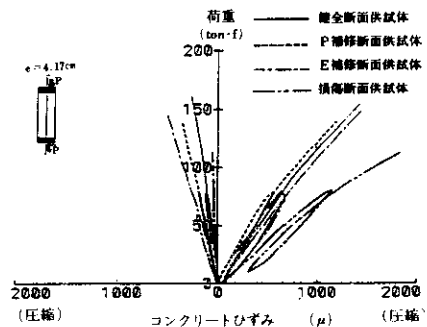


図-14 荷重とコンクリートひずみの関係 (偏心0.17)

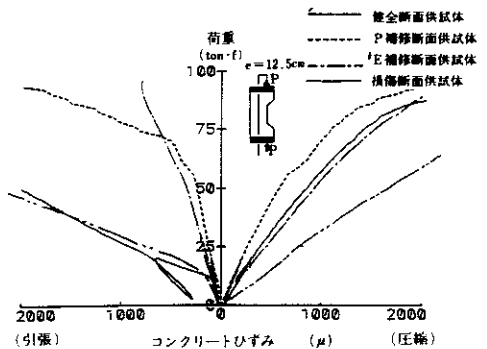


図-15 荷重とコンクリートひずみの関係 (偏心0.50)

2-1 シリーズA

図-13、14、15はそれぞれ偏心なし、偏心0.17、偏心0.50の圧縮載荷によって得た荷重コンクリートひずみの関係図である。同一荷重におけるひずみを各供試体と比較すると、圧縮応力側では、P

補修断面供試体のひずみがE補修断面供試体のひずみを下回っており、コンクリートとひずみの低減効果からみるとプレパックドコンクリートによる補修の方が効果大きいことがわかる。しかし、E補修断面供試体についても、健全断面供試体のひずみを下回ることはないが同程度まで回復しているので、補修という意味では十分な効果が得られていると判断できる。一方、引張応力側では、P補修断面供試体、E補修断面供試体ともに破壊荷重の約70%の荷重まではほぼ同程度のひずみであるが、その後、P補修断面供試体についてはひびわれの拡幅が進行したことともなうひずみの増大がみられるのに対して、E補修断面供試体は、破壊時まで有効にコンクリートのひびわれを抑制していると思われる。これは次のように考えることができる。図-16、17は偏心0.50載荷時の断面ひずみの分布であるが、E補修断面供試体では、荷重が増加してくると鋼板の変位はコンクリートの変位に追随しなくなり、鋼板のひずみの遅れは

生じるものの、破壊時以外では鋼板の剥離は認められず、鋼板、エポキシ樹脂ともに破壊時まで有効に作用しているようである。一方P補修断面供試体では、載荷当初においては鋼板、コンクリートとも一体に挙動しているが、荷重が増大してくるとひびわれの拡幅を抑制していると思われる鋼板が剥離しているのがわかる。しかし、鋼板の剥離が進行しても供試体は直ちに破壊に至ることはなく、耐力は持続しおり、プレパックドコンクリートによる応力の分担は伺える。

次に、鋼板の有効性をみるため、各荷重における鋼板の荷重分担率を図-18、19に示す。これらの図に示されるように、P補修断面供試体はE補修断面供試体よりも荷重の分担率が小さく、破壊荷重の約50%まではE補修断面供試体の50~80%程度の効果であるが、これは、プレパックドコンクリートと樹脂の弾性係数の差および鋼板との付着性によるものと思われる。一方、E補修断面供試体においても、弾性理論的には18%程度の荷重

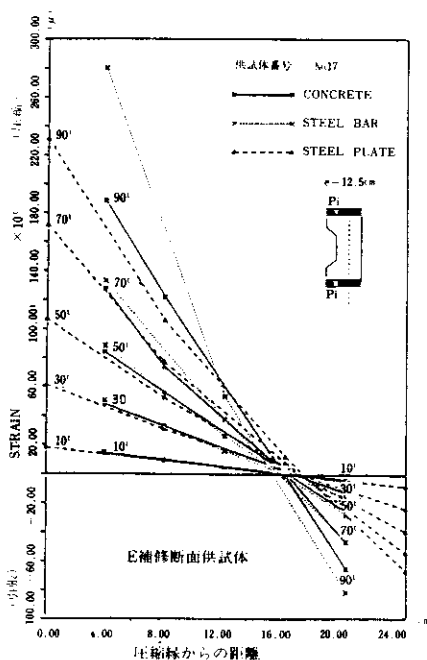


図-16 E補修断面供試体の断面ひずみ分布図(偏心0.50)

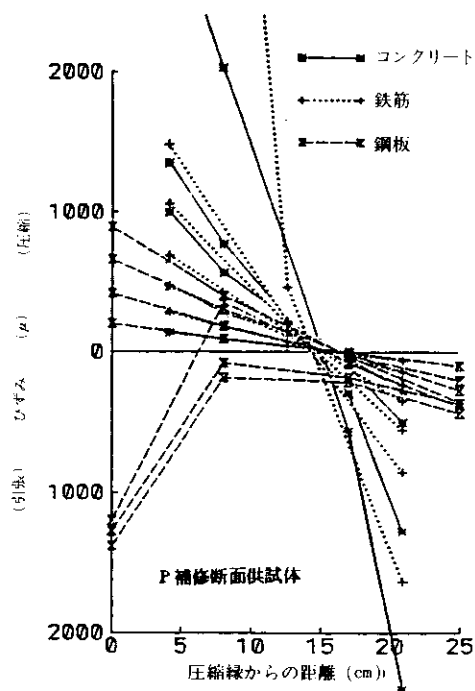


図-17 P補修断面供試体の断面ひずみ分布図(偏心0.50)

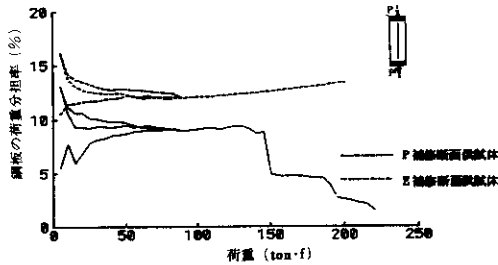


図-18 補修断面供試体における鋼板の荷重分担率（偏心なし）

分担率が得られるはずであるが、圧縮応力側では12~13%と理論値の約70%程度であり完全に鋼板の効果が得られているとは言えない。これは、鋼板への応力伝達がコンクリートよりも弾性係数の低い約10分の1エポキシ樹脂を介して行われるためであると思われる。しかし、両補修断面供試体ともに、鋼板の応力分担率は微増している。これは鋼板の効果であり、補修によって補強効果を生み出すものと考えられる。したがって、応力の伝達ができなくなった時点でその補強効果を失うものである。エポキシ樹脂による補修では、供試体の破壊、すなわち、補修部分での破壊がこの時点であるのに対し、プレパックドコンクリートによる補修では、鋼板が剥離するときと考えられる。しかしながら、P補修断面供試体においては、鋼板の剥離後のコンクリートひずみの急激な増大は認められず、さらに耐力が増加することから、P補修断面供試体での補修効果は、主にプレパックドコンクリートによってもたらされていると考えられる。

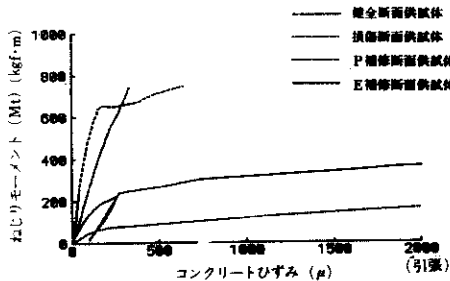


図-20 供試体側面中央部斜め引張ひずみ-ねじりモーメント（純ねじり）

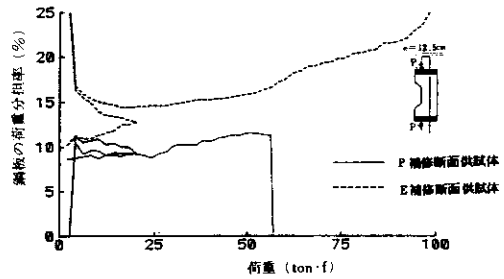


図-19 補修断面供試体における鋼板の荷重分担率（偏心なし）

2-2 シリーズB

最初に、各載荷条件（純ねじり、ねじり支配、曲げ支配、純まげ）における、コンクリートひずみとモーメント（曲げおよびねじり）との関係について述べる。

図-20は、純ねじり試験における供試体中央部両側面における斜め引張方向ひずみとねじりモーメントとの関係を表わしたものである。この図から、損傷断面供試体のねじりに対する抵抗が大幅に低下することが認められる。一方、補修断面供試体はともに破壊に至っておらず、補修による十分な補強効果が得られている。終局状態については観察できなかったが、両補修断面供試体と比較すると、P補修断面供試体の方が、モーメント-ひずみ関係の勾配が大きくなっており、剛性の増加が伺える。また、P補修断面供試体では、コンクリートがすでに塑性域に入っており、破壊に近づいていることが推測できる。しかしながら、軸力と曲げが作用するシリーズAにおいては、P補修断面供試体は鋼板が剥離しても耐力は増加したが、E補修断面供試体では鋼板の剥離によって直

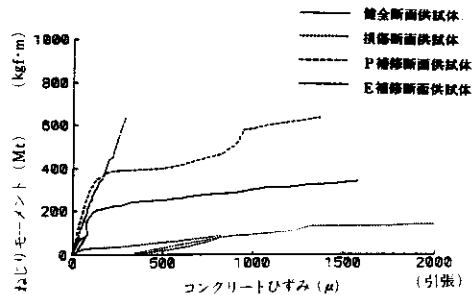


図-21 供試体側面中央部斜め引張ひずみ-ねじりモーメント（ねじり支配）

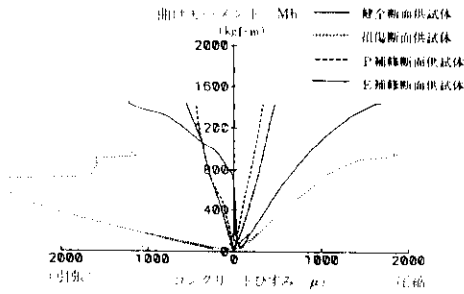


図-22 供試体上下縁コンクリート引張ひずみ-曲げモーメント (曲げ支配)

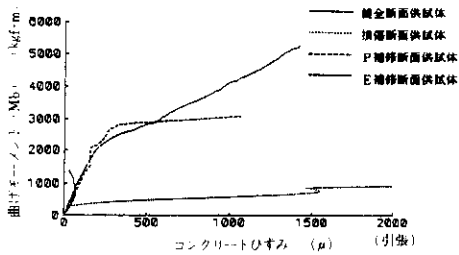


図-23 供試体側面4等分斜め引張ひずみ-ねじりモーメント (純曲げ)

ちに耐力が低下して破壊に至っており、ねじりが作用した場合の終局時における補強効果の優劣については断定することはできないと思われる。

図-21は、ねじり支配型試験におけるねじりモーメントと供試体中央部側面の斜め引張ひずみとの関係を表わしており、この図からねじりモーメントによる挙動は、純ねじり試験とほぼ同等の挙動をしていることが伺え、曲げモーメントによる影響が小さいことがわかる。

図-22は、曲げ支配型試験における曲げモーメントと供試体上下縁のひずみとの関係を表わしており、供試体中央部側面における斜め引張ひずみはそれほど認められなかったのに対し、供試体上縁部では圧縮ひずみ、下縁部では引張ひずみが発生しているため、ねじりモーメントは支配的ではなく、曲げモーメントの影響が大きい載荷試験であることがわかる。しかし、この載荷条件では、E補修断面供試体およびP補修断面供試体ともに弾性的な挙動範囲内にあり、破壊には至らなかった 図-23は、純曲げ試験における曲げモーメントと供試体側面4等分点 (せん断スパン内) の斜

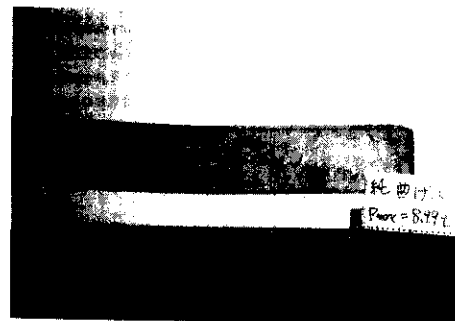
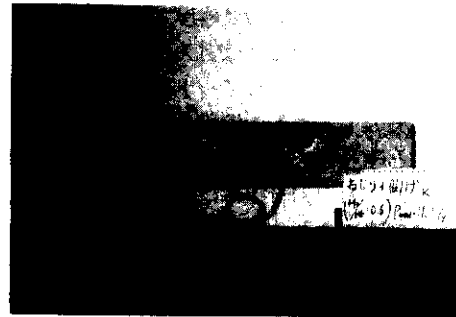
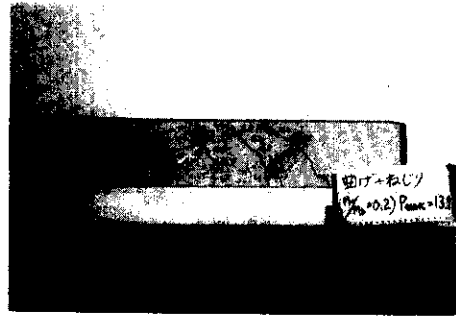


写真-1 健全断面供試体のひびわれ状況図

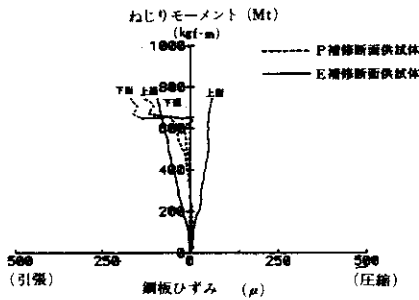


図-24 供試体上下縁ひずみ-ねじりモーメント (純ねじり)

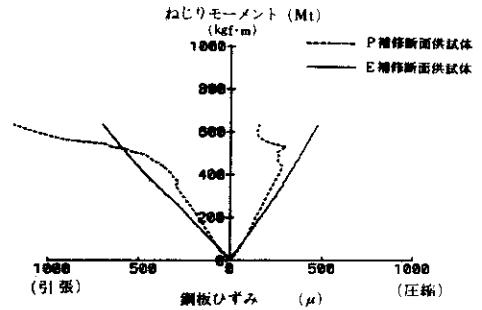


図-25 供試体上下縁ひずみ-ねじりモーメント (ねじり支配)

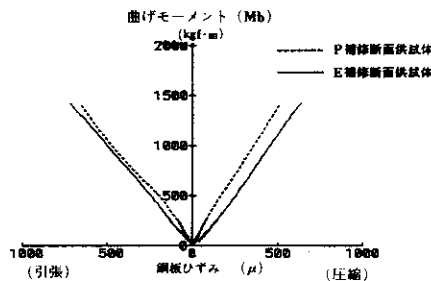


図-26 供試体上下縁ひずみ-ねじりモーメント (曲げ支配)

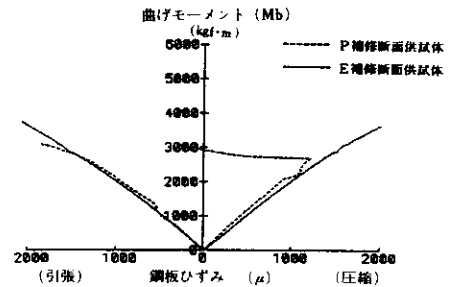


図-27 供試体上下縁ひずみ-ねじりモーメント (純曲げ)

め引張ひずみの挙動を示したものである。この図によると、両補修断面供試体を比較すると、弾性的な挙動を示す範囲内ではほとんど変わりはないが、塑性域に移行した後のひずみ挙動を見ると、E補修断面供試体では、ひずみの増加率が大きくなっているものの、ひずみと耐力はともに増加しているのに対し、P補修断面供試体では、耐力は増加せずひずみだけが増加しており、破壊の進行が早くなっていることがわかる。

なお、健全断面供試体の終局時における、供試体側面のひびわれ状況を写真-1に示す。

次に、鋼板ひずみとねじりおよび曲げモーメントとの関係を図-24～27に示す。全体的には、補修断面供試体のコンクリートにおけるひずみ挙動と同じ傾向にあると言える。すなわち、一般的に弾性域内では、P補修断面供試体の方がE補修断面供試体よりモーメント-ひずみ関係の勾配が大

きく、剛性が高いことを示している。

E補修断面供試体とP補修断面供試体の剛性の相違は、エポキシ樹脂とプレパックドコンクリートの弾性係数の違いによるものと考えられることができる。すなわち、エポキシ樹脂の弾性係数はコンクリートの約10の1と低いため、エポキシ樹脂の応力分担が少なく、鋼板とコンクリートの応力分担が多くなっている。一方、プレパックドコンクリートでは、その弾性係数がコンクリートと同程度であるため、均等に応力が分担されているためであると考えられる。しかし、P補修断面供試体では、鋼板の剥離が進行するにつれ、ひずみの挙動は当然のことながら不安定となっている。

3. まとめ

本実験の結果から、両補修断面供試体とも、剛

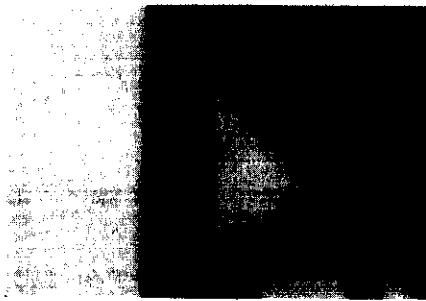


写真 - 2

性を健全断面供試体以上に回復することができ、十分な補修・補強効果が得られたが、特に、ひずみの低減効果ではP補修断面供試体の方が優れていた。しかし、E補修断面供試体と比較すると早期に鋼板が剥離し、プレパックドコンクリートにひびわれが発生し、終局状態に近づくとき破壊の進行が早くなる危険性がある。

補修用材料としてエポキシ樹脂を用いた場合、その弾性係数がコンクリートと比較してかなり小さいために鋼板が十分な応力が伝達できないということ、また非常に高価であるということでプレパックドコンクリートによる補修方法の検討を行った。その結果、プレパックドコンクリートの弾性係数がコンクリートのものとはほぼ等しいために応力は理想的に伝達されるが、鋼板との付着性が悪く、早期に剥離してしまうという問題が生じた。このような場合、鋼板に凹凸処理するなどして付着性を向上させる方法が必要と考えられる。

したがって、このような鋼板接着工法で補修を行う場合、損傷部を充填する材料は、弾性係数がコンクリートと同程度であるとともに、鋼板との付着性が良いものが理想とされる。

あとがき

実際にエポキシ樹脂を用いて補修を行った橋脚(写真-2)は、現在のところ新たな損傷が発生したような報告はされておらず、また本実験によっても剛性の増加が認められるなど、非常に有効な

補修方法であると思われる。

しかし、本工法は後荷重のみに対して有効な工法であり、施工時の断面欠損、振動等を考慮して、できるだけ活荷重の影響を少なくするように施工するのが望ましい。

最後になりましたが、本研究にあたって御指導、御協力をいただいた大阪市立大学工学部真嶋光保助手、同土木材料学研究室の方々、および公団担当者の方々に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 阪神高速道路公団：既設コンクリート構造物の補強方法確認実験業務 1984. 3
- 2) 阪神高速道路公団：既設コンクリート構造物の補強方法確認実験業務(その2) 1985. 3
- 3) 河野、藤井：既設コンクリート構造物(特に柱部)の補強方法について、阪神高速道路公団：第18回技術研究発表会論文集 1986. 2