

炭素繊維シートによるRC耐震補強の実験と解析

大阪第一建設部 設計課 袴田文雄

要 約

RCの耐震補強に関しては、「復旧仕様」、「参考資料」、新しい道路橋示方書などに従って順次施工されている。しかし、施工条件の制約を受け、施工法が限定される場合には別途検討を加える必要がある。本稿では、このような場合の炭素繊維シートを用いた耐震補強に関する新しい施工法に関して行った実験検討を述べるものである。実験の結果、炭素繊維シートを用いたRC橋脚の耐震補強に適用の可能性を見いだした。また、耐震補強の解析の計算法についても述べる。

キーワード：炭素繊維シート，耐震補強，RC橋脚，実験，解析，地震

はじめに

RCの耐震補強に関しては、平成7年2月「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様（以下「復旧仕様」という）」が通達された後、平成7年5月には既設橋脚全体に適用範囲が拡大される旨が通達された。その後、平成7年6月、日本道路協会から「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様」の準用に関する参考資料（案）（以下「参考資料」という）」が提示されて以来、RC橋脚の耐震補強はこれらに従って順次施工されている。平成8年11月1日「橋、高架の道路等の技術基準について（以下「示方書」という）」が建設省都市局、道路局より通達された。しかし、建築限界や構造物の立地条件などの制約条件から、これらの適用に限界があることがある。また、施工条件の制約を受け、施工法が限定される場合には別途検討を加える必要がある。以下では施工条件等に制約を受け、一般的な耐震補強工法の選択に制限を受ける場合に、炭素繊維シートを用いたRC橋脚の補強法に関して行った実験検討結果を述べるものである。

1. 実験の意義

既設RC橋脚の耐震補強は、使用材料の区分では表-1に、一方、補強効果の区分では表-2のように分類される。このうち公団では、路下条件などを勘案し、現在施工中の都市内におけるRC橋脚補強の使用材料では、鋼板巻立て工法を一般的な

表-1 使用材料別の区分

- | |
|-----------------|
| 1. RC巻立て工法 |
| 2. 鋼板巻立て工法 |
| 3. 炭素繊維シート巻立て工法 |

表-2 補強効果別の区分

- | |
|------------|
| 1. せん断耐力補強 |
| 2. じん性補強 |
| 3. 曲げ耐力補強 |
| 4. 段落し補強 |

工法としている。補強効果の観点からは、公団ではスパン比との関係から、じん性補強が適用される事例が多いと考えられる。また、復旧仕様や新しい示方書との考え方による限り、曲げ耐力補強を必要と

される事例も少なからず発生すると考えられる。

該当するRC橋脚が施工機械、建築限界、工期などの制約を受けて一般的な鋼板補強の採用に制限をうけるとき、設備の簡易といわれる炭素繊維シート補強を行うことが考えられる。このときの耐震補強効果について実験的に確認するのが本実験の目的である。なお、段落しのある場合は一連の実験では対象としていない。段落しのある場合は、すでに既往の設計法などによって十分に対応することが可能と考えられたためである。

次に表-2に示す補強効果を構造物の持つ破壊特性との関連で述べる。構造物の補強の要件は、その破壊特性に応じて決められる。構造物の破壊特性は構造物の固有のせん断耐力と曲げ変形時の復元力との相対的な関係により、図-1のように示すことができる。

せん断耐力が復元力に対して低位にある時には、そのときの変形に応じてせん断破壊、あるいは曲げせん断破壊を呈する。せん断耐力はコンクリートのクラックの成長、降伏後の繰り返し荷重の過程で大きく低減するため、曲げせん断破壊に至るケースは比較的多いと考えられる。せん断破壊あるいは、曲げせん断破壊を未然に防ぐ補強がせん断耐力補強である。

構造物が十分なせん断耐力を有するときには、当該構造物の終局状態は曲げ破壊を呈するのであるが、そのときに必要なじん性率を確保できていないときには、十分な荷重低減を発揮することができない。このため、所定の範囲内でじん性を向上させるのがじん性補強である。なお、荷重低減とは、弾性応答に対する荷重の低減をいい、構造物が弾塑性応答をするときに発揮される。

今回示方書にて示されるようなレベルの地震に対しては、まだ定まった設計法がないとしなければならないが、平成8年11月現行の示方書では、このような地震に対しても設計震度を定めている。既設の橋脚にてこれを満足させるときには、曲げ耐力そのものの向上が必要になる。図-1でPuを向上させる。これに対応するのが曲げ耐力補強である。曲げ耐力補強を行うときには必要とす

るせん断耐力を大きく向上させるので、多くはせん断耐力補強を必要とすることになる。

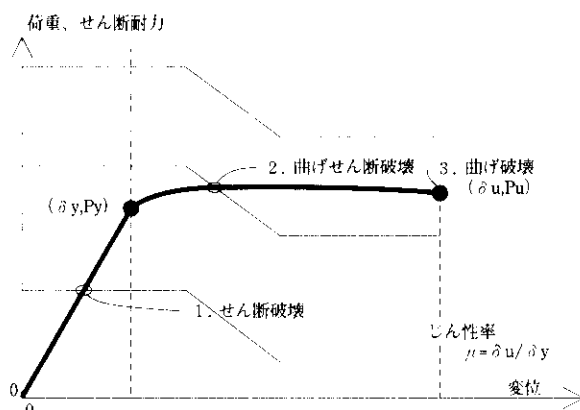


図-1 繰り返し荷重載荷時の荷重変位曲線の包絡線と破壊モード概念図

2. 炭素繊維シートのじん性補強に関する実験

2-1 目的

近年日本道路公団¹⁾をはじめとして炭素繊維シートが土木構造物に採用される事例が多くなってきたが、RC橋脚の基部のじん性補強や耐力補強など、終局限界状態対応として炭素繊維シートを積極的に採用する事例は少ない。炭素繊維シートの採用理由としては、施工性、管理、経済性、景観など様々なものがあるが、構造的な課題が少なからず残っており、炭素繊維シートのRC橋脚補強について構造的な検討を行う必要が認められる。なお、構造的な課題とは、RC橋脚に炭素繊維シートを採用したときに、構造上の所要の性能が発揮できるか確認を行うべき課題をいう。そこで、RC橋脚の炭素繊維シートによる耐震補強効果を実験的に確認し、設計法立案の基礎資料とするために、実験・検討を行った。

2-2 供試体および実験の方法

供試体は表-3のとおり6体、全7試験である。RCの耐震補強に関しては他にも実験を行っており²⁾、これらとの整合性をとるために起数をNo.5としている。

図-2(1)、(2)に供試体No.7、No.10の一般図を示した。実橋を参考に1/5スケールモデルで考え、軸力はコンクリート粗断面換算にして、円形では23kgf/cm²、矩形では17kgf/cm²の応力発生をみるように考えた。

表-3 実験供試体一覽

断面	円形	矩形
基準供試体	No.5	No.8
じん性補強+せん断耐力補強	No.6	No.9.No.11
じん性補強+曲げ耐力補強	No.7	No.10

基準供試体の設計では実橋を参考にした。

No.6, No.9は炭素繊維シートの水平方向のみの補強でせん断補強, じん性の向上を目指したものである。塑性ヒンジの領域とそれ以外では層数を区別した。No.7, No.10が炭素繊維シートを用いたときの曲げ耐力補強供試体である。じん性を確保するためにはエネルギー吸収の能力のある部材が不可欠である。ここに, 塑性ヒンジの領域のみ鋼板を用いることとした。図-2にみるように柱基部に鋼板を用い, フーチングにはアンカーにて, 柱部には軸線方向の炭素繊維を用いて, 力の伝達をはかった。施工条件の厳しい中では鋼板の大きさをなるべく小さくする必要がある。モデルでは鋼板が降伏する領域として $0.5 * D$ (D は断面辺長)を考えた。No.11はNo.9をケーシング補強したものである。ケーシング補強とは後の図-4(2)に見られるような矩形断面を円形に補強するものをいう。No.9の実験の後, 挙動の改善を目指して急遽補強の上, 再試験することとした。炭素繊維シートの全体層数については構造・施工上の上限もあると考え, 現実の橋脚で実現が可能な層数であることをモデル設計の段階では配慮した。

2-3 実験の結果および考察

実験に先立って, 復旧仕様に基づく応答の試算値を算出した。ここで, 鋼板, ケーシングは既設の帯鉄筋に等価な降伏応力度比にて与えた。試算値は, 復旧仕様に準じて, 補強断面を降伏比により鉄筋等価として既設断面に合算して計算を行ったものである。図-3(1)~(7)には供試体の荷重変位曲線を示した。以降荷重変位曲線には試算値の内, 降伏, 終局の2格点を●にて図示する。降伏変位では鋼板による剛性増加を考慮していない。図-3(7)には矩形断面としての補強計算値も示した。円形としたときのじん性よりも低いじん

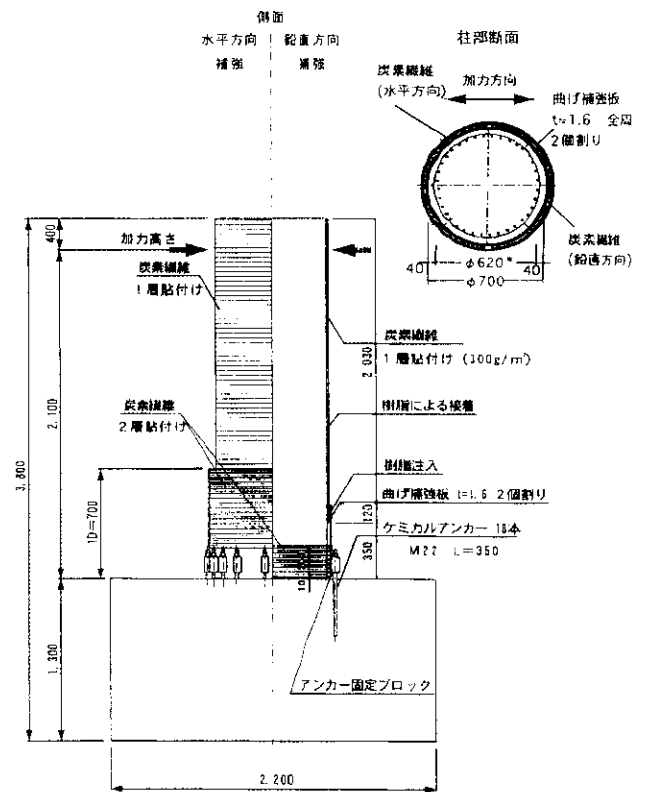


図-2(1) 実験供試体(No.7)

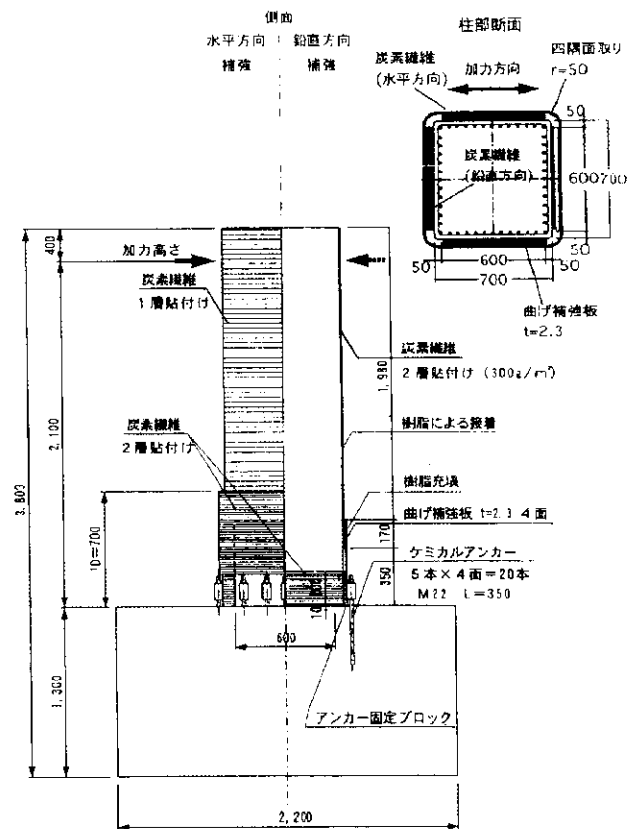


図-2(2) 実験供試体(No.10)

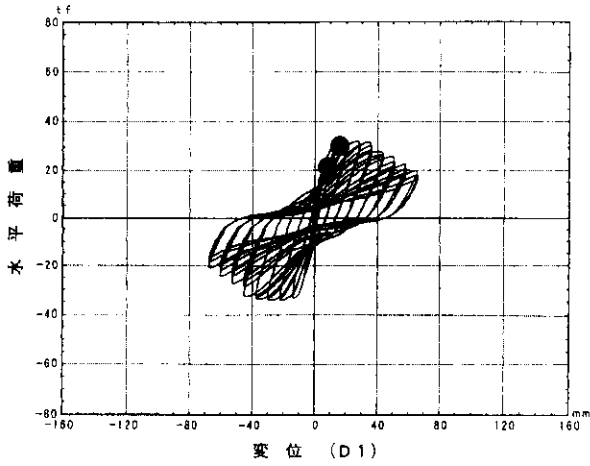


図-3(1) 荷重変位曲線(No.5)

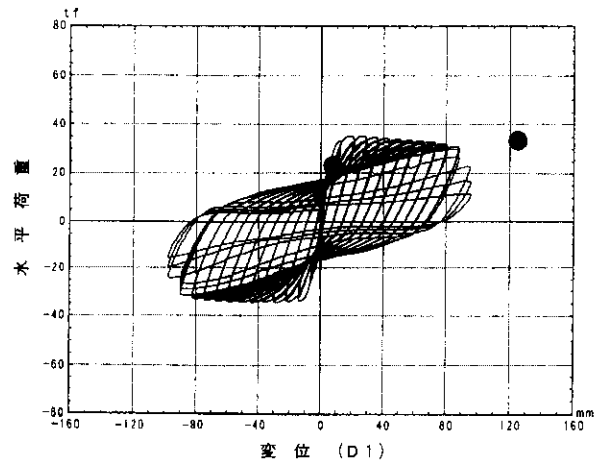


図-3(2) 荷重変位曲線(No.6)

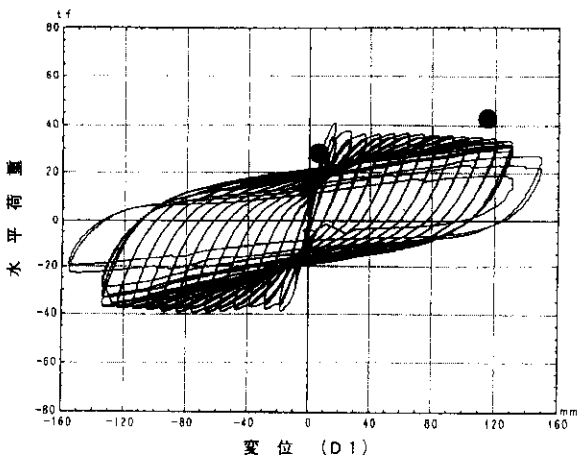


図-3(3) 荷重変位曲線(No.7)

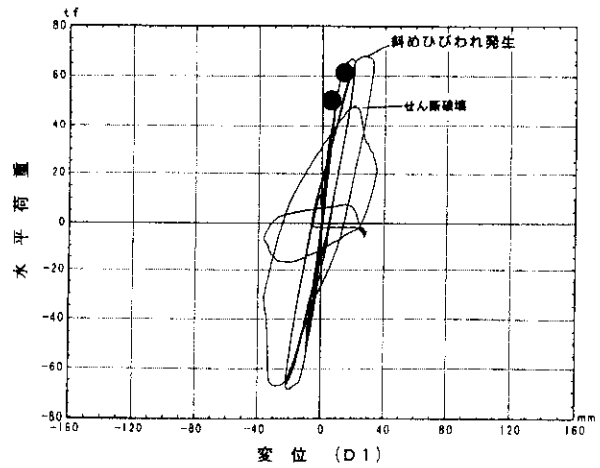


図-3(4) 荷重変位曲線(No.8)

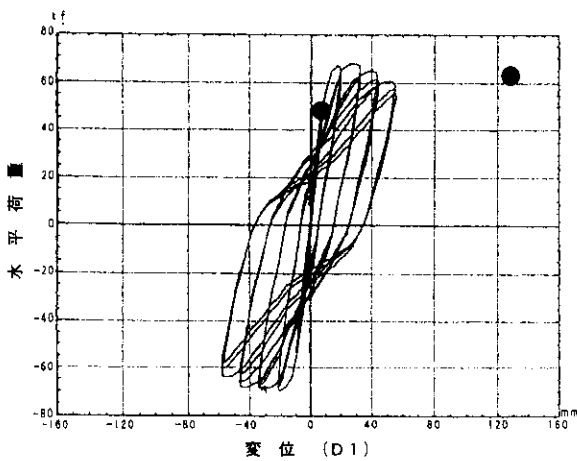


図-3(5) 荷重変位曲線(No.9)

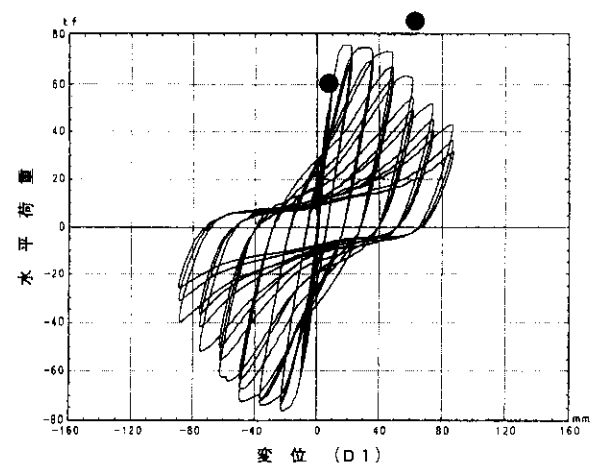


図-3(6) 荷重変位曲線(No.10)

性を与えることがわかる。

本供試体は復旧仕様などのモデルによる限り、基準供試体では円形、矩形ともせん断破壊が先行するものと考えられていた。実験ではNo.5では曲

げ破壊し、No.8では降伏荷重を通過した後、塑性域でせん断破壊を生じた。No.7、No.10では曲げ耐力補強を意図したが、耐力の向上は実現できなかった。これは、鋼板と炭素繊維シートの界面での

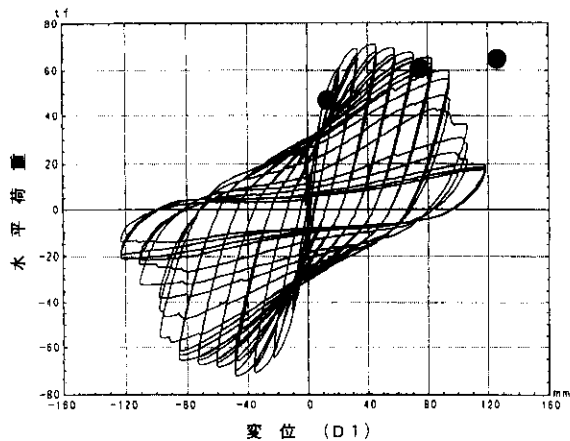


図-3(7) 荷重変位曲線(No.11)

付着力が不十分であったためと考えられた。特に矩形No.10では鋼板が周辺方向の炭素繊維シートを破断させたようで、じん性率についても非常に小さな値を得るにとどまった。

一般に炭素繊維シートとの付着に関しては、十分な長さがあれば母材破壊するが、逆に必要以上の付着長さでは付着力が全長にわたって均一に作用しないから見かけ上は単位面積当たりの付着力を小さくして、全体の付着力向上には寄与しない。このことをモデル結果を実際に反映するときには配慮しなければならない。

No.6, No.9ではせん断補強（拘束効果の付与）によって、じん性率が定量的に延びることを期待したものである。実験の結果、円形断面では著しい改善が見られた。矩形断面No.9ではクラッシュ音が生じた段階で実験を中止した。その後、ケーシング補強を行って挙動を確認するためである。図-3(7)に見るように、矩形断面であっても耐力に著しい低減を生じることなく、比較的大きなじん性率を確保できていることがわかる。同図には基部を2層補強したときの矩形断面にて評価した終局状態の格点も含めて示した。

実験を通じて、RC橋脚のせん断補強に関しては方向を見いだした。特に円形断面においては著しいじん性率の改善が期待できる(No.6)。矩形断面でも破壊モードを基準供試体の曲げせん断破壊から曲げ破壊に変化させ、かつじん性率の向上が期待できることが観察された(No.9)。矩形供試体では円形にケーシング補強することで、さらにじん

性を改善できることも確認した(No.11)。一方で、耐力補強に関しては細部設計を改善することが必要と判断された。基準供試体のような比較的帯鉄筋比の小さな供試体では、復旧仕様によるとじん性が低く評価される傾向にあることは注目される。

3. 炭素繊維シートの耐力補強に関する実験

3-1 目的

実験2により、曲げ耐力補強に関しては、円形断面、矩形断面とも十分な成果が得られたとは言えず、再検討が必要であることと考えられた。ここに特に炭素繊維シートの曲げ耐力補強に着目した実験を企画した。

3-2 供試体および実験の方法

表-4に示すように供試体は4体とする。ここで、炭素繊維シート巻立てとは矩形断面に水平方向に炭素繊維シートを2層巻いたものである。炭素繊維シートは塑性ヒンジを含む $1 \times D$ の領域のみとし、それ以外はプレーンの状態として挙動を観察することとした。ここで、 D は断面辺長の最大値、もしくは直径である。ケーシング補強とは塑性ヒンジ領域をケーシングにて補強し、外側から炭素繊維シート2層を水平方向に巻立てるものである。円形断面では矩形断面に比べ、じん性挙動が著しく優れ

表-4 実験供試体一覧

補強方法	角形	基部形状
基準供試体	No.12	矩形
炭素繊維シート巻立	No.13	矩形
ケーシング補強	No.14	円形
鋼板+ケーシング補強	No.15	円形

ていることがわかっている。ケーシングを置くことで矩形断面でも円形断面に近い挙動を期待した。

一方で、現場では占有面積を必要とするケーシング補強が不可能な場合も考えられる。このとき、炭素繊維シートのみでの補強がケーシングを利用したときと比べ、どのような定量的な差異があるのか把握する必要がある。

耐力補強を目指したNo.15の供試体では鋼板にて耐力増加と同時にじん性を向上させようという考え方に変更はないが、実験2の結果から、炭素繊維シートと鋼板を機械的にボルト(PC鋼棒)にて接合することを試みた。鋼板からの軸力がボルトのせん断力を通じて炭素繊維シートに伝達するように考えた。コンクリートにはボルトの支圧も考えた。モデルの制約のため、アンカー部はフーチング内に埋め込み定着する構造を採用した。図-4(1)、(2)には供試体No.13およびNo.15の一般図を示した。図-4(3)には、No.15における基部の詳細を示した。アンカー部ブラケットの制作が困難なため、モデルではフーチング主筋にアンカーをしている。No.13では1Dの範囲のみじん性補強を行い、それ以外は基準供試体のままである。コンクリートのせん断耐力はひび割れが大きく進展しないときには、十分大きな耐力を持っているため、基部のみの補強で十分な場合があり、これを検証することを目的としている。

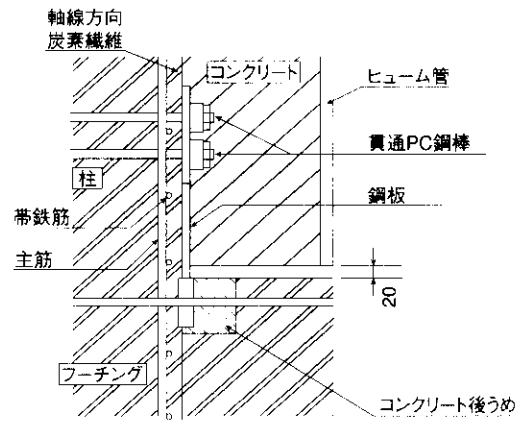


図-4(3) No.15の基部詳細

3-3 実験の結果および考察

図-5(1)~(4)には供試体の荷重変位曲線を示した。No.13の供試体では最終的に炭素繊維シートのコーナー部の荷重載荷方向面で炭素繊維シートが破断し、カバーコンクリートの圧壊、主鉄筋の座屈を生じて曲げ破壊に至った。No.14では炭素繊維シートの破断を生じることなく、主鉄筋の破断を生じて耐荷力を低減させた。No.15ではNo.14と同

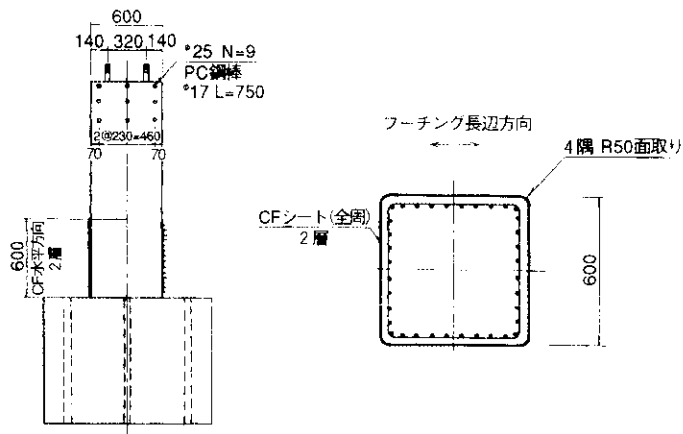


図-4(1) 実験供試体(No.13)

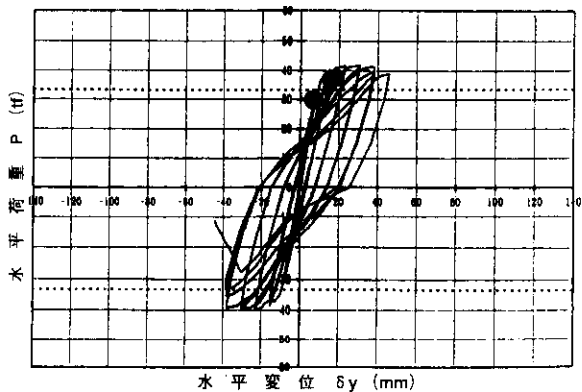


図-5(1) 荷重変位曲線(No.12)

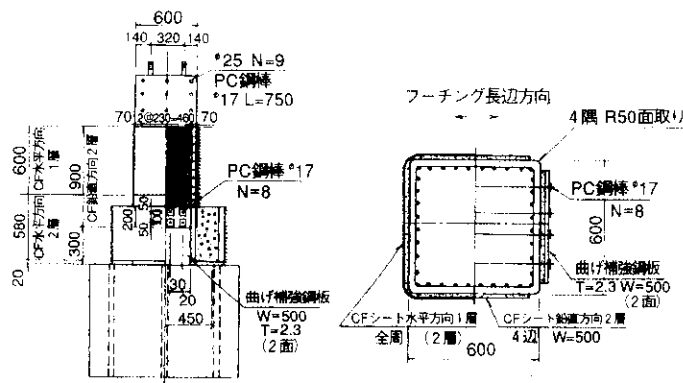


図-4(2) 実験供試体(No.15)

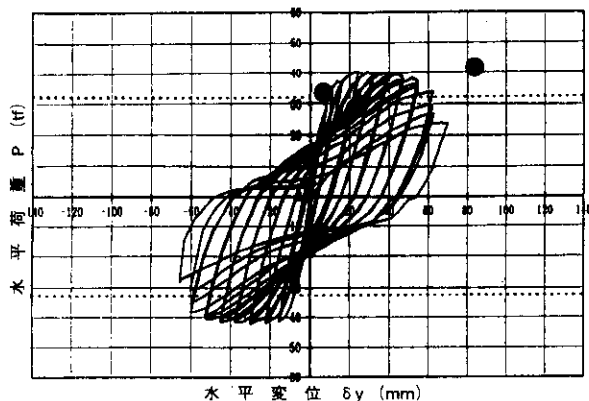


図-5(2) 荷重変位曲線(No.13)

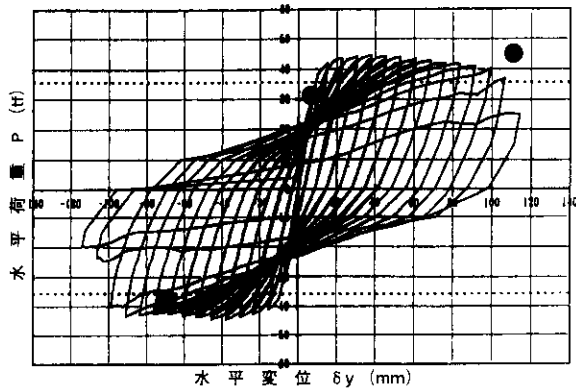


図-5(3) 荷重変位曲線(No.14)

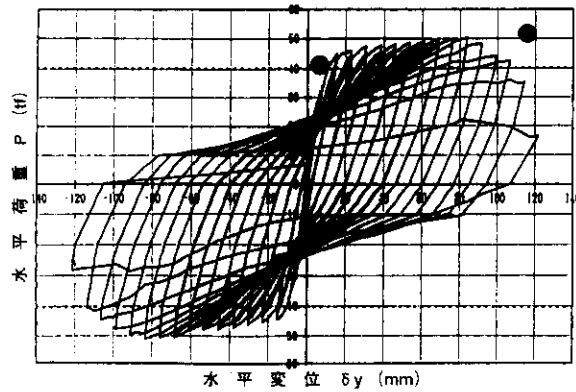


図-5(4) 荷重変位曲線(No.15)

様である。双方の実験でNo.13と異なり炭素繊維シートが破断しなかった原因は、ケーシングのコンクリート打設時に型枠として簡便的に用いたヒューム管強度が大きかったことによると考えている。

本節の実験では炭素繊維シートを用いたときの曲げ耐力補強の構造を実験的に確認することを主な目的とした。結果、No.15にて炭素繊維シートが主体の補強構造で耐力の増大をはじめて実現することができた。

4. 耐震設計における計算の手法

じん性補強では炭素繊維シートを降伏応力度比の帯鉄筋に換算して試算を行った。すなわち、 f_{yh} が等価となるようにそれぞれの補強材について等価な帯鉄筋換算断面を算出し重ね合わせ、拘束効果を考慮したコンクリートの応力ひずみ関係を算出した。

帯鉄筋（横拘束筋）体積比は、

$$\rho = \frac{4 \times A_h}{s \times b_f}$$

炭素繊維シートの場合の等価な拘束筋面積寄与分は、

$$A_h = n \times s \times t \times \frac{b_f}{B} \times \frac{f_{cf}}{f_{yh}}$$

さらに、炭素繊維シートでケーシング補強を行う場合の等価な拘束筋面積寄与分は、

$$A_h = n \times s \times t \times \frac{b_f}{D_{tube}} \times \frac{f_{cf}}{f_{yh}}$$

これを既設の A_h に重ね合わせることとする。

次に、せん断耐力については、示方書に従えばコンクリートと鋼材の重ね合わせと考え、

$$P_s = S_c + S_s$$

$$S_c = \tau \times B \times d_w$$

$$S_s = A_v \times f_{yh} \times \frac{d_w}{1.15 \times s}$$

基準供試体では、 $A_v = 2 \times A_h$

炭素繊維シートの時、

$$A_v = 2 \times n \times s \times t \times \frac{D}{d_w} \times \frac{f_{cf}}{f_{yh}}$$

ケーシング補強の時、

$$A_v = 2 \times n \times s \times t \times \frac{D_{tube}}{d_w} \times \frac{f_{cf}}{f_{yh}}$$

を既設の A_v に重ね合わせる。

ここで記号は、 A_h ：帯鉄筋断面面積、 s ：帯鉄筋間隔、 b_f ：コアの幅、 n ：炭素繊維シートの層数、 t ：炭素繊維シートの層厚、 f_{yh} ：帯鉄筋の降伏強度、 f_{cf} ：炭素繊維シートの強度、 B ：橋脚の幅、 τ ：コンクリートのせん断許容力、 D ：橋脚の奥行き、 D_{tube} ：ケーシングの直径、 A_v ：せん断耐力に寄与する鉄筋総断面面積、 d_w ：コアの奥行きである。ただし、降伏強度、強度では規格値をとる。

資料³⁾では、せん断耐力の算定に際して、実験結果に基づく別の算式を提案している。そこでは 1) 変形とともに低減するコンクリートのせん断耐力への影響 2) 軸力によるせん断耐力への影響において上式と異なっている。ただし、炭素繊維シートの換算においては変わらない。ケーシング補強断面では、曲げに関しては角形断面であるが、拘束効果に関しては円形断面扱いを行った。変形については図-6のようなひずみの境界条件を与えた。コントロールポイントは軸力と曲げの

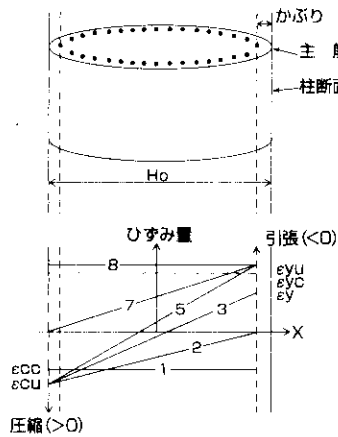


図-6 ひずみ分布

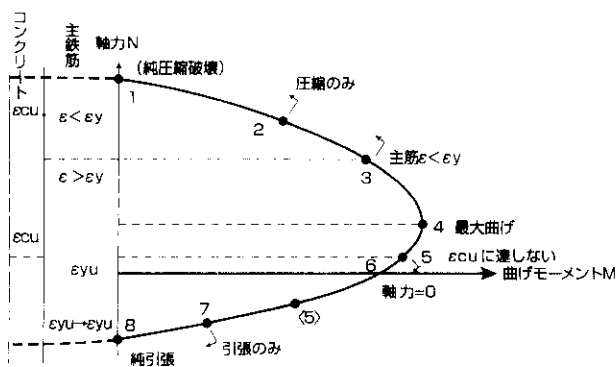


図-7 最大変位に着目した曲げと軸力の相関曲線

相関曲線上にて場合分けされ、図-7のように考えた。図-7は最大変形を与える時の相関曲線と考えるべきである。復旧仕様に示されたポストピークのある場合の応力ひずみ曲線では、必ずしも最大ひずみを与えるときが、最大の断面力を与えるとは限らない。ただし、このときに確実に最大変形を発生するほか、最大の断面力との差異は小さい。このように場合分けすることで、繰り返し計算を行うときの収束が良好になる。

5. 結論

一連の実験を通じて炭素繊維シートを用いたRC単柱橋脚のじん性補強、耐力補強に関して、実用的な範囲内で施工方法の見通しをつけることができた。またそれぞれの解析法についても実用的な範囲内ではほぼ妥当な見通しを持つことができた。設計法はモデルでの挙動のみならず、材料、施工などの現場における不確定要因を含んだものであ

るべきで、実験や解析による根拠があることが望ましい。耐震補強、特に現有の構造物で耐力増加を伴う場合などには本来さまざまな見解があるべきであるが、今回の実験結果より、施工法に制約がある場合にも通達などへの対応に見通しを得たと言っていると考えている。

あとがき

以上の記述の中で、降伏時、終局時の荷重と変形には、基部の弾性変形、抜けだしの影響を特別には考慮していない。主筋ひずみをフーチング内でも測定したところ、特に過大なひずみは発生しないことにより、変形の大部分は塑性ヒンジと想定される領域に集中していると考えるのが妥当と考えるためである。塑性ヒンジを考えることでいくばくかの抜けだしの影響も含めて考えることができる。じん性の改善は、帯鉄筋あるいはそれに等価な部材による拘束状態でのコンクリートの応力ひずみ曲線において、終局ひずみの改善によるところが大きい。ところが、終局ひずみの改善は曲げが支配的な試験と一軸圧縮試験とでは、メカニズムの違いから同一には論じられないとも考えられる。今後詳細なモデルの設定では明らかにされなければならない。実験2の炭素繊維シート補強実験は土木研究所、実験3は大阪工業大学において実施された。

参考資料

- 1) 炭素繊維による鉄筋コンクリート橋脚の補強方法 設計・施工要領(案), 日本道路公団試験研究所橋梁研究室, 1997.2.
- 2) 壁式橋脚のRC耐震補強及びCFRPによるRC耐震補強の実験, 第29回阪神高速道路公団技術研究発表会, 1997.2.
- 3) M. J. N. Priestley, F. Seible, Y. H. Chai; Design Guidelines for Assessment Retrofit and Repair of Bridges for Seismic Performance, University of California San Diego, August, 1992.