

報告 RC 柱の補強効果の解析的な検討

古賀秀幸*¹、児島孝之*²、青柳計太郎*³、栗本雅裕*⁴

要旨：RC 橋脚に対する各種補強工法に関する研究は、補強の有無をパラメータとした静的・動的な加力実験を中心に行われている。ここでは既設RC 橋脚をモデルとした補強供試体による静的加力実験結果に対して、有限要素法を適用し補強効果の数値解析的なアプローチを行った。その結果、補強鋼板等の補強材を適切にモデル化することにより、実験時の挙動を2次元モデルによってシミュレートすることができ、RC 各種工法の補強効果を解析的な方法で評価できる見通しが得られた。

キーワード：有限要素解析、RC 橋脚、補強工法

1. はじめに

平成7年1月17日に発生した阪神・淡路大震災により得られた知見をもとに、数多くの既設橋脚に対する補強が実施されている。各種補強工法が施されたRC 橋脚の挙動や耐荷力性状に関しては明らかではない事項が多く、各種関連機関において実験研究が現在も精力的に行われている。これらの補強効果に関する研究は補強の有無をパラメータとした静的・動的な加力実験を主に行い、実験結果を比較検討することにより補強工法の特性を把握したものが多く、数値解析的に既設部材と補強部材の力の分担や適応性に着目したアプローチは少ない。

道路橋示方書の改訂に伴い今後、橋脚設計において橋脚の断面耐力や挙動を精度良く効率的に求めることが必要とされている。同様に、既設コンクリート橋脚の補強設計においても、補強効果やその挙動および耐力におよぼす影響等を容易に把握できる手法が必要となってくる。

本検討はコンクリート橋脚に対する補強効果のメカニズムを明らかにすることを目的とし、補強の有無と補強工法をパラメータとした2次元弾塑性有限要素解析を行い、既往の実験結果と比較することにより、補強部材の既設部材に与える影響を把握するとともに、補強効果を解析的に評価する手法について報告するものである。

2. 解析対象とした実験結果

2.1 対象橋脚

本解析で対象とした実験供試体の形状および載荷方法の概念を図-1に示す。また、実験供試体および実験供試体のモデルの概要を表-1に示す。実験供試体は「日本国有鉄道：耐震設計指針(案)・解説、昭和54年9月」以前に設計された標準的な橋脚およびその補強橋脚をモデルとした。モデルは鉄道RC ラーメン高架橋脚の鉄筋コンクリート柱とし、破壊性状および加振機的能力等を勘案し5/8模型とした。供試体形状の設定は曲げ耐力をせん断耐力の1.2倍以上として設計した。

*1 (株) オリエンタルコンサルタンツ 東北支社 総合技術部 (正会員)

*2 立命館大学 理工学部 教授 工博 (正会員)

*3 (株) 銭高組 東京本社 土木本部 生産システム部 技術課課長

*4 (株) 奥村組 技術研究所 構造研究室 主任研究員

対象補強工法には、せん断補強工法に多く採用されている鋼板接着工法、新素材を用いた炭素繊維シート補強工法、最近提案されているスパイラル筋による巻立て工法の3種類とした。また、その比較として補強前の無補強供試体と耐震設計指針(案)により設計された供試体とした。

表-1 実験供試体の概要

	供試体モデル形状	実験供試体形状
断面形状	80cm×80cm	50cm×50cm
設計基準強度	$f'_{ck}=20.6\text{N/mm}^2$	$f'_{ck}=20.6\text{N/mm}^2$
主鉄筋	D32(SD295)×20本	D22(SD295)×20本
帯鉄筋	φ9(SR235)c/c150	φ6(SR235)c/c94
橋脚高さ	3m～6m	1.5m
せん断スパン比	3	3

表-2 実験結果の概要

	旧基準 無補強	スパイラル 補強	鋼板 補強	炭素 素強	新基準 無補強
降伏荷重 P_y	286.4	303.0	304.0	289.3	301.1
降伏変位 δ_y	0.92	0.79	0.85	0.92	0.89
最大荷重 P_u	353.0	382.5	372.7	381.5	372.7
終局変位 δ_u	2.3	9.0	9.0	12.0	7.5
じん性率	2.5	9.8	10.0	13.2	8.1

注) 単位: 荷重(KN)、変位(mm)

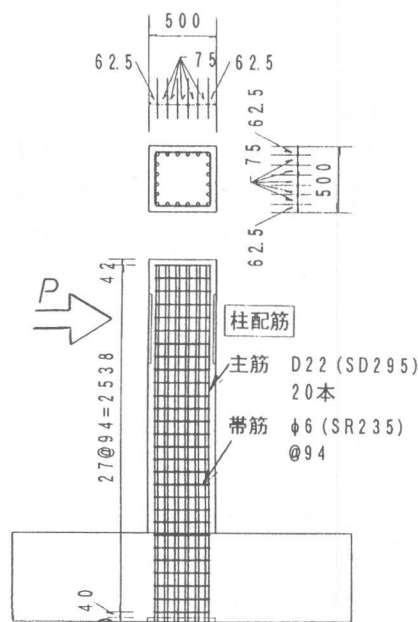
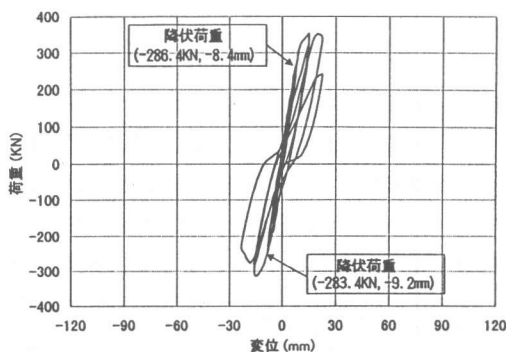


図-1 供試体形状と荷重方法

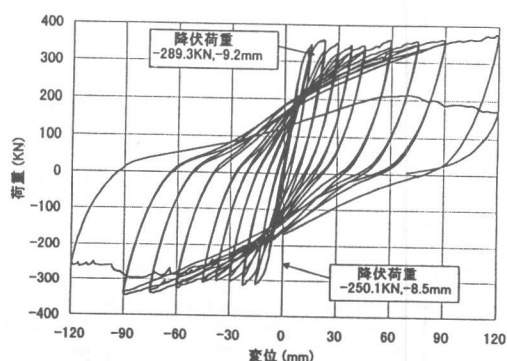
2.2 実験結果

試験供試体における実験結果を表-2に示す。また、実験結果の一例として無補強供試体と炭素繊維補強供試体の荷重～変位曲線を図-2に示す。実験における旧基準無補強供試体の破壊形態はせん断破壊であった。

しかし、無補強供試体を炭素繊維シートや鋼板接着工法によって補強した結果、降伏後の耐力は一定のまま変形が増大し曲げ圧縮破壊を示した。また、降伏耐力や降伏時変位は補強工法の種類により大きな差はなく、変形はいずれも増大した。なお、各供試体の差異はせん断補強材によるせん断補強効果と拘束効果の差異によるものと考えられる。



(a) 旧基準無補強供試体



(b) 炭素繊維補強供試体

図-2 実験結果における荷重～変位曲線

3. 解析方法の概要

(1) 解析方法

解析方法は材料の非線形性を考慮した2次元弾塑性有限要素解析とし、実験と同様に外力として強制変位を与えた。解析対象は上記試験供試体のうち、無補強供試体、鋼板接着工法と炭素繊維接着工法の2種類の補強工法とした。配筋と補強材の配置から、要素分割を図-3に示すとおりモデル化した。なお、橋脚外側の補強鋼材や炭素繊維のモデル化の考え方を図-4に示す。

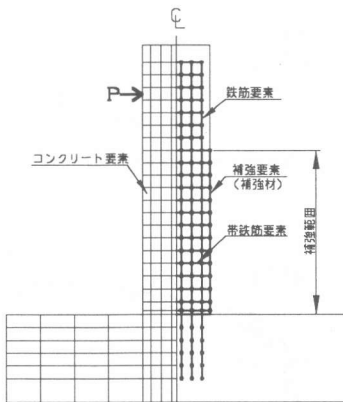


図-3 供試体モデル

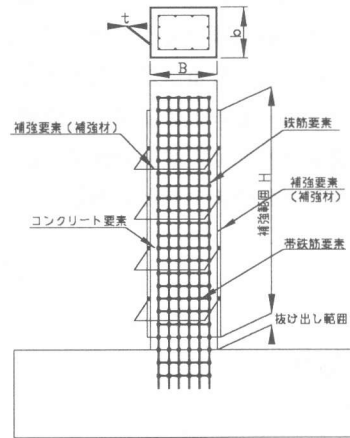


図-4 モデル化の考え方

(2) 材料特性

材料特性は以下のように設定した。また、付着要素については考慮していない。

- ①コンクリートのヤング係数と圧縮強度は載荷実験時の圧縮強度試験から得られた値を用いた。破壊の判定条件としてモール・クーロンの破壊条件を用い、圧縮破壊後はヤング係数を1/1000に低減させた。また、引張破壊後は引張応力を解放した。
- ②鉄筋は主鉄筋および帯鉄筋をトラス要素でモデル化するものとし、引張強度試験結果から得られた結果によりパイリニアで示した。また、補強鋼板も同様とした。
- ③炭素繊維シートは降伏点がないため、試験結果による値を直線で示した。

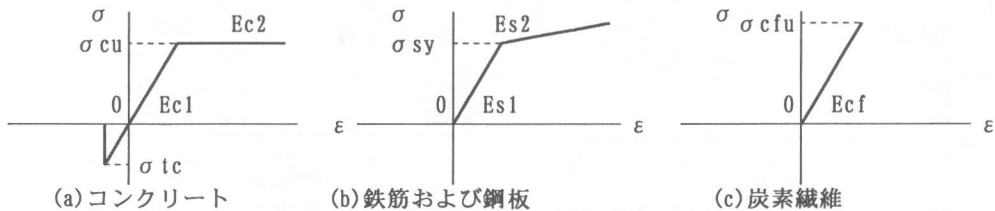


図-5 主要材料の材料特性

4. 解析結果と実験結果の比較

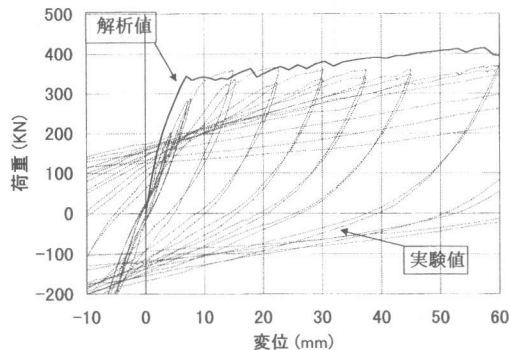
(1) 荷重～変位曲線

無補強供試体の荷重～変位曲線について実験値と解析結果との比較を図-6に示す。無補強供試体における解析結果は、初期剛性がやや高いが鉄筋の降伏やコンクリートの破壊による橋脚剛性の低下を表現しており、荷重～変位曲線は実験結果とは概ね一致している。このため、材料特性は簡易な形で表現したものの妥当であったと考えられる。

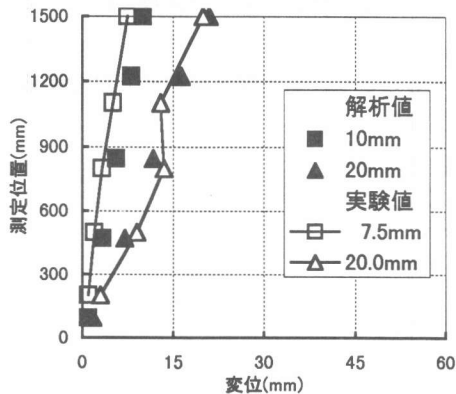
鋼板接着補強供試体の荷重～変位曲線を実験値と解析結果とを比較して図－7に示す。

また、同様に炭素繊維補強供試体の荷重～変位曲線を図－8に示す。両者の結果は無補強供試体とほぼ同様な傾向であり、荷重～変位曲線は実験結果と概ね一致している。

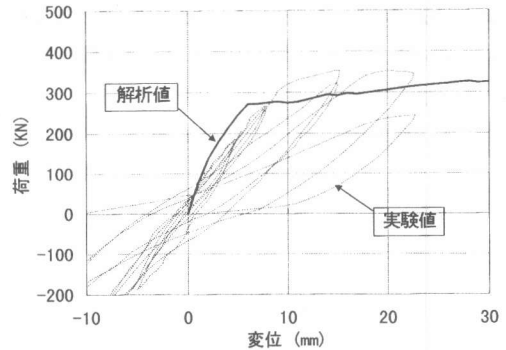
ただし、解析は交番载荷ではなく一方方向载荷としたため、荷重は実験のように低下せず、供試体が降伏したのちも荷重は増加傾向となっている。このため、解析上の終局点は実験時における終局変位または引張側の鉄筋が終局ひずみを越えた場合を終局時と定義した。



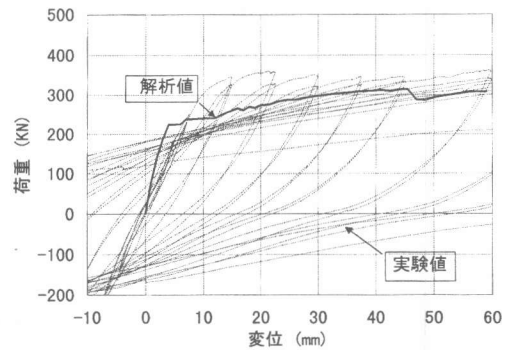
図－7 鋼板補強供試体の荷重～変位曲線



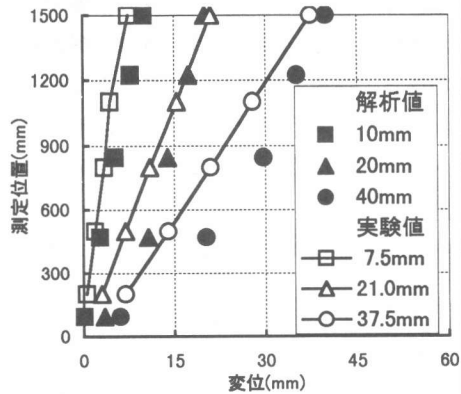
図－9 無補強供試体の変位分布



図－6 無補強供試体の荷重～変位曲線



図－8 炭素繊維補強供試体の荷重～変位曲線



図－10 鋼板接着補強供試体の変位分布

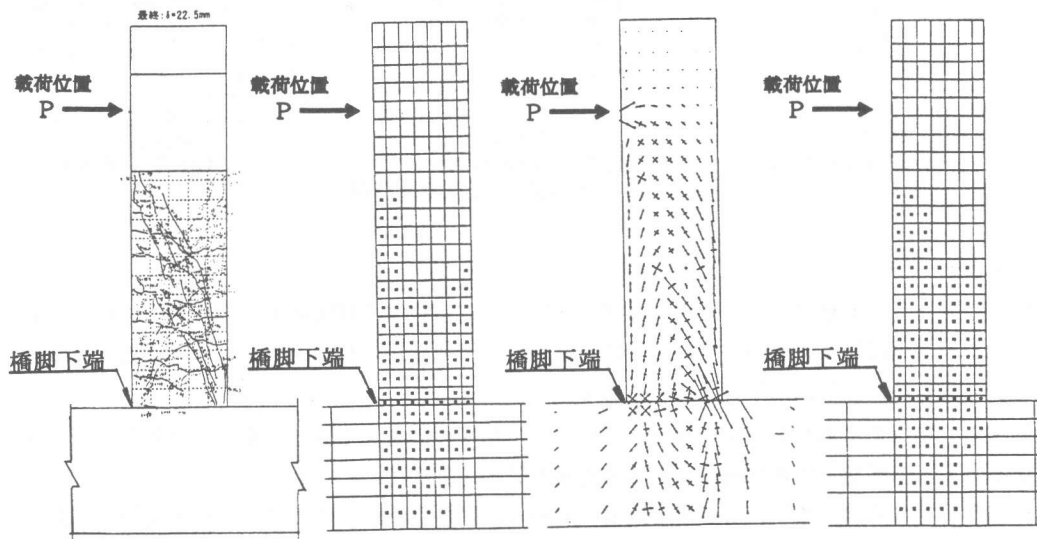
無補強供試体の変位分布を図－9に、同様に鋼板接着補強の変位分布を比較して図－10に示す。全ての結果で柱の変位は実験値および解析値とも、ほぼ直線であり下端で曲げ降伏し、上部の変形はほとんど変形量に影響していない。また、炭素繊維補強の結果も同様である。

(2) ひびわれ性状および破壊形式

実験においてひびわれが明確となるのは無補強供試体のみである。無補強供試体の実験結果と解析結果を比較して図－11に示す。解析結果における破壊時の主応力図、破壊と判定されるコンクリートの位置から、ひびわれ性状および圧縮コンクリートの圧壊性状は実験結果とほぼ一致

している。なお、解析結果における破壊の進行パターンは以下のとおりである。

変位7.5mmでは無補強供試体は補強供試体に比較して圧縮破壊が多く生じている。変位20mmでは部材全体が曲げ変形をするため圧縮破壊が高さ約90cmの位置にまで至っている。このため、無補強供試体の破壊形態は引張および圧縮破壊が柱の端部から柱の中心に進行する形態となる。これに対し、補強供試体は破壊領域が柱の下部から柱の先端に進行する破壊となっている。

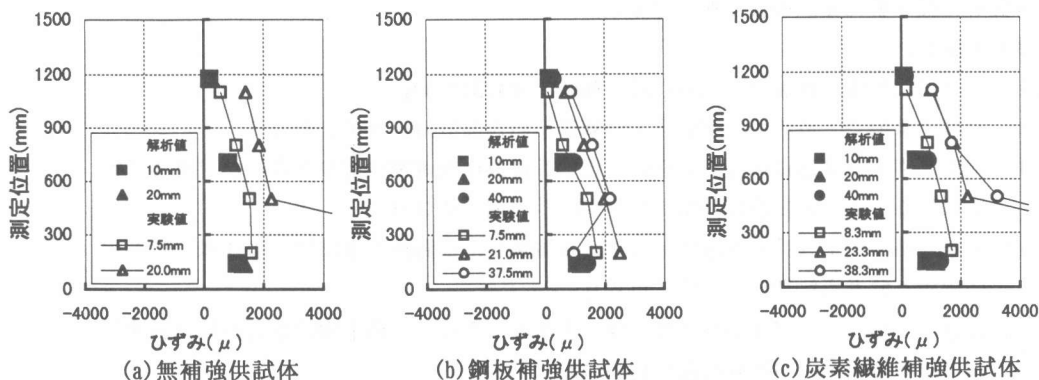


(a) 無補強ひびわれ図 (b) 無補強破壊判定要素 (c) 無補強主応力図 (d) 補強破壊判定要素
図-1-1 ひびわれ性状と破壊位置

(3) 主鉄筋および帯鉄筋のひずみ

実験結果および解析結果における主鉄筋のひずみ分布を図-1-2に示す。実験結果と比較して解析値の主鉄筋のひずみは小さくなっている。無補強供試体と補強供試体の主鉄筋の下端のひずみを比較すると、補強による影響は小さくほぼ同一である。

実験結果および解析結果における帯鉄筋のひずみ分布を図-1-3に示す。実験結果と同様に解析結果における帯鉄筋のひずみは加力位置と橋脚下端との間でばらついている。また、無補強供試体では実験結果および解析結果とも橋脚下端では帯鉄筋に大きなひずみが発生している。しかし、補強供試体においては補強鋼材がせん断力を負担することから、同一変位における帯鉄筋のひずみは無補強供試体と比較して小さくなっている。



(a) 無補強供試体 (b) 鋼板補強供試体 (c) 炭素繊維補強供試体
図-1-2 主鉄筋のひずみ分布

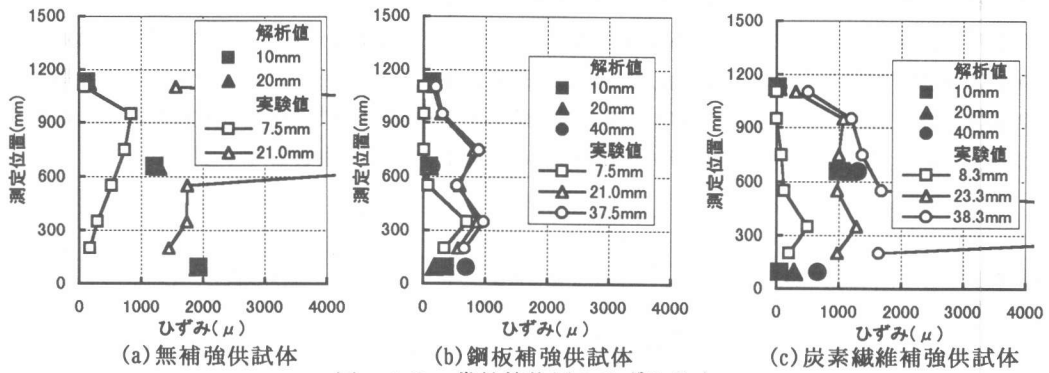


図-13 帯鉄筋位置のひずみ分布

5. まとめ

既設コンクリート橋脚をモデルとし補強が実施された実物大橋脚供試体（5／8モデル）による静的な加力試験結果に対して有限要素法を適用し、補強効果の解析的な検討を行った。その結果により得られた知見は以下のとおりである。

- ①簡易な材料特性により有限要素解析を行ったが、比較的精度良く部材の変位、コンクリートの破壊挙動および耐力等の部材の挙動を把握することができた。
- ②詳細な解析にあたっては付着要素は重要であると考えられるが、今回対象とした実物大モデルによる解析では、これらの要素を考慮することなく解析ができたと考える。
- ③コンクリートの強度の影響により部材の挙動が大きくかわるため、解析においてはコンクリートの破壊後の特性（残留強度）を評価する適切な構成則を考える必要がある。

構造解析における解析のモデル化については、設計者の判断に任せられていることが多い。補強工法の検証等へ応用する場合、コンクリートの実強度と設計強度との差異等、このようなモデル諸元の設定は十分考慮して行う必要がある。また、今後、付着要素やジョイント要素による抜け出しを加えた解析方法との比較および交番載荷、さらに、3次元の補強効果を2次元化する場合のポアソン比の影響により発生する加力直角方向への応力の影響の有無について検証する必要がある。

なお、本報告は日本コンクリート工学協会近畿支部の土木コンクリート構造物の震災対策に関する調査研究委員会（藤井學委員長）第三分科会（児島孝之主査）での活動[5]の一部であることを付記し、関係者に謝意を表すものである。

【参考文献】

- [1] 日本国有鉄道：耐震設計指針(案)・解説、昭和54年9月
- [2] 日本道路協会：道路橋示方法書・同解説V耐震設計編、平成2年2月
- [3] 兵庫県南部地震道路橋震災対策委員会：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および復旧仕様の解説(案)、平成7年2月
- [4] 日本道路協会：「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)、平成7年6月
- [5] 日本コンクリート工学協会近畿支部：土木コンクリート構造物の震災対策に関する調査研究委員会・中間報告書、1995.12