

論文 補強したRC橋脚の交番載荷実験シミュレーション

田中 良弘^{*1}・藤井 学^{*2}・安田 扶律^{*3}・畠 明仁^{*4}

要旨：震災により損傷を受けたRC橋脚を模擬して、無補強および鋼板併用RC巻立て工法による2種類の供試体を対象とした正負交番載荷実験を実施した。また、実験結果から鋼板併用RC巻立て工法による補強法は、耐力の増加や韌性率の向上を期待できることが示された。柱基部での柱鉄筋の抜け出しを考慮した非線形回転バネを用い、鋼板を等価な帶鉄筋に換算しコア・コンクリートの横拘束効果を考慮する式を用いて、ファイバーモデルを基本とする解析により、柱筋が座屈して急激な耐力低下を生ずる前まで、実験結果を比較的精度良く再現することが可能であった。

キーワード：耐震補強、鋼板併用RC巻立て、主鉄筋の抜け出し、ファイバーモデル

1. 序論

兵庫県南部地震の教訓から、橋梁全体としての耐力と変形性能を向上させて、ねばり強い構造とするための耐震補強技術の確立が求められている。損傷を受けたRC橋脚の復旧や既設橋脚の耐震補強に当たり注意すべき点は、基礎の耐力とのバランスを考慮した橋脚躯体の曲げ耐力の補強設計にある。本文では、鋼板で補強されたRC橋脚の交番載荷挙動を合理的に予測する手法の確立を目指し、無補強および鋼板併用RC巻立て工法による供試体をそれぞれ1体づつ用いた正負交番繰り返し載荷実験による補強効果を考察すると共に、ファイバーモデルに基づく解析手法を用いた耐力および変形性能の解析を通して補強効果の予測法について検討する。

2. 交番載荷実験

2.1 実験供試体

実験供試体は、図-1に示すような断面寸法が600x600mmの無補強供試体（基準供試体）と断面寸法が700x700mmの鋼板併用RC巻立て工法の供試体（鋼板・RC供試体）で、基部から載荷点までの高さは3.01m、せん断スパン比は5.0である。基準供試体の柱鉄筋はD10(SD295)を二段に配筋した構造で柱鉄筋比は1.58%、また帶鉄筋はD6(SD295)を20cmピッチで二重に配筋し、端部はフックで定着した。帶筋比は0.11%である。鋼板・RC供試体は、1) 基準供試体の外側に補強のための柱鉄筋を後施工樹脂アンカーで既設のフーチングに定着し、これに帶鉄筋を一重に配筋、2) 1.6mm厚さの鋼板(SS400)を加工して正方形断面（内径700x700mm）のジャケットを組み立て、載荷時に鋼板とフーチング上面とが接触して鋼板が座屈しないようにフーチング上面より50mmの間隙を設けて配置、3) 基準供試体と鋼板との隙間に無収縮モルタルを注入する。補強後の鋼板・RC供試体の全柱鉄筋比は1.6%、帶鉄筋比は0.2%となった。コンクリートは、いずれも早強セメントを用いたGmax=20mmのレディーミクストコンクリートを使用した。鉄筋や鋼板の材料特性を表-1に示す。

* 1 大成建設(株)技術研究所 構造研究部土木構造研究室室長、Ph. D. (正会員)

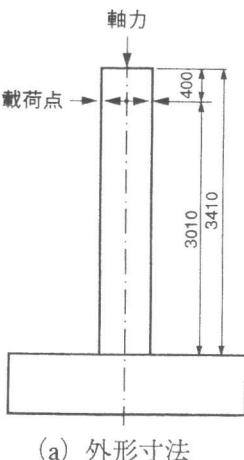
* 2 京都大学教授 工学部土木工学科、工博 (正会員)

* 3 阪神高速道路公団 工務部設計課係長、工修 (正会員)

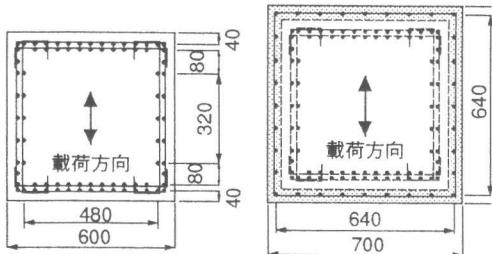
* 4 大成建設(株)技術研究所 構造研究部土木構造研究室研究員、工修 (正会員)

表-1 材料特性

		基準供試体	鋼板・RC
コンクリート	初期剛性 (kgf/cm ²)	2.75E+05	3.01E+05
	圧縮強度 (kgf/cm ²)	365	416
主鉄筋	剛性 (kgf/cm ²)	1.81E+06	
	降伏強度 (kgf/cm ²)	3890	
帶鉄筋	剛性 (kgf/cm ²)	1.85E+06	
	降伏強度 (kgf/cm ²)	3343	
モルタル	圧縮強度 (kgf/cm ²)		464
	初期剛性 (kgf/cm ²)		2.00E+05
鋼板	剛性 (kgf/cm ²)		2.12E+06
	降伏強度 (kgf/cm ²)		2964



(a) 外形寸法



(b) 基準供試体断面

図-1 実験供試体の諸元

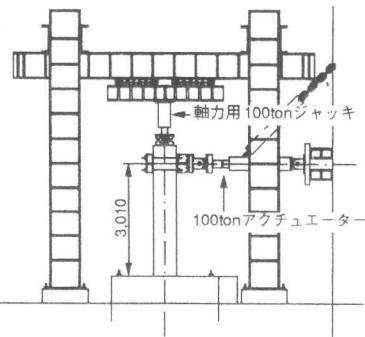
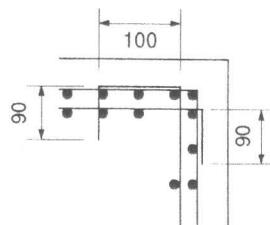
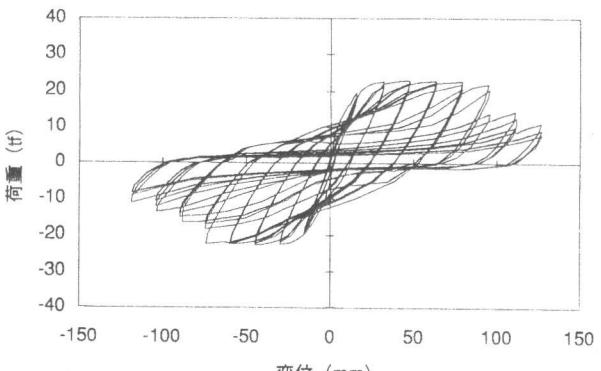


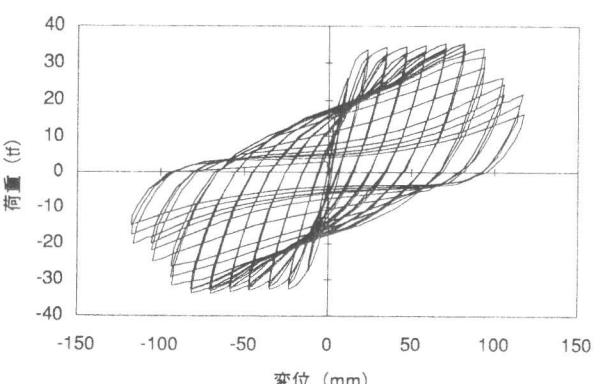
図-2 載荷方法

2.2 載荷方法

載荷方法は、図-2に示すように実橋脚に作用している軸応力度（基準供試体では15.3kgf/cm²、鋼板・RC供試体では11.5kgf/cm²に相当）の影響を考慮して柱天端に油圧ジャッキで55tfの軸力を加えながら、2台のアクチュエータにより交番水平力を載荷した。事前計算で求められた降伏荷重Pyまでは荷重制御により加力し、降伏荷重以降は変位制御で降伏時変位δyの整数倍の変位で各3サイクルの正負交番載荷を行い、耐力が最大荷重の50%を下回るまで行った。降伏荷重Pyは基準供試体では最外縁鉄筋が降伏する荷重、鋼板・RC供試体では既設鉄筋と補強鉄筋の団心位置におけるひずみが降伏ひずみに達する荷重として求められている。測定項目は、載荷荷重、載荷点での水平変位、柱の水平変位の高さ方向分布、柱鉄筋、帶鉄筋、鋼板のひずみ量などである。



(a) 基準供試体



(b) 鋼・RC供試体

図-3 水平荷重-水平変位履歴曲線

3. 実験結果

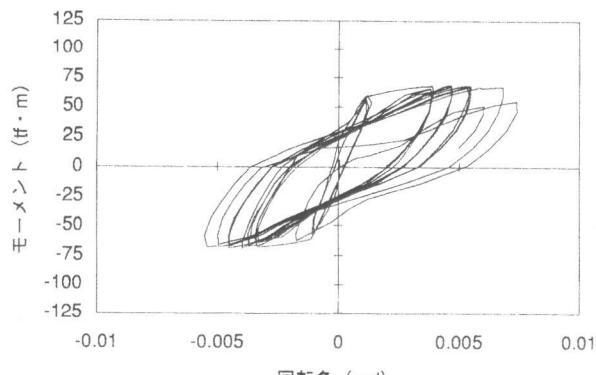
3.1 履歴曲線と耐力・変形性能

載荷点位置における水平荷重-水平変位の履歴曲線を図-3に示す。基準供試体では降伏荷重 $P_y=19.6\text{tf}$ を載荷したときの降伏変位 δ_y は15.3mmであった。最大荷重は $P_{max}=22.8\text{tf}$ であり、 $4\delta_y$ 載荷まではこの最大耐力が保持され、 $5\delta_y$ の繰り返し載荷時に主筋のはらみ出しに伴うかぶりコンクリートの剥落に至りコアコンクリートの損傷が始まり、さらに載荷を続けると基部の柱鉄筋が座屈して水平耐力が急激に低下した。最終変位の定義を最大荷重の80%時の変位とする、最終変位 $\delta_u=94.0\text{mm}$ となった。

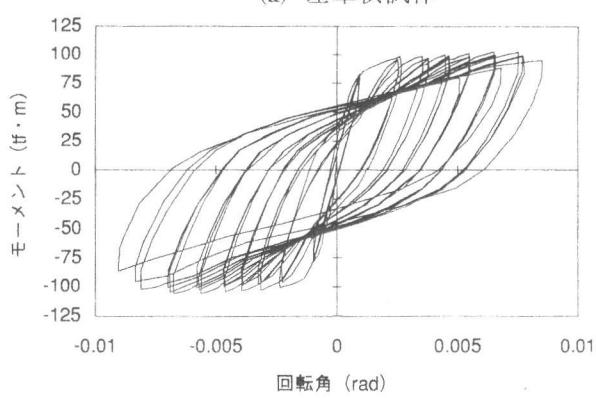
一方、鋼板・RC供試体は降伏荷重 $P_y=26.9\text{tf}$ に対する降伏変位は $\delta_y=11.6\text{mm}$ となり、基準供試体と比較すると小さい。従って鋼板併用RC巻立て補強により降伏時の割線剛性が1.81倍に高くなっている。また、最大荷重は $P_{max}=34.7\text{tf}$ 、最終変位 $\delta_u=101.2\text{mm}$ となり、 $7\delta_y$ 載荷まではこの最大耐力を維持している。 $8\delta_y$ の繰り返し載荷時に内部主筋のはらみ出しにより鋼板下部のはらみ出し、 $9\delta_y$ 以降の載荷に対しては鋼板下部のはらみ出しが急速に進展して水平耐力が低下した。補強により最大耐力が1.52倍、韌性率が6.1から8.7へと1.43倍に向上したことがわかる。

3.2 柱鉄筋の抜け出し量

本実験ではフーチング上面と橋脚載荷面上の固定点（フーチング上面から35mmの位置）との鉛直相対変位を測定している。橋脚上の固定点は橋脚を貫通させて取り付けた棒材により示されており、曲げひび割れ等の影響が少なくなるよう工夫されている。これをもとに柱筋の抜け出しによる橋脚基部の回転角を算定した。算定方法は橋脚の両載荷面の鉛直相対変位差を橋脚断面の1辺長で割ることにより求めた。この回転角と橋脚基部にはたらくモーメントとの関係を図-4に示す。基準供試体では $5\delta_y$ 程度まで、鋼・RC供試体では $8\delta_y$ 程度まで安定な履歴曲線を得ることが出来たことがわかる。



(a) 基準供試体



(b) 鋼・RC供試体

図-4 橋脚基部回転角-モーメント関係

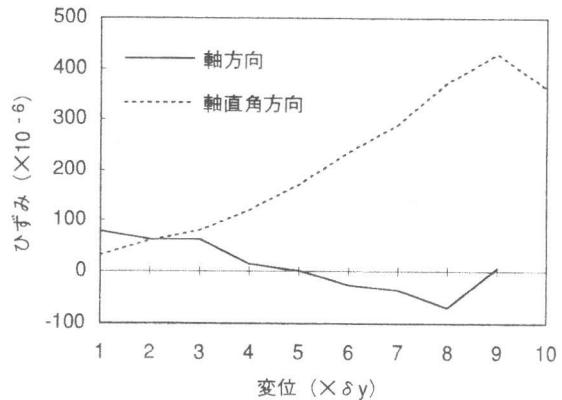


図-5 各載荷STEPにおける鋼板ひずみ

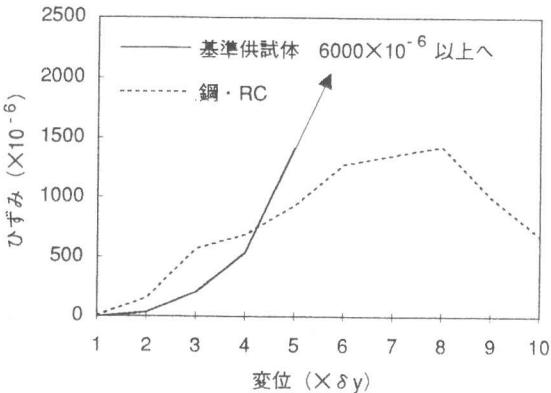


図-6 各載荷STEPにおける帶筋ひずみ

3.3 ひずみ性状

鋼板・RC供試体の各載荷ステップにおける鋼板の軸方向および軸直角方向のひずみを図-5に示す。ひずみは供試体の天端の変位が各載荷STEPの1サイクル目で最大となる時の値を用いている。軸方向のひずみはフーチング上面から200mm上方、軸直角方向のひずみはフーチング上面から400mm上方における測定値である。一方、図-6にはフーチング上面から400mm上方の位置において、基準供試体の帶筋および、鋼板・RC供試体の帶筋の各載荷ステップにおけるひずみ値を示す。これらの結果を考察すると以下のことが考えられる。

まず、鋼板の軸方向ひずみは+0.001～-0.001と小さく、柱鉄筋が降伏するような載荷荷重に対しても、鋼板には柱鉄筋のような引張力が発生していない。これは、鋼板がフーチングにアンカーされていないために、鋼板と外縁コンクリートとの間でスリップしているものと考えられる。これに比べ鋼板の軸直角方向ひずみは橋脚が終局破壊を迎える $9\delta_y$ 程度まで伸び続け、コアコンクリートを拘束するような引張力が発生している。一方、両供試体の帶筋ひずみ結果から、いずれの帶筋もコアコンクリートの拘束効果の役目を果たしているといえる。

4. 耐力および変形性能の解析

4.1 解析手法

解析手法としては、RC柱部材断面を幾つかの断面（ファイバー）に分割してその各々のファイバーに軸方向の応力-ひずみ関係を考えて、断面内の平面保持の仮定のもとに力の釣合をとり、荷重-変形関係を解析する、いわゆるファイバー・モデルの手法を基本的に用いる。今回の実験結果から、荷重-変位関係に柱基部における柱鉄筋の抜け出しによる載荷点の水平変位への影響があるので、柱基部において非線形回転バネを設定する。

コンクリートの履歴モデルは、図-7に示すように修正Kent & Park式を骨格曲線とし、除荷と再載荷のルールは初期剛性で内部曲線を描くものとした。鉄筋と鋼板については、Yamadaら¹⁾が用いた図-8に示すような

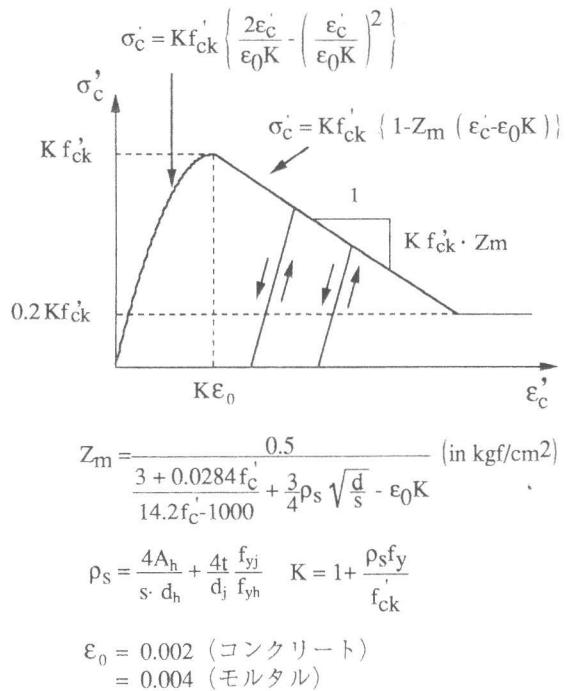


図-7 コンクリートの応力-ひずみ関係
(修正Kent&Park型)

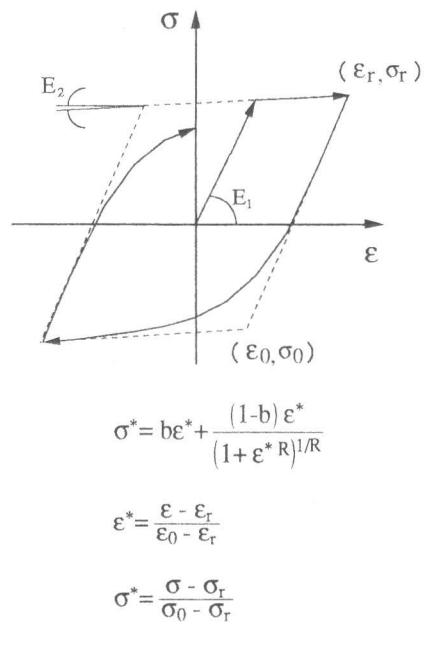


図-8 鉄筋の応力-ひずみ関係
(Menegotto-Pinto型)

Menegotto - Pinto モデルを用いた。柱部材のモデル化としては、図-9に示すように柱の基部にフーチングから柱鉄筋が抜け出す現象をモデル化した非線形回転バネを設け、柱を長さ方向に13の要素部材に分割した。柱基部付近は曲げによる曲率が大きくなり塑性領域になるため、要素長を短くした。

鋼板・RC供試体のモデル化にあたり修正Kent & Park式の軟化域における鋼板による横拘束効果をどのように考えるかが問題となる。今回は川島ら²⁾が提案する鋼板を帶鉄筋に換算する方法をとった。つまり、コアコンクリート部については帶鉄筋と換算された鋼板による拘束効果を考慮し、後充填したモルタルについては鋼板による拘束効果のみを考慮した。また、鋼板の柱鉄筋としての考慮は、軸方向のひずみ実験値から判断して、フーチングから柱径の長さまでは柱鉄筋としての効果を無視し、鋼板によるコンクリートの拘束効果のみを考慮し、それより上方では鉄筋と同様に剛性も考慮した。

柱筋の抜け出しによる柱基部の回転をモデル化するため、実験結果から求めた図-4に示す曲げモーメントと回転角の関係をトレースするような、M - θ の骨格曲線を求め、Degrading Tri - linear の履歴則を用いた。

4.2 解析結果と実験値の比較

基準供試体と鋼板・RC供試体の載荷点の水平荷重と水平変位の履歴挙動の実験値と解析値との比較を図-10に示す。いずれの比較においても、最大耐力を示す変位（基準供試体では4δy 載荷、鋼板・RC供試体では7δy 載荷）までは耐力と変位性能に対する解析値と実験値が良い一致を示している。主鉄筋がはらみ出し座屈の進展により急激に耐力低下を示す軟化領域での予測に対して今回の解析モデルがさらに硬化する結果を与えていたのは、鉄筋の座屈を考慮していないために鉄筋の硬化則の影響のみが出ていたためと考えられる。

柱基部における主鉄筋抜け出しをモデル化した非線形回転バネの実験値と解析値との比較を図-11に示す。鋼板・RC供試体の回転バネは比較的良好な一致を示すが、基準供試体の設定した回転バネは全体的に実験値よりも柔らかい結果を示している。しかし、3~4サイクル目位までは、両者とも実際の現象を捕らえていると考えられる。

図-12に、柱基部付近（フーチング上端から400mm 上方）における柱鉄筋のひずみ履歴

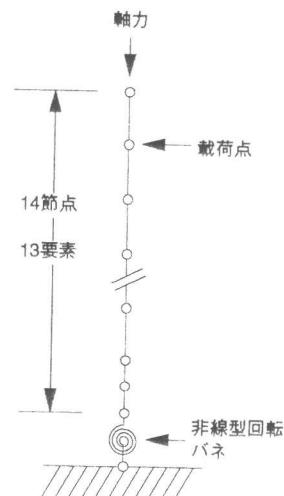
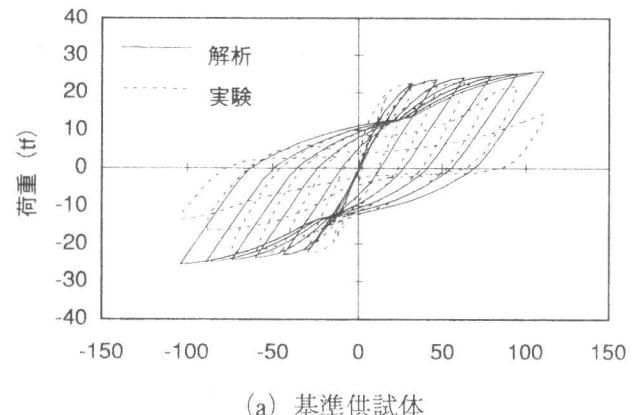
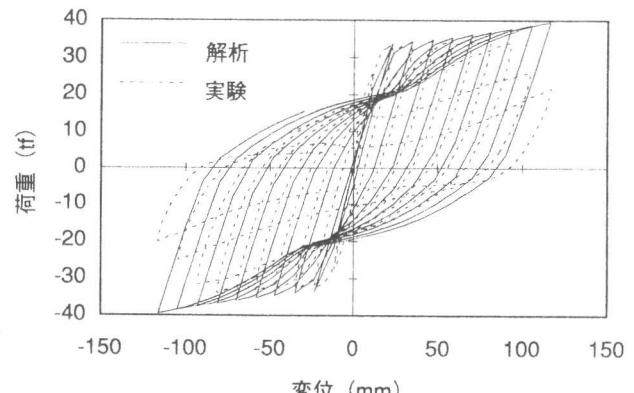


図-9 柱部材のモデル化



(a) 基準供試体



(b) 鋼・RC供試体
図-10 水平荷重-水平変位履歴

の実験値と解析値の比較を示す。解析値は、両供試体とも全体的に履歴特性を良く説明している。しかし、細部にわたり両者を比較すると、実験では載荷方向を+から-に転じた時に引張ひずみが依然として残留して圧縮ひずみにならないが、解析では圧縮ひずみがほぼゼロのひずみを示している。この傾向は、塑性領域が増大する載荷サイクルでより顕著になり、柱鉄筋の座屈現象の一部を示唆しているものと考えられる。

5. 結 論

本検討の結果をまとめると、以下の通りである。

- (1) 鋼板併用RC巻立て工法による補強により、耐力は補強前の1.52倍、韌性率は補強前の1.43倍に向上了した。また、降伏時の割線剛性の増加率は1.81倍であった。
- (2) 鋼板をフーチング上端より50mmの間隙を設けた本補強工法では、鋼板や補強した帶鉄筋のひずみ性状より、等価な帶鉄筋としてのコア・コンクリートの横拘束効果を期待できる。
- (3) ファイバーモデルに柱筋の抜け出しを考慮した非線形回転バネを組み合わせた解析モデルにより、柱鉄筋が座屈し始める終局状態の直前まで、無補強橋脚および鋼板で補強したRC橋脚の交番載荷履歴挙動を比較的良好に予測できる。

参考文献

- [1] Yamada,Y.,Iemura,H.,Matsumoto,T.,Ristic,D. and Ukon,H. : Stress-strain Based Inelastic Earthquake Response Analysis of Reinforced Concrete Frame Structures, Proc. of IABSE International Symp., pp.599-608, 1987.
- [2] 川島一彦、大塚久哲、中野正則、星隈順一、長屋和宏：鉄筋コンクリート橋脚の耐震補強法とその設計、橋梁と基礎、pp.27-34、1996.1.

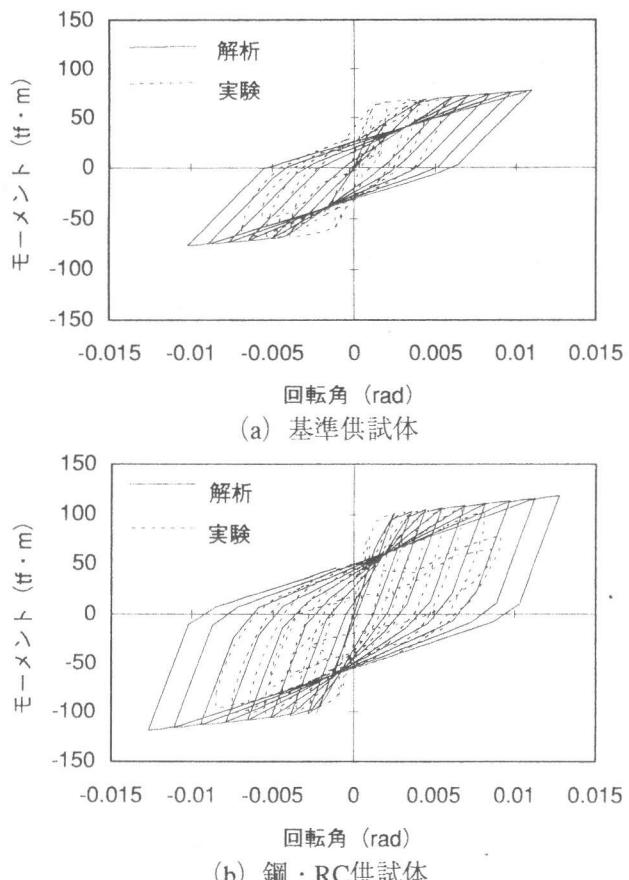


図-11 基部モーメント-回転角関係

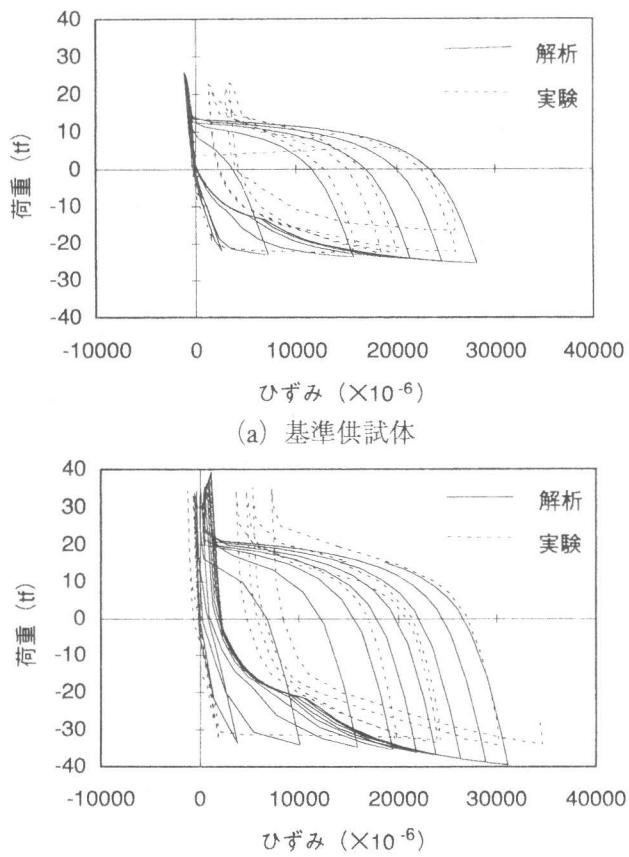


図-12 主筋の応力-ひずみ関係