論文　丸鋼を用いたRC部材の長期供用後の曲げ耐荷性状

大屋戸　理明[*1]　　黒岩　俊之[*1]　　早川　健司[*2]　　岡本　大[*1]

要旨：既存構造物の健全度の診断を行う際，力学的性能の評価が重要となる。一方，建設後年数を経た構造物は古い基準や仕様により設計されており，それらの中には軸方向鉄筋に丸鋼を使用して製作されたものも多い。そこで本研究では，長期供用された実物の鉄筋コンクリート部材を使用して載荷試験を行い，その結果から軸方向鉄筋に丸鋼を使用した部材が，腐食により劣化した場合の曲げ耐荷性状について考察を行った。

キーワード：既存構造物，丸鋼，腐食，曲げ

1.　はじめに

社会資本ストックの有効活用を考える場合，既存構造物の材料劣化が構造物に与える影響の評価が重要となる。この場合，まず鉄筋腐食により外観が損なわれることを防止する観点から検討される場合が多いが，腐食の程度が大きい場合には耐力や疲労等に関わる安全性の検討も重要となる。

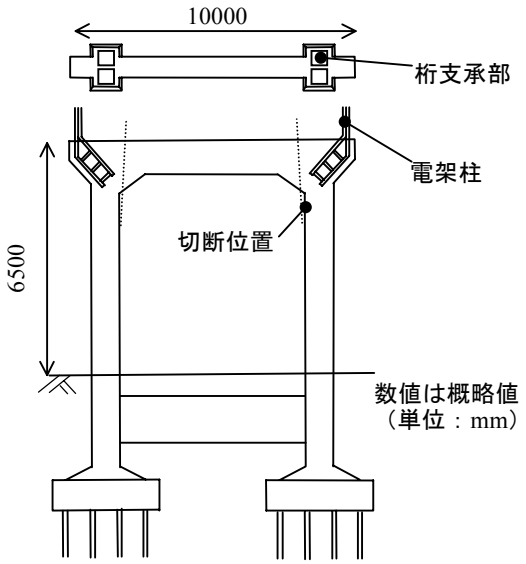
一方，既存構造物の中には古い規準類に拠って設計されているものがあり，現在の設計照査の前提と相違する材料や施工方法が使用されたものも少なくない。これらの構造物の中に，軸方向鉄筋として丸鋼を使用した構造物がある。丸鋼は 1960 年代以前に建造された構造物に使用されていたが，その後より付着強度の大きい異形鉄筋を使われることが多くなった。現在では新設の鉄道構造物の軸方向鉄筋には丸鋼はほとんど使用されておらず，照査手法も異形鉄筋の使用を前提とした体系に整理されつつある。しかしながら，丸鋼を使用した部材が腐食により劣化した場合の力学的性能について取り扱った研究例や，特に実際に長期間供用された鉄道構造部材を使用した研究例は少なく，これらの構造物の耐力等に関わる安全性の検討が必要と考えられる。

以上の経緯から，本研究では，丸鋼を用いて長期間供用され腐食した RC 部材の曲げ性状を確認することを目的とし，実物の鉄道構造部材を用いた曲げ載荷試験により検討を行った。

2.　試験体の概要

2.1　試験体の形状と構造上の特徴

対象構造物の一般図を**図－１**に示す。対象構造物は，温暖な都市部（沿岸地域でない）の鉄道構造物として使用されていた鉄筋コンクリート（RC）門型ラーメン橋脚である。本構造物から**図－１**に示す柱前面位置でワイヤーソーにて梁部材を切断し，試験体として使用した。なお，この橋脚は，柱頭の支承部で桁を支持する構造



図－１　対象構造物の一般図

*1 (財)鉄道総合技術研究所　コンクリート構造　工修　(正会員)
*2 東急建設(株)　技術研究所　土木研究室　工修　(正会員)

となっており，梁部材は自重以外の常時荷重を受けない。竣工は 1930 年代であり，試験時の供用年数はおよそ 70 年である。

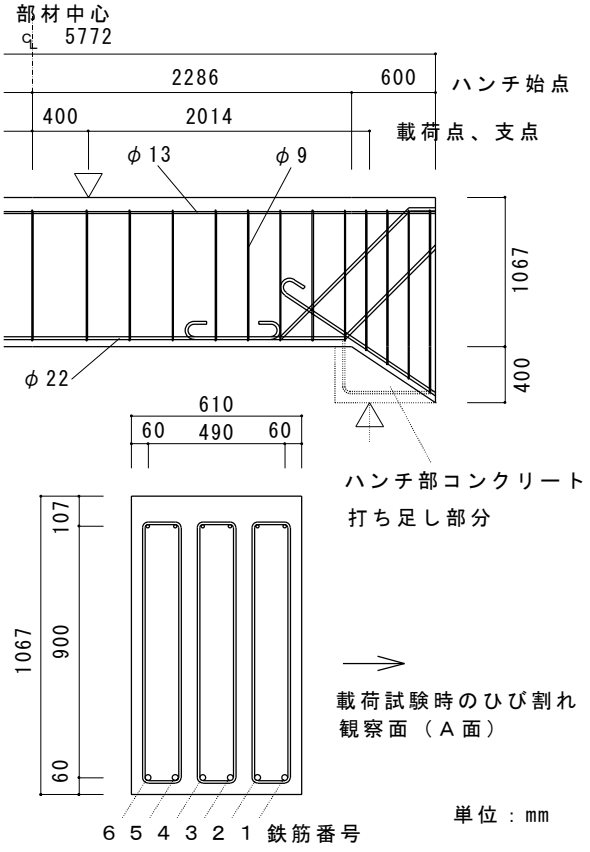
試験体の形状寸法および配筋を**図－２**に示す。同図には，以下の考察で参照する面名称，鉄筋名称，および載荷試験結果時の載荷点・支承位置を併記した。ここで示した配筋は，保存されていた設計図により確認し，鉄筋探査機（電磁波レーダー法，電磁誘導法）およびかぶりコンクリートを除去し鉄筋を露出させる方法により，要所的に配置を検証したものである。試験体の特徴を今日の一般的な鉄道 RC ラーメン高架橋・RC ラーメン橋台と比較して以下に記す。

(1)引張鉄筋比が 0.37%と小さい。

(2)引張鉄筋は，全数がスパンの約 1/4 位置の同一断面でフック付き重ね継手で継がれている。重ね継手は構造上の弱点になりやすいことから，このようなせん断力が大きく常時に引張応力が作用する部分に用いることは今日では一般的でない。

(3)軸方向鉄筋は端部で曲げ上げられている。地震時に生じる梁端部下側が引張となる曲げモーメントはハンチ筋で負担する。

(4)スターラップは，軸方向鉄筋を４本ずつ独立して取り囲んでいる。

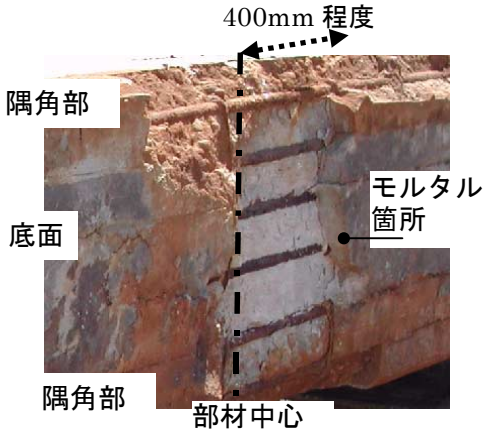


図－２　試験体の形状寸法および配筋

2.2　使用材料と劣化状態の調査

(1)　コンクリート

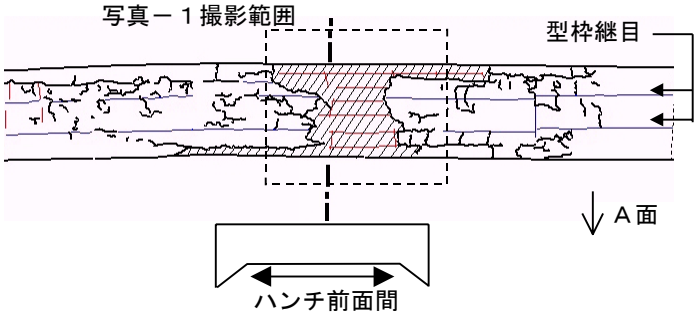
試験体には，対象構造物の上部（軌道床）からのものと見られる土砂が，側面と底面の隅角部に付着していた。このことより，試験体には常に水分が供給されやすい状態であったことが推察される。



（試験体を横に倒した状態で底面を撮影）

写真－１　試験体底面の剥離状況

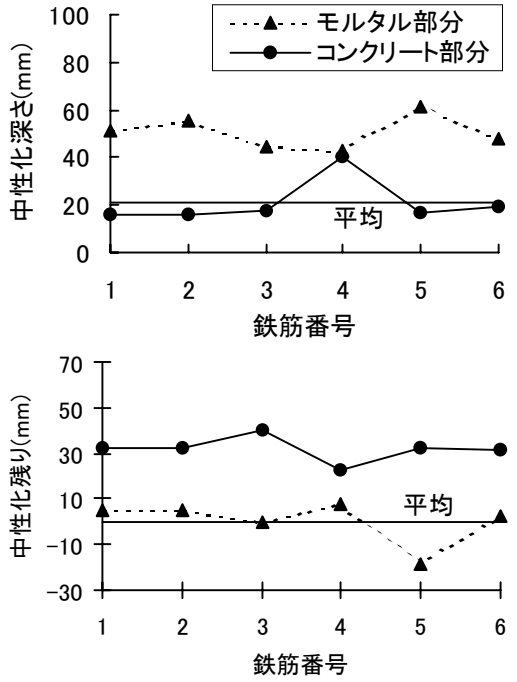
試験体の底面のコンクリートは，**写真－１**および**図－３**に示すように引張鉄筋の腐食によりスパン中央の一部が剥離しており，その周辺は粗骨材がないモルタル部分となっていた。一方，他の部位には，粗骨材を含んだ通常のコンクリートからなるかぶりの部分（コンクリート部分）



図－３　試験体底面のひび割れ状況（ハンチ前面間の拡大）

も存在していた。これらのいずれの部分も，試験体表面に観察される型枠継目が連続していること（**図－３**）から判断して，竣工当時から存在していたものと推察される。

載荷試験後にかぶりコンクリートを除去し，新たに露出させた断面にフェノールフタレイン溶液を噴霧することにより確認した中性化の状況を**図－４**に示す。中性化残り（かぶりと中性化深さの差）は，モルタル部分の全ての鉄筋について腐食の発生しやすい 10mm 以下である。このことから，この試験体は主にモルタル部分の中性化から鉄筋腐食が進行したと考えられる。

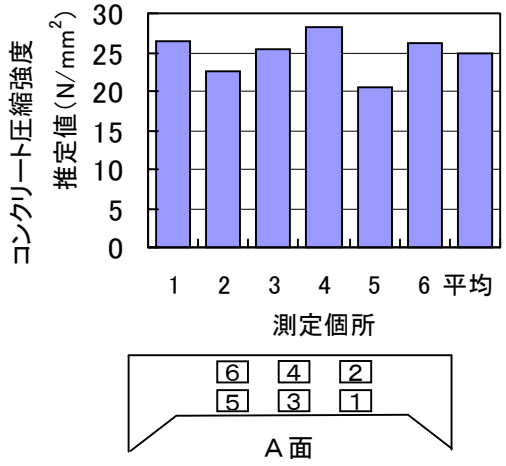


図－４　試験体底面の中性化の状況

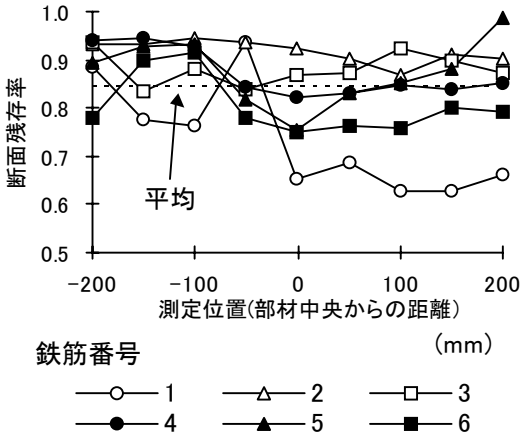
シュミットハンマーにより推定したコンクリート部分の強度を**図－５**に示す。測定は材料の均一な側面（A面）で行った。推定値（東京都建築材料検査局式による）は平均で 24.9 N/mm^2 である。

(2)　鉄筋

載荷試験後にかぶりコンクリートを除去し露出させて確認した，軸方向鉄筋の各断面における断面残存率を**図－６**に示す。ここで断面残存率とは，測定断面における鉄筋の断面積と健全な部分（φ22mm）の断面積との比とした。測定断面における鉄筋の断面積は，ノギスにより測定した各方向の鉄筋径の最小値を直径とする円の断面積とした。この仮定は，腐食要因がコンクリートの中性化であり，孔食等の局部的な著しい腐食が少ないことによる。隅角部となる鉄筋 No.1 の断面残存率が小さい（腐食が著しい）が，前述した上部から供給された水分の影響と，かぶりがモルタルであることの影響があるものと考えられる。全ての測定個所の平均断面残存率は 0.85 程度となり，この値に元の鉄筋の降伏点を乗じた見かけ上の降伏点は 261 N/mm^2 となった。ここで元の鉄筋の降伏点は，近隣の別の橋脚（同一鉄道高架橋）で実施された鉄筋抜き取り試験で得られた結果をもとにした。



図－５　シュミットハンマーによる
コンクリート強度推定値



図－６　軸方向鉄筋の断面残存率

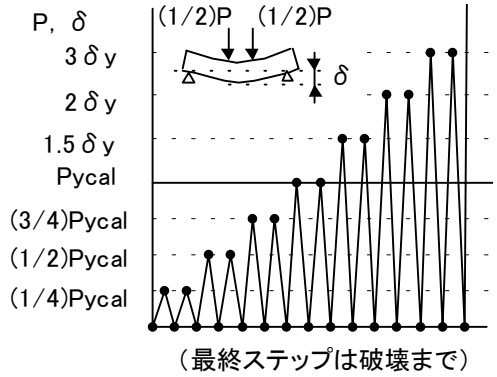
なお，スターラップの腐食については，載荷試験終了後にかぶりコンクリートを除去し露出させて，ほとんど腐食が進行していなかったことを確認している。

3. 載荷試験

3.1 試験方法

載荷は**図－２**に示す２点集中曲げ載荷とし，等曲げ区間を 800mm，せん断スパン比を２程度確保することとした。この場合，支点位置がハンチ箇所となるため，安定して反力が得られるように，**図－２**に示すようにずれ止めの補強筋を配置したうえ，新規に早強コンクリート（16 日強度で 29.4 N/mm^2）を打ち足した。また，軸方向鉄筋の定着が十分でない可能性があるので，溶接により軸方向鉄筋の端部に定着プレートを取り付けた。

載荷は，降伏荷重計算値 P_{ycal} と降伏変位 δ_y を基準とし，**図－７**に示す載荷サイクルにより実施した。



図－７　載荷サイクル

3.2 解析

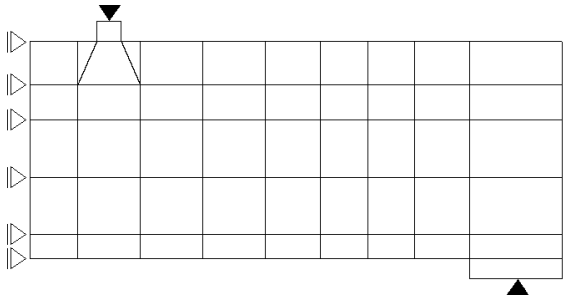
(1) 目的

本研究では，本来，丸鋼を用いた健全な RC 部材に対し，腐食した場合の曲げ性状への影響を検討する必要がある。しかし，丸鋼を用いた健全な RC 部材の試験データがないため，異形鉄筋を用いた健全な RC 部材を対象として既往の手法による解析を行い，比較を試みた。

(2) 解析の概要

本研究では，ファイバーモデルによる断面耐力の計算方法[1)]（手法Ａ）と，２次元 FEM 非線形解析プログラム[2)]を用いた方法（手法Ｂ）を用いて解析を行った。手法Ａでは試験体の耐力の確認を，手法Ｂでは耐力と変形の確認を実施した。手法Ｂは，ひび割れを有する RC 構造の材料構成則を考慮している。要素の種類として RC 要素を定義し，異形鉄筋（腐食していない前提）の付着特性を仮定してひび割れ発生後の RC 要素の平均引張応力と平均ひずみの関係を巨視的に表現できる。これは，部材の全体的な挙動を総合的に把握するのに適するモデル（分散ひび割れモデル）である。

手法Ｂの解析対象は，**図－８**に示すように，対称性を考慮して部材中心から片側 1/2 の部分をモデル化し，載荷点およびハンチ部分について剛な要素を定義した。なお，解析で用いる材料強度は 2.2 で述べた値とした。すなわち鉄筋は，軸方向鉄筋については腐食による強度低下の影響を考慮し，スターラップについては軸方向鉄筋とおなじ降伏点を有する健全な鉄筋（φ9mm）を仮定した値とした。コンクリートは，シュミットハンマーによる推定値（平均値）とした。



図－８　手法Ｂの解析モデル

3.3 試験結果と考察

(1) 破壊状況

載荷試験では，軸方向鉄筋の降伏後，スパン中央部の変位が進行し，圧縮側コンクリートの表面に著しい圧壊を確認したため載荷を終了し

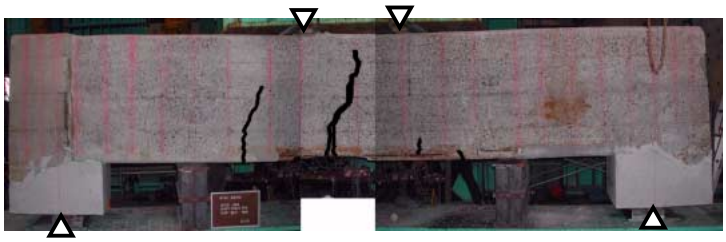
た。載荷試験中に急激な荷重低下は観察されなかった。載荷によるひび割れのうち目視で確認できるものは2本程度と少なく，等曲げ区間に発生したひび割れのみが最終的に50mm程度以上まで大きく開いた。載荷試験によるひび割れ状況を**写真－２**に，解析（手法Ｂ）で得られたひび割れ状況を**図－９**に示す。解析では，等曲げ区間近傍とせん断スパンにひび割れが分布しており，実験結果と異なる性状を示している。ひび割れが少ない原因については，(1)軸方向鉄筋が丸鋼であること，(2)腐食により等曲げ区間のかぶりコンクリートがほとんど全て剥落していることから，軸方向鉄筋とコンクリートとの付着力が低下したことによると考えられる。これにより，軸方向鉄筋からコンクリートへ引張力が伝達されずに，コンクリートに生じる引張応力が小さくなったため，ひび割れが多数発生せず，特定のひび割れに集中し開口したと考えられる。軸方向鉄筋とコンクリートとの付着が十分でない要因として挙げた(1)と(2)のうち，(1)の要因だけではこのようなひび割れ傾向にはならないと見られる実験結果も報告[3)]されていることから，(2)の要因による影響がより大きかったものと考えられる。

なお，実験では，懸念された重ね継手位置での破壊は生じなかった。

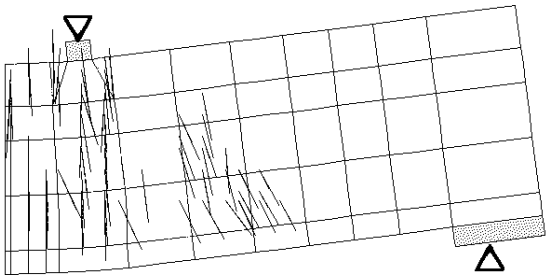
(2)　荷重－変位曲線

載荷により得られた荷重－変位曲線を**図－１０**に示す。同図に，手法Ａにより求めた降伏荷重と，手法Ｂにより求めた荷重－変位関係の解析結果を併記する。以下この図を用い，耐力と変形について考察する。

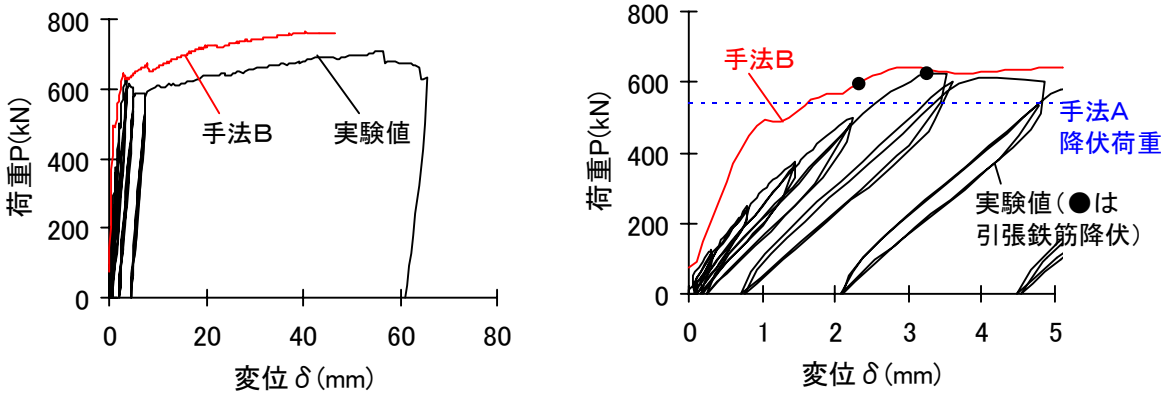
耐力については，実験値は手法Ａおよび手法Ｂによる降伏荷重の解析値と概ね一致した値となっている。3.3(1)で述べた通り，試験体では軸方向鉄筋とコンクリートとの付着力が低下していることが考えられるが，このことによる降伏耐力への影響が確認できなかった。なお，耐



写真－２　載荷試験でのひび割れ状況



図－９　解析（手法Ｂ）によるひび割れ状況



図－１０　荷重－変位曲線（左：終局まで　右：降伏近傍の拡大）

力の解析には材料強度が大きく影響するため，今回用いた現有材料強度の評価手法に対する追加検証が求められる。

降伏に至るまでの変位については，試験体の初期剛性は解析（手法Ｂ）で見られるそれより小さい。この理由として，試験体は載荷を始める以前から腐食によるひび割れおよび剥落が多数生じていたことにより，軸方向鉄筋とコンクリートとの付着力が低下したことの影響が考えられる。また，降伏変位については，実験値は解析値（手法Ｂ）より大きい値となっている。軸方向鉄筋の付着が損なわれた部材では剛性が低下するとも考えられ，今回の検討でもそれと同様の結果となっているが，他の事例を含めてさらに検証が必要と考えられる。

以上の検討から，軸方向鉄筋に丸鋼を用い腐食した RC 部材においては，耐力よりも変形に違いが出やすいと推察される結果となった。なお，本検討では，特殊な条件にある部材を既往の一定の仮定に基づく解析と比較したが，解析は試験体を適切にモデル化したものではない。今後，軸方向鉄筋に丸鋼を使用した場合や，鉄筋が腐食した場合の RC 部材の挙動について，特に鋼材とコンクリートとの付着に関し適切に表現できる構成則の検討が必要と考えられる。また，今回の試験体の特性に影響を与えた要因について，より詳細に分析することも重要と考えられる。

4. まとめ

丸鋼を用いて長期にわたり供用された実物の鉄道構造部材を切り出して試験体とし，材料劣化の調査，曲げ載荷試験および解析を行った。試験体の配筋および材料劣化は以下の通りであった。

(1) 対象構造物は，自重以外の鉛直荷重を受けない構造となっていたため，近年の一般的なラーメン構造部材と異なる配筋がされていた。
(2) かぶりコンクリートのモルタル部分の中性化が著しいため，軸方向鉄筋が腐食していた。その程度は鉄筋の平均断面で 85%程度であった。

また，載荷試験の結果からは，丸鋼を用い腐食した RC 部材の曲げ耐荷性状について，以下の事柄を確認した。

(1) ひび割れの開口は，等曲げ区間に発生した特定の箇所に集中する。
(2) 耐力は，実験値が異形鉄筋を用いた健全な RC 部材の解析値とほぼ一致する値となったが，腐食した材料の現有強度の設定方法に対して注意する必要がある。
(3) 降伏に至るまでの剛性および変形は，異形鉄筋を用いた健全な RC 部材の解析値と異なる値となったが，この理由として，載荷を始める以前に腐食によるひび割れおよび剥落が生じていたことに伴う，軸方向鉄筋とコンクリートとの付着力の低下の影響が考えられる。

参考文献

1) 運輸省鉄道局監修・鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説　コンクリート構造物，1999.12
2) 岡村甫，前川宏一：鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則，技報堂出版，1991
3) 松本嘉司，中村正平，河野清，中山紀男，岡村甫：各種の高張力異形鉄筋を用いた鉄筋コンクリート大型ばりの曲げ性状に関する研究，第２回異形鉄筋シンポジウム，土木学会，1965.12