

(24) 鉄骨鉄筋比の大きい鉄骨鉄筋コンクリート橋脚の地震時変形性能について

DEFORMABILITY OF STEEL REINFORCED CONCRETE BRIDGE PIER WITH LARGE REINFORCEMENT RATIO DURING EARTHQUAKES

須田久美子* 大塚一雄** 天野玲子* 村山八洲雄***

By Kumiko SUDA, Kazuo Otsuka, Reiko Amano, Yasuo Murayama

Model tests were carried out to determine the ability of steel reinforced concrete bridge piers with a large reinforcement ratio of approximately 95% to withstand earthquakes, giving due consideration to labor savings in design and construction, and with the focus on bridge piers of 50 to 100 m of large prestressed concrete rigid frame bridges. The effects of section shape(hollow,solid) and torsional moment on the ability of the bridge pier members to deform appropriately were studied by applying reverse cyclic loads in bending, shear and torsion on a 1/30-scale SRC model of an actual bridge pier. The results of tests verified the presence of a very high deformability due to a relatively high shear component because of the dowel effect in the SRC members with large reinforcement ratio, and excellent ability of the bridge pier to deform appropriately. Moreover, a design with good durability is feasible by carefully considering the interactions of flexure, shear, and torsion, even in cases where the effects of torsional moment are not negligible.

1.はじめに

高さ40～100m級の高橋脚における施工の省力化を図るためには、鉄筋コンクリート橋脚に代えて、鉄筋を極力少なくした鉄骨鉄筋コンクリート(以下、SRCと略記)橋脚が考えられる。通常、ひびわれ幅の問題から、全軸方向鋼材量に占める鉄骨量の割合は土木学会コンクリート標準示方書等により70%以下に設定するように規定されているが、ここでは、常時に30～40kgf/cm²程度の軸圧縮応力が作用する高橋脚を対象としているため、中小地震によって橋脚にひびわれが発生してもその残留ひびわれ幅は非常に小さくなると考えられる。そこで、さらに施工の省力化と工期短縮を図ることを目的として、軸方向鉄骨量の比率を95%以上とした鉄骨鉄筋比の大きいSRC橋脚について考える。

高橋脚を有する高架橋にはPCラーメン橋などの採用が見込まれているが、急峻な山岳地帯に沿って建設されるために、橋脚の高さが著しく異なる場合が一般的である。この場合、各橋脚の曲げ剛性の違いにより橋軸直角方向の地震力によりねじりモーメントが発生し、弾性応答による試算によれば曲げモーメントの15%程度に相当するねじりモーメントが発生するものも見られる。既往の模型実験により、中実断面RC柱部材でねじり/曲げモーメント比が10%の場合において、RC部材の変形性能に及ぼすねじりモーメントの影響が無視できないことが確認されている¹⁾。高橋脚では橋脚重量を軽減するために中空断面になる可能性が大きく、高橋脚を有する橋梁全体の耐震性を高める観点から、中空断面橋脚に通常の曲げ、せん断に加えてねじりモーメントが作用する場合の耐震性能を如何に確保するかが重要な課題と考えられる。

そこで、鉄骨鉄筋比が大きいSRC構造の高橋脚への適用性を検討する一環として、小型模型試験体による基礎実験を実施し、交番繰り返し曲げ・せん断・ねじり荷重下における中空断面SRC部材の耐震性能を検討した。

* 鹿島建設(株) 技術研究所 第一研究部第1研究室

** 鹿島建設(株) 土木設計本部 第二設計部

*** 工博 鹿島建設(株) 技術研究所 第一研究部

2.実験概要

(1)試験体

試験体の外形寸法を図-1に示す。試験体の諸元と材料特性を表-1に示す。図-2にはそれぞれの試験体の断面図を、図-3に鋼材組み立て図の一例を示す。

試験体は、断面幅20cm、断面高さ30cmで、No.1は中実断面であり、No.2～No.4は壁厚4cmの中実断面である。軸方向鉄骨

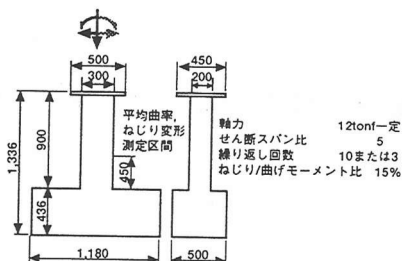


表-1 試験体諸元と材料特性

図-1 試験体の外形寸法

	鉄 骨				鉄 筋				鋼材比 (鉄骨+鉄筋)		鉄 骨		コンクリート (kgf/cm ²)	ねじり 有 無
	軸方向		軸直角方向		軸方向		軸直角方向		軸方向	軸直角方向	軸方向	軸直角方向		
	使用材料	鉄骨比*	使用材料	鉄骨比**	使用材料	鉄筋比	使用材料	鉄筋比**						
No.1	H30×30×4 fy=3280 fu=4760	2.19%	□3×3 fy=41 fu=7500	0.11%	D3 fy=3450 fu=4850	0.09%	D3 fy=3450 fu=4850	0.07% (0.14%)	2.28%	0.18% (0.25%)	96%	61% (44%)	480	無
No.2	H15×15×4.5 fy=3540 fu=4990	2.16%	□3×3 fy=2900 fu=3300	0.11%	#2 fy=2200 fu=3070	0.09%	#2 fy=2200 fu=3070	0.07% (0.14%)	2.25%	0.18% (0.25%)	96%	61% (44%)	612	無
No.3	H15×15×2.5 fy=3670 fu=5290	2.67%	□3×3 fy=41 fu=5110	0.11%	#2 fy=2200 fu=3070	0.09%	#2 fy=2200 fu=3070	0.07% (0.14%)	2.76%	0.18% (0.25%)	97%	61% (44%)	445	有
No.4	H15×15×2.5 fy=3670 fu=5290	2.67%	□4.5×4.5 fy=2990 fu=3890	0.25%	#2 fy=2200 fu=3070	0.09%	#2 fy=2200 fu=3070	0.07% (0.14%)	2.76%	0.32% (0.39%)	97%	78% (64%)	445	有

*断面の幅と高さで全鋼材量を除した値、**水平材換算で断面の全幅を用いて求めた値、鉄骨比・鉄筋比は一般部の値と（ ）内に基部の値を示す。

fy, fuの単位はkgf/cm²

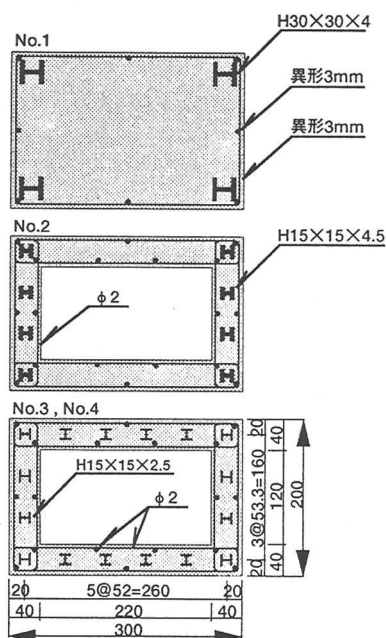


図-2 断面図

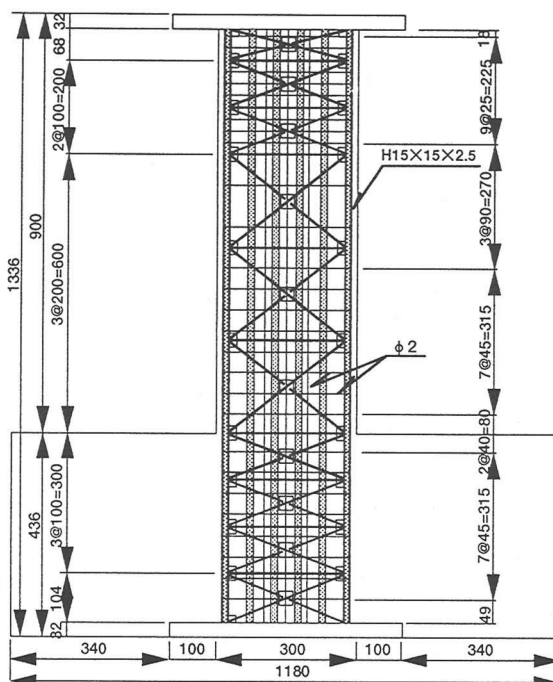


図-3 No.3およびNo.4の鋼材組立図

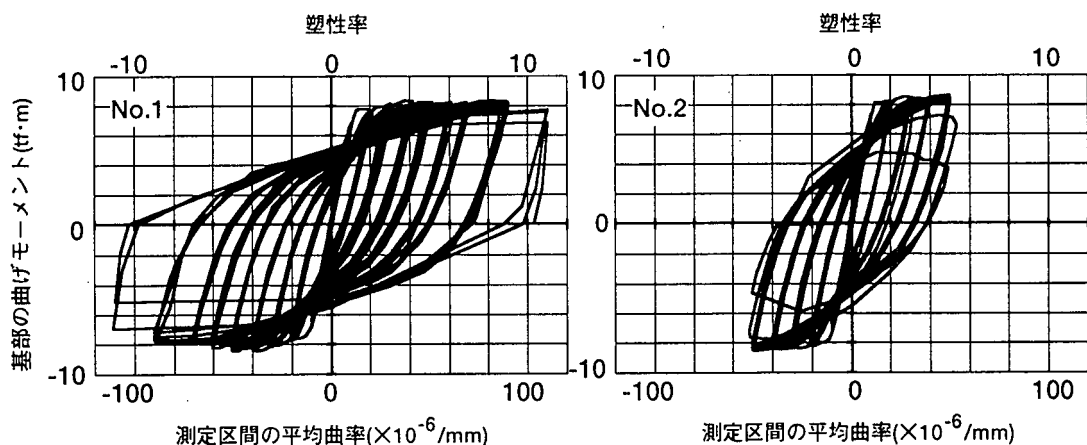


図-4a 曲げモーメントと曲率の関係

に用いた模型用のH鋼は角型鋼材を切削加工して作成した。水平材および斜材はH鋼との全ての接点で溶接した。

(2)加力方法

加力には曲げモーメント、せん断力、ねじりモーメント、軸力を任意の組合せで同時に加力できる6自由度加力装置¹⁾を用いた。せん断スパン比(a/h ; a はせん断スパン、 h は断面高さ)は5とし、軸圧縮力は12tf(No.1中実断面で20kgf/cm²、No.2~No.4中空断面で35.7kgf/cm²)一定とした。No.1およびNo.2はねじりのない場合、No.3およびNo.4は柱基部においてねじり/曲げモーメント比が15%一定になるように加力した場合である。曲げモーメント、せん断力、ねじりモーメントについては交番繰り返し加力を行った。H鋼降伏後は降伏時の変形の整数倍で変形制御とし、繰り返し数はNo.1およびNo.2が10回ずつ、No.3およびNo.4が3回ずつとした。

(3)測定方法

曲率およびねじり回転角はフーチング面と高さ1.5h(45cm、図-1参照)区間の鉛直および水平の相対変位を測定することによって求めた。H鋼降伏後の変形制御は平均曲率で行った。

3.実験結果および考察

(1)破壊モードと耐力

図-4に柱基部の曲げモーメントと平均曲率の関係を示す。No.1およびNo.2については曲げおよびせん断耐力の計算値を表-2に、No.3およびNo.4については曲げ-ねじりとせん断-ねじり相関図²⁾を図-5に示す。耐力の推定は基本的には土木学会コンクリート標準示方書(以下、示方書と略記)の方法に従った。ただし、せん断耐力の

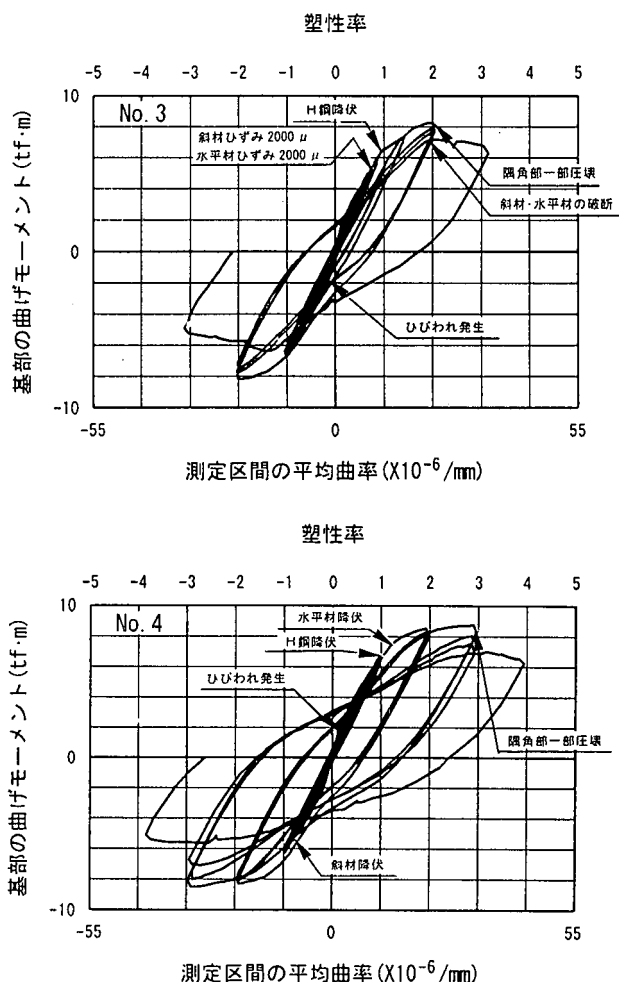


図-4b 曲げモーメントと曲率の関係

値にはH鋼のダボ効果(ここではひびわれを横切るH鋼を広義のダボと考えた)による負担せん断力(水平材の間隔を長さとした両端固定梁の固定端モーメントが全塑性モーメントになるときの固定端荷重として算出)を考慮した。中空断面のねじり耐力は断面を構成する各辺の面内せん断耐力とねじり有効断面積から求められるが、面内せん断耐力の評価に示方書の方法を用いるとかなり安全側の評価になる²⁾ため、ここでは広沢の方法³⁾で面内せん断耐力を評価した。

ねじりモーメントが作用しない場合については、No.1およびNo.2共に曲げ耐力に比べてせん断耐力の方が大きく、曲げ破壊先行型の破壊モードになると推定された。実験では、No.1の場合、最大荷重を経過後にかぶりコンクリートがはく落し、H鋼が座屈して降伏時の荷重を下回った。No.2の場合はかぶりコンクリートがはく落した曲率の繰り返しの途中で降伏時の荷重を下回った。破壊モードはいずれも曲げ破壊であった。曲げ耐力は計算値が実験値の8~9割程度であり、通常の鉄筋コンクリート部材と同程度の精度で推定できると言える。

じん性率については、No.1が11、No.2が5であった。計算によればH鋼のダボ効果による負担せん断力が部材のせん断耐力に占める割合は比較的大きく、No.1が34%、No.2が28%であった。また、No.1とNo.2のH鋼の寸法の違いによって負担せん断力そのものの値がかなり異なる。鉄筋コンクリート部材における既往の研究から部材の曲げ耐力に対するせん断耐力の比率が大きい程じん性率が大きくなることが知られており⁴⁾、実橋脚で用いられる鉄骨と鉄筋の寸法の違いを考慮すれば、同一の鋼材量の場合には通常のRC部材よ

表-2 耐力の計算値

	曲げ耐力 M_u/a	せん断耐力			せん断耐力 曲げ耐力
		土木学会法 ⁵⁾	ダボ効果分	合計	
No.1	7.2	10.0	4.7	14.7	2.0
No.2	7.9	7.2	2.2	9.4	1.2

(単位: tf)

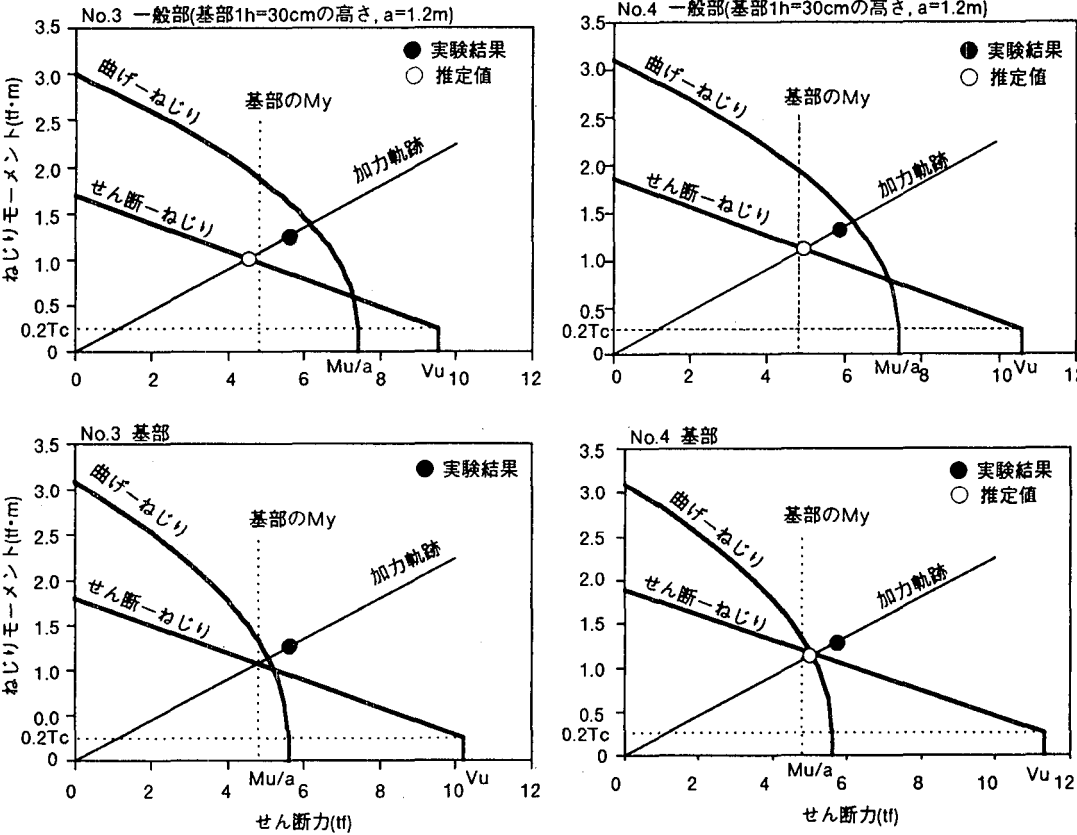


図-5 曲げ-ねじりおよびせん断-ねじりの相互作用曲線

りもSRC部材の方が相対的に軸方向鋼材の負担せん断力が大きいため、変形性能が優れていると考えられる。

ねじりモーメントが作用する場合については、No.3は基部のH鋼が降伏前に一般部でせん断-ねじり型の破壊をすると推定されたが、実験ではH鋼が降伏後にせん断-ねじり型の破壊をした。破壊モードは推定どおりであったが、耐力値は若干安全側の評価であった。No.4は基部のH鋼が降伏後に基部の曲げ-ねじり破壊と一般部のせん断-ねじり破壊がほぼ同時に起こると推定されたが、実験値は推定値に比べ耐力値がかなり大きく、繰り返し加力の影響でねじり変形が大きくなったため、一般部でせん断-ねじり型の破壊をした。水平材の降伏は塑性率2にはじめて加力した時に起こっているが、鉄筋コンクリート部材の場合には帯鉄筋の降伏と同時にねじり破壊する⁵⁾のに対し、水平材の降伏がねじり破壊の直接の契機にならなかったことが特徴的である。

(2)変形性能とねじり

図-6にねじりモーメントとねじり回転角の関係を示す。ひびわれ発生前のねじり剛性は薄肉閉断面のSt.Venant式による計算値に比較的良く対応することを確認した。No.3およびNo.4共に、ひびわれ発生後には著しくねじり剛性が低下することがわかる。対象とする橋脚におけるねじりは、主桁との変形適合ねじりとして作用すると考えられるので、ねじり変形を考慮することによりねじり補強をより合理的に設計することが可能であると考えられる。ただしそのためには、軸直角方向の補強量に応じてねじり変形能力が異なるため、繰り返し加力によるねじり変形の増加などを考え併せると、耐力評価の段階で曲げ-ねじり型の破壊が先行するようなねじり補強を行う必要があると考えられる。

図-7にH鋼、水平材および斜材における各鋼材のひずみの測定例を示す。H鋼は柱基部、水平材および斜材はねじりとせん断が足し合わされる面の一般部における値である。No.3およびNo.4共に、ねじりとせん断が相殺される面の水平材のひずみは終局時まで 1000×10^{-6} 以下であることを確認している。これは、せん断とねじりが正負交番加力されることにより、せん断応力度としてせん断とねじりが足し合わされる側面(ウェブ)と相殺される側面が正負ともに同一の側面になるためである。このため、せん断とねじりが足し合わされる側面に劣化が集中し、せん断-ねじり破壊の起点になった。

4.まとめ

鉄骨鉄筋比の大きいSRC柱部材の小型模型による曲げ、せん断、ねじりの交番繰り返し加力実験の結果、以下のことが明らかになった。

- 鉄骨・鉄筋比の大きいSRC柱部材は鉄骨のダボ効果によるせん断分担が相対的に大きいため、その影響を考慮したせん断耐力は曲げ耐力に比べて非常に大きく、その結果地震荷重を想定した交番繰り返し荷重下においても優れた変形性能を有している。
- 曲げ・せん断に加えて、ねじりモーメントが作用する場合の耐力は曲げ-ねじりとせん断-ねじりの相互作用を考慮することによって安全側に推定が可能と考えられる。
- 曲げ・せん断・ねじりの組み合わせ荷重下では、ひびわれ発生後におけるねじり剛性の低下が著しいので、ねじり変形を考慮することにより、高橋脚橋梁の合理的な設計が可能であると考えられる。ただし、繰り返し加力によってねじり変形が増加するため、せん断-ね

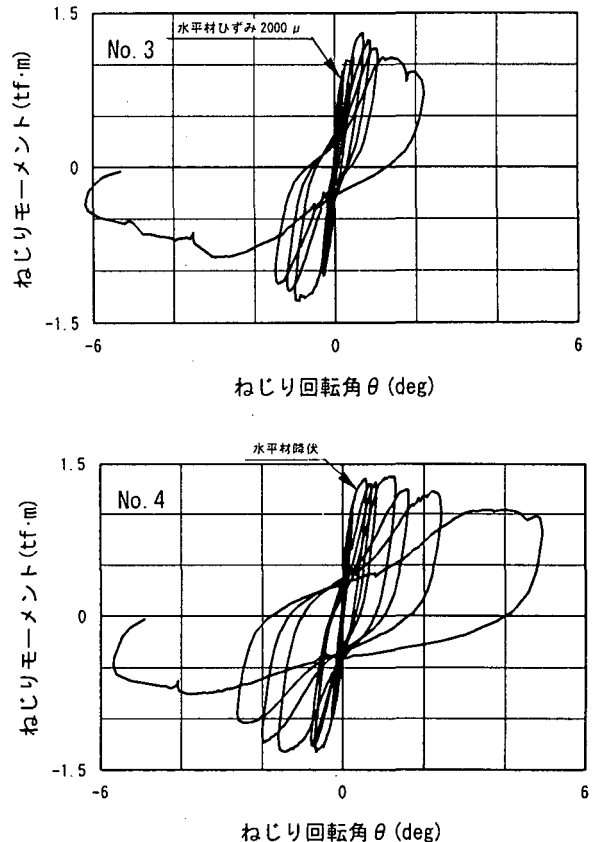


図-6 ねじりモーメントとねじり回転角の関係

じりの相互作用を考慮した耐力が曲げ-ねじりの相互作用を考慮した耐力以上になるようなねじり補強を行う必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 新保、村山、須田、一宮：6自由度加力装置を用いたRC柱部材実験、コンクリート工学年次講演論文集、Vol.14、pp.815-818、1992
- 2) 一宮、須田、村山、新保：曲げ、せん断、ねじりが作用するRC柱部材の耐力、土木学会年次大会講演概要集、1995
- 3) 広沢：既往の鉄筋コンクリート造耐震壁に関する実験資料とその解析、建築研究資料、建設省建築研究所、1975.3
- 4) 運輸省鉄道局監修、鉄道総合研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物、丸善株式会社、1992.10
- 5) 須田、村山、天野、一宮：RC中空断面柱部材の変形性能に及ぼすねじりの影響、土木学会年次大会講演概要集、1995

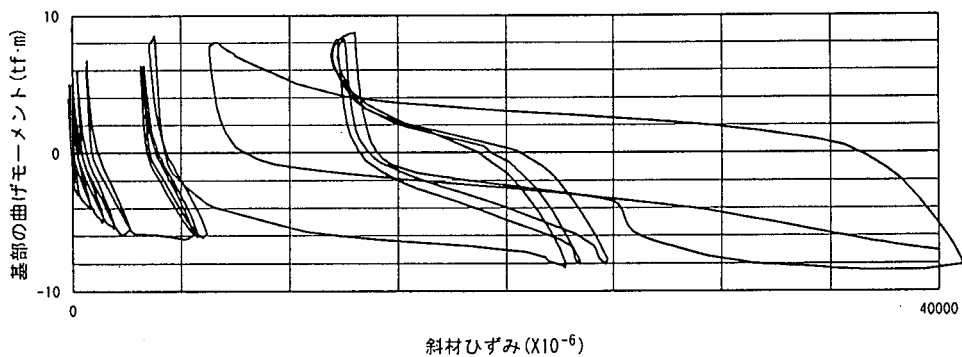
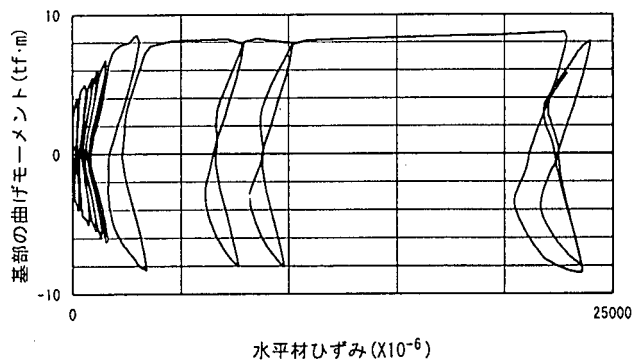
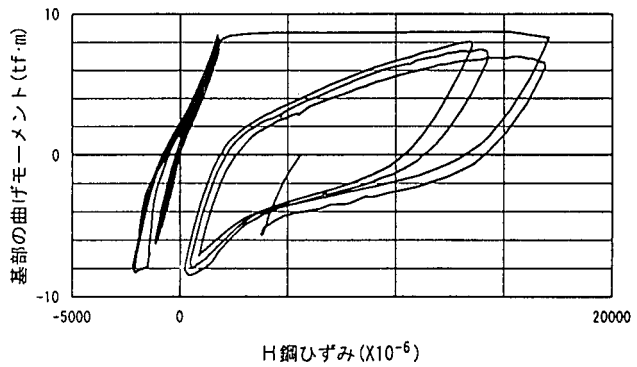
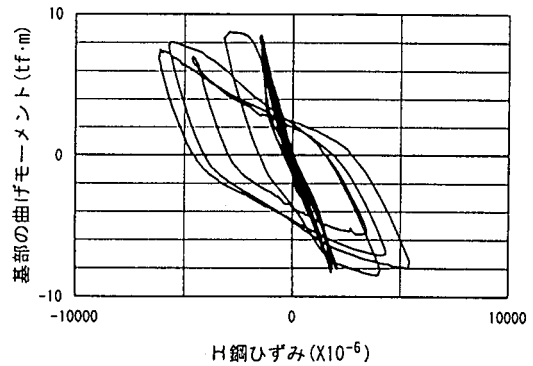


図-7 No.4の鋼材ひずみ履歴図