

(17) 形鋼によるずれ止めの耐力評価

運輸省港湾技術研究所 構造部 清宮 理

運輸省港湾技術研究所 構造部 ○ 横田 弘

1. まえがき

防波堤用ケーソン等の港湾構造物を鋼-コンクリート合成部材によって建設することが考えられている。合成部材の採用により、力学特性の向上、構造物の軽量化、施工の迅速化等が図られ、経済的で所定の安全性を保持する港湾施設の建設が可能となる。鋼-コンクリート合成部材の力学特性に関する研究は、近年活発に行われているが^{1,2)}、この種の部材の港湾構造物への採用に当たっては、構造様式、施工性、耐久性等に関して海洋環境の特殊性を考慮した検討を必要とし、設計・施工法等の技術的課題を解明する必要がある。

その一つに鋼とコンクリートを合成する際の「ずれ止め(シアコネクター)」の性能評価がある。橋梁や建物等でのずれ止めには、スタッドジベルが従来より多く用いられてきたが、港湾構造物では、鋼板の剛性を増大させる目的で形鋼を利用することが検討されている。しかし、形鋼による合成効果あるいは形鋼を用いた部材の耐力評価については、十分な知見が得られていない。

そこで、形鋼によるずれ止めの耐力を評価し、形鋼をずれ止めに用いた合成部材の力学特性を把握するため、押抜き試験及びはりの載荷試験を実施した。形鋼の形状・寸法等の要因がずれ止めの耐力及び合成部材の耐力等に及ぼす影響について考察を行った結果について報告する。

2. 供試体の概要

2.1 押抜き試験

押抜き試験に用いた供試体の概要を図-1に示す。供試体はH形鋼(H-250×250×9×14)の両側にコンクリートブロックを取り付けた構造で、鋼とコンクリートはずれ止めによって連結されている。コンクリートブロックは、高さ60cm、幅25cm、奥行き25cmである。コンクリートブロック中には鉄筋を配していない。

ずれ止めは、コンクリートブロック上端より20cmの位置に連続すみ肉溶接でH形鋼に取り付けている。ずれ止めとしては、図-2に示すように、市販標準品の等辺・不等辺山形鋼(Lタイプ)、H形鋼のウェブ中央を切断したT形鋼(Tタイプ)及びみぞ形鋼(Cタイプ)の3種類とした。山形鋼では、取付け方向を変化させた(LA~LD)。鋼材の材質はSS41材とし、コンクリートの設計基準強度は350kgf/cm²とした。なお、粗骨材は碎石で、最大寸法は10mmである。コンクリート打設に当たっては、コンクリートブロックと接するH形鋼表面の錆を落とし、グリスを塗布した。今回試験を行った供試体の総数は31体である。

2.2 はりの曲げ載荷試験

曲げ載荷試験に用いたはり供試体の概要を図-3に示す。はりの断面長方形で、

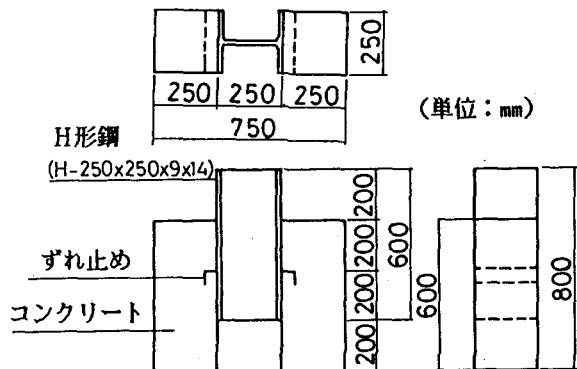


図-1 押抜き試験供試体の概要

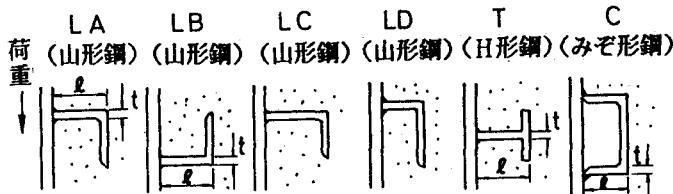


図-2 ずれ止めの種類

幅40cm、高さ25cm、長さ 350cmである。はりは、下縁のみに鋼板を設けたタイプⅠと、上下縁の両方に鋼板を設けたタイプⅡの2種類である。鋼板は厚さ6mm (SS41材)である。鋼板とコンクリートとの合成には、押抜き試験と同様に山形鋼、T形鋼及びみぞ形鋼をずれ止めとし、おのおの30cm間隔に鋼板に溶接で取付けた。タイプⅠでは、圧縮鉄筋としてSD30-D19の鉄筋3本をはり上縁より5cmの位置に配筋した。なお、今回の試験では、ずれ止めの耐力評価という観点から、せん断補強を行わなかった。また、コンクリートの品質は、押抜き試験のものと同様である。コンクリートの打設は、はりの側面から行った。今回試験を行ったはり供試体の総数は6体である。

3. 試験の概要

押抜き試験の概要と計測機器の配置を図-4に示す。荷重は、油圧ジャッキ(容量 200tf)を用いてH形鋼上端から鉛直下向きに行った。荷重は、供試体が最終強度に達するまで単調増加で荷重した。コンクリートブロックを床には特に固定しなかったが、ブロックの水平変位量は、ほとんど検出されなかった。

はりの荷重試験では、荷重スパンが 300cmの両端単純支持で、対称2点荷重とした。この際、せん断スパン比は、4.8である。

両試験における計測項目〔計測機器〕は、載荷荷重〔ロードセル〕、H形鋼あるいははりの鉛直変位〔変位計〕、H形鋼・ずれ止め・コンクリートに生じるひずみ量〔ひずみゲージ〕、コンクリートのひびわれ幅〔パイ型変位計〕及びコンクリートのひびわれ進展状況〔目視〕である。

4. 押抜き試験結果と考察³⁾

4. 1 ひびわれ発生状況と破壊形式

コンクリートひびわれ発生時と終局時の載荷荷重、終局時のH形鋼の鉛直変位量及び破壊形式の一覧を表-1に示す。

表-1 押抜き試験結果の一覧

Na	ずれ止めの寸法	Pc	Pu	δu	FT	Na	ずれ止めの寸法	Pc	Pu	δu	FT
LA-1	L-40×40×3	30	46	2.8	SF	LD-1	L-90×75×9	60	88	1.7	SF
LA-2	L-40×40×5	40	54	2.1	SF	LD-2	L-100×75×7	65	72	1.4	SF
LA-3	L-50×50×4	45	52	4.2	SF	LD-3	L-100×75×10	30	98	1.8	SF
LA-4	L-50×50×6	40	62	1.6	SF	LD-4	L-125×75×7	45	61	1.2	SF
LA-5	L-65×65×6	55	67	1.2	SF	LD-5	L-125×75×10	90	96	2.0	SF
LA-6	L-75×75×6	30	60	1.9	SF	T-1	H-100×50×5×7	30	73	3.8	CC
LA-7	L-75×75×9	75	82	1.9	SF	T-2	H-100×100×6×8	30	57	2.1	CC
LA-8	L-75×75×12	45	102	3.0	SF	T-3	H-125×60×6×8	35	92	4.0	CC
LB-1	L-40×40×5	35	60	4.0	TF	T-4	H-125×125×6.5×9	35	82	4.3	CC
LB-2	L-50×50×4	30	52	3.0	TF	T-5	H-150×75×5×7	35	74	4.4	CC
LB-3	L-50×50×6	52	68	4.5	SF	T-6	H-150×100×6×9	40	104	7.5	CC
LC-1	L-90×75×9	84	84	1.4	SF	T-7	H-150×150×7×10	40	83	3.8	CC
LC-2	L-100×75×7	40	80	4.0	SF	T-8	H-200×100×5.5×8	30	93	7.0	CC
LC-3	L-100×75×10	15	80	1.6	SF	C-1	L-100×50×5×7.5	40	86	2.4	CC
LC-4	L-125×75×7	30	85	1.2	SF	C-2	L-75×40×5×7	20	95	2.5	CC
LC-5	L-125×75×10	60	88	1.5	SF						

Pc: ひびわれ発生荷重(tf)、Pu: 終局荷重(tf)、 δu : 終局時のH形鋼の鉛直変位(mm)

FT: 破壊形式

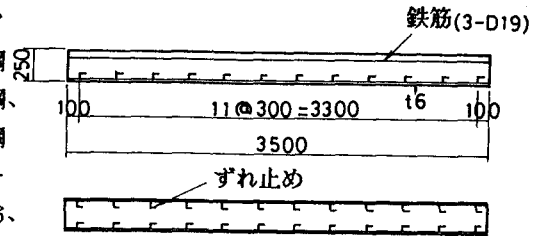


図-3 はり供試体の概要

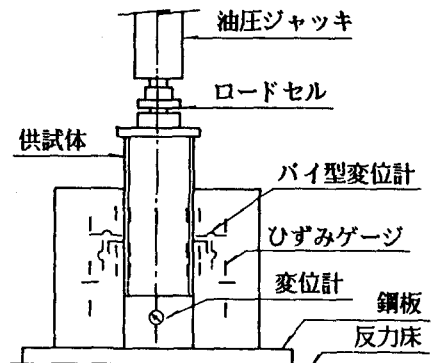


図-4 押抜き試験での荷重状況

最大荷重時での供試体のひびわれ発生状況を図-5に示す。ひびわれの発生状況及び破壊の形式は、ずれ止めの形状によってほぼ決まる結果となった。山形鋼のずれ止めについては、ずれ止めの高さ l と板厚 t (図-2) との比 l/t の値によってひびわれの発生状況が異なった。すなわち、 $l/t < 10$ の場合には、ずれ止めから下側に、 $l/t \geq 10$ の場合には、ずれ止めから上側にひびわれが発生した。T形鋼のずれ止めでは、ずれ止めの上側にひびわれが発生し、みぞ形鋼のずれ止めでは、ずれ止めの下側に斜めひびわれが若干発生した。

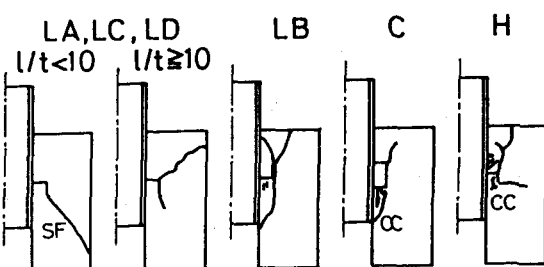


図-5 破壊時のひびわれ発生状況及び破壊形式

ずれ止めとコンクリート間にすき間が生じたのは、比較的低い荷重段階であり、その後コンクリートにひびわれが発生した。終局時の荷重は、コンクリートにひびわれが発生した荷重の約2倍であった。

各供試体での破壊形式は、図-5及び表-1に示すようにずれ止めの破断 (TF)、コンクリートのせん断破断 (SF)、コンクリートの圧縮破断 (CC) の3種類に分類することができた。山形鋼のずれ止めの破壊形式は、コンクリートのせん断破断であった。これは、形鋼の変形により形鋼周辺のコンクリートが外側に押し拡げられたためである。一方、T形鋼及びみぞ形鋼のずれ止めでは、コンクリートの圧縮破断が主であった。また、ずれ止めの破断が生じたものも2体あったが、これは、最大荷重に達した後、載荷を続けたため変形が急激に進展し、ずれ止めの破断に至ったものである。

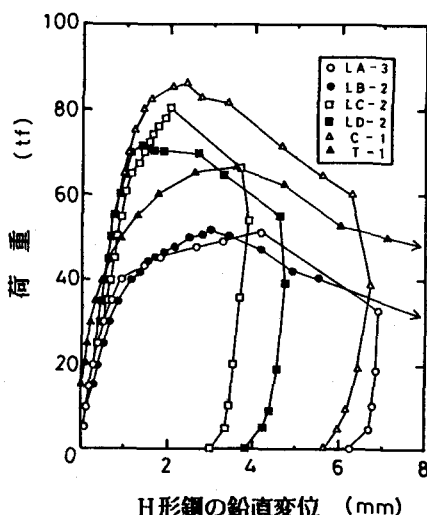


図-6 荷重と変位との関係

供試体破壊後のずれ止めの変形状態は、溶接部が折れるように変形したものと溶接部が剛なものと2通りに大別できた。形鋼の寸法が小さく、相対的にずれ止めの剛性が低い場合には、前者の変形形態が多く見られた。T形鋼では、溶接部が折れるように変形したものがほとんどであったが、ずれ止めの上側半分はあまり変形せず、下側半分での変形が顕著であった。

4. 2 荷重-変位曲線

供試体の荷重-H形鋼の鉛直変位の関係を図-6に示す。山形鋼のずれ止めでは、この関係は終局荷重の約50%でコンクリートにひびわれが生じるまではほぼ直線であり、これを越えると勾配が少し緩やかになった。さらに載荷し続けると変位量が大きくなり破壊に至ったものと、変位量はあまり大きくならず突然破壊が生じたものがあった。一方、T形鋼及びみぞ形鋼のずれ止めでは、明瞭な直線区間がなく、荷重の増加とともに曲線の勾配が緩やかになり、破壊に至った。

4. 3 ずれ止めの形状と耐力

ずれ止めの耐力を求める式としていくつかの設計式が提案されているが、既往の設計式はいずれも、今回試験を行ったタイプのずれ止めを直接の適用対象としていない。今回採用したずれ止めと比較的近い条件となっている設計式である道路橋示方書⁴⁾の式及びAISCの式⁵⁾を用いた計算結果によると、前者の式は、今回の実験の下限値、すなわち安全側の値を与えた。しかし、試験結果は全体的にばらつきがあり計算値とよい対応を示しておらず、最大のものと計算値の約1.8倍の差となった。一方、後者の式では、いずれも計算値を下回っており、試験結果と計算結果の対応はあまり良くなかった。

そこで、今回の試験結果に適合するようにずれ止めの板厚、面積、高さ等を因子として、ずれ止めの耐力

力の算定式を求める試みを行った。既報のように³⁾、山形鋼やみぞ形鋼によるずれ止めの耐力力は、 t により表されることが分かっている。しかし、T形鋼では同じ t に対して、山形鋼やみぞ形鋼に比べて大きな耐力力を有することが明らかとなった。従って、T形鋼については、フランジの板厚(t_f)とウェブの板厚(t_w)との比を用いて耐力力の割り増しを行う。これは、破壊後のT形鋼の変形状況が板厚の比、すなわち剛比の影響を受けたことを反映させることになる。この結果、耐力力 P (kgf)を与える式として次式が得られる。

$$P = 88 \alpha \cdot \sqrt{t \cdot w} \sqrt{f_c} \quad \dots\dots ①$$

ここに、 t : 形鋼の板厚 w : 形鋼の奥行き幅

f_c : コンクリートの圧縮強度

α : T形鋼の割り増し係数 (t_f/t_w)

式①及び試験結果をプロットすると、図-7のようになる。この図より、今回用いた形鋼によるずれ止めの耐力力を与える式として式①を用いると、かなり精度良くしかも簡単な計算でずれ止めの耐力力を計算できた。

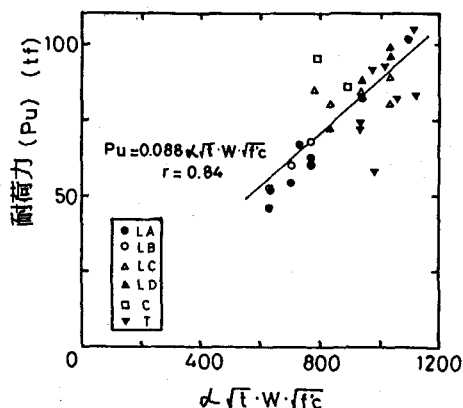


図-7 ずれ止めの耐力力の算定

6. 曲げ載荷試験結果と考察

6. 1 強度とひびわれ性状及び破壊の形態

試験で得られた最大荷重、最大荷重時のたわみ、破壊の形式等を表-2に示す。破壊の形式は、大半がコンクリートのせん断破壊となった。山形鋼とT形鋼のずれ止めを用いた場合の最大荷重はほぼ同じとなり、みぞ形鋼のものを若干上回った。限界状態設計法⁶⁾により求めたはり理論での曲げ破壊に達する荷重値は、タイプIで32.1tf、タイプIIで36.1tfとなり、いずれも試験で得られた最大荷重を上回った。これは、せん断破壊が生じたことや鋼板とコンクリートとの間で相対的なずれが生じ、平面保持の仮定が大きく崩れたためと考えられる。供試体での終局時のひびわれ発生状況を図-8に示す。ひびわれは、ずれ止めの位置から発生した。前述のように、せん断ひびわれが顕著となったが、貫通したせん断ひびわれは、支点あるいは載荷点からではなく、ずれ止めを結ぶひびわれとなった。

6. 2 荷重-変位関係

各供試体で得られた荷重とスパン中央点でのたわみとの関係(包絡線)を図-9に示す。前述のように大半の供試体は、最大荷重に達した時点でせん断破壊が生じ急速に載荷重が低下した。また、引張側鋼板とコンクリートとの間で局所的なずれが生じたため、はりのたわみの式による計算値よりも試験結果の方が大きくなった。

6. 3 鋼板のひずみ分布

引張側鋼板降伏時の鋼板のひずみの分布を図-10に示す。ひびわれ発生前では、鋼板とコンクリートとの

表-2 はりの曲げ載荷試験結果の一覧

No.	ずれ止め	鋼板配置	P_c	P_y	P_u	δ_u	破壊形式
①	L-50×50×4	片面	2.0	17.5	20.3	23.4	せん断
②	L-50×50×4	両面	3.5	17.5	17.5	9.4	せん断
③	C-100×50×5	片面	4.1	12.0	16.9	11.9	せん断
④	C-100×50×5	両面	4.1	18.8	17.8	10.3	せん断
⑤	H-100×50×5×7	片面	5.6	20.9	21.3	28.5	曲げ
⑥	H-100×50×5×7	両面	3.6	20.3	22.0	11.9	せん断

相対的なずれがほとんどなく、鋼板の軸方向に連続したひずみが得られた。しかし、荷重が大きくなると、ずれ止めを挟んで両側でひずみが不連続となり、はりの端部側でのひずみが大きくなった。このことは、水平せん断力の増加に伴い、ずれ止めを挟んではりの中心部側で、鋼板とコンクリートとの付着が切れた結果となった。また、タイプⅡ供試体の圧縮側鋼板のひずみ量は、曲げモーメント分布の形状と相似形となった。

6. 4 ずれ止めのひずみ

No④供試体のずれ止めに生じたひずみの状況を図-11に示す。いずれのずれ止めでも、曲げによるひずみが卓越したが、ずれ止めに発生したひずみは小さく、降伏強度に達したものはなかった。押抜き試験では、この形鋼のずれ止めでは、52tfの耐力が得られたが、はりの載荷試験では、この値よりもずれ止めに作用したせん断力がかなり小さかったため、ずれ止めが変形したものや破壊したものはなかった。

6. 5 せん断耐荷力の計算

せん断耐荷力の計算に当たっては、せん断補強のないはり部材に対しては、斜め引張破壊の計算、せん断補強のあるはり部材については、アーチ機構を考慮してせん断耐力を求める算定式^{2,7)}が提案されている。今回のはりの構造及び破壊の状況から、形鋼によるずれ止めを用いたはり部材では、以下の特徴がある。

- 1) ひびわれがずれ止めの上端から発生するため、はりの有効高さは、はりの上縁からずれ止めの上端までの距離とする。
- 2) ひびわれがずれ止めの取付け位置から発生するため、せん断スパンが見かけ上小さくなる。
- 3) 上下縁に配置した鋼板はせん断力にほとんど抵抗しない。

コンクリートのアーチ機構を考える式⁷⁾に基づいて算定したせん断耐荷力は、タイプⅠで25.5tfとなり、試験結果よりも大きくなった。この理由として、せん断補強がないために斜めひびわれ発生後に急激にはりが耐荷力を失うため、アーチ機構を期待できないものと考えられる。一方、コンクリート内のせん断応力がせ

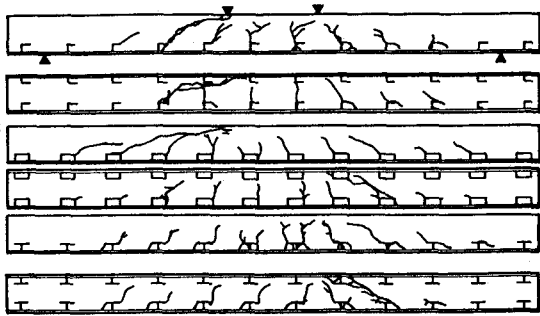


図-8 はり供試体のひびわれ発生状況

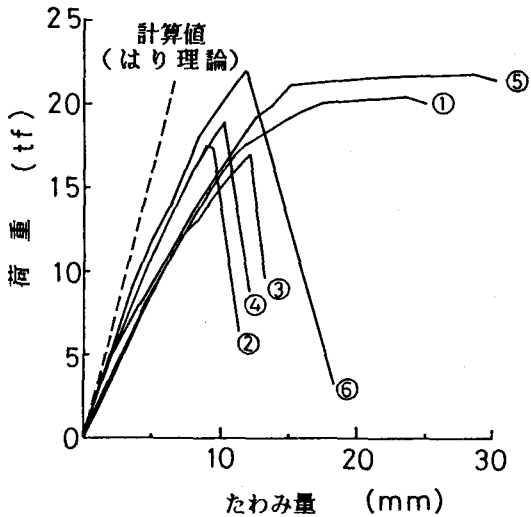


図-9 荷重とスパン中央でのはりのたわみ

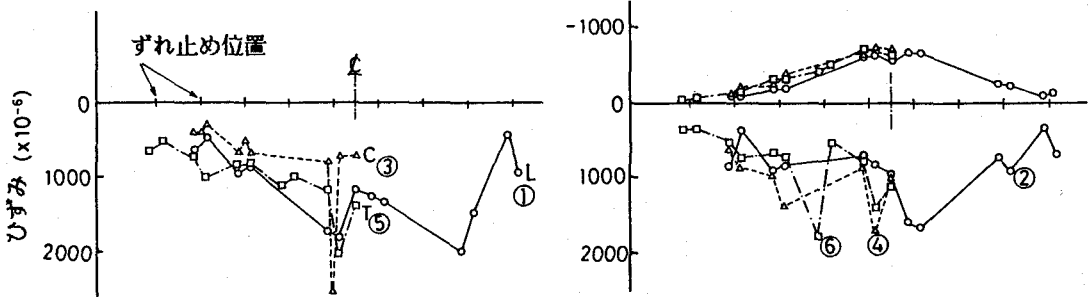


図-10 鋼板のひずみ分布

せん断強度に達した際、斜め引張破壊を起こすと考える式に基づいてせん断耐荷力の算定を行うと、 $18.3tf$ となり、試験結果と比較的一致した。この際前述のように、はりの有効高さは、ずれ止めの上縁からはりの上縁までの距離とした。

7. 結論

形鋼を用いたずれ止めの基本的な力学性状として、今回の試験の範囲で得られた結論は以下のとおりである。

7. 1 押し抜き試験

1) 破壊形式は、ずれ止めの形状、山形鋼

でのフランジの向き等の影響を受けたが、ずれ止めの破断、コンクリートのせん断破壊及びコンクリートの圧縮破壊の3種類に分類できた。このうち、山形鋼は、コンクリートのせん断破壊が、T形鋼とみぞ形鋼はコンクリートの圧縮破壊が主であった。

2) 今回の試験に用いた形鋼によりずれ止めの耐荷力として、式①に示す $P = 88 \alpha \sqrt{t} \cdot w \sqrt{f_c}$ とすると、試験結果と計算値とが良く一致した。

7. 2 はりの曲げ試験

1) 形鋼をずれ止めに用いたはりでは、コンクリートのせん断破壊が生じたが、はりの斜めひびわれ理論による算定方法で試験結果を良く説明できた。ただし、はりの有効高さとしては、ずれ止めの上端からはりの上縁までの距離とする必要がある。

2) ずれ止めのはり中央部よりでは、引張鋼材とコンクリートとの間での相対的なずれの現象(すべり)が認められた。

8. あとがき

本研究は、特別研究「ハイブリッド海洋構造物の設計等に関する研究」の一環として実施されたものである。形鋼によるずれ止めを用いた合成構造部材の載荷試験では、せん断補強を行ったはり部材についても実施しており、その結果についても今後順次報告したい。なお、本研究の実施に当たっては、昭和60年度研修生・鈴木 操氏(日本鋼管技術開発本部)及び構造部・千葉照男技官のご協力を賜った。ここに深謝の意を表します。

参考文献

- 1) 秋山 暉他：鋼コンクリート合成サンドイッチ構造部材の強度特性、第8回コンクリート工学年次講演会論文集、1986年、pp.605~608
- 2) 小沢一雅他：鋼コンクリート合成構造のせん断耐荷機構、第8回コンクリート工学年次講演会論文集、1986年、pp.777~780
- 3) 清宮 理他：合成構造におけるシアコネクタの基本的な力学性状、第8回コンクリート工学年次講演会論文集、1986年、pp.609~612
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説、II鋼橋編、1980年 5月
- 5) Roger G. Slutter and George C. Driscoll, Jr.: Flexural Strength of Steel-Concrete Composite Beams, Proc. of ASCE, ST2, April 1965, pp. 71-99.
- 6) 土木学会：コンクリート構造の限界状態設計法指針(案)、1983年11月
- 7) 二羽淳一郎：FEM解析に基づくディープビームのせん断耐荷力算定式、第2回RC構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム論文集、1983年10月、pp.119~126

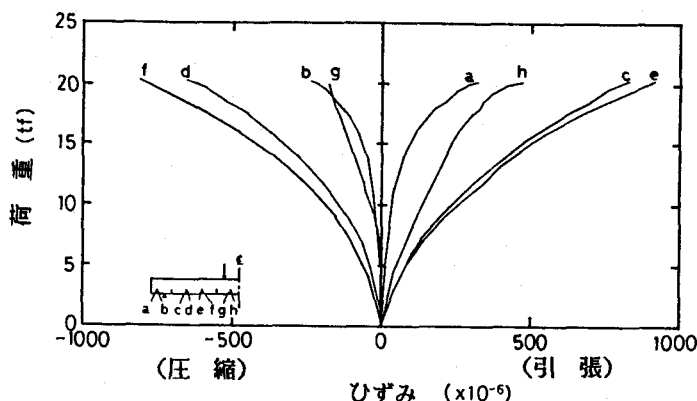


図-11 ずれ止めのひずみ