

## 断面が急変する部分のひずみ分布に関する基礎研究

神 山 一\*  
岡 田 武 二\*\*

## 1. 要 旨

RCまたはPC桁の断面が急激に変化する部分にひびわれを生ずることがある。ゲルバー桁のヒンジ部などはその一例である。これらのひびわれの原因としてコンクリートの乾燥収縮、温度分布の変化、隅角部の応力集中および偏心載荷によるねじれの影響などが考えられるが、本報告は外力が作用した場合のひずみ分布の状態とひびわれ傾斜角、ひびわれ発生荷重などを調べたものである。

断面急変部近傍の応力集中の程度を調べる方法としては光弾性実験によるのが常道と考えられるが、ひびわれ発生の機構が明確でない現在においては、光弾性実験と同時にひずみ分布および大きさの検討もまた大切と考える。このような観点に立ってひずみ分布および大きさから、ひびわれ発生の可能性を検討したものである。

ひずみ測定結果からつぎの傾向が推察された。

- 1) プレストレッシングのみによって断面急変部分の隅角部にひびわれを発生する可能性は少ない。
- 2) 伸びひずみを中心として調べると、プレストレスによる伸びひずみと曲げ荷重による伸びひずみとの和が最大になる方向とひびわれ発生方向とは一致する。
- 3) ひびわれは隅角部から発生し、その桁軸となす傾斜はプレストレスを増すにしたがって小さくなる傾向が見られる。本実験の範囲では  $10^{\circ} \sim 20^{\circ}$  の範囲にある。この傾向はRCの場合とかなり異なり、プレストレスの大きさによって傾斜角  $0^{\circ} \sim 45^{\circ}$  の範囲にひびわれを発生する可能性がある。
- 4) 伸びひずみが  $(600 \sim 1000) \times 10^{-6}$  に到達したときにひびわれを発生した。しかし、このひずみ量は試験体の形状寸法およびスターラップの配置状態などによって変化する。

## 2. ま え が き

断面が急激に変化する部分の隅角部から発生するひびわれの原因として、コンクリートの硬化過程において生ずる温度の不均等分布または不均等収縮にもとづく元応

力および静荷重、動荷重による応力などがある。これら諸要因のいずれも重要なものであるが、ここでは荷重による応力、ひずみを中心として考察する。

ゲルバー桁のヒンジ部のようにコンクリートの断面が急変する部分のプレストレスによる補強は予期される応力に対してなされるものであり、引張応力がある限界値に到達したときにひびわれを生ずると仮定するならばこの補強方法は正しい。しかし、一方において伸びひずみがある限界値に到達したときにひびわれを生ずると仮定するひずみ限界説が成立すると仮定するならば、応力を対象としたプレストレスによる補強方法では必ずしも十分とはいえない。特に複雑な応力を生ずる部分では、応力対象の補強方法だけではなく、伸びひずみ対称の補強方法についても検討してみる必要があるように思われる。断面が急変する部分の応力分布を求める方法として弾性理論による方法、光弾性実験による方法およびコンクリート桁による実験などがあり、これらは並行して検討すべきであるが、定性的な傾向を見るにはPC桁による実験が最も容易である。すなわち、ひずみの分布やひびわれ発生位置、傾斜角などはPC桁による実験によって大略の傾向を察知できるが、一般性に欠ける点は避けられない。

RCゲルバー桁のヒンジ部の設計については、基本方針が確立されているように見受けられ、これに関する実験報告もある<sup>1)</sup>。岡本、石綿両氏<sup>2)</sup>はRCゲルバー桁支承部の応力分布を測定し、2次的応力がかなり大きくなることを確認し、鉄筋の配置その他について貴重な資料を提供した。この報告によると隅角部から発達するひびわれの桁軸となす傾斜角はほぼ  $45^{\circ}$  程度であって、実際に架設されているRCゲルバー桁ヒンジ部のひびわれ傾斜角と相似している。また成瀬氏<sup>3)</sup>は、ヒンジ隅角部はNotch Effectによって応力集中を生じ易い所であるからハンチをつけて角をとるか、丸味をつけるのがよいと述べている。これらの報告は断面が急変するRCまたはPC部材の設計にあたって配慮すべき貴重な資料を提供している。

断面が急変するPC部材の1例としてゲルバー桁ヒンジ部をとってみると、実験的にRC部材とかなり異なったひびわれの傾向が認められる。以下にひずみとひびわ

\* 工博 早稲田大学助教授 理工学部土木工学科

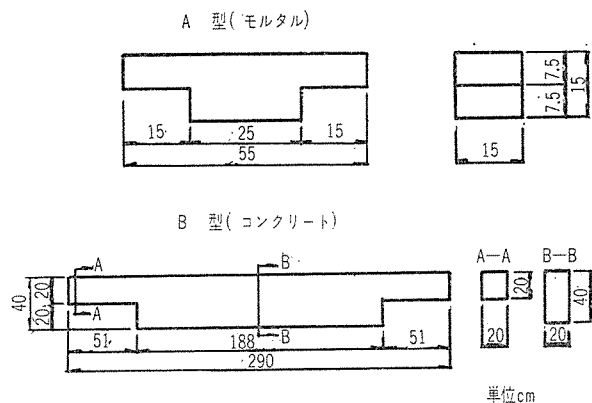
\*\* 早稲田大学大学院工学研究科 修士課程

れを中心として一、二の実験結果を述べる。

### 3. 実験の方法

この実験では図-1に示すモルタル供試体(A型)とPC桁(B型)供試体とを用いた。断面は長方形で諸寸法は図-1のとおりである。供試体の幅を小さくしたのは支承部における偏心载荷の影響を極力少なくすることを考慮したためである。

図-1 供試体寸法



A型のモルタル試験体は予備の実験として実施したもので、軸方向圧縮力および曲げ荷重を単独に図-2の条件で载荷し、それぞれの断面急変部近傍のひずみ測定値を集計して、最も大きな伸びひずみを生ずる位置を調べた。軸方向力をプレストレス力と仮想し、载荷条件I、IIおよびIIIの場合の隅角部ひずみを測定したのである。B型PC桁の载荷条件は図-3のとおりである。B型供試体のプレストレスは、土木学会PC指針の許容値に近いものと、やや大きいものと2種

図-2 A型载荷条件

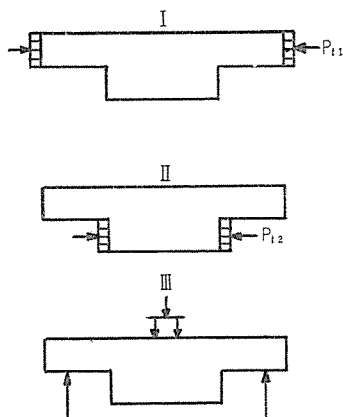
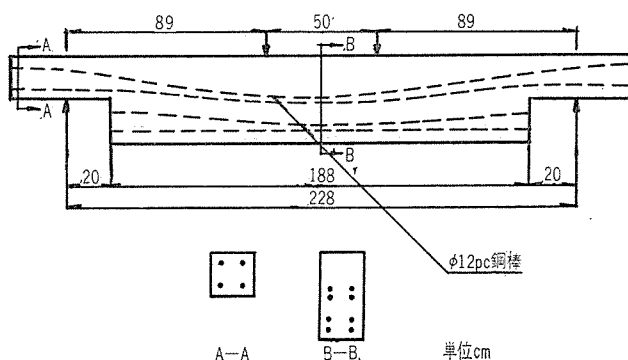


図-3 B型载荷図



とした。

供試体の製作に用いたモルタルおよびコンクリートの配合および強さは表-1のとおりである。型わくは材令2日ではずし、その後は試験前日まで湿布養生した。A型モルタル供試体は材令7日で载荷した。B型PC桁は材令7日でプレストレスを与え、グラウトする場合はただちに実施し、材令14日で载荷した。

表-1 モルタルとコンクリートの配合および強度 (a)

配合	骨材最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	単位水量 (kg)	単位セメント量 (kg)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位細骨材量 (kg)	単位粗骨材量 (kg)
Aモルタル	5	0	218	545	40	—	1608	—
Bコンクリート	25	45	170	425	40	41	755	1085

(b)

配合	圧縮		引張		曲げ
	$\sigma_7$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_{14}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_{17}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_{14}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_{b14}$ (kg/cm <sup>2</sup> )
Aモルタル	485	—	39.3	—	—
Bコンクリート	288	375	—	38.2	59.7

ひずみの測定には電気抵抗線ひずみ計を用いた。A型モルタル供試体にはゲージレンジ30mmのものを用い、図-4のAB、ACおよびADと直角方向に、また供試体両面に配置した。PC桁はゲージレンジ60mmのものを用い、その配置は最初A型供試体と同様にしたが、ひびわれ傾斜角の範囲が明確になった後は図-5のAB、ACおよびADに直角な方向に配置した。

図-4 A型供試体のゲージ配置図

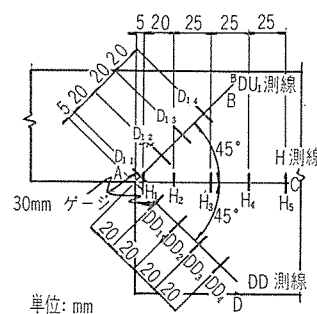
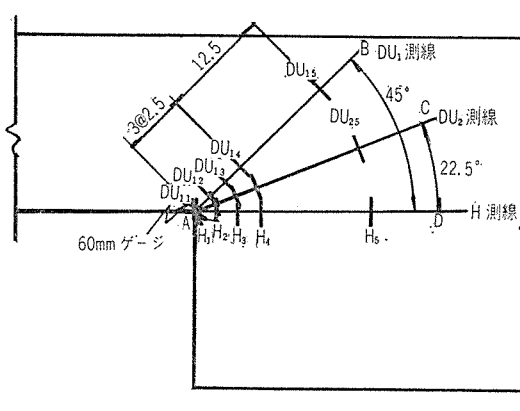


図-5 B型ゲージ配置図



4. ひずみ測定値

以下にひずみ測定値の一、二例をあげ、その特徴を述べる。A型モルタル供試体のひずみ分布を載荷条件別に示したものが図-6, 7 および 図-8 である, ひずみの記号は伸びを (-), 縮みを (+) として表わした。軸方向圧縮力の大きさを 20 t (約 178 kg/cm<sup>2</sup>) のときをとり, 曲げ荷重は破壊に近いときのものをとって示した。図-6 は載荷条件 I の場合のひずみ分布を示したもので, 隅角部をとる H 線および DD 線と直角方向の一部にわずかの伸びひずみを生じている。図-7 は載荷条件 II の場合のひずみ分布を示している。この場合は H 線および DU<sub>1</sub> 線と直角方向の一部に伸びひずみを生じている。この場合の DD 線と直角方向には縮みひずみを

図-6 載荷条件 I の場合のひずみ分布図 (A 型モルタル)

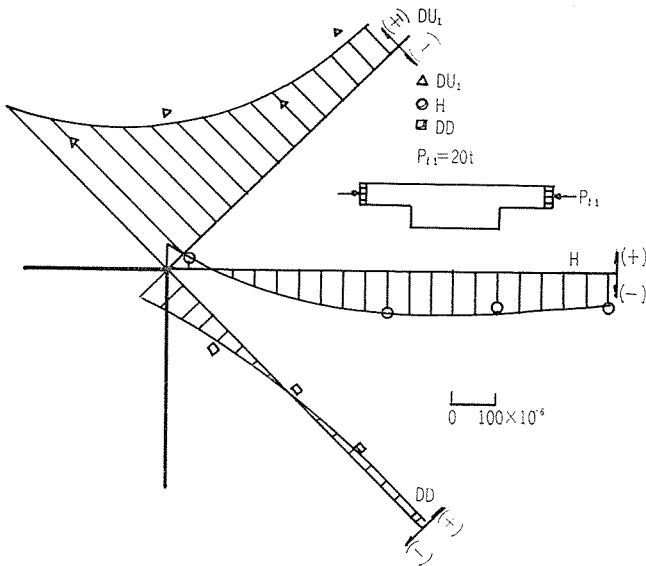
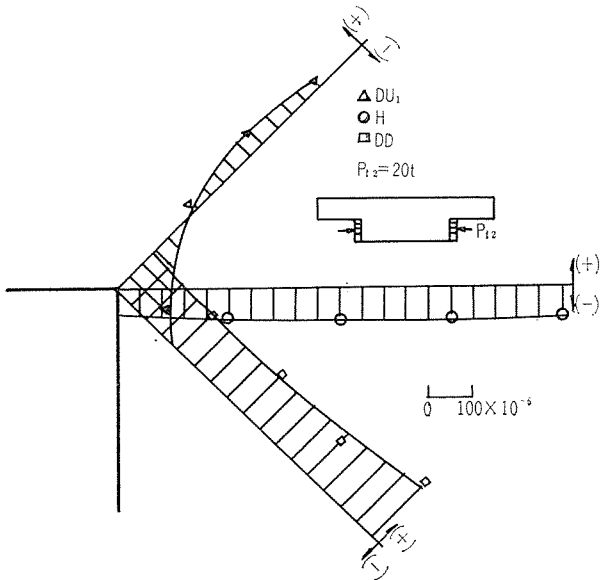


図-7 載荷条件 II の場合のひずみ分布図 (A 型モルタル)



生ずる。図-8 は載荷条件 III の場合のひずみ分布を示したもので, 破壊に近い荷重の値を取っている。この載荷条件では H 線, DU<sub>1</sub> 線に直角方向にかなり大きい伸びひずみを生ずるが, DD 線と直角方向にはほとんどひずみを生じない。図-9 は載荷条件 I と II の場合のひずみの合成値を表わしたもので, H 線と直角方向にのみ伸びひずみを生じ, DU<sub>1</sub> 線, DD 線と直角方向には縮みひずみを生じている。図-10 は載荷条件 I, II および III の場合のひずみの合成値を示している。H 線と直角方向にかなり大きな伸びひずみを生じ, DU<sub>1</sub> 線と直角方向では隅角部に近い部分で伸びひずみとなる。しかし, このひずみ合成値の分布, 特に伸び縮みは軸方向圧縮力および曲げ荷重の大きさの割合, すなわち  $P_{11}$   $P_{12}$  および  $P$  (図-10 の載荷記号参照) の組合せによって変化するが, H 線あるいは DU<sub>1</sub> 線と直角方向に伸び

図-8 載荷条件 III の場合のひずみ分布 (A 型モルタル)

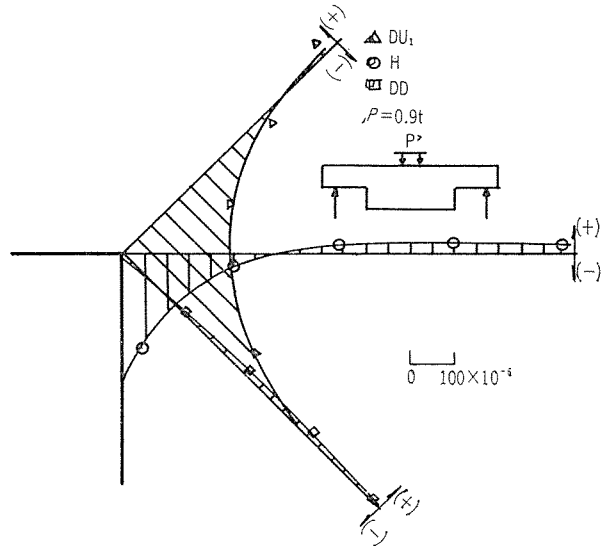
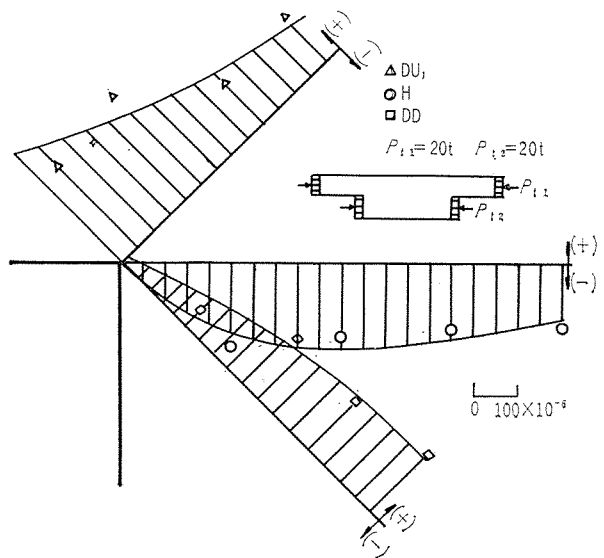


図-9 載荷条件 I と II との合成ひずみの分布 (A 型モルタル)



ひずみを生ずる傾向のあることは認められる。図-11、  
図-12 および 図-13 は大きい伸びひずみを生ずる位置

図-10 荷条件 I, II および III の合成ひずみの分布

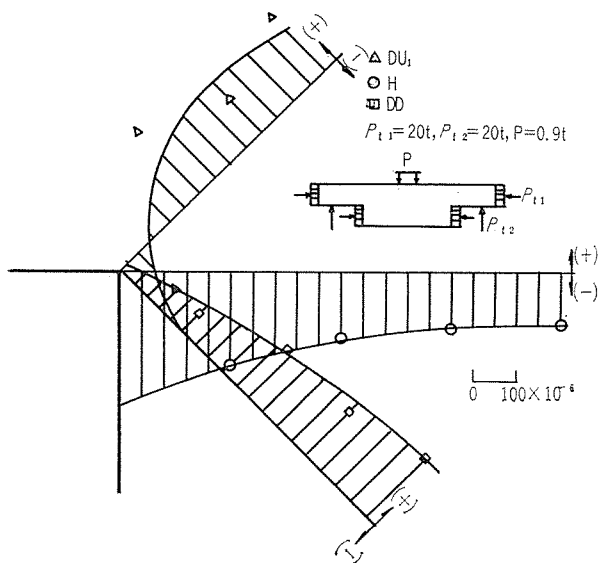


図-11 荷条件 I におけるゲージ H1 のひずみ

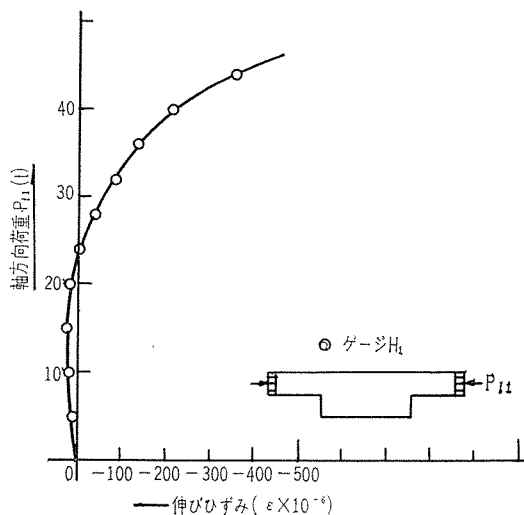
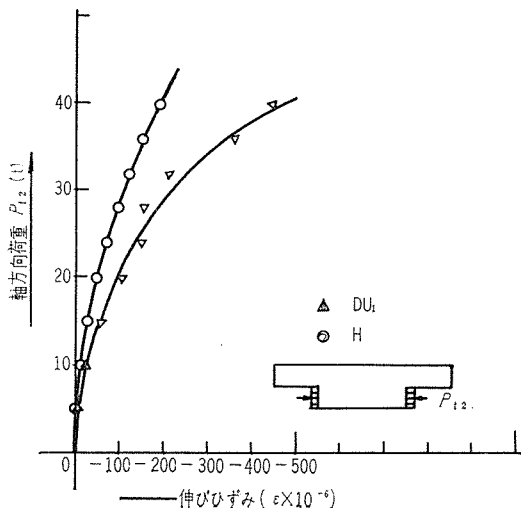


図-12 荷条件 II におけるゲージ H1, DU11 のひずみ



にあるゲージのひずみと荷重との関係を示したもので、  
ひずみ増大の傾向は大略このように変化する。図-14 は  
ゲージ H1, DU11 と合成ひずみとの関係を示している。  
これは曲げ荷重を 0.9 t にとった場合のものであって一  
般性にとほしいが、軸方向圧縮力の合成値 ( $P_{11}+P_{12}$ )  
(図-14 記号参照) が小さい AB 区間の伸びひずみは  
DU1 の方が大きく、軸方向圧縮力の合成値が大きくなる  
にしたがって BD 区間の伸びひずみ H1 の方が大き  
くなる傾向がある。もしこの伸びひずみとひびわれ発生  
方向との間に何等かの関連があると仮定するならば、R  
C部材の場合は軸方向圧縮力が作用しないから DU1 線  
方向すなわち桁軸と 45° の角度をなす方向にひびわれを  
発生する可能性があり、P C部材の場合は軸方向圧縮力  
がかなり大きいから H線方向に、すなわち桁軸に平行な  
方向にひびわれを発生する可能性がある。ひびわれを発  
生しやすい方向は軸方向圧縮力の大きさによってその傾  
斜角が 0°~45° の範囲に変化するであろうと推察される。

図-15, 図-16 および図-17 は P C 桁 (B 型) ヒン

図-13 荷条件 III の場合の DU1, H1 のひずみ

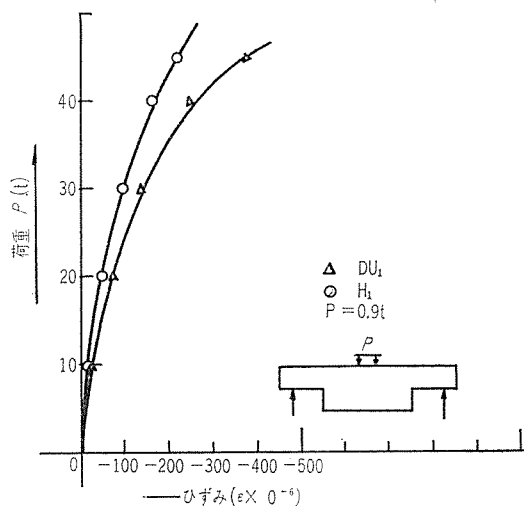
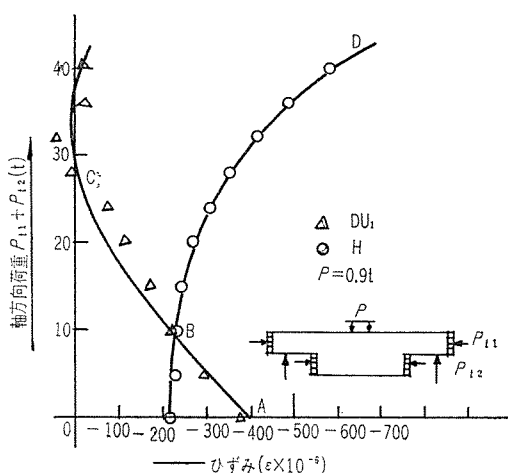


図-14 ( $P_{11}+P_{12}$ ) と H1, DU11 との関係



ジ部のひずみ分布の例である。この桁のプレストレスは  
スパン中央断面の上面で0, 下面で  $+160 \text{ kg/cm}^2$ , 断面

図-15 PC 桁ヒンジ隅角部のひずみ分布 (B型)

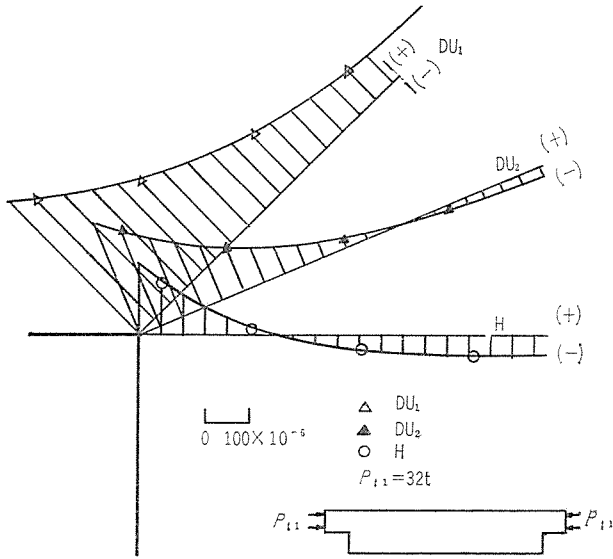


図-16 PC 桁ヒンジ隅角部のひずみ分布

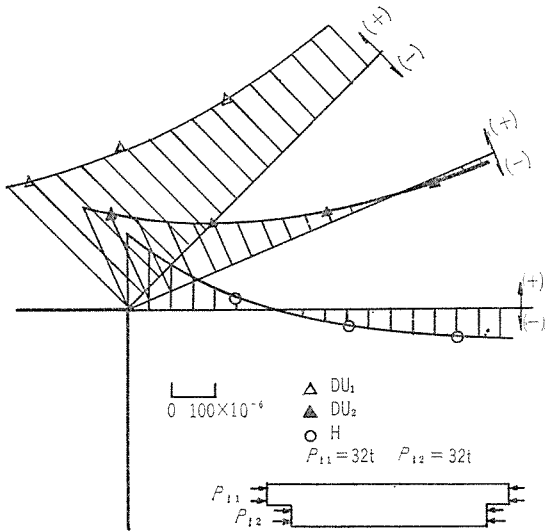
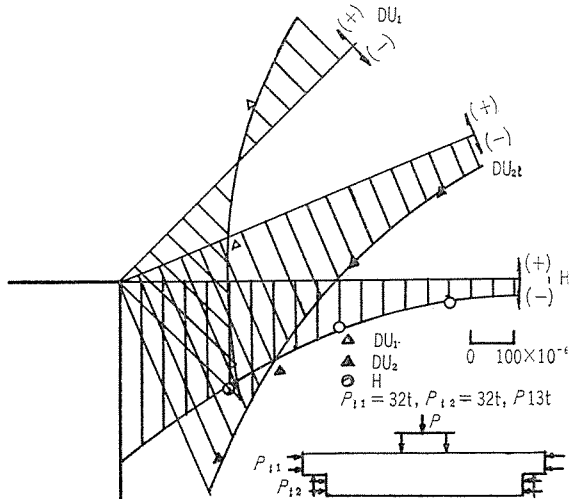


図-17 PC 桁ヒンジ隅角部のひびわれ発生直前のひずみ分布



が急変して減少したヒンジ部面の上面で  $+4 \text{ kg/cm}^2$ , 下面で  $+156 \text{ kg/cm}^2$  である。図-3 に示す載荷条件でスパン中央断面とヒンジ部断面とはほぼ同時に曲げ引張りひびわれを生ずるプレストレスが与えられている。ヒンジ部断面にプレストレスを与えたときの隅角部近傍のひずみ分布はA型モルタル試験体の載荷条件I (図-6) と同一傾向を示している。この場合H線と直角方向に一部伸びひずみを生ずる部分があるが、その量は僅少である。

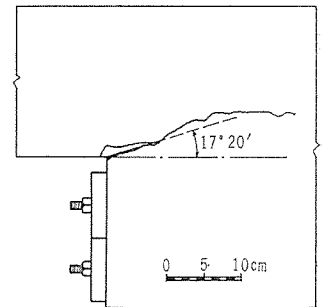
図-17 はプレストレス導入完了直後における隅角部近傍のひずみ分布である。A型モルタルの載荷条件IとIIとのひずみ合成値の分布(図-9)に相当するもので、H線に直角方向のひずみ分布に多少の相違があるが、傾向は相似している。一部に伸びひずみを生ずるが、その量は僅少である。図-17 はプレストレスと荷重との合成ひずみの分布を示したものである。荷重は隅角部にひびわれを発生する直前の値をとった。図-17 は隅角部でDU<sub>1</sub>線、DU<sub>2</sub>線およびH線に直角方向のひずみはいずれも伸びひずみとなり、DU<sub>2</sub>線に直角の方向が最も大きい伸びひずみを示している。この分布図からDU<sub>2</sub>線とH線の間にも最も大きい伸びひずみを生ずる方向があることが推察される。もし伸びひずみが限界値に到達したときにひびわれを生ずるものと仮定すればH線とDU<sub>2</sub>線との間に発生するはずである。このひずみ分布の傾向はA型モルタル試験体の合成ひずみ分布を示す図-10と一致している。

### 5. 伸びひずみの分布とひびわれの方向

PC桁ヒンジ隅角部のひびわれは曲げ引張りひびわれ発生荷重の約50%の荷重で発生している。ひびわれの形状は図-18のようになり、その傾斜角は約 $17^\circ$ である。一方、伸びひずみの分布は図-17に示したとおりDU<sub>2</sub>線(傾斜角 $22.5^\circ$ )とH線(傾斜角 $0^\circ$ )との間で最大となる傾向があり、DU<sub>2</sub>線と直角方向の最大値は $-450 \times 10^{-6}$ 、H線と直角方向の最大値は $-400 \times 10^{-6}$ で、DU<sub>2</sub>線に近い位置で最も大きくなっていることが推定される。すなわち、伸びひずみが最大となる方向に直交してひびわれを発生する可能性のあることが、ひずみ分布の傾向とひびわれ傾斜角が一致することから推察される。

ひびわれの傾斜角はプレストレスの増加とともに減少する傾向が認められ、普通程度の大きさのプレストレスを与えた場合の傾斜角は $10^\circ \sim 20^\circ$ の範囲にある。伸びひ

図-18 ひびわれ状態



ずみの限界値は、別に実施した実験から  $(600 \sim 1000) \times 10^{-6}$  程度と考えられる。

## 6. 考 察

断面が急変するコンクリート部材の隅角部から発生するひびわれ発生機構を解明するために、伸びひずみを中心とした一、二の実験を試みたが、伸びひずみに重点を置いたのは数年前から実施してきたRCゲルバー桁ヒンジ部のひびわれ発生状況の調査結果にもとづいた発想によるものである。この研究手段は片寄ったものであるから、これから導かれた結論がすべての場合に妥当であるかどうかは明らかでない。応力分布その他が理論的に解明されなければ一般性は生れない。しかし、PCゲルバー桁ヒンジ部のように断面が急変する部分の隅角部から発生するひびわれがRCの場合と異なることは実験的に明らかであるから、現段階ではこのひびわれの傾向を考慮して補強対策が検討されるべきである。

## 7. む す び

ゲルバー桁ヒンジ部のように断面が急変する部分の隅角部から発生するひびわれに関する一、二の実験の概要を述べたが、これからつぎのことがいえる。

1) 隅角部から発生するひびわれの方向と最大伸びひずみを示す方向に直交する方向とはほぼ一致する。

2) 伸びひずみが  $(600 \sim 1000) \times 10^{-6}$  になるとひびわれを発生するようである。このひずみ量は直接引張限界ひずみ量よりもかなり大きい。

3) ひびわれと桁軸とのなす角度はプレストレスの大きさによって差があるが、普通の場合 ( $10^\circ \sim 20^\circ$ ) の範囲にある。この角度はRCの場合の約  $45^\circ$  よりもかなり小さい。

4) 隅角部にひびわれを発生する荷重は、曲げ引張りひびわれ発生荷重よりかなり小さい。例えば図-3に示したPC桁の場合はスパン中央断面、ヒンジ部断面ではほぼ同時に曲げ引張りひびわれを生ずるようにプレストレスを与えたが、隅角部のひびわれは、曲げ引張りひびわれ荷重の約 50% の荷重で生じている。これから推定すると実際の構造物では設計荷重よりかなり小さい荷重でひびわれを生ずる可能性がある。

5) プレストレスのみによって隅角部からひびわれを発生する可能性は少ない。しかし架設の際に起る曲げ応力に対して一時的にプレストレスを与える場合、隅角部から発生するひびわれに対する安全度は必ずしも増さないから、ヒンジ部に一時的に作用するせん断力、曲げモーメントの大きさによってはひびわれを生ずる可能性もある。

以上のことが本実験から推察されるが、実際の構造物ではつぎの諸点が隅角部ひびわれの発生に影響すると思われる。

6) ヒンジ部の反力が均等に分布せず偏心载荷となって“ねじり”をとまうと隅角部ひびわれを発生しやすい。この傾向はRCゲルバー桁ヒンジ部のひびわれ発生状況からも推察される。施工時に慎重な配慮が望まれる。

7) 動的くり返し荷重と隅角部ひびわれとの関係を研究する必要がある。

8) 隅角部ハンチの形状とひびわれとの関係についても実験研究の必要がある。これについてはPC部材のハンチの形状とひびわれとの関係を調査するのが有益である。

このような隅角部から発達するひびわれに対しては、PC鋼材の曲げ上げ、プレストレスを与えた傾斜スターラップまたは鉛直スターラップの使用が望ましい。これができない場合は十分な量のスターラップを使用すべきである。補強の基準となる応力分布は隅角部をとおり桁軸と  $10^\circ \sim 20^\circ$  の傾斜をなす面上に引張り強さに相当する引張応力が分布すると仮定するのも一つの方法である。

本実験は、中条友義、楊瑞宗、陳文雄、小沢俊司、久松光世氏の協力をえて実施し、資料の一部を岡田が整理した。ご協力下された諸兄に御礼申し上げます。

## 参 考 文 献

- 1) 横道英雄：鉄筋コンクリート橋，技報堂，昭和27年  
横道英雄：鉄筋コンクリート桁ゲルバー鉸端部の計算，土木技術，第7巻第7号，昭和27年7月
- 2) 岡本舜三，石綿知治：ゲルバー桁吊桁支承部の応力分布に関する1実験，土木技術，第7巻第7号，昭和27年7月
- 3) 成瀬勝武：土木技術第7巻第12号，技術相談室の解答

1964.6.22・受付