

# 第九章 鐵筋コンクリート矩形及T形断面桁彎曲原論

## § 88. 鐵筋コンクリート桁彎曲概論

鐵筋コンクリート部材として最もよくその特性を發揮するものゝ一に彎曲に抵抗する桁がある。尤も鐵筋コンクリートは柱の如く抗壓部材として、或は又抗張部材として使用さるゝ場合もある。然し乍ら柱や抗張材ではまだ充分その特性を發揮して居ない。元來コンクリートは壓應力に對しては相當に強いが張應力に對しては大變弱く、且その抵抗力たるや甚だ不確實のものであるから、之を鋼を以て補強した鐵筋コンクリートを桁材として使用するの最も妙味あることゝ言はねばならぬ。

或る部材が彎曲を受けるときはその一断面には彎曲率と剪力とが作用し、その結果彎曲應力と剪應力とが誘起される。此場合外力と内應力との關係を吟味するには夫々を別個の問題にして取扱ひ得る様な實驗研究に依る方が便宜が多い。然し乍ら全々別々に取扱ふことは多少困難であるが今少しく注意すれば必ずしも難事ではない。例へば單桁に二つの等大の集中荷重を對稱的に加へた場合を考へれば兩荷重間に於ては桁の自己重量を無視すれば彎曲率は不變で剪力は零である。斯くの如くして彎曲應力と剪應力とを別々に切り離して吟味することが出来れば鐵筋コンクリート桁の彎曲理論を的確に究めることが出来る。

先づ彎曲應力から吟味せんに、茲に  $E$  なる常數の彈性係數を有する均等断面の桁が彎曲率のみを受けた場合その彎曲應力を計算するに當りては次の假定をする。

- 1° Bernoulli の假定：— 平面なりし断面は彎曲後も尙平面であつて中立軸の位置は不變である。
- 2° Hooke の方則：— 應力と變形とは比例する。
- 3° Navier の假定：— 或断面の正應力  $\sigma$  は中立軸からの距離に比例する。

以上の假定は鋼其の他の桁に於ては實際上成立するのは讀者のよく知れる通りであつて、かゝる桁の應力の計算は至つて容易に出来るものである。反之鐵筋コンクリート桁は Hooke の方則に隨はないコンクリートと鋼とから出來て居るから必ず

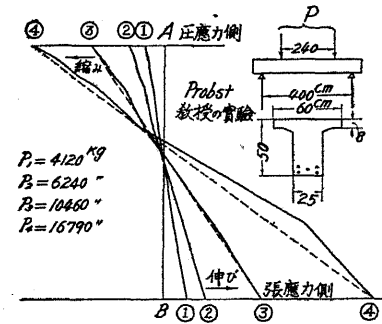
しもそう簡單には解決出來ぬ。隨つて上述の假定を基本として實驗の結果に適用する彎曲理論を見出すことすら容易でないばかりでなく、更に鐵筋コンクリート特有の難問題が横はつて居つてその理論は益々複雑して來る。

上述の如く鐵筋コンクリート桁に於ては彎曲應力すら容易に計算する事が困難であるから、まして剪應力の計算は尙更のことである。加之鐵筋コンクリート桁に於ては斜張力を考へなくてはならぬ。元來コンクリートの抗張強度は抗壓強度に比して非常に低い。隨つて斜張力に對して充分なる補強を施さないと桁は之によつて破壊することが屢々ある。以下諸大家の實驗研究を基として桁に關する彎曲理論に就

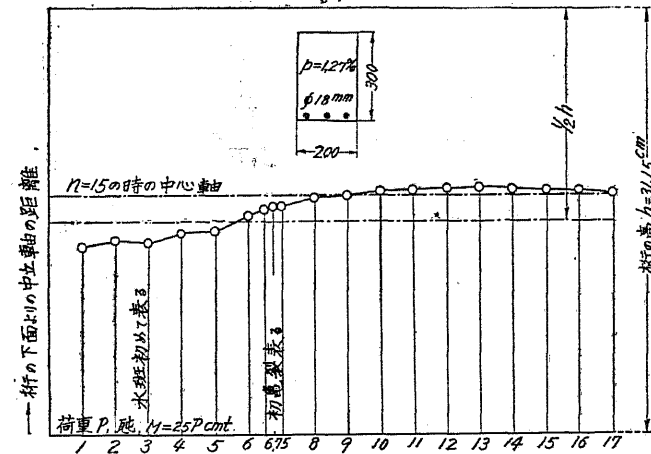
て考究して見よう。

## § 89. 断面の變位及變形と中立軸の移動

Hooke の方則に隨ふ様な材料では Bernoulli の假定を適用し得るが、鐵筋コンクリートでは多少趣を異にする。Schüle 氏又は Müller 博士の實驗に於ては彎曲率を受けた桁に於てはその断面は最早平面でない事が證明されて居る。Probst 教授の實驗によれば



第 45 圖



第 46 圖

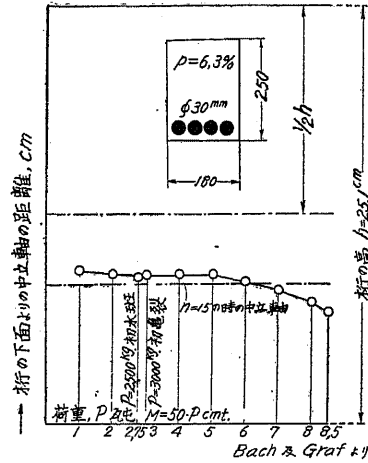
ば T 形桁に於ても同じ結果が表はれて居る。第 45 圖はその實驗に於ける荷重と變形との關係を示したもので、荷重が増すに連れ、伸び及び縮みが増加し、その變形は必ずしも中立軸よりの距離に

比例せず、且荷重大なるに至れば中立軸は壓應力側に移動することが判る。

上述の如く彎曲率を受けた桁の断面は變形すると同時に普通の鐵筋量の桁に於てはその中立軸が彎曲率の大なるに連れて壓應力側の方に移動する。その移動の様子は第46圖からも判る様に張應力側に龜裂を見る迄は殆んど移動はないが一旦龜裂が入ると移動が顯はれて来る。

但し鐵筋量が特別に多いものは第47圖に示すが如く却つて反對の結果を示して居るのは理の當然である。

上述から明な様に鐵筋コンクリート桁の断面の變形及中立軸の移動は必ずしも Bernouilli の假定には隨はない。而してその移動は彎曲率の大小によりて自ら關係を異にする。即ち桁に許容應力程度の應力を起す彎曲率の場合に於ては桁の断面は變形せず、且中立軸は移動しないものと思つてよい。又鐵筋量の多少によりて相違があるもので鐵筋量が少い程中立軸の移動に及ぼす彎曲率の影響は大である。



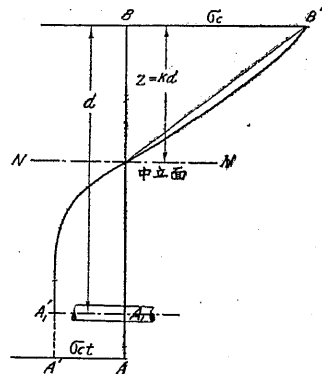
第 47 圖

§ 90. 断面に於ける應力の分布

コンクリートは理論的に論ずれば Hooke 氏の方則に隨はぬ。且コンクリート又は鐵筋コンクリートの断面では Navier 氏の假定は成立しない。

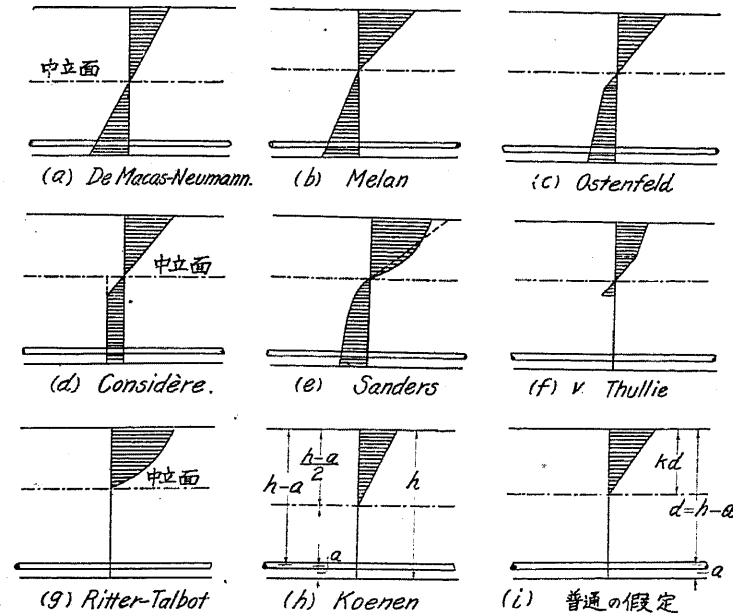
第48圖は鐵筋コンクリート桁の或る断面に於けるコンクリートの應力分布の様子をさせるもので上述の事實を明に説明して居る。

この断面に於ける應力の分布を或る一定の方則によりて表はすことを得ば至つて好都合である。實驗によりて断面の各點に於ける變形を測定する事が出来るから應力と變形との關係を知る時は断面に於ける應力の分布は自ら明となる。Hodgkinson 氏は (11) 式に述べた様に  $\epsilon = \frac{\sigma^3}{E}$  なる



第 48 圖

指數曲線式を以てその關係を表はした。茲に  $\epsilon$  は變形で  $\sigma$  は應力で  $n$  及  $E$  は常數である。 $n$  はコンクリートの性質によりて變ずるもので 1 以上の數である。之に關しては Bach 及 Schüle 兩教授が研究をして居る。又 Lang 氏は(14)式に示した  $\sigma = \frac{E\epsilon}{1+\beta\epsilon}$  なる双曲線曲線を以て  $\sigma$  と  $\epsilon$  の關係を示して居る。之等の關係と断面の變形曲線とから應力分布の法則が考究された。第49圖は此研究の代表的のもので、断面に於ける應力の分布に關する各研究者の假定を示してある。



第 49 圖

圖中(a) (b) (c) 及 (d) は應力が小なる場合にのみ近似的に適用出来るもので (e) は相當の應力までは比較的正確に適合し得る公式なるも計算が複雑

である。(f) 及 (g) は大なる應力まで適用出来るもので特に (g) は破壊の場合に適合し、現在も破壊荷重を求むるに當りては此 Talbot 教授の公式が用ひられて居る。(h) 及 (i) は許容應力の計算の場合に適用し得る假定で、之では張應力を無視して居る。現今の實用計算に於ては殆んど (i) の法則が一般に採用されて居る。

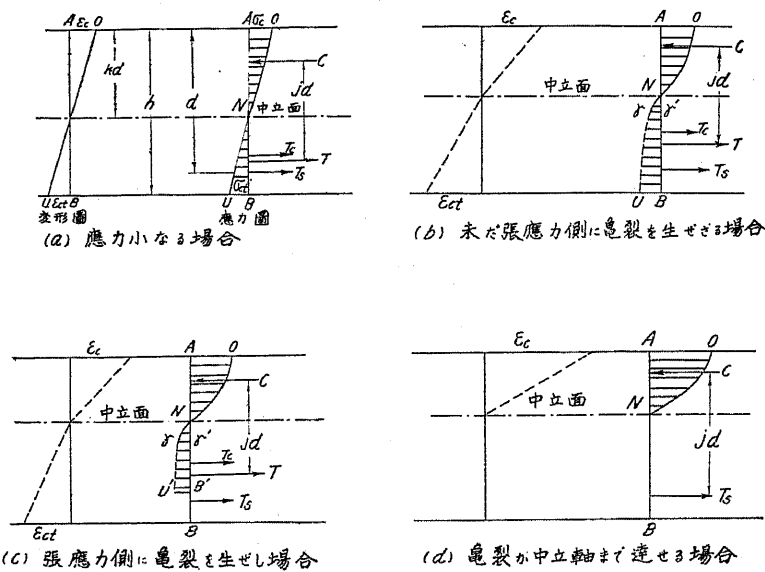
§ 91. 矩形及 T 形断面桁の應力分布に及ぼす荷重の影響

或断面に於ける應力分布と荷重との關係を知らんとせば實驗研究に依らねばならぬ。

第50圖は或實驗で測定した變形とそれによつて計算した種々の荷重に對する應

力分布の様態を示したものである。(a)は荷重又は彎曲率が小なる場合である。Cはコンクリートの壓應力の和で、 $T_c$ はコンクリートの張應力、 $T_s$ は抗張鐵筋の張應力、 $T$ は $(T_c + T_s)$ でCに等しい。而して彎曲率  $M$  は  $Cjd$  又は  $Tjd$  に等しい。(b)は桁の張應力側のコンクリートに龜裂を生ぜざる以前の、(c)は初龜裂後の變形と應力分布の様態を示した圖である。

(d)は破壊の時で龜裂が中立軸まで侵入せる場合を示す。以上は凡て變形は中立軸の上下共に直線變化をなすと假定して應力の計算を行つたものである。



第 50 圖

斯くの如く應力の分布は彎曲率或は荷重によりて相違するものであるから凡ての場合に適合する鐵筋コンクリート桁の彎曲理論を設定することは困難である。次に鐵筋は初應張龜裂が表はれる迄は殆んど働かないが、一旦初龜裂が入るや否や著しくその効力を發揮するものである。

§ 92. 抗張鐵筋の働き

既に述べた様に抗張鐵筋の最も大切なる役目は断面の張應力側の抵抗を大ならしめることである。抗張鐵筋は断面の張應力側に均等に配布すれば應力の分布が均等になり且つ桁の抵抗力を強めるものである。故に鐵筋は出來得る限り接近して使用し、その徑小なるものを使用するを得策とするもその反面施工上からコンクリート

に用ふる粗骨材の大きさ、施工の容易、附着應力の點から或程度以上に接近して小徑の鐵筋を使用することは許されない。普通鐵筋間の純間隔は鐵筋の直徑の 1.5 倍又は 3cm 以上とする。

断面に彎曲率のみが作用する時には鐵筋は初龜裂以後その効力を發揮するのは前述の通りである。普通の桁に於ては鐵筋の張應力がその屈伏點應力を越えれば桁高が小なるものであれば桁が兩斷し、桁高が大なるものであれば鐵筋の伸びが大なるため龜裂が抗壓力側に侵入してコンクリートの壓應力が大となりて遂に破壊するものである。故に鐵筋コンクリート桁の最大或は許容彎曲強度の計算には鐵筋の最大應力はその屈伏點應力を以てするのが當然である。

Schüle 氏の研究によれば或矩形断面桁は鋼比が 3% 以下の時は上述の如く鐵筋の屈伏のために、鋼比が 3% 以上になつて初めて壓應力側のコンクリートが壓挫されて破壊するものである。即ち普通構造物の部材としての桁に於ては彎曲率に對するその安全さは抗張鐵筋によるものである。尤も Schüle 氏の實驗の結果は凡ての場合に適用は出來ないが、彎曲率を受けた断面の最も適當なる設計をなすには抗張鐵筋の應力が屈伏點應力に達すると同時に抗壓コンクリートの應力が破壊強度に達する様に鋼比を定めねばならぬ。

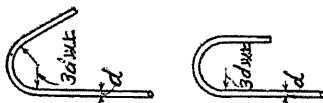
鐵筋はコンクリートとの附着が良くないと充分働を發揮し得ないからその面が平

碇着の方法	効率
(a)	100
(b)	169
(c)	180
(d)	196

滑なものはよくない。多少の錆は差支へないが、鱗状の浮錆は針金刷毛の類で落すが良い。

抗張鐵筋はその効力を發揮させるためその端は折曲げて用ふる。この鐵筋の碇着(Anchorage)の方法には第51圖に示す如く數法がある。

Bach 教授の實驗によれば 180°折曲げた Considère 氏鈎が最もよく、鋭角鈎之れに亞ぎ直角鈎は少しく劣るもので鈎なきものは最も悪い。故に鐵筋は本則としてそ



第 52 圖

の端を折曲げて鈎となすを要し而も鋭角或は Considère 氏鈎をよしとす。第52圖は我土木學會の標準鈎を示す。

桁に於ける鉄筋は抗張鉄筋に限らず接合しないがよい。已むを得ず抗張鉄筋を継ぐ場合には最大彎曲率の断面を避け、なるべく相互にずらし一断面に集中しない様にする。抗張鉄筋の重ね継手は鉤なき時は鉄筋直径の 50 倍の重ね合せがないと効率が 100% にならぬ。それで普通は半圓形の Considère 氏鉤を作り重ね合せを鉄筋直径の 30~40 倍とし、直径 0.9mm 以上の焼鈍鋼線にて數箇所緊結する。場合によりては熔接継手にする事があるがその際は熔接の効率が 80% 以上になる様な方法を取り、且つ継目には 50% 以上の断面を有する附加鉄筋を併用する。此附加鉄筋は両端に Considère 氏鉤を有し、重ね合せの長さはその直径の 60 倍以上とする。硬鋼又は 14mm 以下の鉄筋は熔接は宜しくない。

鉄筋が非常に錯雑せる所では継ぐのはよくない。又大きな鉄筋を継ぐ時は重ね合せはよくない。それでターンバックルを用ひて接ぐことがある。接ぐ場所は折曲けの途中がよい。

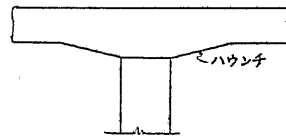
§ 93. 桁に於ける壓應力側のコンクリートの補強

鉄筋コンクリート桁に於てコンクリートのみで壓應力を受ける事が出来ない時は抗壓鉄筋を以つて補強することがある。即ち大なる彎曲率を受ける高さが制限された矩形断面桁、或は大なる負彎曲率を受ける連続 T 形断面桁の場合が即ちそれである。一般に連続桁の場合負彎曲率の抵抗を増すため支承の處では桁高を増すため第 53 圖の如くハウチを設ける場合が多いが、それでも彎曲率に抵抗し得ない時は已むを得ず抗壓鉄筋が必要になつて来る。

この壓應力側を補強するに二つの方法がある。第一は抗張鉄筋同様、桁に沿ふた縦鉄筋を以つて補強する方法で、第二は螺旋筋柱の場合の如く壓應力側コンクリートを箍鉄筋によりて取囲み應力と直角の方向に變形するのを妨げてその抗壓強度を増加せしめんとする方法である。

第一の方法に依る場合には縦鉄筋は相當大なる径のものを用ひ、且つ所々を肋筋によりてその位置を保たしめるを要し、又屈伏點應力の高い鋼程よろしい。

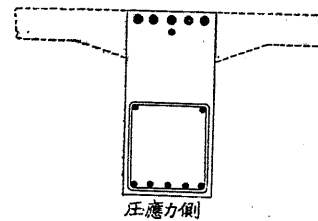
尙壓應力側を鉄筋を以て補強する代りに抗壓強度の大なるコンクリートを用ひて



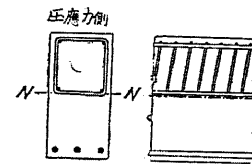
第 53 圖

もよい。即ちコンクリートの配合及使用水量に注意し、施工をよくする事によりてその抗壓強度を大ならしめる事が出来る。

要するに桁の壓應力側を縦鉄筋を以つて補強することは唯特殊な場合にのみ行はれるものである。已むを得ず縦鉄筋を用ふる時は上述の如く屈伏點應力の大きなる、恒久變形の小なる相當直径の大なる鉗を用ひ、且つ肋筋を併用して縦鉄筋が彎折しない様に力めなくてはならぬ。



(a)



(b)

第 54 圖

第二の方法による場合には壓應力側の鉄筋を帶鉄筋にて密接に取囲むか、或は螺旋筋を巻付ける。その模様は第 54 圖に示す通りである。何れの箍鉄筋の場合でも低い應力の場合には効果は表れない。また箍鉄筋外のコンクリート断面は無効であつて且箍鉄筋は中立軸を含んで居ることが必要である。

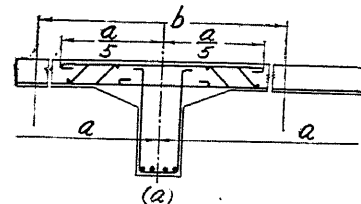
以上の二法の内では現在では施工の容易其他の事情のために第一の方法が普通に用ひられて居る。

§ 94. 對稱及不對稱 T 形断面桁の突縁の作用

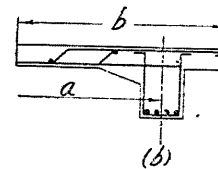
(1) 概説。T 形及 丁形断面の桁が彎曲を受けた場合その壓應力側の突縁の幅と桁の強さとの間に如何なる

關係あるかを述べよう。

Bach 教授によれば突縁の幅が或程度までは完全に全面積で壓應力を受持つが、その幅が餘りに廣くなると許容應力程度では左迄認め得ないが破壊近くなると突縁中の應力の分布が均等を缺く事が明になつた。而して桁の腹部に於ける剪應力による破壊に備へるため隅縁を作ることの有効なことを忘れてはならぬ。又一般構造に於ては突縁部の鉄筋は第 55 圖の如く抗張鉄筋の通しのもとと曲鐵筋と



(a)



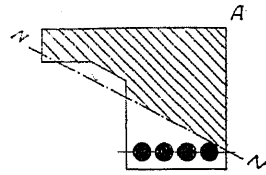
(b)

第 55 圖

を交互に配置するがよい。

次に独立 T 形即ち不對稱 T 形断面の桁に於てはコンクリートの應力は突縁の無い方で大となり、A 點に於て最大値に達し此處に於て破壊が起るのである。

その理由は中立軸  $N-N'$  が第 56 圖の如き位置を取るからである。



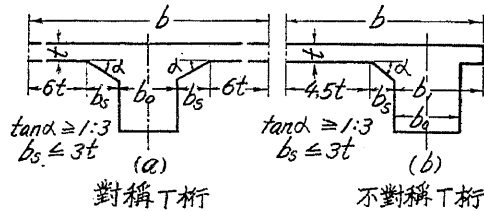
第 56 圖

既に述べた様に T 形桁の應力計算に當つては突縁の幅は重大なる関係がある。故に此突縁の幅は實驗上からその有効幅員及厚さを決定する事を要する。次に之れに關する獨逸、日本及米國の標準示方書の規定を掲げて参考に供しよう。

(2) 獨逸規定。

(a) T 桁の抗壓版は 8cm 以上の厚さを有すべし。

(b) 抗壓版の許容有効幅としては  
イ、T 桁腹部の兩側に版ある場合は第 57 圖 (a) の如く



第 57 圖

$$b = 12t + b_0 + 2b_s$$

但し兩側の版の中心線の間隔より大ならず且つ支間の 1/2 以下たるべし。

ロ、T 桁腹部の片側にのみ版ある場合は第 57 圖 (b) に依り

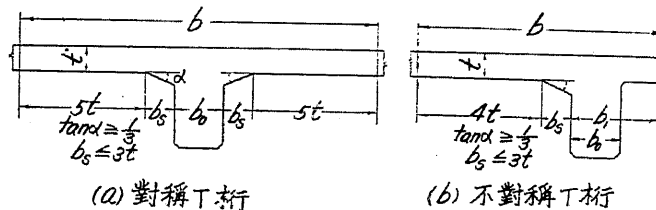
$$b = 4.5t + b_0 + b_1$$

但し純桁間隔の 1/2 に  $b_0/2$  を加へたものより大ならず且つ T 桁支間の 1/4 以下たるべし。

(c) 抗壓版と腹部とを繼ぐ箇所の強がり即ちハウチの傾斜は 1:3 より緩なるべからず。若しかゝるハウチ無き場合には  $b_s$  は零と置くべし。

(3) 日本 (土木學會) 規定。

(a) T 桁の抗壓突縁の有効幅は次式によりて求めたる値を超ゆべからず。



第 58 圖

イ、兩側に版あ

る場合 (對稱 T 桁)

$$b = 10t + b_0 + 2b_s$$

但し  $b$  は兩側に於ける版の中心線間の距離より大ならず、又桁支間の 1/2 を超ゆべからず。

ロ、片側に版ある場合 (不對稱 T 桁)

$$b = 4t + b_1 + b_0$$

但し  $b$  は版支間の 1/2 より大ならず、又桁支間の 1/4 を超ゆべからず。

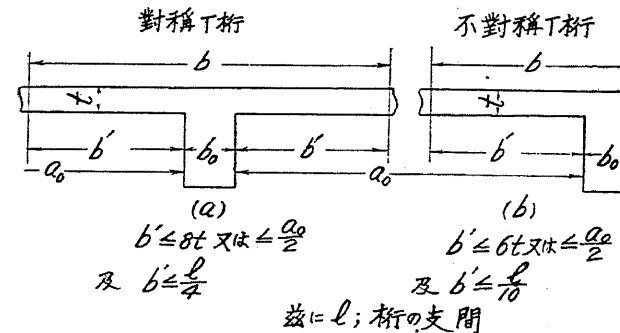
(b) T 桁の突縁版の厚さは 10cm 以上たるべし。

(c) 獨立 T 桁の突縁の厚さは腹部の幅の 1/2 以上とし、その有効幅は腹部の幅の 4 倍を超ゆべからず。

(4) 米國規定。

(a) 床版と桁梁を用ふる床組に於ける桁と版との接合部に於ては有効にして充分なる附着及剪斷抵抗を有すべし。かゝる構造に於ては桁及版は共同作用をなすものと心得べし。

(b) 對稱 T 形の有効突縁幅は桁支間の 1/4 を超ゆべからず。且つ孰れに於てもその突縁



第 59 圖

の突出せる幅は版の厚さの 8 倍又は次の桁との純間隔の 1/2 を超ゆべからず。

不對稱 T 桁に對しては有効突縁幅は桁支間の 1/10 を超ゆべからず、且つ突縁突出の幅は版の厚さの 6 倍又は次の桁との純間隔の

1/2 を超ゆべからず。

(5) 結言。上述の各國標準示方書の T 桁突縁に關する規定は大同小異である。只日獨に於ては版と桁との接合に當りては隅縁を設けるのを本則として居るが、米國に於ては必ずしも之を設くる事を強要してゐない。併し乍ら既述の如く版の剪力並に桁の水平剪力に抵抗するためには隅縁又はハウチを作るを可とする。かようなわけで著者は鐵筋コンクリート構造の性質から言つても獨逸規定の方が米國のよ

り優つて居ると思ふ。まして我國の如く天災國で且つ工事の施工も米獨に比して遅れて居る處に於ては獨逸規定の方針によるべきである。故に土木學會は獨逸に倣つて新規定を作つた、(3)に示したのは即ち之れである。

要之我土木學會の規定は實驗學上、構造上から論じて最もよく我國情に適合して居るから今後この規定の行はれん事を望むものである。

§ 95. 鐵筋コンクリート桁の撓度

鐵筋コンクリート桁の撓度は非常に小にして特に許容荷重以内の荷重を受けたる桁の場合には殆んど考慮の必要は無い位である。構造物竣工検査に當り往々載荷試験を行ふことがある。その際桁の撓度を測定するのであるが、之は施工上の缺點を見出すのが主目的である。我土木學會の標準示方書に於ては構造物の最大撓度は試験荷重を6時間以上載荷した後、永久變形は荷重を取除きて12時間以上経過したる後、之れを測定し、その永久變形が最大撓度の1/4以下たることを規定して居る。實驗の結果から推斷すれば、桁の彈性撓度は設計施工その宜しきを得ば徑間の1/1200~1/700が最大値である。

鐵筋コンクリート桁の撓度は初龜裂が表はれる迄は著しからずして、無筋桁の場合と大差なく龜裂が入りたる後は荷重に比例して著しく増加し破壊状態の直前に急變する。一般の桁の撓度同様に本桁のそれも

$$\delta = \alpha \frac{P^3}{EI} \dots\dots\dots(71)$$

なる式に隨ふものと思つてよいが普通の構造物の場合には殆んど計算するの必要はない位僅少なものである。式中  $\alpha$  の値は次の如くである。

- 中央に集中荷重  $P$  を受けたる單桁.....1/43
- 等布荷重  $P$  を受けたる單桁.....5/384
- 中央に集中荷重  $P$  を受けたる兩端固定桁.....1/192
- 等布荷重  $P$  を受けたる兩端固定桁.....1/384

次に  $E$  及  $I$  は普通齊等質の桁の場合と多少趣を異にするもので Turneaure 及 Maurer 兩教授並に Mürsch 教授等に隨へば實驗研究の結果  $\alpha$  は上表の値を採るものとして  $E$  はコンクリートの彈性係數、 $E_c$ 、 $I$  は桁の断面をコンクリート断面に換算したる  $I$  の値を取ればよい。而して  $E_c$  及  $I$  の計算に當つては次の如き假定に

依る。

- 1° 断面の高さは彎曲公式の場合と同様に桁の上表面より抗張鐵筋の中心線迄の距離即ち  $d$  である。
- 2° コンクリートは壓力並に張力に堪へるもので兩應力とも直線に依つて其の配布の變化を表されるものとする。
- 3° コンクリートの彈性係數は許容壓應力に達する迄の平均値とする。
- 4° 断面の二次率は桁の中央のものを探ること。
- 5° 良く設計された桁に於ては其の腹鐵筋の形式如何、及抗張鐵筋の配置等には無關係である。

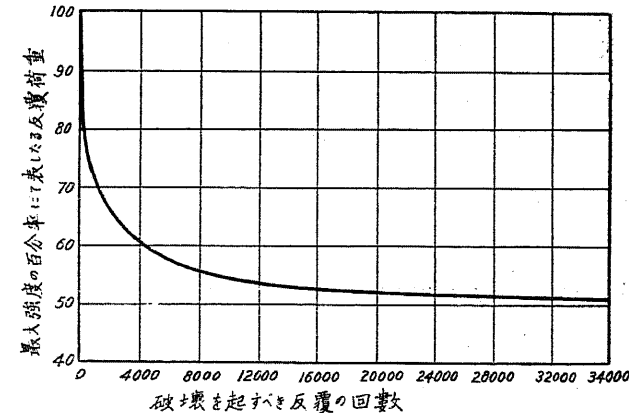
斯かる假定が成立するものとせば  $I$  の値は第十二章に述べる理論から容易に計算される。即ち桁の中立軸に對する有効斷面積の二次率は

$$I = I_c + n I_s$$

となる。茲に  $I_c$  はコンクリートの断面二次率、 $I_s$  は鐵筋の断面二次率である。

§ 96. 反覆荷重が應力及撓度に及ぼす影響

反覆荷重を桁に加ふる時は中立軸の位置、コンクリートの抗壓強度及鐵とコンクリートの附着強度に多少の影響を及ぼすが、その破壊荷重には殆んど影響はない、又全撓度及永久撓度は多少増加するがその荷重より大なる荷重に對する撓度には無關係である。尤も反覆荷重と言つてもその大きによりて之れが及ぼす影響は自ら



異なるものである。即ちその大きが破壊荷重に近ければ近い程僅かな反覆で破壊を來すものであるが破壊荷重の1/2以下の場合には如何に荷重を反覆繰返して加へても破壊は起らぬものと思つて差支

第 60 圖

へない。第 60 圖は破壊を起すべき反覆の回数と最大強度の百分率にて表したる反覆荷重との關係である。

§ 97. 桁の剪應力及コンクリートの抗剪強度

(1) 剪應力と主應力。鐵筋コンクリート構造物に於ては剪應力及之れによりて誘起される主應力が最も重要なものである。今普通の桁の場合を考へるに、それが破壊するのは主に次の原因による。

1° 最大彎曲率が起る断面若しくはその附近に於て抗張鐵筋の受ける張應力が屈伏點應力に達するとき。

2° 剪應力によりて起る主張應力のためにコンクリートに龜裂を生ずるとき。

既に述べた様に (1) の場合の破壊は至つて緩に來るものであるが、(2) の主張應力による破壊は至つて急激で甚だ危険である。

この剪應力及主應力の理論は材料力學本論に屬する事柄であるから詳論は略して此處には單に梗概のみに止めることにする。

桁の或一點に垂直剪應力  $\tau$  が作用すれば之れと等値の水平剪應力が働く。而して之等の剪應力と水平直應力から主應力を見出すことが出来る。

今  $\sigma$  = 水平直應力、 $\tau$  = 剪應力、 $\sigma_1$  及  $\sigma_2$  = 主應力 とすれば

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{1}{2} \sigma + \sqrt{\frac{\sigma^2}{4} + \tau^2} \\ \sigma_2 &= \frac{1}{2} \sigma - \sqrt{\frac{\sigma^2}{4} + \tau^2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (72)$$

(72) 式より明なる如く、最大主應力  $\sigma_1$  は水平直應力  $\sigma$  と同性で最小主應力  $\sigma_2$  は異性である。随つて桁の中立面より上方に於ては  $\sigma_1$  は壓應力、 $\sigma_2$  は張應力にして中立面より下方に於ては上と相反する。故に最大主張應力即ち最大斜張力は (72) 式中の  $\sigma$  が張應力の場合の  $\sigma_1$  の値である。桁の中立面に對する主應力の方向は次式を以つて表すことが出来る。

$$\tan 2\alpha = \frac{2\tau}{\sigma} \dots\dots\dots (73)$$

桁の縁維に於ては  $\tau = 0$  であるから

$$\tan 2\alpha = 0 \text{ 又は } 180^\circ$$

$$\therefore \alpha = 0 \text{ 又は } 90^\circ$$

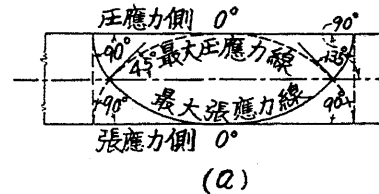
即ち縁維に於ける最大主應力の方向は縁維に接觸し、中立面の反對側の縁維に於ては之と  $90^\circ$  の角をなすものである。

中立面に於ては  $\sigma = 0$  であるから

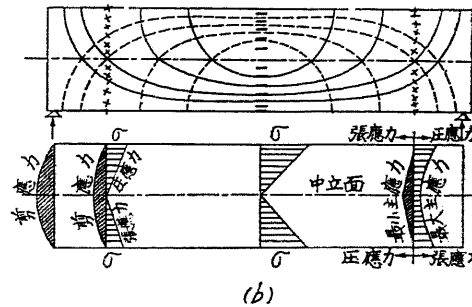
$$\tan 2\alpha = \infty, \quad 2\alpha = 90^\circ \text{ 又は } 270^\circ$$

$$\therefore \alpha = 45^\circ \text{ 又は } 135^\circ$$

即ち最大主應力の方向は中立面と  $45^\circ$  の傾斜を有し、その大きさは  $\tau$  である。



斯くして第 61 圖 (a) の如き曲線を描けばその各點に於ける切線は夫々最大主應力の方向を表はす。故にかゝる曲線を主應力線 (Line of principal Stress) と稱す。



第 61 圖

第 61 圖に於て實線は最大主張應力即ち斜張力の曲線、點線は最大主壓應力の曲線である。第 61 圖 (b) は矩形断面の單桁が等布荷重を受けた時の主應力線である。以上述べたる處は龜裂の生じない限り鐵筋コンクリートの桁にも適用して差支へはなからう。

(2) コンクリートの抗剪強度。コンクリートの抗剪強度は相當に大なるもので桁の場合之に直接原因して破壊の起る事は稀である。このコンクリートの抗剪強度の値を直接に見出す實驗は至つて難しい。

この抗剪強度に關し初めて實驗を行つたのは Morsch 教授である。彼は壓穿抗剪強度の値は次の式によりて求められることを主張した。

$$\tau_p = \sqrt{\sigma_{nt} \cdot \sigma_n} \dots\dots\dots (74)$$

茲に  $\tau_p$  = 壓穿抗剪強度、 $\sigma_{nt}$  = 破壊抗張強度、 $\sigma_n$  = 破壊抗壓強度、

然るに實際コンクリートの剪應力は穿斷に因ることは至つて稀であるから Föppl, Bach 及 Graf 教授等は扭試驗によりて之を求めんとした。この場合の抗剪強度は次に示す Mohr 教授の公式から計算する。

$$\tau = \frac{1}{2} \sqrt{\sigma_{ut} \cdot \sigma_u} \dots\dots\dots(75)$$

次に著者はコンクリートの抗圧強度試験の結果からその剪應力を計算して見よう。今、日本及米國の抗壓強度標準供試體が Navier 教授の説に従つて破壊するものとすれば、その破壊は剪應力に因るものであるから抗剪強度は

$$\tau = \frac{\sigma_u}{2} \cot \theta \dots\dots\dots(76)$$

茲に  $\theta$  = 供試體の破壊面がその軸に直角なる面となす角、

材齡 28 日の強度を標準とすれば、A. N. Johnson 氏に據れば

$$\sigma_{ut} \approx 0,16 \sigma_u$$

と考ふる事が出来る。著者は熊本縣内の天然骨材並に各種の人工的調合骨材を用ひて、鉄筋コンクリート用コンクリートに關し、5000 箇以上の供試體に就て實驗研究した結果、 $\theta$  の値として略々  $67^\circ 40'$  を得た。之等の結果を (74)、(75) 及 (76) 式に代入すれば次の如くなる。

Mörsch 教授	$\tau_p = 0,4 \sigma_u$ 又は $\frac{\sigma_u}{2,5}$	} \dots\dots\dots(77)
Mohr 教授	$\tau = 0,2 \sigma_u$ 又は $\frac{\sigma_u}{5}$	
著者	$\tau = \frac{\sigma_u}{5}$	

(77) 式より明な様に抗剪強度は研究者によりて相違があるのは已むを得ない處である。而して Mohr 教授の式と著者の式とが全く一致するのは注目に値する。此抗剪強度の値は最小値を與へる Mohr 教授の説に隨ふも尙  $\tau_u$  の  $\frac{1}{5}$  の大きさを有する。故に  $\sigma_u$  が  $140 \text{ kg/cm}^2$  の場合を考ふれば、 $\tau$  は  $28 \text{ kg/cm}^2$  となり、最大値を與へる Mörsch 教授によれば實に  $56 \text{ kg/cm}^2$  となる。

米國聯合會の標準示方書では  $\tau$  は如何なる場合でも  $0,12 \sigma_u$  を超ゆべからずと規定して居る。即ち Mohr 教授及著者の式を用ひて計算した値の約  $\frac{1}{2}$  になつて居る。我國及獨逸では  $14 \text{ kg/cm}^2$  を以つて限度として居る。今安全率を 2 と假定して Mohr 教授公式に依つて計算すれば  $\sigma_u$  が  $140 \text{ kg/cm}^2$  の場合に當る。故に此値は普通鉄筋コンクリート用のコンクリートの有する抗壓強度と一致する。

要之、桁に起る剪應力が何れの説によるかは不明であるが、各國示方書に規定してある許容抗剪強度は Mohr 氏の説に従つても尙約 2 の安全率を取つた値であるか

ら、之に隨つて設計する時は兎に角安全には違ひない。

§ 98. 鉄筋コンクリート構造に於ける龜裂

鉄筋コンクリートの理論の研究に當つては、龜裂の吟味は補助研究として有意義なものである。既に述べた様に桁に於ける彎曲理論の研究に當り、その龜裂の状態を知つて桁の断面内に誘起さるゝ應力の状態を推知することを得るが如きはその一例に過ぎない。

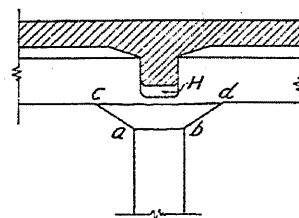
この龜裂は大別して之を三つとする。

- 1° 收縮龜裂
- 2° 施工不良のための龜裂
- 3° コンクリートに誘起さるゝ内應力に因る龜裂即ち靜龜裂(Statischer Riss)

收縮龜裂はコンクリート或は鐵筋コンクリート構造としての設計或は施工不良のため、或は材料不良のため、施工に當りコンクリートが凝結後收縮するための龜裂であつて毛細龜裂は之に屬する。この收縮のためコンクリートに大なる龜裂を生ずる様な設計施工は以ての外である。

施工不良のために龜裂が入る事は往々あるが之は當事者が鐵筋コンクリート施工方法に關する智識に乏しいためか、或は工事者が不正實で施工の際手を抜いた事に因る場合が多い。

例へば第 62 圖に示す様に柱と桁と同時にコンクリート打ちを行ふときはコンクリートの沈下のため、桁のハウチと柱との接合面に於て  $ab$  なる龜裂が入る場合が多い。又柱のコンクリート打ちに當り、ハウチまで及ぼす時は  $cd$  が構造接合



第 62 圖

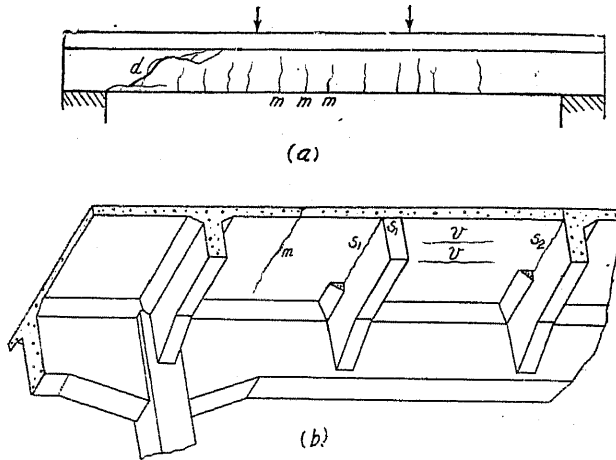
となる、隨つて上部のコンクリートとの接合が悪ければ構造物が荷重を受けた場合此處に龜裂を見る事がある。又ハウチと桁の主體とを別々にコンクリート打ちを行ふ時はハウチ例へば圖示の  $HI$  が剝落する事があるから注意を要する。斯くの如くなるを以つて我土木學會の標準示方書に於

ては柱に於ける構造接合は床組の下側に設け、ハウチ及柱頭は床組の一部とし且つ床組と連続的に働くものと解釋を下して居る。



靜龜裂は應力による龜裂で第63圖(a)(b)にその數例を示して置いた。先づ(a)圖に於て  $m$  を以つて表はす龜裂はコンクリートの張應力に因る應張龜裂で  $d$  は斜張力による龜裂である。(b)圖の  $m$  は床版に於ける應張龜裂で  $v$  は主鐵筋を連絡する用心の横鐵筋が全然無いか、又は非常に少い場合に起る龜裂である。 $s_1$  はT形断面桁の突縁と腹部との接合に於ける水平剪應力による龜裂で、 $s_2$  は平板と桁との接合に於ける垂直剪應力による龜裂である。之等の剪應力による破壊に備へるためハウチを

設ける又T形断面桁に於ては腹部と突縁のコンクリート打ちを連続して行ふ。尤も腹部の丈高が大なる場合には先づ腹部のコンクリートを打つて暫く沈下をなさしめ、然る後その表面の浮水等を取りよく注意して突縁部コンクリートを打つ様に心掛くべきである。



第 63 圖

### § 99. 桁の斜張力及腹補強の方法

(1) 斜張力と龜裂。§ 97 に於て述べた様に齊等質材料よりなる桁の張主應力の理論は初龜裂が入らない限り鐵筋コンクリート桁にも適用し得るものと見てよい。故に鐵筋コンクリート桁の主應力線は初めて斜張力龜裂が入つた時の荷重に對して計算すればよい。

Funke 氏、Bach 及 Graf 兩教授等の實驗の結果から推斷する時は斜張力に對する鐵筋コンクリート桁の龜裂は上記の如くして描かれたる主應力線に略々直角に起るものである。而してその龜裂は斜張力に對する補強即ち桁の腹部補強その宜しきを得れば之れを遅延せしめ、又之れによつて桁が破壊するのを防止する事は出来る

が之れを未然に防ぐことは到底不可能である。即ち斜張力龜裂が入る迄は桁に於ける腹鐵筋は殆んど働かないで、コンクリートの抗張強度によつて斜張力に抵抗して居るが、一旦コンクリートに龜裂が入る時は初めて腹鐵筋が働き出すものである。コンクリート抗張強度には限度があるから龜裂は必ず入るが、腹鐵筋の設計その宜しきを得ば桁は破壊せずに鐵筋によつて斜張力に抵抗するものである。

(2) 腹補強。桁に誘起する斜張力を受ける方法即ち桁の腹補強の方法は大別して次の三つとなす。

1° 桁の主鐵筋に對し、直角又は直角に近い角度に配列したる腹鐵筋、即ち肋筋(Stirrups)による方法。

2° 桁の主鐵筋を折曲げたる腹鐵筋、即ち曲鐵筋(Bent-up bars)による方法。

3° 肋筋及曲鐵筋を併用する方法

次に上記三つの腹補強の方法に就て實驗學上から論じて見よう。

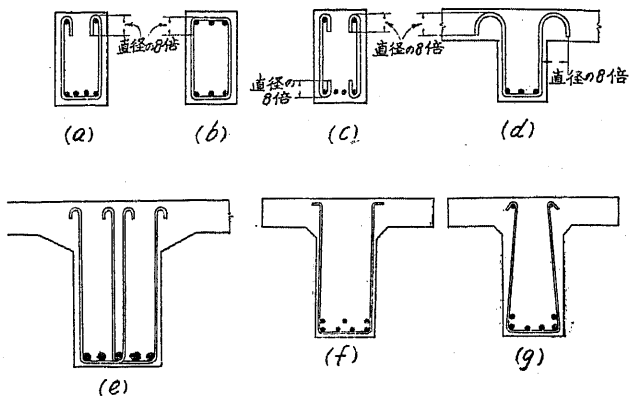
(3) 肋筋による腹補強。

(a) 概説。鐵筋コンクリート桁の腹鐵筋として肋筋が用ひられる。この肋筋は普通鐵形の鐵筋で之を主鐵筋に直角又は或角度をなして緊結するものである。米國標準示方書に於ては主鐵筋と肋筋との傾斜角は  $30^\circ$  以上と規定して居る。普通は構造上の便宜から垂直肋筋が主に用ひられるが  $45^\circ$  傾斜せる肋筋と雖も垂直肋筋同様有効なる事が F. E. Richart 教授の研究によつて證明された。同教授の實驗によれば肋筋の傾斜は水平と  $67.5^\circ$  の時最も有効なる事が理論上證明されて居る。然し乍ら傾斜せる肋筋は施工上手数が懸り且つ種々の不安が伴ふから普通は主として垂直肋筋が實用に供せられるのである。かような譯で以下述べる所は主としてこの垂直肋筋に關する事柄である。

一般に鐵筋コンクリート桁の場合には力學上は必要が無い時でも肋筋を用ひて補強するのが普通である。元來肋筋は斜張力に抵抗するのが主役であるがその外正及負鐵筋の位置を正しく保ち特に負鐵筋の場合はその剛度を増し且壓應力側のコンクリートの抗壓強度を強むる等の役得がある。

現在實際に採用されて居る肋筋は多くは小徑の圓釘で構造細目は第64圖に示す通りである。圖中(a), (d), (e) はよい設計である。この肋筋の桁軸に沿へる代

表的配置は第65圖に示す様で、支承に近い程相互の間隔が接近して居るのは力學上然るべき事である。

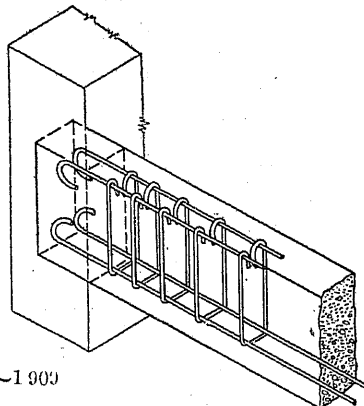


第 64 圖

この肋筋が果して腹補強の實を擧げ得るものであるかどうか、又腹補強の効力があると

すればその程度如何の問題に就ては獨米の學者に依つて以前から多くの實驗研究が行はれた。それ等の研究を綜合すれば

適當なる設計施工の桁に於ては肋筋は斜張力に抵抗する事を得て腹補強の目的を略々達するものと考へて差支へない。次に各大家の研究の結論の概要を示さう。



第 65 圖

(b) Talbot 教授の研究。Talbot 教授が1907~1909年に行つた腹補強に関する實驗研究の中肋筋に関する項のみを掲げると次の如くなる。

- 1° 肋筋の間隔は桁の有効高さの 0.75 ~ 0.8 を超えてはならぬ。
- 2° 桁断面に於ける剪力の 2/3 は肋筋で受けるものと假定して差支へない。
- 3° 肋筋としては大きい鐵筋を粗く配置するよりも細きものを密に配置する方がよい。
- 4° 肋筋を使用せる桁に於てもコンクリートの抗剪強度は桁の抗剪力に大なる影響があるから強い桁を作るには抗剪強度の大なる、換言すれば抗壓強度の大なるコンクリートを用ひなくてはならぬ。
- 5° 肋筋を有する桁の破壊は有しない場合より緩である。
- 6° 肋筋は桁に初斜張力龜裂が入るまでは働かない、この龜裂が発生してから初めて効果が顯はれる。尙肋筋は垂直剪力の全量を受けるものでなくその一部分を受ける。

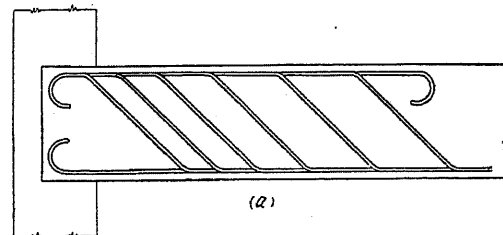
(c) Stuttgart 工科大學に於ける研究。Talbot 教授の研究と前後して Stuttgart 工科大學材料研究所に於て Firma Dyckerhof 及 Widman 氏の依頼により曲鐵筋及肋筋の實驗行は

れ、その結果は Luft 氏によりて發表された。その結論に依れば肋筋のみ用ひても桁の腹補強の目的を達し得るものである。而して肋筋の効力を大ならしめんとせば主鐵筋との緊結をよくし且つ碇着を満足ならしむる事が肝要である。

(d) Bach 及 Graf 兩教授の研究。Bach 及 Graf 兩教授は桁の腹鐵筋に就て詳細に研究し、數回に亘つて獨逸鐵筋コンクリート委員會報告等にその結果を報告して居る。それに依れば肋筋は小さな直径の釘を接近して用ふる程有効である事が證明されて居る。

(e) 結言。上述の各大家の研究を綜合すれば肋筋が腹補強として相當有効な事は疑を挿む餘地のない處である。而してその効果を顯著ならしめるには施工上差支へない範圍内に於て直径の小なるものを接近して使用し且主鐵筋との緊結をよくし尙その碇着を完全ならしめることが肝要である。

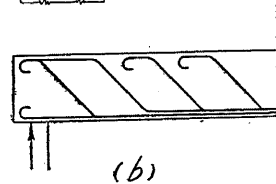
(4) 曲鐵筋による腹補強。桁に誘起される斜張力に抵抗する手段として肋筋の代わりに曲鐵筋に依ることがある。即ち桁の或断面に於て正鐵筋に餘裕がある場合には之れを折曲げて斜張力を受けしめる事がある。或は別に曲鐵筋を加へる事もある、但しこの場合には碇着に特に注意するを要する。折曲げの角度は主鐵筋の方向と15°



以上で普通は 45° 内外である。

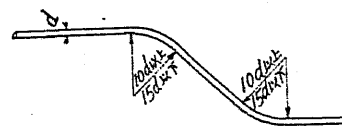
第66圖(a)及(b)は曲鐵筋による補強の例である。

曲鐵筋は主鐵筋を折曲げて之れを以つて斜張力を受けしむる



ものであるから折曲げの處の半径は相當大にして之れに接するコンクリートが壓挫されない様にする。折曲の處の應力關係は後で述べる。第67圖は我土木學會の標準折曲げの設計である。次に折曲鐵筋の間隔は近い程有効であつて、隔りが大に失する時は曲鐵筋の間

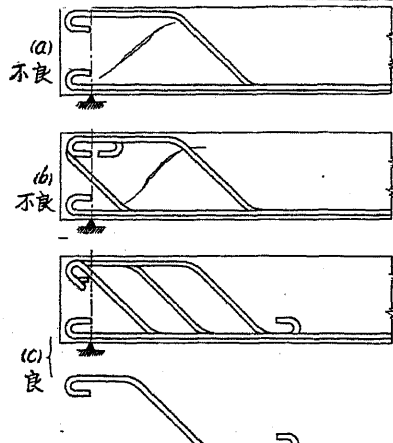
第 66 圖



の補強の手薄の處で破壊が起るのである。第68圖は其の模様を示したもので圖中(c)の設計が宜しく、(a)(b)は不良である。斯の如くであるから抗張鐵筋は小徑のものを數多く用ひ

第 67 圖

間隔を近めて折曲げるのが得策である。



第 68 圖

この曲鐵筋に関する實驗研究は既述の如く Talbot 教授、Luft 氏、Buch 及 Graf 兩教授によりて肋筋と連關して行はれた。それ等の結論を綜合する時は次の如く結言することが出來よう。

- 1° 曲鐵筋は斜張力を受けて桁の腹補強の目的を達する。
- 2° 曲鐵筋は従着を良くするためその端を折り曲げ鉤を作る。斯くする時は桁の剪力に對する抵抗を甚だ増大する。

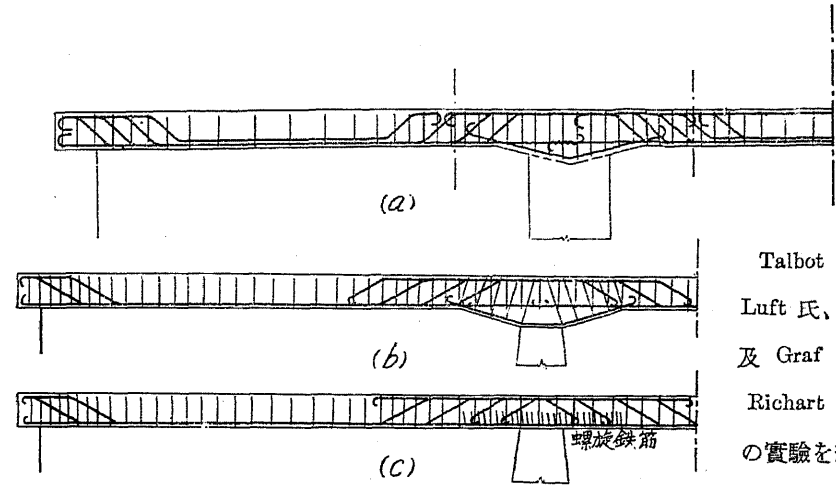
3° 曲鐵筋は桁の斜張力線の方角となるべく一致せしめるがよい。即ち中立軸の處では之と 45° をなさしめ、且つ桁の中央に近い程中立面との傾斜を緩にするのが理論上實驗に宜しいが、實際工事に於てはかくては非常に手数が掛るから凡て中立面と 45° 或は之に近い傾斜をなす様に折曲げるのが普通である。

4° 曲鐵筋の間隔は或程度以上に之れを大きくする時は腹補強としての實がなくなる。曲鐵筋は直徑の大きな釘を大間隔に配置するよりは直徑の小さな釘を接近して配置するがよい。

5° 曲鐵筋の曲りは相當に大きな半徑の圓弧を用ひないと之れに接せるコンクリートが鐵筋に誘起される張應力のために壓挫されることがある。

以上は曲鐵筋設計に當つて忘れてはならない大切なことである。

(5) 曲鐵筋及肋筋による腹補強。桁に於ては普通彎曲率の大なる断面に於ける剪力は小さいから最大彎曲率に對して抗張鐵筋量を定める時は彎曲率の小なる断面に於ては鐵筋過剩を來し不經濟であるから之れを折曲げて曲鐵筋とするのである。然るに彎曲率及剪力が共に大なる場合には抗張鐵筋を折曲げただけでは斜張力に抵抗が出來ない。かゝる場合には曲鐵筋と肋筋とを併用するのである。又時には曲鐵筋のみで充分腹補強の目的を達する場合にも肋筋を併用して桁の安全さを増加する事がある。かくすれば鐵筋の配置を正しく保ち施工を容易にする等の附帶の得點がある。



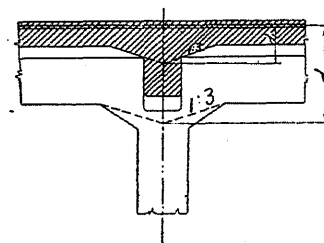
第 69 圖

Talbot 教授、Luft 氏、Buch 及 Graf 兩教授 Richart 教授等の實驗を綜合する時は曲鐵筋及

肋筋を使用せば兩者の得點を兼備し、腹補強としては完全に近いものとなるのである。第 69 圖 (a) (b) 及 (c) は兩者併用の腹補強桁の例である。

### § 100. 隅縁及ハウンチ

連続桁の支承上に於ける負彎曲率が大なる場合にはハウンチを設けて桁の抵抗力を大ならしめることがある。連続桁又は控制桁に於て先づ正彎曲率に對してコンクリートの有効斷面積を決定し、之れと同一斷面積を支承上に於ても採用する時は負彎曲率に抵抗するには多量の正鐵筋を要し、構造上鐵筋の配列が錯雜し施工の完滿を期せられないことがある。或は鐵筋による補強のみでは負彎曲率に對する抵抗が不充分の事もある。かゝる場合にはハウンチを設けて支承上に於ける桁の有効高さの増大を計るがよい。特に T 桁の場合には負彎曲率に對しては上桁となり、ハウ



第 70 圖

ンチを設けなければ到底負彎曲率に耐え得ない場合が多い。

又徑間が小で大なる荷重を受ける桁では支承に於ける剪力が非常に大きいから彎曲率によつて決定した斷面では到底剪力に抵抗し得ないことが屢々ある。かゝる場合にもハウンチを設ける。このハウンチの傾斜は普通は 1:3 以上と

し施工に當りては剝落しない様充分注意を拂はねばならぬ。ハウチの傾斜が 1:3 より急なる時は第 70 圖に示す如く 1:3 よりも緩なる傾斜の部分のみを有効とする。連續桁同様連續版に於ても隅縁を附して桁との接合を強くする。版と桁とが共に T 桁を形成するに當つては隅縁が如何に有効なるかは § 94 に於て述べた通りである。