

第三章 コンクリート及鉄筋の共同作用

§ 35. 概 説

鉄筋コンクリートが成立するためには、コンクリートと鉄とが共同し一體となつて働かねばならぬ。此兩者の間に如何なる關係が存するか、又共同作用をなすのは如何なる原因によるかに就ては古くから研究されて來た。

抑々コンクリート及鉄筋の共同作用を論ずるに當つては先づその原因を吟味し、次いで其の效果に及ばねばならぬ。然らばその原因は如何と云ふに附着力、鉄筋の彈性、鉄筋とコンクリートとの膨脹係数が略々等しいこと及コンクリート中にて鉄筋が錆びないこと等を擧げることが出来る。

上述の如く鉄筋とコンクリートとが共同作用をなす結果種々の効果が顯れる。先づコンクリート桁中の鉄筋は張力又は剪力を受けて補強の目的を達する。尙鉄筋は相互に相助けて其の能力を發揮し且つ龜裂を防止するに預つて力がある。又抗張鉄筋を挿入することにより變形をよく分布することが出来る、従つて龜裂が出来るのを妨げることになる。又抗張鉄筋を程よく配置すればコンクリートの斷面が有効に外力に抵抗するから龜裂荷重(Crack load, Risslast) を高める。或は又桁にては抗張側及腹部の補強其の宜しきを得ば、斜張力に對する破壊から免れしめることも出来る。尙桁の應壓側の補強をなすことによりてコンクリートが壓應力のため破壊することのない様にすることも可能である。

其の他桁に限らず軸壓力を受ける柱に於て、軸鉄筋を密接に帶鉄筋により或は螺旋鉄筋によつて緊結することに依り、コンクリートの抗壓強度を高めることも出来るのである。其の他コンクリート及鉄筋の共同作用の效果は枚擧に遑ない位である。之等に関しては順次後章で詳論することとする。

§ 36. コンクリートと鉄筋との附着

(1) 概要。コンクリートと鉄筋との共同作用は相互の間の附着力(Bond strength, Haftfähigkeit) に基くものである。此場合の附着力は木材に釘を打込んだ場合の引抜抵抗とは多少趣を異にするのである。即ち鉄筋とコンクリートとの附着力は

セメント・ペーストと鉄筋との粘着力と滑動抵抗との二つに區別してよからう。而して滑動抵抗と言ふのは、コンクリートの凝結硬化の際の收縮のための壓力に因る摩擦抵抗及鉄筋の表面の凹凸に因る抵抗とに分つことが出来る。故に附着力なるものはコンクリートの性質、鉄筋の種類、供試験の種類及製作法等によりて異なるのは言ふ迄もない。此附着力の試験には種々あるが、大別すればコンクリート塊の中に一定長さの鉄筋を挿入して之を引抜く引抜試験及び桁による試験とに分つことが出来る。以下に此二つに就て簡単に述べよう。

(2) 引抜試験(Pull-out test)

(a) 概要。鉄筋の附着力を引抜試験に依つて判斷する事は當を得たものではないがさればと言つて無意義なことでもない。此試験は抗壓強度試験供試體の中央に鉄筋を挿入して之を試験機に懸けて引抜き又は壓出して附着應力を知る。即ち今 P を附着力 (kg/cm^2) P を荷重 (kg)、 U を周長 (cm) 及 l を埋込みの長さ (cm) とせば

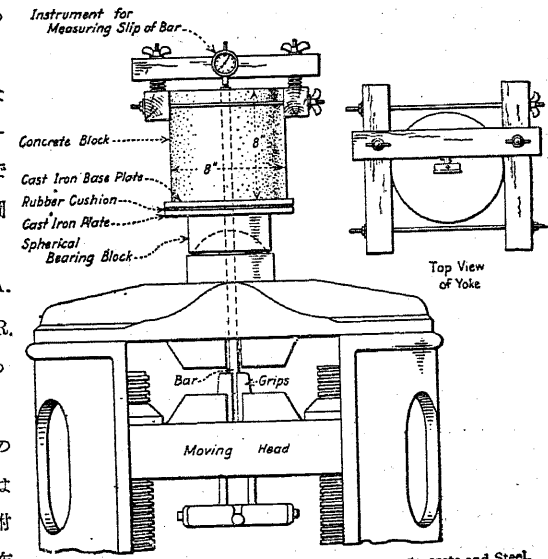
$$\sigma_0 = \frac{P}{Ul} \dots \dots \dots (2)$$

から附着力を求める。

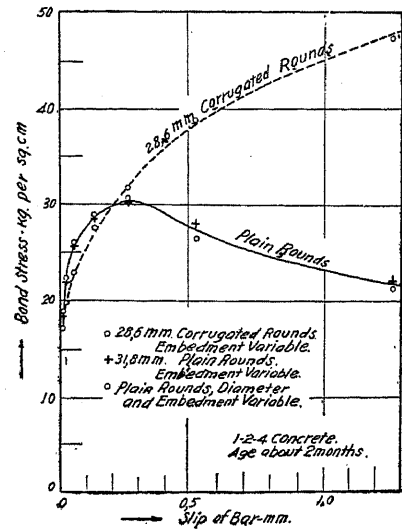
供試體は多く鉄筋を垂直にしてコンクリートの型詰めをしたものが多い。而して鉄筋を横にして供試體を作れば斯かる場合の附着力は縦の場合に比して著しく小である。以下述べる處は斷りない限り鉄筋を縦にしてコンクリートを填充した場合に關したものである。引抜試験の模倣は第 11 圖に示す通りである。

引抜試験で有名なものに D. A. Abrams 教授、C. Bach 教授、R. Feret 氏及 E. Probst 教授等の實驗がある。

(b) 附着力と埋込の長さとの關係。附着應力の計算に當つては(2)式に依るものである。即ち附着力は鉄筋の全表面に均等に配布されるすと假定するから埋込みの長さが小なる程附着力は大に表れる譯である。



Apparatus for Pull-out Tests of Bond Between Concrete and Steel



第 12 圖

(c) 附着力と滑動との関係。引抜試験に於ては埋込端に於て鉄筋の滑動を検する。之れにはアメスのダイヤルゲージを用ふる。此ゲージで測定し得る微動は $\frac{1}{200}$ mm 程度である。第 12 圖は Abrams 教授の實驗の結果で之れに依れば約 18 kg/cm^2 位の附着應力までは鉄筋の滑動は表れない。此 18 kg/cm^2 は最大應力の實に 60% に當る。而して滑動が約 0.25 位の時附着應力は最大値に達し其後は漸次減退して遂に最大附着力の $\frac{1}{2}$ 位になる。以上は普通の圓筋の場合であるが變形筋は滑動が大なる程附着應力は大になつて行く。我九大の吉田先生に従へば普通のワオオカピリチーを有する 1:2:4 コンクリートに於て材齡 28 日の場合の最大附着力は $28 \sim 38 \text{ kg/cm}^2$ 位である。

- (d) 附着力と釘の大きさとの關係。鉄筋は小さい程附着力は大である。
 - (e) 錆の影響。鉄筋は多少錆びて居ても差支へない。表面を磨いて奇麗にする等は以つての外である。尤も鱗狀の浮錆はよくない。
 - (f) 鉄筋の形狀 形鋼は一般に丸鋼に比し附着力は小である。夫は形狀の複雑せるためであらう。變形筋の附着力の大なるのは説明する迄もないことである。
 - (g) 鈎。鈎を有する鉄筋の附着力が大になるのは明なことである。之れに關しては第九章に於て論ずる。
 - (h) コンクリートの影響。附着力はコンクリートの強度に關するものであるからコンクリートの強度の支配條件は又附着力にも關することは勿論である。
 - (i) 塗料の影響。種々の塗料を塗つた鉄筋の附着力は相當に減少する。夫で防錆のために塗料の代りに水比 30% 位のセメント・ペーストを薄く塗ればよい。
 - (j) 鉄筋を横にして製作せる場合の附着力。鉄筋を横にしてコンクリートの填充を行ふときは鉄筋の下方には水膜を生じ附着力は著しく減少する。我吉田先生に従へば鉄筋を横にした場合の附着力は之れを縦にした場合の値の僅かに 40% 位に過ぎないことが判る。
- (3) 桁に依る試験。既に述べた引抜試験は實際に於ける附着力を知る上に於て當を得たものでない理由から、獨逸の Probst 教授、Preuss 氏、Bach 及 Graf 兩教授、米國の Abrams 教授等は桁試験によつて抗張鉄筋とコンクリートとの附着力の研究をなしたのである。以下に之等の諸大家の説を綜合して結論とも稱すべき事項を掲げよう。

1、鉄筋とコンクリートとの附着力は主に兩材料の機械的結合に原因する。故に此機械結

合が成立して居る間は兩材料は共同作用をなすものである。此共同作用は桁の強度に關するものである。此共同作用は鉄筋の配置の模様、其の表面積、鉄筋表面の平滑度及碇着の如何等に依りて異なる。

ロ、附着應力はコンクリートの抗張強度に關すること大である。故に實用計算にはコンクリートの抗張強度は之れを無視するが、事實上はコンクリートの抗張強度は實に桁の強度を支配する大切な要素である。

ハ、桁の實用設計に於ては附着應力は第十章第十節に述べる様に剪力 S に比例するものと考へるが、實驗の結果に依れば附着力なるものは剪力に關係なくして實は最大彎曲率即ち鉄筋の最大張力に依ることが明となつた。然らば附着力は次式で計算することが出来る。

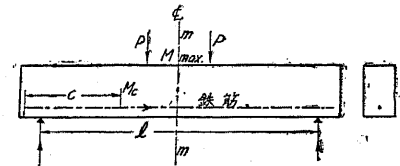
即ち $T = cu$
 故に $\tau_0 = \frac{T}{cu}$ (3)

茲に T = 鉄筋 1 本の力

c = 鉄筋の張力を測定したる點より其の端までの距離

u = 鉄筋の周長 (第 13 圖参照)

元來桁に於ける粘着力の分布は均等ではない。



第 13 圖

今桁の集中荷重を懸けるときは荷重と支端との間に於て、荷重に接近した處に略々引抜試験の場合の最大附着力程度の附着應力が生じ、やがて鉄筋は最大彎曲率の断面に於て滑動を初め之れと同時に其の點に龜裂が入る。而して支端附近では未だ附着應力は最大應力の 15~40% 位にしか達して居ない。斯くて一旦龜裂が表れると最大附着應力の起る點は支端の方へ向つて移動し、荷重の増加に連れて此新しい最大附着力の點にも龜裂を生ずるに至る。斯くて遂に最大附着力の點は支端にまで移動して來て、此處に鉄筋の滑動が起るに依り鉄筋は次第に桁の中央に向つて滑動して行くのである。此鉄筋の滑動と時を同ふして桁の下面には龜裂が生ずる。

ニ、鉄筋の下敷の被覆コンクリートの厚さも附着力に關するもので、此厚さが大なる程附着強度は大である。尤も大した相違はない。鉄筋の間隔も多少の影響を及ぼすもので間隔が大なる程附着力は大である。

ホ、桁に於ける徑間の大小は附着力に大した影響は及ぼさない様であるが、支端を越えて鉄筋を延すことは有効であると認められて居る。鉄筋端に鈎を作ることは附着力を大ならしめる上に於て最も有効なる方法である。

ヘ、引抜試験の場合同様桁に依る附着力の試験に於てもコンクリートの抗張及抗壓強度の影響は大なるものがある。

ト、鉄筋は下面が扁平なる程附着力が小である。これは鉄筋の下に水膜が出来てコンクリートとの機械的結合が著しく害されるからであらう。

チ、引抜試験及桁試験に依る附着力の割合は、米國にては軟練コンクリートを用ふるから 1,0:0,6 位である、反之獨逸にては割合に硬練コンクリートを用ふるため水膜の影響少く従つて兩試験値は殆ど相等しい結果を示して居る。然るに實際工事に於ては普通は軟練に限られて居るから桁試験に依る値の方が引抜試験の場合より小なるのは言ふ迄もない。

(4) 結言。以上論じた處を綜合するにコンクリートと鉄筋との附着力はコンクリートの抗壓強度と同様に一定の値にて表すことは不可能である。而して普通の圓釘に於ては抗壓強度の或る函數であると考へて差支へはあるまい。米國の標準示方書に於ては許容附着應力として τ_{oa} は $0,04\sigma_{28}$ 、變形釘に對しては $0,05\sigma_{28}$ を取つて居る。故に $\sigma_{28} = 140 \text{ kg/cm}^2$ とせば τ_{oa} は夫々 $5,6 \text{ kg/cm}^2$ 及 $7,0 \text{ kg/cm}^2$ となる。諸家の實驗の結果を検するに最大附着力は普通のコンクリートを用ひた場合であれば圓釘に對して少くとも 18 kg/cm^2 位はある様である。故に獨逸に於ては 5 kg/cm^2 を採り、我國に於ては $5,5 \text{ kg/cm}^2$ を採つて居る。尙ほ日、獨逸に於ては鐵筋には必ず鈎を有せしめて萬全を期して居る。

§ 37. コンクリート中の鐵筋は錆びないのみならず反つて錆が取れること

§ 35 に於て鐵筋コンクリートが共同作用をなす原因の一つとして、コンクリート中では鐵が錆びないことに就て述べた。鐵筋コンクリートの發明當時に於ては此問題は特に重大視されたものであつたが實驗、實測の結果鐵筋コンクリート中の鐵筋はコンクリートの施工其の宜しきを得、且つ其の被厚を § 33 に従つて充分にするときは半永久に錆びるものでないことが明となつた。

§ 38. コンクリートの龜裂と鐵筋の腐蝕

鐵筋コンクリートに何かの原因で龜裂が入つた爲め、そこから濕氣や酸素や炭酸瓦斯が侵入して直接鐵筋に作用し、錆を生ぜしめはしないかと言ふことは興味深い問題である。

吾々の常識で判斷しても分る様に如何に龜裂が大きくとも、コンクリート中の鐵筋は空中にある鋼材の如く錆を生ずることは先づない。而もコンクリートの配合に注意し且つプラスチックのコンクリートを用ひてあれば、鐵筋コンクリート構造物としての設計さへ誤らなかつたならば空氣が自由に流通する様な龜裂が生ずることは先づないと思つてよい。尤も鐵筋コンクリート構造物に於ては毛細龜裂の發生を未然に防ぐと言ふことは殆んど不可能である。然し乍ら斯かる龜裂が入つたため鐵

筋が錆びることは殆んどない。E. Probst 教授は實驗によりて毛細龜裂が入つても鐵筋が錆びるものでないことを立證した。

§ 39. 鐵筋コンクリートの初應力

(1) 概要。鐵筋コンクリート工に於ては第一コンクリートの凝結硬化に依る容積の變化、第二温度の變化に依る膨脹係數の相違、第三コンクリートに恒久變形に起因する初應力が作用する。此三者の中第一のコンクリートの容積變化に依る初應力は可成りの大きさに達し往々龜裂の原因となることがあるから注意を要する問題である。反之他の初應力は左迄恐るゝに足らない。以下之等に就て略述しよう。

(2) コンクリートの凝結硬化に依る初應力

コンクリートは凝結硬化に當り沈下及收縮をする。此ために容積の變化を來し茲に鐵筋とコンクリートに初應力が生ずるのである。

コンクリートを打終つて凝結するまでのコンクリートの沈下收縮は、コンクリートの設計施工に注意を拂ふときは左迄恐れるに足らないのは經驗の教ふる處である。然し乍ら凝結後コンクリートは硬化が進行するに連れて空中に於ては收縮をする。此收縮は到底免れ得ない處で之れに依る初應力は時として相當な値に達し龜裂の原因となる。尤もコンクリートの設計を誤らずその施工後の養生がよかつたならば此影響とても左迄恐れるに足らないであらう。又空中でなくて水中で硬化するときはコンクリートは却つて膨脹する。

(a) 自由端の場合。今兩自由端を有する鐵筋コンクリート部材が空中にて硬化するものとせばコンクリートは數年経てば 10 000 分の 3~4 の收縮をしようとする。然るに鐵筋は收縮せざらんとして突張るから茲に鐵筋には壓應力を生じ、反之コンクリートには張應力を生ずる。之等の計算法は諸家に依つて多少の相違がある。次に一般に獨逸で認められて居る計算法を示さう。今計算を簡單にするためコンクリートの断面と鐵筋の断面の夫々の重心は一致するものとする。此計算法は Mörsch 教授、Probst 教授等に依つて認められて居る方法で、之れに在りては鐵筋に生ずる壓應力は全長を通じて均等であるものと假定してある。

今 α = コンクリートの凝結硬化の際の收縮係數、

σ_{ct} = コンクリートの張應力、

σ'_s = 鐵筋の壓應力、

p = 鐵筋比、

m = コンクリートの断面積と鐵筋の断面積との比即 $1/p$ 、

E_s 及 E_c = 鐵筋及コンクリートの彈性係數、

$n = \frac{E_s}{E_c}$ 即ち鐵筋及コンクリートの斷性係數の比、

とすれば

単位長さの鉄筋コンクリートの収縮 α' は第14圖から

$$\alpha' = \alpha - \frac{\sigma_{ct}}{E_c} = \frac{\sigma'_s}{E_s} \dots\dots\dots(4)$$

次にコンクリートに生ずる全應力と鉄筋に生ずる全應力とは相
等しいから

$$m\sigma_{ct} = \sigma'_s \dots\dots\dots(5)$$

(4) 及 (5) 式から

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{ct} &= \alpha E_c \frac{n}{m+n} \\ \sigma'_s &= m\sigma_{ct} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(6)$$

今 $\alpha = 0,0003$ $E_c = 140\,000 \text{ kg/cm}^2$ $n = 15$ 及 $m = 100$ とせば $\sigma_{ct} = 5,5 \text{ kg/cm}^2$
(張應力) 及 $\sigma'_s = 550 \text{ kg/cm}^2$ (壓應力) を得る。

以上述べたる如くコンクリートには相當大なる収縮張應力が生ずる。尤も普通の鉄筋コン
クリート用のコンクリートは 10 kg/cm^2 位の抗張強度はあるものであるから左迄恐れることは
ない。而もコンクリートの施工宜しきを得たならば、其の沈下は僅少で無視しても差支へない
位である。又コンクリートの配合及水比が適當に設計してあつたならば硬化による収縮も又僅
かなものであり且つ荷重に依つてコンクリートに生ずる應力は壓應力である。斯くの如く各方
面から觀察するときは自由端を有する部材の場合に於ては、コンクリートの収縮應力なるもの
は注意を要する問題には相違ないが左程恐れる必要はないものである。

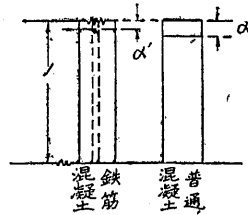
(b) 固定端の場合。鉄筋コンクリート部材の両端が其の位置を變ぜざる場合には、コン
クリートにはその収縮のため温度降下と同種類の應力を生じ龜裂が入ることがある。今全断面
及鉄筋の断面の重心が一致する場合に、コンクリートに生ずる張應力は次式に依つて計算して
よかるう。

$$\sigma_{ct} = \alpha E_c \dots\dots\dots(7)$$

今材齡 1箇月のコンクリートの収縮係數 α を $0,060 \text{ mm/m}$ とせば

$$\sigma_{ct} = \frac{0,06}{1\,000} \cdot 140\,000 = 8,4 \text{ kg/cm}^2$$

α の値はコンクリートの種類施工及養生等に依りて異なり、又材齡によりても變ずるを以つて
 σ_{ct} の値は上述の計算値より大なることも亦小なることもある。而してコンクリートの抗張強
度は 10 kg/cm^2 位はあるものであるから大抵は大なる龜裂が入ることはなからう。尤もコン
クリートの設計施工には充分注意を拂ふべきは勿論のことである。而して實際設計に當つては
此収縮應力を計算し、或は収縮龜裂の入らない備をなすに當り α の値を幾何に採つて然るべき
かと言ふに、此點に關しては的確に規定することは困難である。故に我土木學會の示方書に於
ては、此硬化収縮の影響を温度低下 -15°C に相當する影響と同様であるものとして取扱つて
居る。然らば α の値は $0,00001 \cdot 15 = 0,00015$ 即ち $0,15/1\,000$ に相當することになる。即ち
土木學會の規定によつて構造物の設計をすれば硬化収縮の影響に對しても相當の安全さが保
證される譯である。



第 14 圖

(3) 温度の變化に依る諸應力。

(a) 自由端の場合 コンクリート及鋼の膨脹係數は共に 1°C に付き $0,00001$ 位である。即
ち兩者の膨脹係數が略々相等しいため温度の變化があつても自由端を有する鉄筋コンクリ
ト部材には應力を生じない。

(b) 固定端の場合。鉄筋コンクリート部材の両端が緊結してある場合には温度の變化のた
めに應力を生ずる。

今 $\beta =$ コンクリートの膨脹係數即ち $0,00001/1^\circ\text{C}$

$t =$ 温度の變化の範圍、我土木學會規定では普通は $t = \pm 15^\circ\text{C}$ とし厚 70 cm 以上の
構造部分では $t = \pm 10^\circ\text{C}$ として居る。

$E_c =$ コンクリートの彈性係數

とせばコンクリートに生ずる温度應力 σ_t は

$$\sigma_t = \pm \beta t E_c \dots\dots\dots(8)$$

となる。

(8) 式から判 様に 1度變化 t が大になれば σ_t は相當の大きさに達する。故に温度が低下
すれば σ_t は張應力となり遂に最大抗張強度以上になれば茲にコンクリートに龜裂を生ずる。
故に水密性を必要とする構造物に於ては大なる龜裂を防止するため伸縮繼目を設ける。尙其の
外に断面の小なる構造物に於ては $0,2 \sim 0,5\%$ の鉄筋を挿入するを可とす。

(4) コンクリートの恒久變形に因る初應力。

コンクリートに壓力又は張力を加ふるときは恒久變形を生ずる。此恒久變形は許容應力以下
の應力に對しては $0,00001 \sim 0,00002$ 位であるから之れに因つて生ずるコンクリートの初應力
は $2 \sim 4 \text{ kg/cm}^2$ 、鉄筋の初應力は $20 \sim 40 \text{ kg/cm}^2$ 程度である。随つて此初應力は 實際上海
等考慮する必要のない事項である。

§ 40. コンクリートの延伸能力

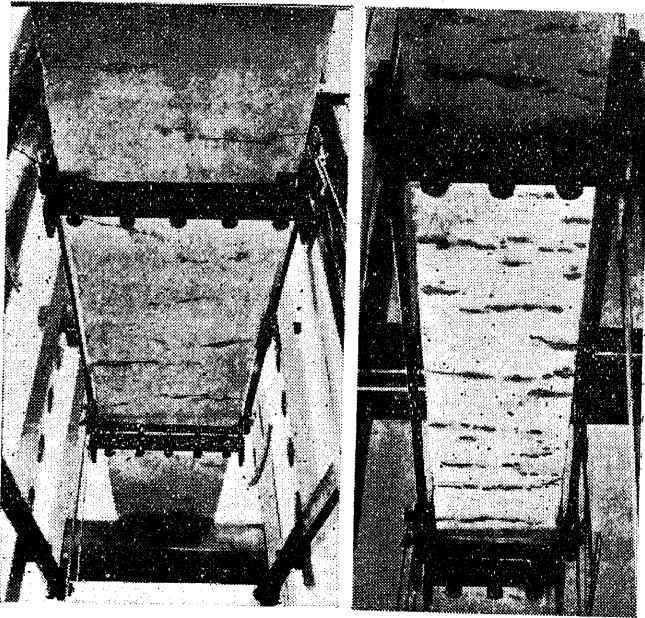
元來コンクリートの抗張強度に至つては小であるから、抗張材にコンクリート及鉄筋コン
クリートを用ふことは稀である。然るに桁に於ては張應力側に鉄筋を挿入して彎曲率に耐へし
める。斯かる鉄筋コンクリート部材の延伸能力は普通の無筋コンクリートに比して外見上大で
あることが Considère, Kleinlogel, Schüle, Bach 及 Probst 教授等によつて明となつた。而
も水中養生のコンクリートの方が、空中養生のコンクリートに比し延伸能力が大なる傾向があ
ることも認められるに至つた。

斯くの如く或條件の許に於て鉄筋コンクリートは無筋コンクリートよりも大なる延伸に耐
へるものである。此理由は Probst 教授に従へば次の如くである。即ち元來鉄筋コンクリ
トはコンクリートの凝結硬化に當りコンクリート及鉄筋に初應力を生ずる。故に水中養生の鉄筋
コンクリートに於てはコンクリートに初應力として壓應力が生じて居るから、此影響のために

コンクリートは皮相的に延伸能力を増すものである。次に鉄筋コンクリートにありては鉄筋が具合よく配置されて居るときはそのためにコンクリートの応力及變形を都合よく分布するから、普通コンクリートに於ける様に一部分弱点があつても龜裂を生ずることなく随つて延伸能力を大ならしめ得るのである。此理由は水斑の現象に依つてよく説明される。茲に水斑(Water marks, Wasserflecke)と言ふのは、米國の Turneure 教授に依つて初めて発見されたもので濕氣中に養生した鉄筋コンクリート桁の彎曲試験に當つて龜裂の前兆としてコンクリートの組織の弛んだ處に表れる約 3mm 位の斑點である。(第15圖參照) 此水斑は鉄筋のないコンクリート桁の場合には表れない。Bach 教授の實驗によれば鉄筋コンクリート桁の彎曲試験に於ける水斑の表れる荷重は同じコンクリートより成る無筋桁の破壊荷重に相等しい。而して Probat 教授の實驗に依れば此水斑が現れた後は延伸が著しく増加し遂に毛細龜裂を生ずるに至りて止むものである。斯くの如く鉄筋コンクリート桁の場合には水斑が出現してもその當座は鉄筋の作用に依つて應力變形が分布されて未だ龜裂を生ずるに至らないが無筋コンクリートの場合には水斑の表れる様な弱い箇所にて早速龜裂を生じ破壊を來すのである。即ちコンクリートは鉄筋コンクリート桁の場合たと無筋コンクリート桁の場合たとを問はず何等延伸能力に相違はないが、只鉄筋の作用に依り皮相的には鉄筋コンクリート桁の場合の方が無筋の場合より大なる延伸能力がある様に見えるのである。

以上の理由から鉄筋コンクリートは之れを濕氣中に於て養生せしめ鉄筋の配置をよくし、その被厚を十分にし、且腹鉄筋の施工に注意することによりて見掛の延伸能力を増加せしめることが出来るのである。以上述べたる處は鉄筋コンクリートの桁及抗張材の設計に當つて特に緊要なることである。

§ 41. コンクリート及鋼の弾性係數

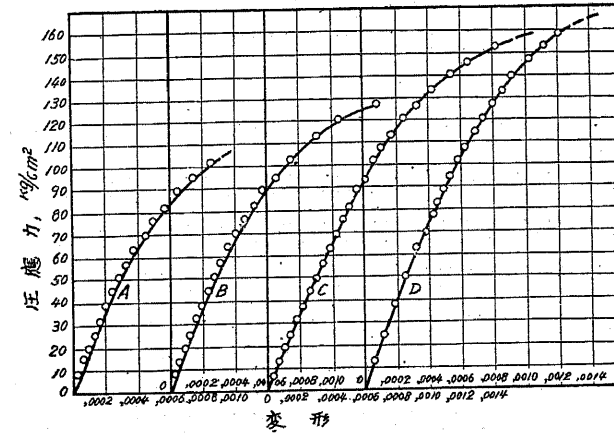


第 15 圖

(1) コンクリートの弾性。(a) 壓應力に對する應力—變形曲線。鉄筋コンクリートに於て兩材料が共同作用をなすには同一の變形をしなくてはならぬ。果して然らばコンクリート及鉄筋に生ずる應力は兩材料の弾性係數に比例すべきである。此重要な意義を有する弾性係數を求むるに先立つてコンクリートの應力—變形曲線

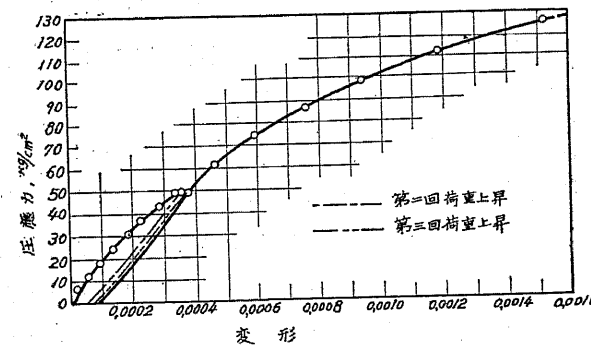
に就て吟味しよう。

第 16 圖は壓應力に對する 15.30 cm 圓棒コンクリート供試體の代表的應力—變形曲線であつて配合比は 1:2:4、材齡 30 日の試験の結果で最大抗壓強度は 110~160 kg/cm² であつた。圖から判る様にコンクリートの應力—變形曲線は鋼の場合と異なり、最初から直線をなさずして幾分か曲線をなし弾性限度が不明で、且つ變形が應力の増大に随ひ急激に増加するのである。



第 16 圖

元來コンクリートは完全なる弾性體ではない。従つて今コンクリートに其の許容應力程度の 35~40 kg/cm² の壓應力を生ぜしめたる後、荷重を全部取り去り應力を



第 17 圖

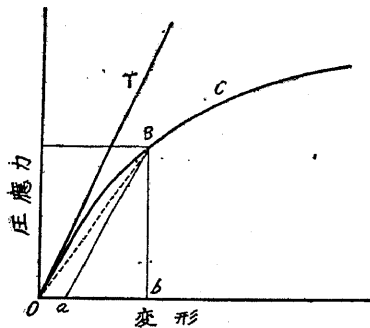
零に戻しても變形は零にならずに幾分かの變形が残留する。尤も此残留變形の僅少な事は既に述べた通りである。而して再度同様の荷重を加へれば應力—變形線は第 1 回に比して直線に近くなり残留變形は小さくなる。

斯くて數回反覆荷重を加ふるときは、應力—變形曲線は殆んど直線となる。第 17 圖は第 16 圖の實驗と同様の供試體に反覆荷重を加へた場合の應力—變形曲線である。

尚反覆荷重の大いさが最大抗壓強度の $\frac{1}{2}$ 以上になれば、荷重を繰返し加へて居る間に變形が著しく大となり遂には破壊するに至るのである。

以上述べた如くコンクリートは不完全弾性體であるから荷重を除去した後でも變形が残留する。此残留變形は構造物の設計に當つては如何に取扱ふべきものであらうか。

構造物が單一材料より成る場合に於ては其の應力變形を計算するに當つては材料の弾性變形に就て考ふべきであらう。尤も鋼に於ては弾性限度以内の應力の下に於ては殘留變形は極く僅かであるから全變形と弾性變形を相等しいものとして居る。然るにコンクリートの如き材料に於ては應力が大になれば殘留變形も相當に大きくなる。此殘留變形を如何に取扱ふかに就て第 18 圖を以つて説明しよう。



第 18 圖

第 18 圖に於て $0BC$ を初めて壓應力を受けた供試體の應力—變形曲線とする。今荷重を 0 から Bb まで昇したる後再び之を零に戻すときは變形は零とならずして $0a$ なる變形が残り荷重下降の際の應力—變形曲線は Ba となる。次に荷重を又 Bb だけ加へると今度は略々 aB なる應力—變形曲線を辿つて B 點に歸着する。元來鐵筋コンクリートにありては鐵筋とコンクリートとは共同作用をなすべきであるから、計算に用ふべき變形は全變形でなくてはならぬ譯である。

今一例として柱の場合に就て考へて見よう。此場合鐵筋にもコンクリートにも初應力は生じて居ないものとする。然らば荷重によつて $0b$ なる變形をなしたとすれば之に對するコンクリート内の應力は Bb で又鐵筋の應力は $0b$ に鋼の弾性係数を乗じたものである。次に荷重を 0 に戻せばコンクリートのみの場合であれば $0a$ なる變形が残留するから鐵筋コンクリートの場合に於ては之がためにコンクリートには張應力を又鐵筋には壓應力を生ずる。

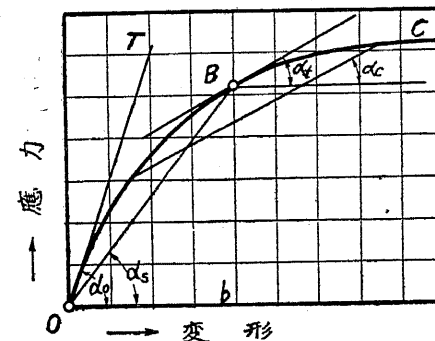
第 18 圖に於て $0BC$ を初めて壓應力を受けた供試體の應力—變形曲線とする。今荷重を 0 から Bb まで昇したる後再び之を零に戻すときは變形は零とならずして $0a$ なる變形が残り荷重下降の際の應力—變形曲線は Ba となる。次に荷重を又 Bb だけ加へると今度は略々 aB なる應力—變形曲線を辿つて B 點に歸着する。元來鐵筋コンクリートにありては鐵筋とコンクリートとは共同作用をなすべきであるから、計算に用ふべき變形は全變形でなくてはならぬ譯である。

更に前同様の荷重を加ふるときは壓縮變形は殆ど ab となり随つて全變形は $0b$ となる。故に鐵筋中に生ずる應力は前回同様となる。即ちコンクリート及鐵筋の應力を計算するに當つては初應力を考へに入れなければコンクリートの變形は全變形を採るべきである。尤も全變形を採るも將又弾性變形を採るも其の誤差は 10% を出でないものである。

(b) コンクリートの抗壓弾性係數。

イ、概要 (a) に述べた様にコンクリートの應力—變形曲線は最初から直線ではない。随つて弾性係數は常數ではない。しかし實際計算に當つては差支へない程度に於て一定の値を用ひた方が便宜が多い。

第 18 圖に於て見るに $20 \sim 30 \text{ kg/cm}^2$ 程度の低い應力を受ける場合に於ては $0T$ なる切線の正切を以つて弾性係數と看做して差支へない。然るに應力が大になつて來れば應力—變形曲線の切線の正切は小となり $0T$ なる切線の正切の値よりも餘程小さくなつて來る。然らば實際には如何なる荷重に對する値を取るべきかと言ふに之は計算の目的その他に依つて多少異なる。而して普通に用ひられて居る弾性係數には次の如き種類がある。



第 19 圖

第 19 圖に於て $0BC$ を應力—變形曲線とする。之に就て弾性係數を類別せば

$$E_{c_0} = \tan \alpha_0 = \text{Initial modulus} \quad (\text{初係數})$$

$$E_{c_s} = \tan \alpha_s = \text{Secant modulus} \quad (\text{正割係數})$$

$$E_{c_t} = \tan \alpha_c = \text{Tangent modulus} \quad (\text{正切係數})$$

$$E_{c_o} = \tan \alpha_o = \text{Chord modulus} \quad (\text{弦係數})$$

此中 E_{c_0} は常數であるが他は凡て應力に依つて相異なる。而して E_{c_0} は應力零の點に於ける係數、 E_{c_t} は應力 Bb なる點に於ける係數であつて E_{c_s} は應力が零 $\sim Bb$ なる場合の平均係數なるを以つて一般には之を以つてコンクリートの弾性係數 E_c として居る。然らばその値は如何と言ふに之はコンクリートの種數その他によりて

異なるものなるが一般應力計算に於ては $E_c = 140\,000 \text{ kg/cm}^2$ 、不静定力及弾性変形の計算に當つては $E_c = 210\,000 \text{ kg/cm}^2$ を採つて居る。然るときは鋼の弾性係数 E_s は $2\,100\,000 \text{ kg/cm}^2$ であるから鋼及コンクリートの弾性係数の比 n の値は

一般應力計算に對しては

$$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{2\,100\,000}{140\,000} = 15 \dots\dots\dots(9)$$

不静定力及弾性変形計算に對しては

$$n = \frac{2\,100\,000}{210\,000} = 10 \dots\dots\dots(10)$$

となる。

ロ、コンクリートの使用水量と弾性係数。普通鉄筋コンクリートに使用する程度のコンクリートに於ては其の使用水量大なる程抗壓強度は減少し、随つて弾性係数も小となる。

ハ、配合と弾性係数。弾性係数 E_c の値は配合が貧弱なるに従つて減ずる傾向がある。

ニ、養生と弾性係数。コンクリートの養生と弾性係数との關係に就ては水中養生の場合が空中養生の場合よりも弾性係数が大である。

ホ、材齡と弾性係数。正確なる關係は不明であるが E_c は材齡の影響を左まで蒙らないものゝ様である。

ヘ、應力度と弾性係数。既に述べた様に變形は應力が大なるに連れて増大する。従つて E_c の値は應力が大なるに従つて減少するものである。コンクリートの應力と變形との間には如何なる關係があるかと言ふに Bullfinger 及 Hodgkinson 兩氏は變形 ϵ と應力 σ との關係は

$$\epsilon = \frac{\sigma^n}{E} \dots\dots\dots(11)$$

なる指數公式で表すがよいと言つて居る。上式中 ϵ は變形、 σ は應力で n 及 E は常數である。

然るときは任意の應力に對する正切弾性係数 E_{ct} は

$$E_{ct} = \frac{d\sigma}{d\epsilon} = \frac{E}{n\sigma^{n-1}} \dots\dots\dots(12)$$

茲に、 n は普通 1.1 位である。上式から判る様に應力が大なる程 E_{ct} の値は小さく

なる。

Talbot 教授は

$$\sigma = \sigma_u - \left(\frac{\epsilon_u - \epsilon}{\epsilon_u} \right)^2 \sigma_u \dots\dots\dots(13)$$

なる關係が成立つことを力説して居られる。式中 σ 及 ϵ ; 應力—變形曲線上の任意の點の應力及變形、 σ_u 及 ϵ_u ; 破壊強度及最大變形。

又 Lang 氏は應力と變形との間に

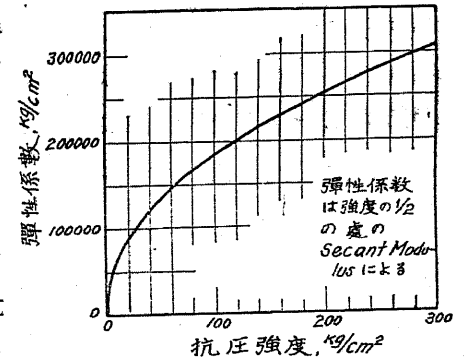
$$\sigma = \frac{E\epsilon}{1 + \beta\epsilon} \dots\dots\dots(14)$$

なる關係があると述べて居る。茲に β は常數で他は既述の通りである。

(13) 及 (14) 式何れに依るも (12) 式同様 E_{ct} の値は應力の増加に連れて減少することを示して居る。

ト、抗壓強度と弾性係数。コンクリートの破壊強度と弾性係数との關係は Bach 教授、Walker 氏等によりて研究されて居る。夫等の研究によれば多少の相違はあるが抗壓強度の大なるコンクリート程その弾性係数も亦大である。第 20 圖は Walker 氏の實驗の結果を示したものである。

(c) 彎曲應力及張應力に對する應力—變形曲線。桁等の彎曲試験に於ける應力側の應力と變形との關係は抗壓試験の場合と略々同傾向である。その詳細は第九章に於て説明する。



第 20 圖

次にコンクリートの張力に對する弾性に關しては餘り實驗が多く行はれて居ない。Bach 教授、Hatt 教授等の實驗研究を綜合するに初弾性係数は壓應力の場合も張應力の場合も同様である。而して正切係数は壓應力の場合の如く應力の増加に連れて減少するものである。

§ 42. コンクリート及鐵筋コンクリートの Poisson 比

(1) コンクリートの Poisson 比。コンクリートの Poisson 比はその弾性係数と共に二軸以上に関する應力及變形を論ずるに當り必要缺くべからざる係數で、殊に

鐵筋コンクリート桁梁式床版、平板及柱等の理論的研究には極めて重要な事項である。然るに之が研究は未だ完成の域には達して居ないが、實際計算に當り如何なる値を採るべきかに就ては略々結論を得て居ると言つて差支へはあるまい。元來コンクリートの Poisson 比なるものは鋼等に於けるが如く一定の値を有するものに非ずして應力の大小、配合比、水・セメント比、材料、施工、養生及材齡等によりて多少の影響を蒙るもので、又無筋コンクリートたると鐵筋コンクリートたるとによりてその値は多少相異なるものである。又一概に鐵筋コンクリートと言つても鐵筋の配置並びに部材の種類等に依りても相異があらう。随つて如何なる場合にも適する Poisson 比の値を求むることは實際上出来ない。

此 Poisson 比を求めるには種々の實驗方法がある。即ち Bach 及 Graf 兩教授は扭力試験に依つて、Rudeloff, Withey, Kleinlogel 及 Talbot の諸教授は夫々柱の抗壓試験に依つて又最後に我田邊平學教授は桁の實驗に依つて此値を求めたのである。之等の諸大家の實驗の結果を綜合するときは鐵筋コンクリートに使用する普通コンクリートの Poisson 比は之れを $\frac{1}{m}$ 以つて表はすときは許容應力以内の應力並に材齡 28 日 ~ 45 日なる條件の下に於て $\frac{1}{6} \sim \frac{1}{9}$ 平均 $\frac{1}{7}$ と思つて差支へなかるべく又破壊強度の下に於て $\frac{1}{5} \sim \frac{1}{3}$ 平均 $\frac{1}{4}$ と看做してよからう。

(2) 鐵筋コンクリートの Poisson 比。鐵筋コンクリートの Poisson 比はコンクリートの性質によりて支配されるのみならず尙補強の方法如何によりても相異なるのである。此鐵筋コンクリートの Poisson 比の測定の實驗研究は(1)に述べたる諸大家によりて無筋コンクリートの研究と相關連して行はれた。以下にその大要を掲げよう。

M. Rudeloff 教授は鐵筋コンクリート柱に就て實驗をなし $\frac{1}{m}$ の値は平均して $\frac{1}{8.9}$ を得る。此値は無筋コンクリートに對する値の $\frac{1}{7}$ と少しく相異なる。

M. Withey 教授もやはり鐵筋コンクリート柱に就て實驗を行ひしに、その結果許容應力以内では $\frac{1}{m}$ の値として平均 $\frac{1}{8.9}$ を得て居る。此値は無筋コンクリートに對する値と略々同様であつた。A. Kleinlogel 教授は螺旋筋及軸鐵筋柱に就て實驗を行ひ $\frac{1}{m}$ の値としては應力の大小に關せず $\frac{1}{8}$ を採つてよいことを確め得た。而して應力が小なる場合には無筋コンクリート柱に對する値も上と略々同様であつた。

F. Richart 教授も螺旋筋柱に就て實驗をなし許容應力以下の應力に對しては $\frac{1}{m}$ の値としては無筋コンクリート柱に對する値を採つて差支へないことを認めて居る。

要するに鐵筋コンクリートの Poisson 比 $\frac{1}{m}$ の値としては應力の大小に關せず普通の場合は $\frac{1}{8} \sim \frac{1}{9}$ を採つて差支へはなからう。