

コンクリートの複合材特性

北海道大学 正 角田 与史雄
 “ “ ○ 佐伯 昇
 “ “ 高田 宣之

1. 序言

コンクリートはその構造上ぎわめて異方性、異質体の複合材であり、物性面に対する研究においても、金属材料等に比し非常に困難さを伴っている。しかしコンクリート構造物において各種応力によるコンクリート体のひびわれの発生、成長および変形は、極めて重要な研究課題である。Griffith 氏らはガラスの破壊についての一つの理論づけを行ない、いくつかの実験を行なってその正当性を立証したが、これはガラスのような無定形物質に対してなされたものであり、一般の物質、とくに複雑な内部構造をもつコンクリート体にそのまま適用しうるとは考えられない。しかしコンクリートにもこの Griffith flow に相当する先天的な欠陥が存在することは事実である。たとえば、①凝結硬化中に生じたペースト内の微小空隙および転位誘発面、②空気泡、分離水などによるペースト中、またはペーストと骨材境界面などにおける欠陥、③骨材中に先天的に存在する欠陥などがあげられる。コンクリートにおいてはこれらが複雑にかみ合まって、永久変位または塑性的な変形の原因となっているものと考えられる。本研究はこれらコンクリートの変形および破壊機構に関する一連の研究計画の一環として行なったものである。

2. コンクリートの微小ひびわれ

a). 微小ひびわれの検出 コンクリート内部に発生する微小ひびわれを検出する方法としては、X線あるいはγ線による写真撮影、超音波の反射による方法、供試体内部を切削して調べる方法などが考えられ報告されている。コンクリートに内力あるいは外力が作用するとき、コンクリートの各点に、応力に相応した相対的変位を生ぜしめ、この応力がコンクリートを構成している物質に対しある限界を越えるとき コンクリートに内在する前述の欠陥から局部破壊が始まるものと考えられる。外力による破壊エネルギーは、熱力学的エネルギー、力学的エネルギーなどに変換されるが筆者らはさきに後者の力学的振動(弾性波)を鋭敏なマイクロホン(Büdel & Kjer の加速度計)を用いて捕えることにより、従来よりのひびわれ検出方法に比較して、かなり早期に微小ひびわれの発生を検出しようことに成功した。またこれらコンクリートの微小ひびわれが応力状態によってどのように発生、成長するかを観察するため、前記検出法に加え、表面をダイヤモンドカッターで切り除き、平滑に研磨し、ペースト、モルタルおよび骨材の位置関係を露出させた、 $5 \times 5 \times 15 \text{ cm}$ の圧縮供試体および $15 \times 10 \times 55 \text{ cm}$ 曲げ供試体につき拡大鏡、顕微鏡を利用した光学的方法と合わせて用いた。

b). 微小ひびわれの発生状況 前述供試体に受振子を取り付け荷重を加え、ひびわれ弾性波を数発受振したのち、拡大鏡($\times 20$)および顕微鏡($\times 50 \sim 200$)によって綿密に観察した。(ただし最初の数発の信号のあとの微小ひびわれは光学的にほとんど検出しよう大きさには至っていなかった。) 次に荷重を増して上記操作を繰り返して初期微小ひびわれの発生状況、成長過程の観察記録を行

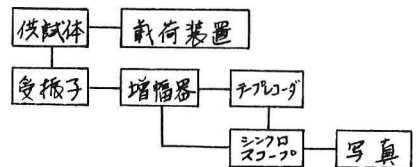


図-1 測定装置ブロックダイアグラム

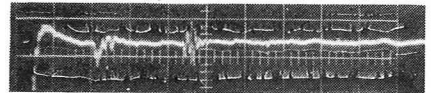


写真-1 ひびわれ弾性波

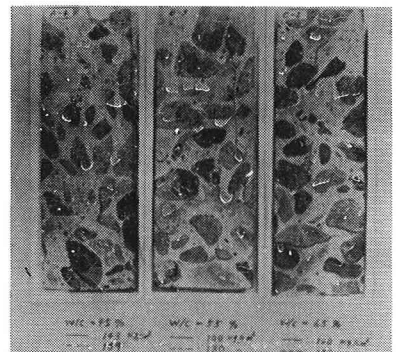


写真-2 微小ひびわれ図

なった。このようにして描かれたひびわれ図の一例を写真2~4に示す。以上初期微小ひびわれに対する本実験の結論として次のことがあげられる。まず圧縮供試体に対しては (1)骨材およびセメントペースト間の界面が破壊する (2)これら界面(ボンド)クラックは、骨材とモルタル境界面というよりも骨材表面を取りまくセメントペースト内において生じた (3)界面クラックは大きい骨材において多く、載荷方向および骨材下面に多い (4)骨材下面のひびわれは水セメント比が大きくなるにしたがって増加した (5)モルタル部のクラックは、近くにある界面クラックの間を橋渡しするように生ずる。また小寸法骨材をさけるように進行する。 (6)独立したモルタル部のひびわれは初期においてほとんど認められず、かなり応力が大きくなってから認められた (7)空隙を通過するモルタルひびわれがかなり認められた (8)骨材を通過するひびわれは非常に少なく、骨材に欠陥のあるときのみ生じた (9)これらの観察された微小ひびわれ幅は、 $0.001 \sim 0.0025 \text{ mm}$ 程度である (10)応力の増加とともにこれらひびわれ幅および長さは増し、さらに新たなひびわれの発生も認められた (11)破壊近くの応力では、独立していたこれらの微小ひびわれが互に連絡し合うように発達し、表面にひびわれ模様を形成した。曲げ供試体においても図-2からあきらかのように相当早期の低応力状態から微小ひびわれの発生を認めることができ、破壊に至る段階は次の如くである。 (1)変載荷時において粗骨材下面供試体上方に乾燥収縮によるボンドのくずれが見られた (2)荷重が破壊荷重の10~20%程度の低応力状態においては上記界面クラックとは別に独立した骨材ペースト間で引張応力方向のボンドのくずれが見られた。これらは互に独立に発生し、少数ではあるが圧縮側にも認められた (3)荷重が20~40%では(1)のひびわれ数が増してきた。この段階では新たなひびわれが発生し、すでに出来ているひびわれの成長はあまり認められなかった (4)荷重40~60%では上記(2)の現象と同時にひびわれの成長が観察された、また圧縮供試体におけると同様に近接するこれらひびわれが細骨材をさけてペースト中で橋渡しする傾向が認められた (5)荷重60~80%では上記の現象が急激に進展し、いくつかの特定ひびわれが下方および上方へ成長するものが認められ、このうち2~3本は下縁に達した。またこれら特定ひびわれに近接する部分ではひびわれの発生、成長がほとんど停止した。この段階までは骨材を通過するひびわれは殆んど認められなかった (6)破壊付近においては上記特定ひびわれのうち、骨材を通過するものも認められた。破壊は特定ひびわれの位置におこるのが多かったが、その中間の小さいひびわれの位置におこることもあった。

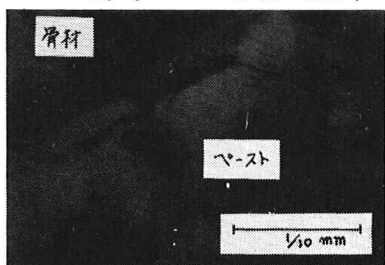


写真-3 微小ひびわれの顕微鏡写真

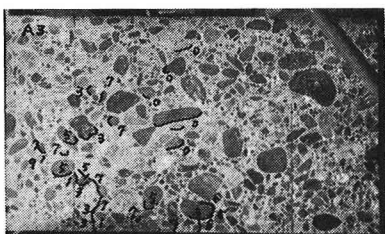


写真-4 曲げ供試体のひびわれ

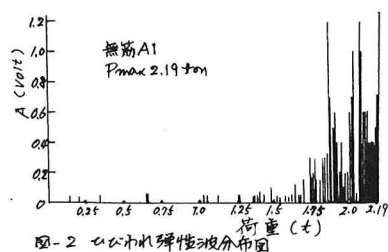
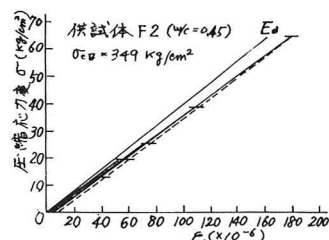


図-2 ひびわれ弾性波分布図



ひびわれ発生数	0.45	0.55	0.65	0.75	0.85	0.95	1.05
0	0	0	0	0	0	0	0
1	20	30	40	50	60	70	80
2	0	2	4	5	6	7	8
3	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0

図-3 初期0-ε線とひびわれ弾性波発生数

c). 微小ひびわれとσ-ε線 コンクリートの変形に対するσ-ε線は曲線状をなし、その原点における切線弾性係数でも動弾性係数に比較して数%以上小さい値と取ることは一般に知られている。ここでは前述のようにひびわれ弾性波による微小ひびわれの早期発見が可能であることを利用して、微小ひびわれの発生とσ-ε線との関係について調べることを目的とした。供試体はφ10×200mm 圧縮供試体でηcは0.45, 0.55, 0.65, 0.75とし、載荷に先だち各供試体の

動弾性係数を測定し、抵抗線歪計およびひびわれ信号を捕える受振子を取りつけた。載荷は繰り返し荷重とし、最大5 tonまで各段階(0~1.0(0~0.5), 0~1.5, 0~2.0, 0~2.5, 0~5.0 ton)に分けて連続的に繰り返し載荷し、残留および各段階ごとのひずみを読みとった。また同時にシンクロスコプによって微小ひびわれの発生状況を観察した。図-3は初期応力状態のσ-ε線およびそれぞれの繰り返し載荷の際のひびわれ弾性波の発生信号数と示す一例である。本実験からコンクリート体は圧縮荷重に対して従来考えられてきたよりかなり初期の応力状態から微小ひびわれの発生することがわかる。國中ひびわれ弾性波の発生数は、その大きさは測定せず、数のみと計測したものであり、これらのひびわれによってどの程度のひずみエネルギーが変換されたかはわからないうが、全般的に見て40kg/cm²前後までは振幅が小さいこと、またこの応力附近まではσ-ε線がほぼ直線的であることから、これら微小ひびわれの発生はσ-ε線に対しそれほど大きな影響を与えず、40kg/cm²を越すころからひびわれ波の発生数およびその振幅の大きさは顕著になり、残留ひずみも急に大きくなり、σ-ε線もこのあたりから曲率を増す傾向を示す。Jones, L. Hermite 氏らの音響的実験や Rüsch, Hsu 氏らの実験においては、微小ひびわれ発生が始まる荷重として、破壊荷重の30~50%という結果を示しているが、本実験においては30%以下の初期応力状態において、すでに微小ひびわれの発生が認められた。次に動弾性係数と初期弾性係数の間におよそ10~30%程度の差が認められたが、これは着目すべき提案した理論式によって説明しうるものである。即ち静弾性コンプライアンスをJ₀とすれば J_{0a} = 1/E_{0a} = J₀ + αb となるからである。ここにαは主としてペースト内部に存在するひびわれの芽に由来し、bは主として骨材もしくは骨材の周囲に存在する欠陥に由来するものである。

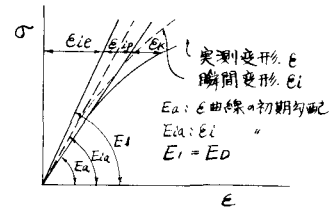


図-4 応力-ひずみ線

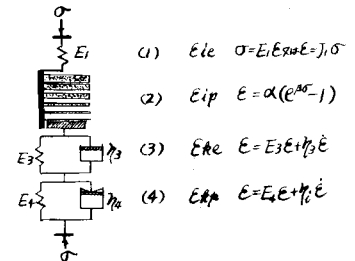


図-5 コンクリートのレオロジー模型

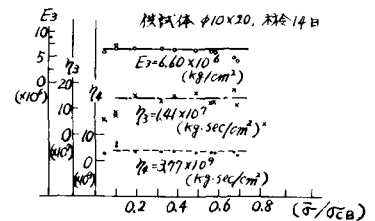


図-6 クリープ諸定数

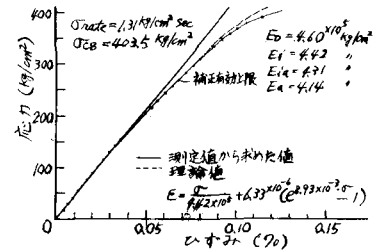


図-7 瞬間変形曲線

3. コンクリートの変形

4. コンクリートの瞬間変形 一般に圧縮試験などにおいて、ある一定速度で荷重を増加させながら測定されるσ-ε線は図-4に示すような非線形となる。この原因の一つとして前項で微小ひびわれの発生について述べたが、コンクリートの場合は各時点において遅れ変形すなわちクリープ成分が含まれるはずである。筆者らはこれらクリープ成分を取り除いた瞬間変形につきσ-ε線特性の解明を試みた。なお温度、収縮の影響によるひずみは実験上自動的に取り除かれるのを考慮の必要がなかった。解析には図-5に示すレオロジー模型を用いた。ここに模型(2)は横道・松岡氏らによって提案されたクシ型模型であり、連続強度分布を持つ理想体に対する内部破壊を説明するもので、クシの歯の強度はゼロからσ_{ub}まで変化し、第1回の載荷によりその応力σまでの歯が破壊し、それに応じた非回復性の瞬間ひずみが生ずるものである。dφ/dσ = kで増加する定速応力に対してこのレオロジー模型を用いて表わせば、

$$\epsilon = (\epsilon_{1e} + \epsilon_{1p}) + (\epsilon_{2e} + \epsilon_{2p}) = \frac{\sigma}{E_1} + \alpha \left(e^{-\frac{\sigma}{\sigma_{ub}}} - 1 \right) + \frac{1}{E_2} \left(\frac{\sigma}{\sigma_{ub}} \left(1 - e^{-\frac{\sigma}{\sigma_{ub}}} \right) \right) + \frac{1}{E_3} \left(\frac{\sigma}{\sigma_{ub}} \left(1 - e^{-\frac{\sigma}{\sigma_{ub}}} \right) \right) \quad (1)$$

また定応力σにおける遅れ変形は

$$\epsilon_k = \frac{\sigma}{E_1} \left(1 - e^{-\frac{\sigma}{\sigma_{ub}}} \right) + \frac{\sigma}{E_2} \left(1 - e^{-\frac{\sigma}{\sigma_{ub}}} \right) \quad (2)$$

ここでは $\sigma/\sigma_{ub} \ll 1$ 、従って (1)式第4項および(2)式第2項はそれぞれ $\frac{1}{2} \left(\frac{\sigma}{\sigma_{ub}} \right)^2$ 、 $\frac{\sigma}{\sigma_{ub}}$ として計算した。

これらにもとづき種々のσにおけるクリープ試験結果より、定数E₁, φ₁,

ϵ_0 を決定し、任意の載荷速度で行なつて得られる σ - ϵ 線の測定値から時間的ひずみ成分を差引けば瞬間ひずみ線がえられる。実験には $\psi_c=0.5$ の $\phi 10 \times 20$ cm 円柱圧縮供試体を用い、種々の応力速度の定速載荷試験および短時間クリープ(5~10分)試験を行なった。種々の応力段階で行なったクリープ試験結果より得られたクリープ諸係数と図-6に示す。図-7は σ - ϵ 線の測定値からクリープ成分 ϵ_c を差引いた補正値の一例を示すが非線形をなしており、明らかに瞬間変形には永久ひずみ成分が含まれていることが確認された。また(1)式の $\epsilon_i = \epsilon_{ie} + \epsilon_{ip} = \epsilon_0 \sigma + \alpha (\sigma^2 - 1)$ を用いて係数 $\epsilon_0, \alpha, \beta$ を計算し理論線を描くと破線のようになり、実験値とよく一致することも確認した。

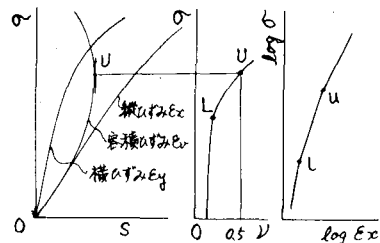


図-8 コンクリートの変形における種々の特異点

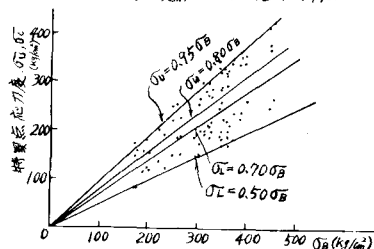


図-9 特異点応力比と圧縮強度

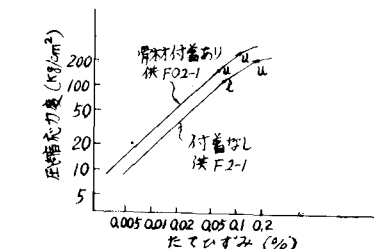


図-10 両対数グラフにおける ϵ_i/ϵ の特異点

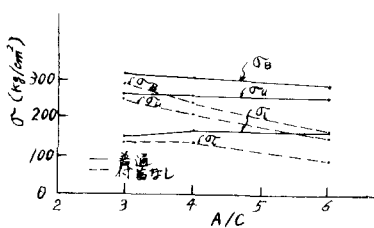


図-11 特異点と A/C の影響

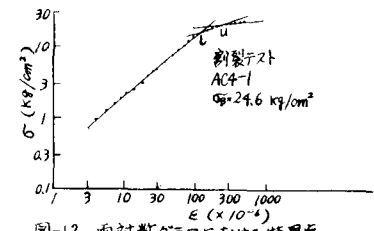


図-12 両対数グラフにおける特異点

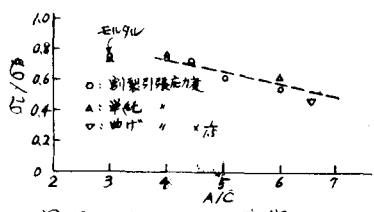


図-13 σ_b/σ_t と A/C の影響

b) 変形の特異点 以上に述べた如くコンクリート体の σ - ϵ 線は瞬間変形に対しても非線形をなし、内部構造上何らかの変化があるものと考えられる。筆者らはコンクリートの一軸圧縮変形の特異点をなわち図-8に示すように容積ひずみ ϵ_v の最大値になる点U、ポアソン比が急増する点L、両対数グラフにおける応力-ひずみ曲線に現われる2つの屈折点UおよびLの4つの点を確認し、それらの間に $\sigma_U > \sigma_L > \sigma_0$ の関係があり、 σ_U および σ_L は圧縮強度 σ_b に対する比がコンクリート配合および材令にほとんど関係なく0.75~0.95の範囲にあってクリープ破壊限界にほぼ相当し、また σ_L は0.50~0.70の間にあって疲労破壊限界に相当するところを見出した。(図-9)。またこれら特異点におよぼす界面クラックの影響すなわち骨材相違の影響について調べるため、粗骨材として絶対乾燥させてからシリコンオイル中に飽和させたのち表面を切って表面付着を除いたものを用いて、この処理をしない普通状態の骨材を用いた場合と比較した。供試体は $W/C=0.5, A/C=3, 4, 6$ の $\phi 10 \times 20$ cm シリンダーを用いた。図-10に試験結果の一例を示す。図-11は圧縮強度および $\log \sigma - \log \epsilon$ 図の2つの特異点を A/C に対してプロットしたもので、各点は同じ供試体3本の平均値を表わす。以上より付着のない骨材を用いたものは普通の骨材を用いた場合に比べて上、下の特異点および強度がともに低下しており、その傾向は当然ながら A/C の大きいほど著しい。これから下方特異点はひびわれが内部応力分布の急激な変化ともたらし、組織のゆるみを開始する点であり、上方特異点は時間的平衡状態に達しないような内部組織のゆるみの生ずる点と考えられる。次に引張変形に対する特異点を調べるため、単純引張試験、割裂試験および曲げ試験を行なった。供試体は $\phi 10 \times 20$ cm シリンダーおよび $15 \times 15 \times 55$ cm のはりで配合は圧縮試験に準じた。この場合にも一般には下方特異点とは顕著に存在したが、上方特異点Uは破壊点に非常に近接しているので、割裂試験の一部に見られたにすぎなかった。また特異点Lはコンクリート表面に微小ひびわれの発生を認める時期にほぼ相当した。図-12に試験結果の一例を示す。図-13は σ_b/σ_t を A/C に対して3個の供試体の平均値をプロットしたものであり σ_b/σ_t は A/C の増

加にもなってほぼ直線的に減少することを確認した。

4. クリープとひびわれ

a). 静的クリープとひびわれ コンクリートが持続荷重下でいわゆるクリープ破壊するときの強度は、普通の短時間試験で定めた強度の70～90%に減少することは早くから報告されている。筆者らは短時間クリープ試験を行い、内部の微細ひびわれ発生状況とこれの特異点におよぼす影響を調べた。供試体は $W/C = 0.4 \sim 0.7$ の数種につき $\phi 10 \times 20 \text{ cm}$ シリンダーを用い、圧縮試験を行なった。図-14にクリープ曲線の一例を示す。図-15にはクリープ試験中に発生したひびわれ弾性波の数と σ/σ_B との関係を示す。また図-16にこれら供試体の特異点をあげる。以上より、ほぼ σ/σ_B に相当する $0.3 \sigma_B$ 以下の持続応力下ではクリープ中に新しいひびわれは発生せず、それ以上では持続応力の大きくなるにしたがって発生数が増加し、 σ/σ_B に相当する約 $0.8 \sigma_B$ をこえると急激な増加が認められた。先に述べたようにコンクリートは圧縮応力を受けると $0.1 \sigma_B$ 以下の応力状態からすでに内部ひびわれが発生するが、特異点 σ_c 以下の持続応力下では時間の経過とともに新しいひびわれの発生はほとんど認められず、 σ_c をこると新しいひびわれの発生があり、 σ/σ_B をこると急激に増加することがわかる。

b). くり返し応力とひびわれ クリープ変形の大きさは応力下においてはその応力の大きさにほぼ比例することが知られているが、高い応力を受ける場合には変形状態は不安定であって大きな遅れ変形を示し、ついには遅れ破壊を起す。このような高い応力下での破壊性クリープは疲労性状と類似した性質の一つと考えられ、コンクリートの疲労を独立した問題としてではなく、静的性質を含め総合的に物性的研究を行なうことが望ましいと考える。以上の立場より、 $\phi 10 \times 20 \text{ cm}$ シリンダーの圧縮および割裂試験、 $15 \times 15 \times 55 \text{ cm}$ はりの曲げ疲労試験も行なうと同時に、圧縮試験については、疲労による変形を静的クリープ変形と比較するため、一部の供試体の静的クリープ試験を同時に行なった。図-18に下限・上限応力比 $S = \sigma_u/\sigma_l = 0.15, 0.3$ および 0.5 に対する Wohler 曲線を示す。これより200万回疲労強度に対する Moore-Kommers-Jasper の疲労強度図に描けば図-19のとおりである。図-20は割裂供試体のひびわれ発生状況の一例を示す。この供試体では3万回のくり返しで最初

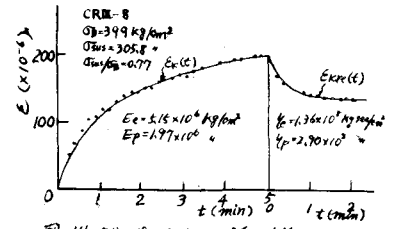


図-14 クリープおよびクリープ戻り曲線

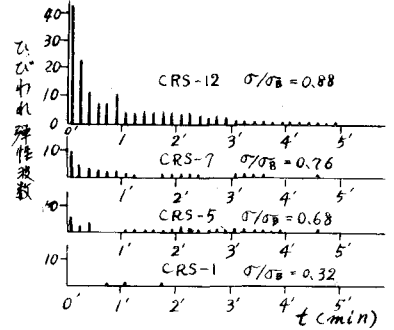


図-15 クリープ中のひびわれ弾性波

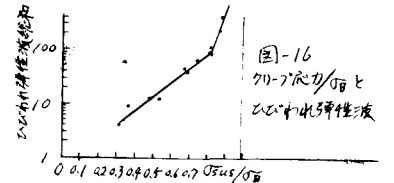


図-16 クリープの σ/σ_B とひびわれ弾性波

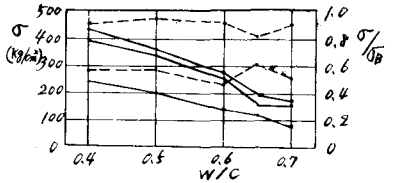


図-17 特異点と水セメント比

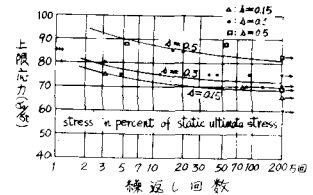


図-18 Wohler 曲線

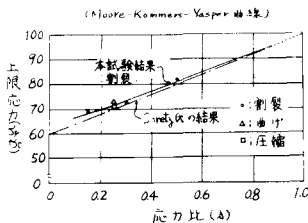


図-19 200万回疲労強度

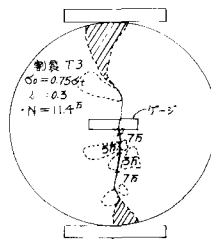


図-20 割裂供試体のひびわれ

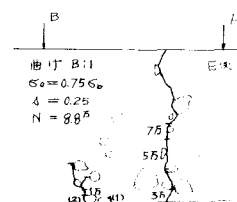


図-21 曲中供試体のひびわれ

のひびわれが中央より下方約20mmの位置に約1cmの長さにわたって発見され、5万回ではさらに上へ、7万回では上、下両方向にひびわれが成長し、11.4万回で破壊が起ったものである。この例で示したようにすべての供試体において最初のひびわれは断面中心より上方または下方に約2~3cm離れた位置に生じやすい傾向を示した。この傾向は静的試験におけるひずみ分布の測定に対応するもので、Bajmai が理論的、実験的に説明しているのと同様である。図-21に曲げ疲労供試体のひびわれ状況の一例を示す。本試験においては1回目の載荷ですでに曲げひびわれが生じており、その後荷重のくり返しに伴ってひびわれは上方に進行し、また新たなひびわれが発生、成長して破壊に至ったが、これらの状況は静的試験における性状と非常に類似しており、荷重のくり返しは静的試験における荷重の増加と同様の働きを持つことがわかった。図-22にくり返し平均応力に対する静的クリープ成分と差引いたコンクリートの純粋の疲労応縮ひずみを示す。これより $\sigma_0 = 0.60\sigma_B$ 以下の供試体では疲労成分はほとんど現われず、くり返しに伴って生じた残留ひずみはほぼ静的クリープひずみだけであるのに対し $\sigma_0 = 0.70\sigma_B$ では明らかに疲労成分が存在し荷重くり返しに伴って徐々に増加することがわかる。

5. η/c と塑性変形

コンクリート体は極めて複雑な複合材料であり、その変形においても初期応力状態から顕著な塑性成分を含むことはこれまでに述べた通りであるが、ここではさらにコンクリートを構成しているペースト部および骨材部の体積比即ち η/c がコンクリート強度、弾性係数、ポアソン比等にもどのような影響をおよぼすかについて調べた。供試体には $\eta/c = 0.45$ および 0.55 の2種類とし η/c は0.2, 0.3, 0.33, 0.4, 0.46 および 0.52 のモルタル $\phi 5 \times 10$ ミリダーを用いた。以上の試験結果 $\eta/c = 0$ のセメントペースト供試体の σ - ϵ 線は破壊附近まで殆んど直線に近い変化を見せるのに対し、 η/c の増加とともにその曲率を増す傾向が認められた。図-23に η/c の変化に対する σ_B , E , ν の変化を示すが、 η/c の増加に伴い σ_B , E とも増加し、 E はあたかも素材としての弾性係数に近づき増加する、しかし $\eta/c = 0.2$ を越えるとやや定常状態を示し、 $\eta/c = 0.5$ に至っては急激な減少が認められ、全体として上に凸の変化が観測された。これらから瞬間変形においてセメントペーストの弾性的挙動を示すのに対して、骨材量の増加は塑性的挙動を起させる原因の一つであることが考えられ、また図-24で0.80B および 0.90B 時における割線弾性係数 E_s の初期弾性係数 E_i に対する比が減少する傾向からも明らかである。

6. おわりに

以上の研究よりコンクリート体は外力による変形において初期応力状態より極めて塑性的挙動を示すこと。瞬間的変形成分を除く瞬間変形において弾性的であるセメントペースト素材と弾性素材である骨材との複合体であるコンクリートは瞬間変形においても塑性的挙動を示すようになる。これら塑性的挙動の大きな要因の一つに微小ひびわれの発生があり、その多くはセメントペーストと骨材間の境界面の破壊に始まる。またこれらの内部ひびわれが変形に対する特異点としてあらわれる。等の事を確認した。

参考文献

- Hsu, et al ; Microcracking of plain concrete and Shape of the Stress-Strain curve Jour. of ACI Vol 60 No.2, 1963
 横道・松岡 ; コンクリートのメカニクス的考察 セメント技術年報 XVIII 223-239
 Rüsch, H ; Physikalische Fragen der Betonprüfung. Zement-Kalk-Gips. Heft I Jan 1959

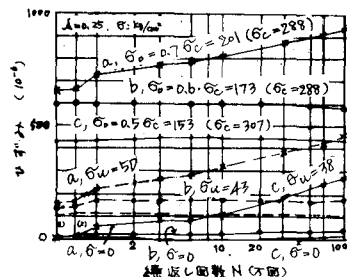


図-21 クリープ成分と差引いたクリープの圧縮歪

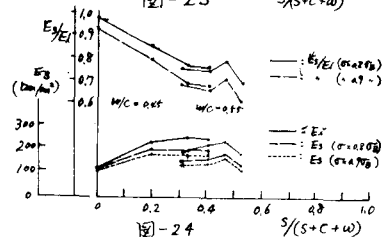
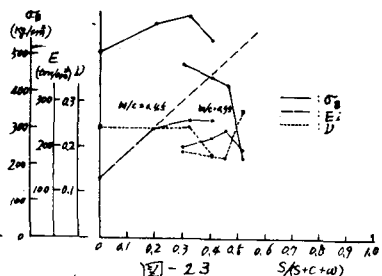


図-24