



コンクリートの変形能力とその改善

鈴木 計 夫*

1. はじめに

コンクリートは元来もろい性質であることはどんな人でも良く知っている。それは、引張に弱いことと、圧縮には強いが一旦こわれ始めると岩石のようにもろくつぶれるということが感覚的に理解されているということであろう。このようなコンクリートが構造材としてわれわれの周囲の建築物には多量に用いられているが、そこではコンクリートのもろいという欠点が鉄のねばり強さによって巧くカバーされるように構造部材が設計されているので地震のときにも一応安心出来ることになる。しかしこれは一般論であってその内容をもう少し詳しくみてみるといろいろな疑問や興味ある点を見出すことが出来る。10年ほど前の十勝沖地震では何故に多くのコンクリートの建物が壊れたのか、アメリカの建物は日本より小さい水平力によって設計されているのに、数年前の通称ロスアンゼルス地震のとき何故オリブビュー病院の主棟はあの大変形を許容し、倒壊をまぬがれたのか、などなど…。

コンクリートの建物が大地震でも簡単には壊れないということが少なくとも人命尊重の立場から最低限必要であって、そのためには構造部材がエネルギーを沢山吸収出来るようなねばりのある壊れ方をすることが要求される。

建物全体として急激なもろい破壊をしないように、設計上はどのように配慮されているかということについては別の機会にふれることにして、先ず本稿では部材のねばり強さを支配するコンクリートそのものの変形能力についてみてみよう。

2. コンクリートの変形能力とその測定

図1はコンクリートに作用する応力度とひずみ度との関係を模式的に表わしたものであるが、コンクリートは鉄と異なって降伏の踊り場がない。したがって塑性域までの部材の挙動をより正確に解析するためには図1のような最大応力以降のひずみ軟化域も含む応力度—ひずみ度曲線（以下 σ - ϵ 曲線と略記）が必要となる。

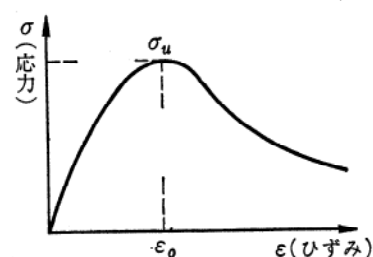
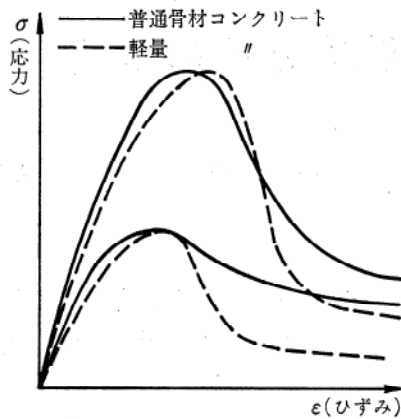


図1 コンクリートの応力度—ひずみ度 (σ - ϵ) 関係

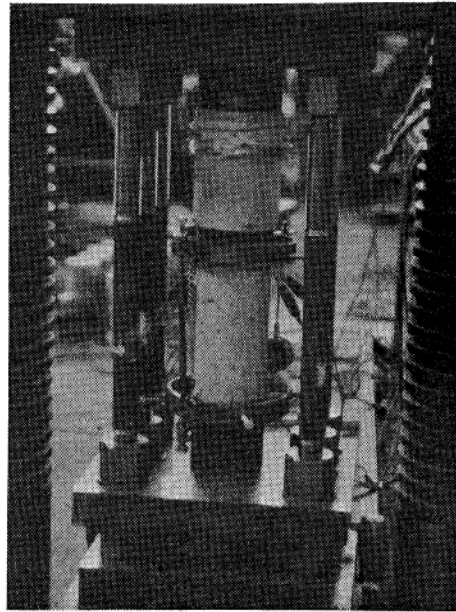
つい数年前までは、コンクリートの応力と変形に関する研究の殆んどは最大応力点までが対象であった。その理由は、ひずみ軟化域の下り勾配部分を測定出来る簡便な方法が見出せなかったことと、コンクリート部材の設計法そのものが破壊の安全性を考慮する場合においてさえ部材の抵抗する“力”のみを考え“変形の性能”は直接評価していないこと、などにあると考えられる。

この σ - ϵ 曲線はコンクリートの配合や種類によって非常に大きな違いがある。それを極く概括的に示せば図2のようになるが、上記最初の理由は、通常材料試験機を用いたのでは下り勾配の急なコンクリートに対しては測定が不可能となることを意味している。いいかえるならば最大応力に達するまでに試験機に蓄えられるエネルギーを仮に強力なスプリングの変形に置きかえて考えるとすれば（すなわちスプリング

*鈴木計夫 (Kazuo, SUZUKI), 大阪大学, 工学部 建築工学科, 助教授, 工学博士, 建築構造学

図2 各種コンクリートの σ - ϵ 曲線

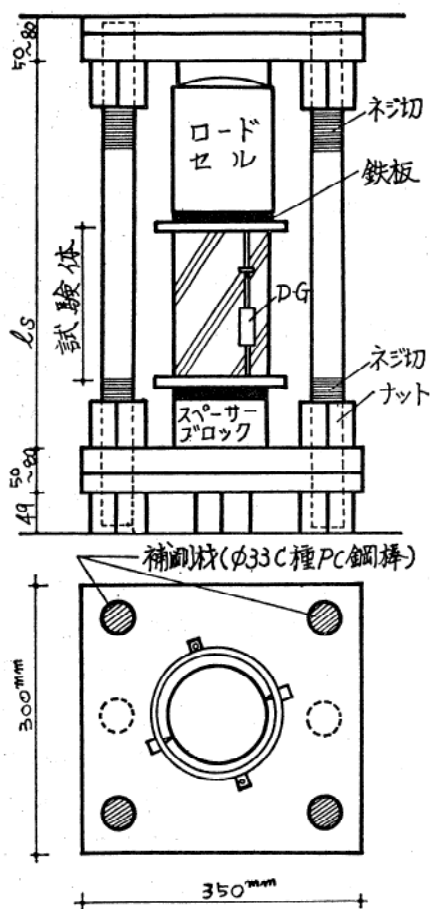
を介して加圧しているとすれば) ひずみ軟化領域に入った次の時点からばねの力を瞬間的に抜く操作を施さない限り破壊は急激に進んで、応力と変形の間係を測定出来なくなる。現在の材料試験機の方式によってこの測定をするには極めて剛性の高いフレームと同時にコンクリートの時々刻々の挙動に対応して瞬間的に油圧の調

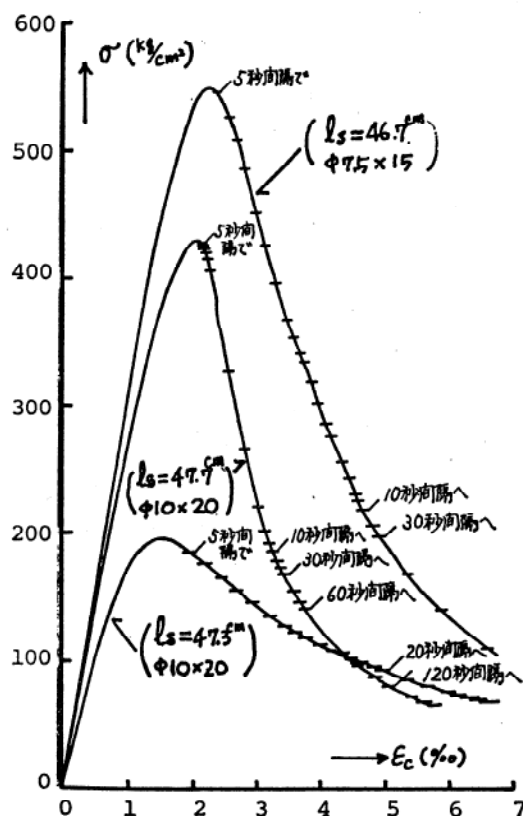
写真1 σ - ϵ 曲線の測定装置

整操作の出来る強力かつ高性能な油圧機構とが要求され、そのためには少なくとも1千万円単位の費用が必要となる。このコンクリートの塑性域の性状の究明を最も必要とする地震国日本においても現在この装置を備えている所は2, 3箇所しかなく、しかもこの領域の研究データはあまり報告されていない。

筆者は数年前より、図3および写真1に示すような装置を考案してこの領域のコンクリートの性状の研究をおこなって来たが、この装置は従来の材料試験機をそのまま利用でき、わずか数万円の資材費のみで全 σ - ϵ 曲線が簡単に測定出来る点に大きな特徴がある。これは上下の厚い鉄板の間に供試体と高強度の鋼材を4~6本並列に並べただけのもので、コンクリートのへたり(ひずみの軟化)が生じるとその分を周辺鋼材が肩代りするようになっている。すなわち材料試験機の荷重(=コンクリートの荷重+鋼材群の荷重)がコンクリートのひずみ軟化域においても荷重低下とならないように鋼材群の剛性を定めてある。

測定はロードセルとコンクリートの変形を入力としてX-Yレコーダに接続すれば、目前で直接図2のような σ - ϵ 曲線を描かせることが出来る。このようにして測定した曲線の例を図4に示す。

図3 全 σ - ϵ 曲線の測定装置

図4 全 σ - ϵ 曲線の測定結果の例

同図も参照してこれまでに得られた σ - ϵ 曲線の特徴を要約すれば次のようになるであろう。

(1) 最大応力度時のひずみ度 (ϵ_0) は、コンクリートの強度が低いと小さく高くなるにつれて大きくなっているが、概略の値は 0.2% 前後と考えられる。(すなわち 1 m の長さのコンクリートであれば約 2 mm 縮んだときこの状態となる。)

(2) ひずみ軟化域の下り勾配は低強度の場合小さく高強度では大きくなっている。また軽量骨材コンクリートでは同一の普通骨材コンクリートのそれと比べると勾配は急である。(下り勾配が急なコンクリートほど破壊は突発的となる—図4の 400, 600 kg/cm² の強度のコンクリートを上述のような装置なしで普通の載荷速度で加圧した場合は、破片が数米にわたって飛び散るほどの爆発的な破壊性状を示す。)

コンクリートの σ - ϵ 曲線は以上のような特性をもっているので“コンクリートの変形能力”という表現はしたもの、どこを変形能力の限界とするかは非常に難しい問題である。これ

までに材料的立場から 2, 3 の案が示されており、筆者は部材の立場から一案を提示しているが、部材の終局域の挙動について、コンクリートのひずみ軟化域も考慮できしかも簡便正確な実用的解析法を考え出すことが、設計した部材の変形能力、言いかえるならば地震に対する抵抗能力のバロメーターであるエネルギーの吸収能力をより正しく評価する上で大切である。

これに関する筆者の提案は別の機会に述べる予定であるが、今後はこの装置を用いて、コンクリート構造物の力学的性状の最も基本をなす全 σ - ϵ 曲線の性状を明らかにし、また装置もどのような試験機関でも気軽に利用出来るようにしたいと考えている。

3. コンクリートの変形能力の改善

さて、2.において述べた内容はプレーンコンクリート(コンクリートのみで鉄は用いていないもの)の応力と変形の関係についてであった。前述のごとく従来のコンクリート部材の設計は部材の抵抗する力を主対象としているが、最近では大地震時の構造物の安全性確保のためには、部材が繰り返し荷重にも安定した十分な変形能力を持ちそれが定量的に算定評価される必要があることが強く認識されて来ている。したがって将来部材の設計法は何らかの形で断面のじん性すなわち変形能力を考慮した方式に移行してゆかざるを得ないことは明白であり、その場合図4のようなもろい壊れ方をするプレーンコンクリートをそのまま用いてねばりのある断面を設計するにはいろいろな点からの制約があり、また賦与出来る変形能力にも限界があって設計の自由度は限定されてくると考えられる。

そこで、むしろ積極的に何とかプレーンコンクリートと鉄筋を巧く協力させてコンクリート自身の変形能力を改善する方法はないものだろうか?。その方法の一つが円形スパイラル筋の利用であろう…。すなわち円柱状のコンクリートに鉄筋を円くスパイラル状に巻き付けた形に補強したものであるが、その補強は、圧縮破壊過程にあるコンクリートの横方向の膨らみを拘束して三次元応力状態であるコンファインド(横拘束)コンクリートとする効果をもつもの

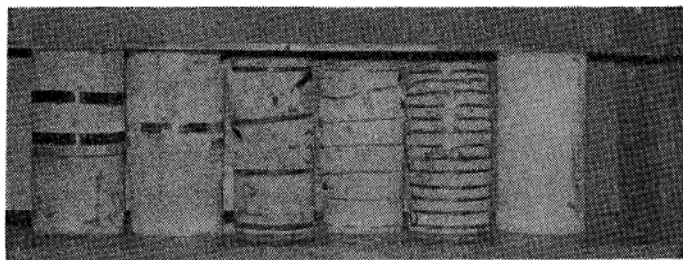
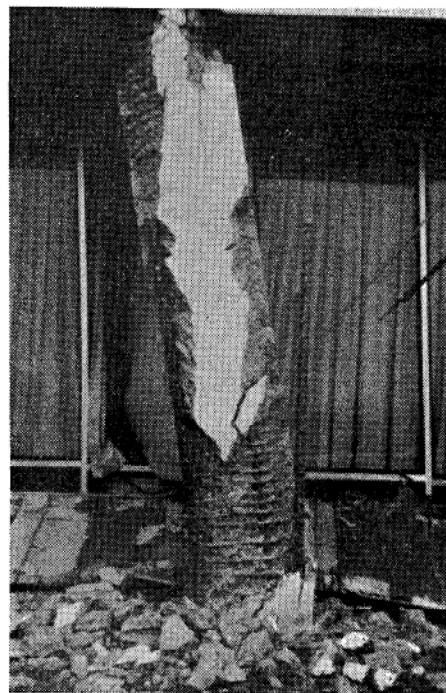
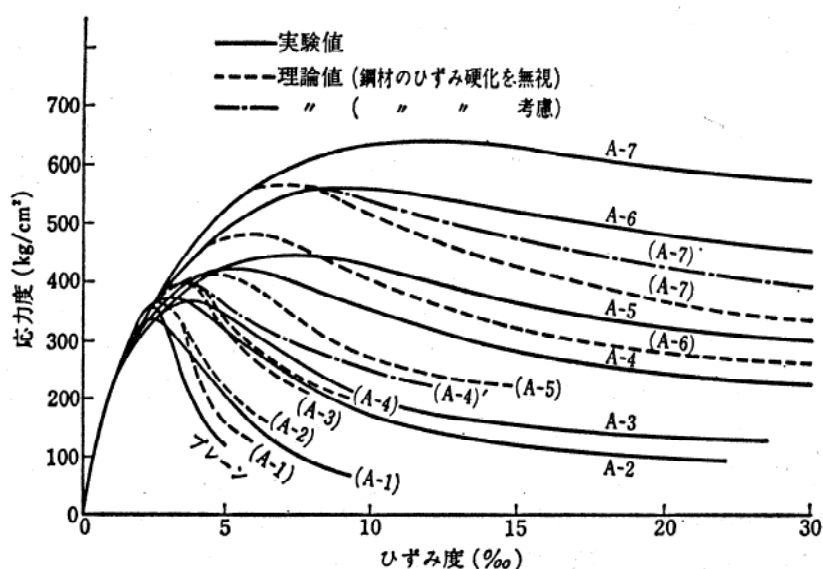


写真2 プレーンコンクリートとコンファインドコンクリートの載荷後の状態比較

で、このようなコンクリートの変形能力が如何に素晴らしいものであるかは写真2を見ていただければ一目瞭然であろう。同写真はスパイラル筋でなくリング筋が用いられているが、効果は同じである。これは $\phi 10 \times 20$ cmの円柱状の供試体を用いて単軸圧縮した場合の補強効果を比較したものであるが、6本のうちの両側は無載荷のものであり左2番目から順に、プレーンコンクリート、ピッチ60, 30, 15mm補強のコンクリートの順になっている。両側の供試体に架け渡した水平材とのすき間を比較していただきたい。プレーンコンクリートのすき間は殆んどないが、補強されたものは補強筋のピッチが小さくなるにつれてそのすき間は大きくなり、右から2番目や3番目のものは指が1本楽に入るくらいになっている。これらのコンクリートの σ - ϵ 関係を図5に示す。試験後のこれらの残存耐力を比較するならば、プレーンコンクリート

写真3 スパイラル補強コンクリート柱の変形能力
(オリーブビュー病院(米国)の1階柱—この上にさらに4層のビルが乗っている—)図5 $\phi 100 \times 200$ mmコンファインドコンクリート円柱の σ - ϵ 曲線
(A-1～A-7: 3.47×3.58 mm補強筋のピッチがそれぞれ12, 8, 6, 4, 3, 2, 1.5 cm)

ではこのまま床に落せばたちまち数個のコンクリート破片になってしまうであろう。しかし右から2番目, 3番目のコンファインドコンクリートではこの状態でも未だ少なくとも最大耐力の7割前後の耐荷能力を保持しており, 変形も更に大となる。また最大耐力もプレーンコンクリートのその1.5~2倍ほどの値であり, そのときのひずみ度は3~5倍にはなっている。

このような目を見張らせるほどの変形能力と耐力を持つコンファインドコンクリートは今後コンクリート構造物の中で最大限に利用する価

値があると考えている。実際に利用し, またその効果についての貴重な実大実験結果は前記ロスアンゼルス地震におけるオリビュー病院の1階柱において示された(写真3参照)。これはコンクリート構造物の今後の発展の方向を示す貴重な例であるということが出来る。

本稿ではコンクリートそのものの変形能力とコンファインドコンクリートによる変形能力の改善についての研究の現状を中心に記述したが, 次の機会には曲げ部材の変形能力について述べたいと考えている。