

I-54 Duffing 型応力-ひずみ関係を有する非線形材料に関する実験的研究

苦小牧高専 正員 近藤 崇
 苦小牧高専 正員 澤田 知之
 日本大学 正員 木田 哲量
 日本大学 正員 能町 純雄

1. はじめに

非線形材料として用いたコンクリート供試体の最大応力発生時までの応力-ひずみ関係は、これまでに行った一連の単純圧縮実験より Duffing 型応力-ひずみ理論式によって表現することが可能であるという結果が得られている。しかし、単純圧縮実験では最大応力が発生した後の瞬時に供試体の破壊が起こり、それ以降の応力-ひずみ関係を計測することができなかった。そこで、本研究では破壊緩和装置を用いた実験を行い、最大応力発生時の急激な破壊を制御し、最大応力発生以降の塑性域における応力-ひずみ関係を計測し Duffing 型応力-ひずみ理論式との適合性の検討を行った。

2. Duffing型応力-ひずみ関係

非線形な力学特性を有する材料に外力が作用した場合の応力 σ とひずみ ε の関係は式 (1) に示す連続関数として表すことができる。

$$\sigma = f(\varepsilon) \quad (1)$$

ここで、ひずみ ε は微小変形であると仮定すると、式 (1) をマクローリン展開し、さらに構成材料の初期接線弾性係数 E を正負応力に対して等しいと仮定し、第3項までとれば、式 (2) で表すことができる。

$$\sigma = E \left[\varepsilon - \frac{\varepsilon^3}{3\varepsilon_0^2} \right] \quad (2)$$

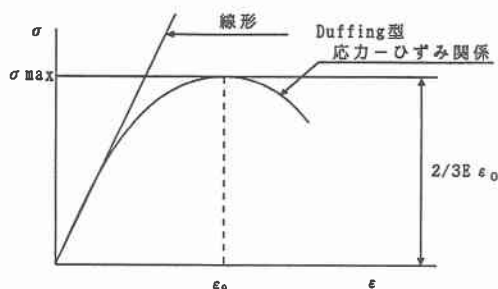


図-1 Duffing 型応力-ひずみ関係

ここで、 ε_0 は最大応力発生時のひずみ値とする。また、これまでの研究により、高次の項は微小であり解析上結果に影響を与えないことが検証されているので無視することとした。

ここで、式 (2) は Duffing の振動方程式の復元力と同様に3次の奇数べきで表されるので、Duffing 型応力-ひずみ関係と称した。

3. 実験方法

3-1 供試体

コンクリート供試体は JIS R 1132 に基づき作製した $\phi 100\text{mm} \times H200\text{mm}$ の円柱を用いた。使用材料は、普通ポルトランドセメント、細骨材 (A: 中国複案省複安川産, 比重 2.58, F.M. = 2.36, B: 君津産, 比重 2.67, F.M. = 6.60, A:B=2:8), 粗骨材 (青梅産, $G_{\text{max}}=20\text{mm}$, 比重 2.67, F.M. = 6.60), 混和剤 (AE減水剤: ポソリス 70) とし、配合を表-1 に示す。また、養生日数は7日, 28日とした。

表－１ コンクリートの配合 1

水セメント比 w/c (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	s/a (%)	単 位 量 (kg/㎡)				AE減水剤 cc/㎡
				水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	
45	14.5	5.1	41.8	169	376	711	1029	940

3-2 実験装置

荷重載荷は載荷容量 100tfのアムスラー型万能試験機を使用し、荷重制御により行った。

破壊緩和装置は図－２に示した形状である。

ここで、破壊緩和装置の上面の鋼製載荷板はナットで挟み上下に可動させることができ、下面の鋼製載荷板はφ33mmの第4種PC鋼棒4本で支持固定したものである。上面のナットを緩めることによって、試験機からの荷重の一部がPC鋼棒に負担され、最大応力発生時の急激な破壊を制御することができる。最大応力発生以降は、増加する試験機からの荷重および供試体から移行する荷重をPC鋼棒が負担することになり、供試体の崩壊を防ぐことができる。

3-3 実験方法

破壊緩和装置内には、側面に2枚左右対称にひずみゲージを貼付した供試体、球座、ロードセルを図－２のように設置する。そして、万能試験機加圧板間に破壊緩和装置を挿入し、以下の方法で荷重載荷を行う。

- ①荷重を与える速度は応力の増加が毎秒3kgf/cm²となるようにする。
- ②供試体に最大荷重の約80%の荷重が載荷された後試験機を止めて破壊緩和装置のナットを締め、再び載荷を始める。

- ③供試体が最大荷重を示した後も荷重載荷を続け、荷重およびひずみを計測する。

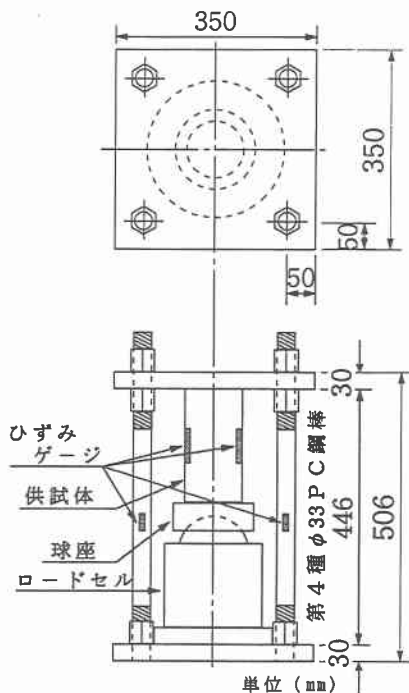
測定結果より、コンクリートの圧縮応力は圧縮試験中に加えられた荷重を供試体の元の最小断面積で除して求める。ここで、求められた応力を縦軸、荷重に対するひずみ値を横軸にプロットして応力－ひずみ曲線を描くために、4自由度の多項式による最小二乗法により整理し Duffing 型応力－ひずみ関係において必要なパラメータである弾性係数E、最大応力発生時のひずみε₀を得ることとし、得られた曲線を実験値とした。ここで、Eは圧縮初期接線弾性係数と定義できるので、圧縮応力－ひずみ曲線の初めの接線こう配とする。すなわち、式 (3) によって求める。

$$E = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \quad (3)$$

ここで、E：初期接線弾性係数(kgf/cm²)

4. 破壊緩和装置を用いた圧縮実験結果

養生日数の異なる2種類の供試体により、破壊緩和装置を用いて行った圧縮実験の結果を図－3、4に材料係数を表－2、3に示す。



図－２ 破壊緩和装置

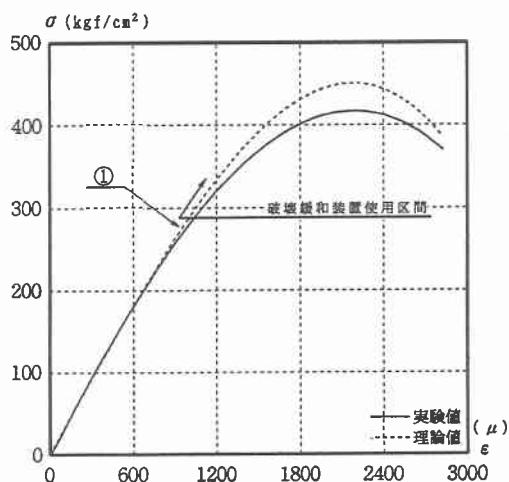


図-3 応力-ひずみ関係 (その1)

表-2 材料係数

供試体① w/c=0.45, 7days cured		
弾性係数 E	(kgf/cm ²)	3.0982×10 ⁵
最大ひずみ ε _o		0.00218
最大応力 σ _o	(kgf/cm ²)	416.85

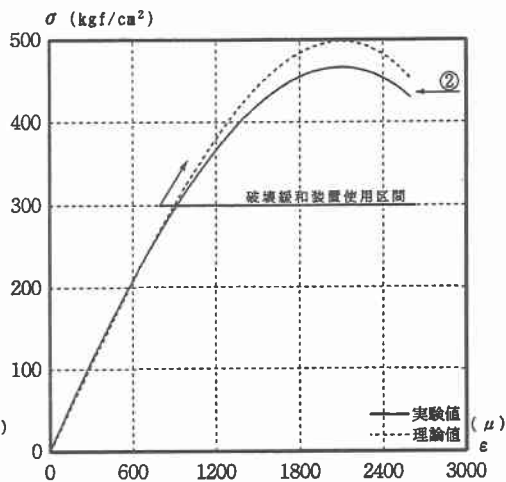


図-4 応力-ひずみ関係 (その2)

表-3 材料係数

供試体② w/c=0.45, 28days cured		
弾性係数 E	(kgf/cm ²)	3.5585×10 ⁵
最大ひずみ ε _o		0.00210
最大応力 σ _o	(kgf/cm ²)	466.27

実験結果より、破壊後と装置装着前までの実験値と理論値は相似した関係を示しているが、装着後において差異が生じていることが確認された。単純圧縮実験の結果より最大応力発生時までの応力-ひずみ関係は Duffing 型応力-ひずみ関係によって表現が可能であるという結果が得られているので、差異の原因は供試体によるものではないと思われる。そこで、差異の原因を究明するために試験機からの荷重分担の検証を行うこととした。

5. 荷重分担の検証

5-1 供試体および実験方法

以下に示した使用材料および配合で作製した養生日数28日の供試体を用いて実験を行うこととした。

使用材料：普通ポルトランドセメント、細骨材（鬼怒川産、比重2.57, F.M.=2.80）、粗骨材（葛生2005、最大骨材寸法20mm、比重2.67, F.M.=6.60）、混和剤（AE減水剤：ポゾリスNo.70）

表-4 コンクリートの配合2

水セメント比 w/c (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				AE減水剤 cc/m ³
				水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	
45.7	8.0	4.5	45.8	154	325	820	998	346

実験方法および測定結果の整理は、3節と同様に行い、以下の項目を変更して行った。

- ① 載荷速度はアムスラー試験機からの荷重の増加が毎秒120kgfとなるようにする。PC鋼棒とコンクリート供試体に貼付したひずみゲージおよびコンクリート供試体を受ける荷重測定のロードセルの値はアムスラー試験機の示す荷重計において500kgf毎に測定を行う。
- ② 供試体に20.0tfの荷重が載荷された後アムスラー試験機を停止させ、PC鋼棒の緩めてあったナットを締め付けた後、再び荷重載荷を行う。

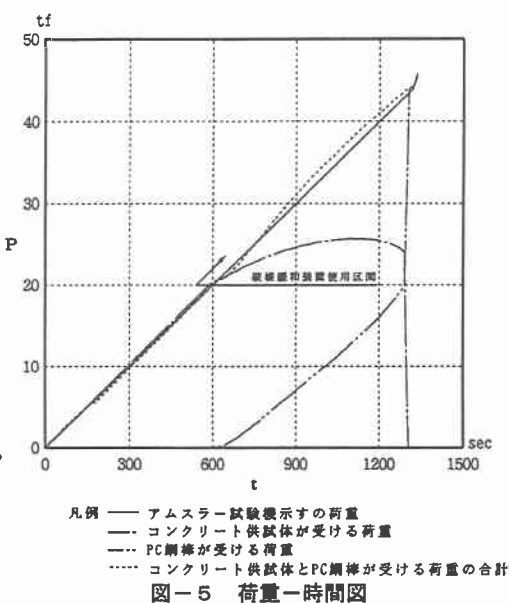
5-2 実験結果

荷重分担の検証を行うために荷重と時間の経過の関係を図-5に示す。

この図-5より、試験機が与える荷重がコンクリート供試体とPC鋼棒に負担されていく経過が分かる。そして、試験機からの荷重が20.0tfに達した後、PC鋼棒に荷重が負担されたことによりコンクリート供試体に対する荷重載荷速度の低下が確認された。

これは、試験機からの荷重増加が破壊緩衝装置装着前後で一定として実験を行っているために生じたものである。

ここで、試験機からの荷重は供試体とPC鋼棒が負担している荷重の合計とほぼ等しくなっており、この実験の信頼性を確認することができたと思われる。また、試験機からの荷重とコンクリート供試体とPC鋼棒が受ける荷重の合計に多少誤差が生じているが、これはロードセルの校正係数の影響によるものである。



6. まとめ

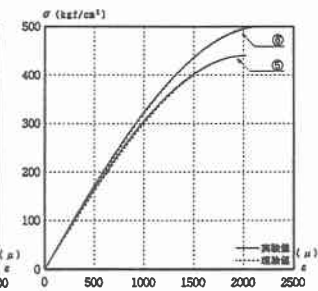
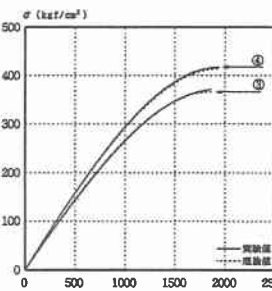
試験機からの荷重の分担の検証結果より、破壊緩衝装置装着前後では、コンクリート供試体の載荷速度の低下が確認された。そこで、3節で行った実験の結果より破壊緩衝装置装着前後の載荷速度を求め、この2種類の載荷速度で単純圧縮実験を行った結果を図-6、7、材料係数を表-5に示す。

表-5 材料係数

			w/c	σ / sec	E(kgf/cm ²)	ϵ_0
養生 日数	7日	③	0.45	0.13	2.9549×10^4	0.00186
		④	0.45	3.00	3.1995×10^4	0.00194
	28日	⑤	0.45	0.15	3.2656×10^4	0.00202
		⑥	0.45	3.00	3.4300×10^4	0.00220

ここで、 σ /sec：応力増加速度

以上より、破壊緩衝装置を用いた実験において、試験機が与える荷重の載荷速度は一定であるのに対し、与えられた荷重は破壊緩衝装置のナットを締めたことによって、PC鋼棒と供試体に分担されるために供試体



における載荷速度の低下が生じる。これによって、速度効果による見かけの弾性係数の変化などの影響が現れることによって、破壊緩衝装置を用いて行った実験結果の実験値と理論値の差異が生じることが判明した。また、単純圧縮実験において載荷速度の変化により材料係数に影響が与えられた場合にも応力-ひずみ関係は、Duffing型応力-ひずみ関係によって表現することが可能であることが確認された。

Duffing型応力-ひずみ理論式は構成方程式のパラメータである材料の弾性係数に大きく依存することから、今後の解析において破壊緩衝装置装着前後の速度効果による材料係数への影響を考慮することによって、より相似的に表現することが可能であると考えられる。

<参考文献> 1)村田二郎・岩崎訓明，新土木実験指導書，技報堂出版，pp131-146，1994，2)村田二郎・越川茂雄・富田嘉雄，コンクリートの応力-ひずみ曲線について，土木学会第30回年次学術講演会講演概要集(V)，pp195-196，1975