

V-158

高応力繰返し履歴下におけるコンクリートの塑性挙動

東電設計土木本部 正会員 小田川昌史
 東京大学大学院 学生員 李 宝禄
 東京大学工学部 正会員 前川宏一

1. はじめに

高応力・低サイクル疲労下におけるコンクリートの劣化過程、ならびに除荷・再載荷時の非線形性に関する系統的検討は現段階では十分とはいえない。さらに、時間依存性についても載荷速度等の指標で記述されている場合が一般的で、任意の時間-応力経路に対しては、データならびに構成モデルもほとんど見当たらない〔1〕。以上を鑑み、本研究は時間の経過に伴うコンクリートの塑性変形と、作用応力の繰返しがコンクリートの塑性変形に及ぼす影響をそれぞれ独立に評価して検討を試みたものである。ここで、非線形弾性ひずみを主たるパラメータとして導入し、除荷・再載荷時の非線形性を塑性挙動の記述に反映させた。

2. 非線形弾性ひずみ増分

図1は繰返し履歴を受けたコンクリートの典型的な除荷・再載荷時の応力-ひずみ関係である。ここで、応力の変動に対して瞬時に応答する弾性ひずみ増分 $d\epsilon_e$ と、時間依存成分を分離する目的から、図2に示す経路で1軸圧縮試験を行った。すなわち、除荷・再載荷経路上で、高速度かつ微小振幅応力パルスを導入し、時間に依存しない剛性 E_r を求めた。実験の結果、 E_r は応力経路に依存しない可逆な量であることが図2からも認められ、以下のように非線形弾性ひずみ ϵ_e を定義した。

$$\epsilon_e = \int d\sigma / E_r(\sigma) \quad (1)$$

σ - ϵ_e 関係は、コンクリートの破壊進行〔1〕とともに非線形性が強くなり、さらに同一破壊レベルにおいても応力が大きくなるほど、剛性が高く（換言すれば回復）なる性質がある。これは、コンクリートの内部構造の再接触による弾性剛性の回復と解釈出来るよう。

3. 瞬間塑性限界

図3は非線形弾性ひずみと瞬間塑性限界の関係を示したものである〔1〕。これは、図4に示す応力波を1振幅のみ導入して求めたもので、時間の経過に伴うひずみ進行、および繰返しの効果を事実上含んでいないと仮定できる。なお、時間依存性の塑性ひずみと破壊パラメータの進行速度が、応力の増加に対して指数関数的増加することを考慮して図4の波形が採用されたのである。

4. 異なる繰返し応力速度下に見掛けの塑性進行性

繰返し応力経路に含まれる時間の影響を明確にする目的で最大応力が $0.8f_c$ で片振り三角応力波を 0.5Hz , 0.05Hz , 0.01Hz の周波数でコンクリートに作用させた。このときの塑性ひずみ-非線形弾性ひずみの関係を平面に展開したものが図5である。

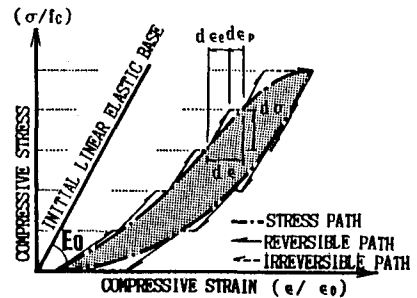


図1 除荷・再載荷時の可逆・非可逆ひずみ

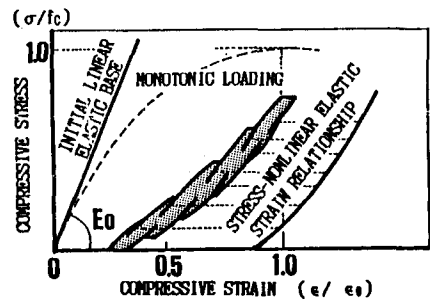


図2 非線形弾性ひずみの分離・抽出

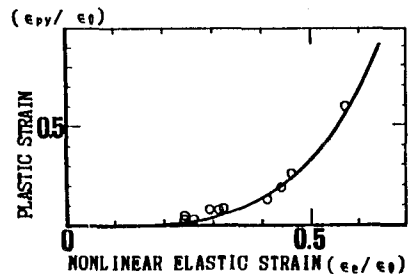


図3 瞬間塑性限界

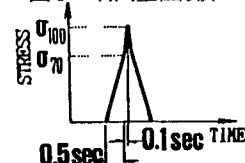


図4 使用した応力波形（1波）

図中の数字は塑性ひずみ変化に要した繰返し回数を表す。周波数の小さいものほど、つまり応力速度の小さいものほど塑性ひずみが大きく進行しているのである。これは高応力下における塑性ひずみの時間依存性によるためと解釈される〔2〕。

塑性ひずみの流れる方向について、それぞれの周波数で検討したものを図6に示す。高速度振幅ほど、相対的には最小主応力方向に塑性ひずみが流れていることが明確に示された。これらの結果は、瞬間塑性変形と時間依存型の塑性変形では、同一応力状態においても、塑性流れの方向はそれぞれの成分に対して異なるものと解釈される。

以上より、応力の繰返しによる塑性変形は、载荷速度の設定によって見掛け上、大きく変化するのである。

5. 繰返し応力下の塑性挙動

時間の影響を十分小さくして、塑性ひずみの増加に及ぼす応力繰返しの効果を抽出するために、図4の応力波形を繰返して塑性ひずみの進行状況を調べた。このとき、最大応力を一定にした片振り载荷を行った。図7は、非線形弾性ひずみ—塑性ひずみ平面上における経路を示したものであり、黒丸は最大応力点に対応する塑性ひずみである。

一定の応力振幅にもかかわらず、図7に示されるように非線形弾性ひずみは増加する。これは、繰返しの効果で弾性剛性が低下したため、結果的に弾性ひずみが増えるからである。このとき、塑性ひずみは繰返しと時間の効果を含んでいない瞬間塑性限界上（図3参照）に存在することが認められる（図7参照）。

さらに、繰返し応力経路途中において、時間の影響を含んだリラクセーション経路（図7、白丸）を導入すると、弾性ひずみが低下し、一方塑性ひずみが増加する経路を辿る。この状態から再度、応力繰返しを導入すると、過去に受けた最大弾性ひずみを越えて瞬間塑性限界に達した時、初めて塑性ひずみが増加する。したがって、時間の経過に伴う塑性ひずみを除いた、応力の変動のみに依存する塑性ひずみは、繰返しの影響を受けないと結論することができるのである。

6. まとめ

繰返し応力下の塑性ひずみの進行は、繰返し応力速度にも大きく依存し、一見、応力の繰返しによって塑性ひずみが加速的に増加しているかのように見える。しかし、繰返し応力経路に含まれた時間に依存する成分を除去すると、塑性ひずみの進行特性に繰返しの影響を認めることはできない。

【参考文献】

- 1) 前川宏一、李 宝禄、小田川昌史「コンクリートの変形特性に及ぼす時間—応力—ひずみ経路依存性」RC構造の有限要素解析に関するコロキウム論文集、日本コンクリート工学協会、昭和59年12月、pp.11～18
- 2) 田畑昌伸、前川宏一「時間を考慮したコンクリートの塑性・破壊モデル」、第6回コンクリート工学年次学術講演会論文集、昭和59年7月、pp.269-272

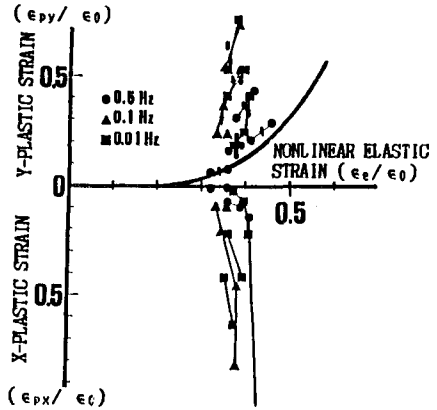


図5 周波数の違いによる塑性進行性の変化

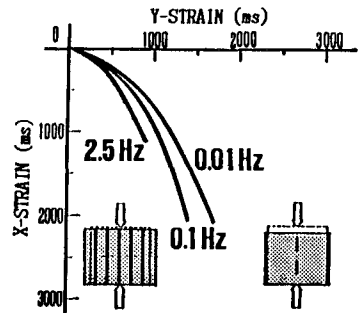


図6 周波数の違いによる塑性流れ方向の変化

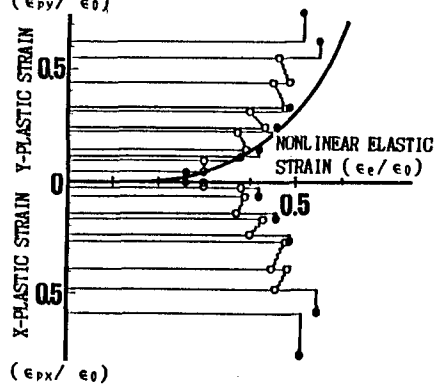


図7 繰返し応力下の塑性進行性