

過荷重下におけるコンクリートの極低サイクル疲労破壊



研究ノート

橋 英三郎*

Low cycle fatigue of plain concrete subjected to overload

Key Words : fatigue, concrete, overload, fracture

1. はじめに

兵庫県南部地震(1995)では、建築設計の拠りどころの一つであった過去の最大規模の地震記録(EI Centro 記録 1945)の2倍程度の加速度が観測された。建物の耐震改修が盛んに行われている所以である。一般に、耐震設計では、材料を弾性域にとどまらせる弾性設計と材料の塑性域まで許容する塑性設計とがある。後者では、多少の損傷を覚悟するかわりに最大耐力を前者より大きくとることができる。ところで、その最大耐力をさらに越えた場合の挙動についての議論はほとんどなされていない。しかし、将来の地震の規模は未知であり、人の避難や、後の修復などを考えるうえで、過荷重下における破壊状況についても知っておく必要がある。

筆者は建築力学が専門で、免震構造や制振構造や膜構造などについて主に構造力学的な面からの研究を行ってきたが、これらとは別に(専門外であるが)材料学の観点から地震の上下動による影響を検討してきた。その結果、上下動による建物内部の弾性波動は柱頭部周辺に集中することや¹⁾、過大入力時におけるコンクリートの破壊性状が、静的載荷の場合とサーボ型の繰返し載荷による場合とでは異なり(写真1, 写真2)、瞬時の破壊が生じること²⁾、繰返し回数が少ないので、全履歴の数値シミュレーションも可能なこと³⁾などが分かった。本ノートではコンクリートが極低サイクル疲労破壊をするとき

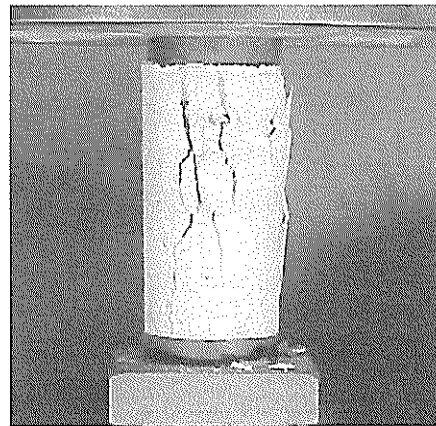


写真1 静的載荷時の破壊

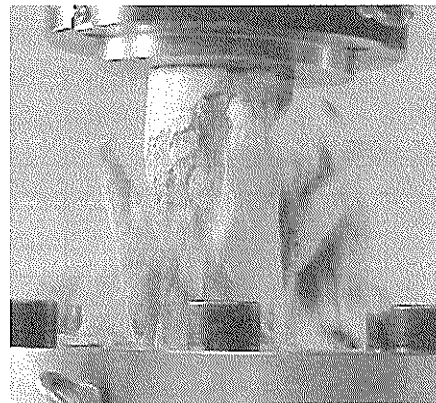


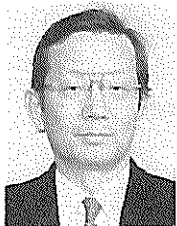
写真2 サーボ型繰返し載荷時の瞬時的破壊

の繰返し回数推定式について簡単な思考実験を試みたものである。

2. 極低サイクル疲労破壊

「極低サイクル疲労破壊」は筆者が便宜的に呼んでいるもので、地震時のように数十回程度の過大な動的繰返し載荷により破壊する現象をさしている。

その現象を、筆者らの行った実験結果で簡単に説明する。



* Eizaburo TACHIBANA
1942年10月生
大阪大学・大学院・工学研究科・修士課程、構築工学専攻修了
現在、大阪大学・工学研究科・建築工学専攻、教授、工学博士、建築力学
TEL 06-6879-7631
FAX 06-6879-7634
E-Mail orange@arch.eng.osaka-u.ac.jp

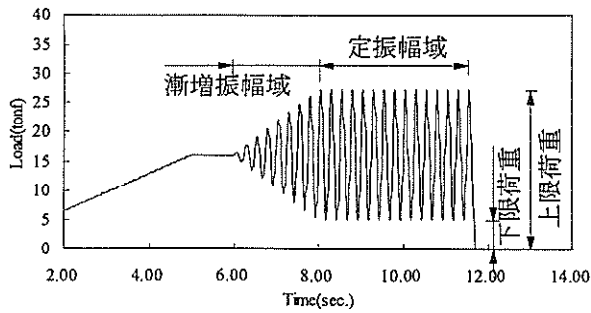


図1 荷重に用いた三角波

プレーンコンクリートの標準試験体(高さ20cm, 直径10cm)を用い, 漸増振幅域を持つ4Hz, 40回の三角波(図1)による動的繰返し軸力荷重実験を行った. 事前に行った静的荷重試験結果の強度 $\sigma_c = 289 \text{ kgf/cm}^2$ (5体の平均値)を用い, 軸応力の上限値は $1.1\sigma_c, 1.2\sigma_c, 1.3\sigma_c$ 相当の3組とし, それぞれについて各5体実施した(表1). $1.2\sigma_c$ の場合10回前後で5体とも瞬間的な破壊が生じた(写真2). 又, $1.1\sigma_c$ の場合は一体を除き, 最後まで破壊せず, $1.3\sigma_c$ の場合には漸増振幅域で5体とも破壊した.

表1 プレーンコンクリートの繰返し荷重実験結果

試験体	下限荷重 N_L tonf	上限荷重 N_U tonf	繰返し回数 cycle	破壊荷重 tonf	破壊時期	
$1.1\sigma_c$	①	5.00	25.0	0	12.60	定振幅域
	②	5.00	25.0	40	---	---
	③	5.00	25.0	40	---	---
	④	5.00	25.0	40	---	---
	⑤	5.00	25.0	40	---	---
$1.2\sigma_c$	①	5.00	27.5	14	27.25	定振幅域
	②	5.00	27.5	3	27.55	定振幅域
	③	5.00	27.5	4	27.35	定振幅域
	④	5.00	27.5	1	27.55	定振幅域
	⑤	5.00	27.5	8	27.60	定振幅域
$1.3\sigma_c$	①	5.00	30.0	0	28.85	漸増振幅域
	②	5.00	30.0	0	28.85	漸増振幅域
	③	5.00	30.0	0	28.40	漸増振幅域
	④	5.00	30.0	0	29.10	漸増振幅域
	⑤	5.00	30.0	0	29.05	漸増振幅域

表1の左から4つ目の欄は, 写真2のように崩壊したときの繰返し回数である. 40の場合は最後まで破壊が生じなかったことを意味する. ただし, 装置が自動的にカウントした回数であるため, 漸増振幅域で破壊した場合や, 設定された上限荷重値に少しでも足りない場合は含まれていない. 次に図2に

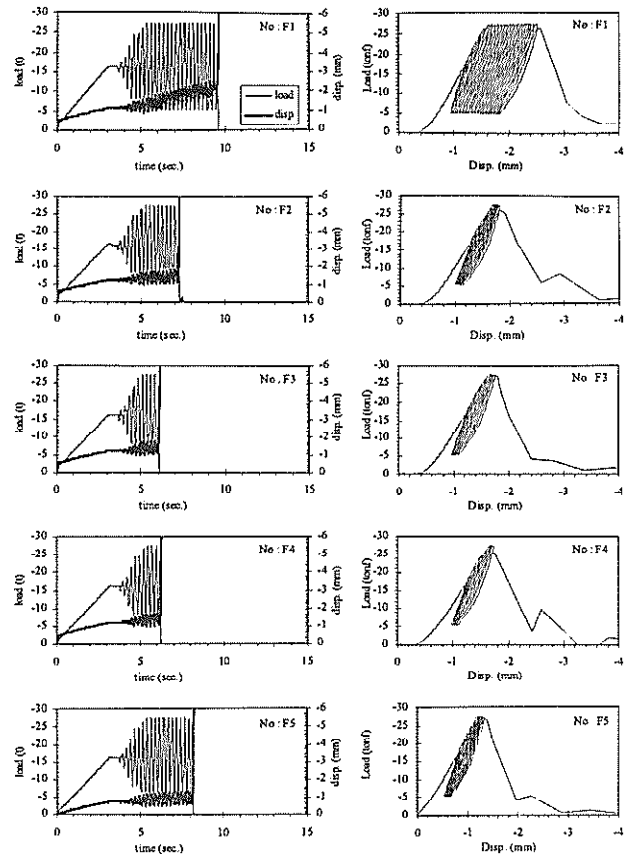


図2 $1.2\sigma_c$ の場合の荷重時刻歴(左)と荷重変形関係(右)

$1.2\sigma_c$ の場合の荷重時刻歴(左)と荷重変形関係(右)を示す. 崩壊するまでの繰返し回数が表1の値より多いのは先の理由によるものである. 「極低サイクル疲労破壊」はこうした破壊現象をさしている. なお, 写真2のような瞬間的な破壊が突然発生する理由については別稿⁴⁾で考察している.

3. 破壊までの繰返し回数の推定

この実験結果を踏まえて, 破壊するまでの繰返し回数の推定式を導く.

荷重圧 σ が σ_c を越えた後の塑性ひずみ速度 $d\epsilon^p/dt$ は越えた値に比例すると仮定する.

$$d\epsilon^p/dt = \alpha(\sigma - \sigma_c)/\sigma_c \quad (\sigma \geq \sigma_c) \quad (1)$$

$$d\epsilon^p/dt = 0 \quad (\sigma < \sigma_c) \quad (2)$$

α : 荷重圧が静的強度を越えた後の塑性ひずみ速度係数

いま $\sigma \geq \sigma_c$ を満たす k 番目の時間間隔を $T_{k, \text{start}} \sim T_{k, \text{end}}$ とすると, その間に進展する塑性ひずみ ϵ^p_k

は次式で与えられる。

$$\varepsilon_k^p = \int \alpha(\sigma - \sigma_c) / \sigma_c dt$$

(積分区間は $T_{k, \text{start}} \sim T_{k, \text{end}}$) (3)

図2から、一体の例外があるものの、破壊する寸前の許容累積残留ひずみはほぼ一定と仮定しそれを ε_{max} とすると、許容繰返し回数 N_{max} は次式で与えられることになる。

$$N_{\text{max}} = \sup(N | \sum \varepsilon_k^p \leq \varepsilon_{\text{max}} \quad \text{総和は } k=1 \sim N)$$

(4)

これで、一応求まったわけであるが、三角波の場合にはさらに簡単となる。

$\Delta t = T_{k, \text{end}} - T_{k, \text{start}}$ とおき、荷重圧の上限値と下限値を σ_{high} と σ_{low} 、振動数を f で表すと(3)式の積分記号がはずれ ε_k^p は一定の値となる。それを $\varepsilon_{\text{unit}}$ とすると(3)式は(5)式となる。

$$\varepsilon_k^p = \varepsilon_{\text{unit}} = 0.5 \Delta t \alpha (\sigma_{\text{high}} - \sigma_c) / \sigma_c \quad (5)$$

$$\text{ただし, } \Delta t = (\sigma_{\text{high}} - \sigma_c) / [(\sigma_{\text{high}} - \sigma_{\text{low}}) f]$$

また(4)式は(6)式となる。

$$N_{\text{max}} = \sup(N | N \times \varepsilon_{\text{unit}} \leq \varepsilon_{\text{max}}) \quad (6)$$

4. 実験結果との対応性

図2では、1体を除き、高さ20cmに対して約0.2mmの残留変形が累積した時点で破壊が生じているので、 ε_{max} を0.001とする。 α の N_{max} 値に関する感度は単純な逆比例であり、仮に0.014をとると、 $\sigma_{\text{high}} = 1.1\sigma_c$ で $N_{\text{max}} = 50$ 回、 $\sigma_{\text{high}} = 1.2\sigma_c$ で $N_{\text{max}} = 14$ 回となり、実験結果をほぼ説明できる。ただ $\sigma_{\text{high}} = 1.3\sigma_c$ では $N_{\text{max}} = 7$ 回であるのに対して実験結果では0となっている。これは前述のように、漸増振幅域において既に静的強度を越えているが、表1では、その回数がカウントされていないことによると考えられる。

一般に、コンクリートは単純圧縮試験において歪速度が早くなると強度が増加する⁵⁾。ここでも4Hzなら10%増の $1.1\sigma_c$ で40回程度の繰返しに耐えている。爆風による建物内の波動伝播などを考える場合のひずみ速度はべき乗的に大きくなり、(1)式は慣性項も含んだもっと別の非線形式となるのであろう。

ただ殆どのビルの一次固有振動数は4Hz前後であり実験では4Hzを用いた。

5. おわりに

内陸性地震においては最初の10秒程度の間の揺れに建物が致命傷を受けるかどうか勝負となる。また、太平洋沿岸のプレート境界で発生する地震(100年~200年周期で発生する南海地震など)では1分~5分程度の揺れに耐えなければならない。本稿では、過荷重下におけるコンクリートの極低サイクル疲労破壊の回数を求めるためのザーとした筋道をたててみた。筆者の専門外の領域だと弁明したとしても「少ない実験結果を用いた単なる辻褄合わせにすぎない」とのそしりは免れまい。ただ、今後こうした議論のきっかけになれば幸いである。

参考文献

- 1) T. Shimizu and E. Tachibana, 'A Study on uniaxial compressive strength of plain concrete under dynamic cyclic loading', Proc. 12th World Conference on Earthquake Engineering, #1451, 2000
- 2) M. Muraji and E. Tachibana, 'The effect of high frequency vertical ground motion on columns of buildings and a proposed vertical shock absorber', Transaction of SMiRT16, #1019, 2001
- 3) A. Kunugi and E. Tachibana, 'Experimental and analytical study of dynamic behavior of plain concrete subjected to vertical cyclic load', Proc. of 2nd International conference on the conceptual approach to structural design, July 2003 (to be published)
- 4) 橋英三郎, '鉛直方向の動的耐力に対する設計法は?' 2002年度日本建築学会大会パネルディスカッション「都市直下地震に対して構造物の耐震対策として何をなすべきか?」, 2002, pp. 83-99,
- 5) P. H. Bischoff and S. H. Perry, 'Compressive behavior of concrete at high strain rate', Material and Structure, Vol. 24, 1991 pp. 425-454