

強震時における建造物の動的挙動と疲労破壊

金沢大学工学部 小堀為雄
 コロンビア大学 篠塚正宣
 金沢大学工学部 ○水正義考

1. はじめに

地震時における動的応答および解析に関して多くの研究がなされてきた。その結果、大型建造物においては地震に対する安全性の検討は十分にでき、建造物が倒壊することは極めてまれになっている。しかし、強震時において、建造物の変形は弾性領域を越え、倒壊に至らない範囲で、塑性領域まで及んでいることがある。この事から、従来の弾性設計法とは異なり、変形が塑性領域にあるが塑性設計法の研究がなされ、塑性設計法的な考え方による建造物が実際に作られつつある。まれにしか起こらないような強震時における変形などの程度まで認めるかは設計の信頼性などの関係で一時的に決めることは困難であるが、一つの考え方として変形と弾性領域内におさまることは不経済な設計と考え、建造物の一部に塑性変形を生じても、その部分の修理によって再使用が可能であり、さらに、建造物から見て、塑性変形に費やされる仕事量は、いっくらの減衰作用となり得ることから、耐震上有利な作用と考えられる。しかしながら、我国は地震の発生頻度が高く、また局部的にはあらず、群発地震なども発生している。建造物が大きな地震を受けたとき、その力と変形は一つの履歴特性を持つ非線形関係となる。長期間に、建造物が数回の大きな地震を受けたとき、建造物は塑性変形を繰返すこととなり、塑性疲労を生ずることが考えられる。本研究は、この問題に対し、基礎的資料を得るために、塑性曲げ疲労実験を行なった。またシミュレーション法によって擬似地震波を作成し、建造物の動的挙動を求め、さらに、従来の塑性疲労の理論と実験結果を用い、数回の大きな地震を受ける建造物の疲労破壊について試算を行なった。

2. 塑性曲げ疲労実験

(i) 実験方法

FIG.1に示す若者らが考察した実験装置を用いて、片持ばりの自由端に集中荷重を作用させ、変位制御による塑性曲げ疲労実験を行なった。実験は、自由端の変位をTable 2.のように変えて行なった。荷重は手動式油圧ジャッキで作用させ、試験片自由端の変位は、ジャッキ可動部に取り付けた板の変位を、変位計を用いて測定した。変位計の用紙にあらかじめ変位を取り、変位計の指針値を志じて手動式油圧ジャッキを動かした。荷重は、ジャッキ可動部と試験片の自由端との間に接続された円張圧縮ロードセルにより、ひずみとして取り出し、動歪計に入れ、その出力をビュグラフ

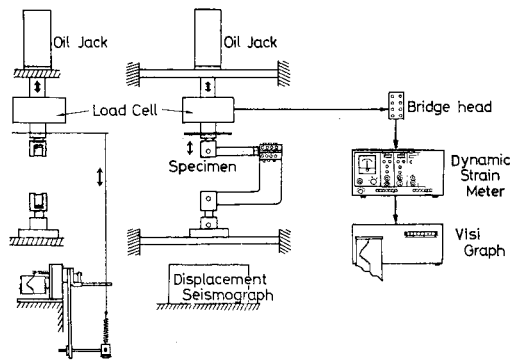


FIG.1 Device for testing stand in fatigue

書かれた。手動式油圧ジャッキを、変位計の用紙に書かれた変位まで、1サイクルにつき、約30段階に分け、階段状に動かす。試験片に垂直の荷重をかけた。繰返し荷重をかけたビジグラフ上で、荷重がゼロを示し、変化しなくなったときを破断とみなした。ダイヤルゲージのかわりに変位計と、ストレインメーターのかわりに動歪計とビジグラフを用いたことにより、少人数でかつ迅速に実験を行なうことができた。

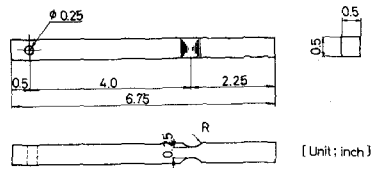


FIG. 2 Specimen

実験に用いた試験片とその寸法をFIG. 2.に示す。ランダム変位は、モンテカルロ法を用いてシミュレーションした擬似地震波形を一自由度系のモデルに入力として入れ、その変位応答を単純化したものを、変位計の用紙に書き、その変位に応じて荷重を作用させた。ランダム変位をFIG. 3.に示す。また、予備実験として、ダイヤルゲージと変位計、ストレインメーターとビジグラフとの誤差を測定した結果共に1%以下であった。この実験に先だって、同一部材から取った引張試験片と、圧縮引張試験機で行った、試験片の静的特性を求めた。

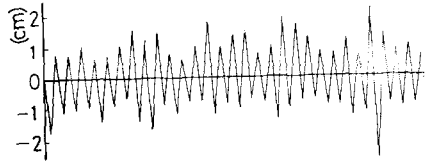


FIG. 3 Notation in random stage

(ii) 実験結果

実験によって得られたデータの整理は、FIG. 4に示すように、変位計の用紙に書かれた変位と、ビジグラフに書かれた荷重とを対応させ、それぞれの値をスケールで読み取った。ヒステリシスループの一例をFIG. 5に示す。引張試験によって得られた静的特性をTable 1に示す。変位制御による塑性曲げ疲労実験結果をTable 2に示す。

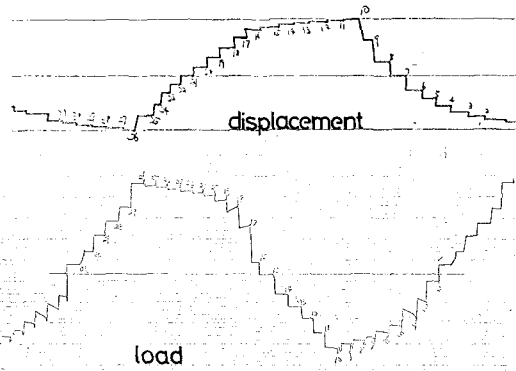


FIG. 4 Recorded displacement and load

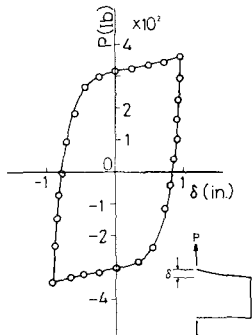


FIG. 5 Load—deflection hysteresis curve

Table 2 Results of plastic flexure fatigue test

Case	Test code	Cycles to constant stress	Cycles to failure
1	±24	11	12
2	±20	17	18
3	±18	26	28
4	±15	37	41
5	±12	64	59
6	±24 → ±12	31	38
7	±12 → ±24	34	35
8	±24 → ±18 → ±12	22	28
9	±24 → ±12 → ±18	24	26
10	±18 → ±24 → ±12	24	28
11	±18 → ±12 → ±24	26	27
12	±12 → ±24 → ±18	25	27
13	±12 → ±18 → ±24	25	26
14	Random max. 2.60	—	59
15	Random max. 2.82	—	50

Table 1 Tensile properties

Yield strength	2542.0 (kg/cm)
Tensile strength	4895.5 (kg/cm)
Elongation	38 (%)
Fracture ductility	0.763

(iii) 疲労評価基準

塑性疲労について多くの研究がなされてきたが、いまだに確定したものが現れていない。そこで河本や大塚によってまとめられた従来の式の中から、考え方の異なる代表的なものを取り出し、実験結果をまとめてみることにした。

(a) Manson-Coffinの式

1953年 Manson は Liu によって発表されていいた低サイクル疲労実験を整理し、次の関係を見出した。

$$\Delta \epsilon_p \cdot N^\alpha = C \quad (1)$$

ここで、

$\Delta \epsilon_p$; 塑性ひずみ幅
 N ; 破断繰返し数

Coffin は、いろいろな研究者の実験結果を集録し、また自身、種々の材料を用いて実験を行なった。式(1)において、 α は材料に無関係に $1/2$ となることを見出した。また破断延性 (Fracture ductility) を ϵ_F とするならば、 $C \approx \epsilon_F / 2$ の近似を与えることを見出した。

すなわち式(1)は、

$$\Delta \epsilon_p \cdot N^{1/2} = \epsilon_F / 2 \quad (2)$$

となる。

(b) Martine の式

Martine は、FIG.6 に示すような2種の勾配を持つ直線で近似した履歴曲線より、加工硬化に十分に費やされた仕事(斜線部分)が損傷仕事になるとして、次のように式(3)を導いている。

$$\Delta \epsilon_p \cdot N^{1/2} = \epsilon_F / \sqrt{2} \quad (3)$$

実験結果を以上の2つの式で計算し、比較したものが Table 3 に示す。なお、Case 6~13 の変位が途中で変わる場合は、各変位のひずみ幅 $\Delta \epsilon_p$ 、その変位の繰返し数 N と重みとし、重みつき平均値を求め、ひずみ幅 $\Delta \epsilon_p$ とした。

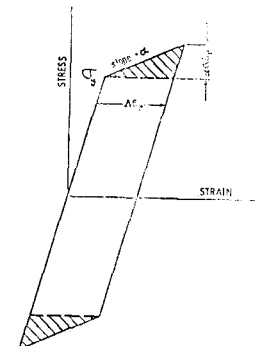


FIG.6 Idealized stress-strain hysteresis loop

Table 3

Case	$N \cdot \Delta \epsilon_p$	Manson-Coffin		Martine	
		$\epsilon_F/2$	Error(%)	$\epsilon_F/2$	Error(%)
1	0.5466	0.3815	30.1	0.5396	1.2
2	0.5901	"	35.3	"	8.5
3	0.6284	"	39.2	"	14.1
4	0.6214	"	38.5	"	13.1
5	0.6099	"	37.4	"	11.5
6	0.5504	"	30.6	"	1.9
7	0.5433	"	29.7	"	0.6
8	0.5493	"	30.5	"	1.7
9	0.5327	"	28.3	"	-1.4
10	0.5491	"	30.4	"	1.7
11	0.5580	"	31.5	"	3.2
12	0.5301	"	27.9	"	-1.9
13	0.5456	"	30.0	"	1.0
14	0.5059	"	24.5	"	-6.7
15	0.5396	"	29.2	"	0.0
		Avg. alg.	31.5	Avg. alg.	3.2
		Avg. abs.	31.5	Avg. abs.	4.6

(iv) 考察

Table 3より、Manson-Coffinの式は、全体的に約30%の誤差がある。これに対し、Martineの式は、かなり良い一致をみている。これは、河本³⁾がその研究の中で述べている引張圧縮に対する結果とほぼ同じである。また、両式共に、マイナーの法則から求めたstep-up, step-downの影響はみられず、全ケースについて同様の値を示している。このことから、ランダムな変位に対して適用してもさしつかえのないものと思われる。これにより、曲げに対しては、式(2)、式(3)が適用できることがわかった。

以上の結果をまとめると、不規則外力によって、部材に曲げの力が加わる際、Martineの式と、疲労評価基準式として採用することが良いと思われる。

また、Martineの式を適用する時は、変位をひずみに換算してやる必要がある。この場合に生ずる誤差と計算の煩わしさをなくするため、変位を直接用いる式が、今後の研究として残されている。

この問題に対して、実験結果を再整理して、総仕事量 ΣA と繰返し数 N の相関があると思われるので、これをF/Gで示す。

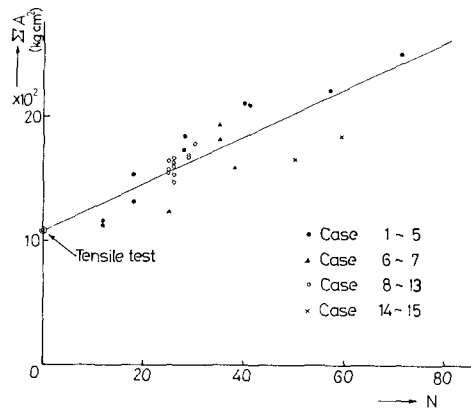


FIG.7 Relation between ΣA and N

3. 地震による動的挙動と疲労破壊

(i) まえがき

地震の大きさの違うものをいく通りも作るため、筛选、佐藤の方法⁽³⁾により、擬似地震波をシミュレーションした。この擬似地震波を一自由度系の構造物に入力として入れ、変位応答を求め、ヒステリシスループを描かせ、動的挙動と疲労破壊を計算した。

(ii) 地震波形のシミュレーション

FIG. 8 のように考え、地震波形は次のような関係を持つ。

$$\ddot{Z}(t) + 2\zeta\omega_g \dot{Z}(t) + \omega_g^2 Z(t) = \eta(t) \quad (4)$$

ここに、

- $Z(t)$; 地震の加速度
- $\eta(t)$; ホワイト・ノイズ
- ζ ; 粘性減衰係数
- ω_g ; 地盤の固有振動数

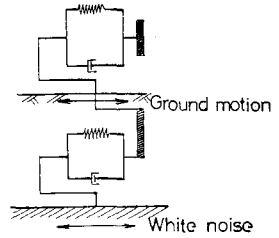


FIG. 8

式(4)のパワースパクトルは

$$S_g(\omega) = \frac{S}{(\omega^2 - \omega_g^2)^2 + 4\zeta^2 \omega^2 \omega_g^2} \quad (5)$$

で表わされる。ここに、

S ; パワースパクトル密度

式(5)の自己相関関数は、

$$R(\tau) = S \cdot r(\tau) = \frac{\pi S}{2\zeta\omega_g^3} e^{-\zeta\omega_g'|\tau|} \left(\cos \omega_g'|\tau| - \frac{\zeta\omega_g}{1-\zeta^2} \sin \omega_g'|\tau| \right) \quad (6)$$

$$\sigma_g = \sqrt{R(0)} = \sqrt{\frac{\pi S}{2\zeta\omega_g^3}} \quad (7)$$

となる。ここに、 ω_g' は地盤の固有円振動数である。

このとき、 $\eta(t)$ はパワースパクトル密度 $S = 1.0$ であるような、ホワイト・ノイズであるから、前もって、Gauss分布の $\sigma = \sqrt{\pi S / \Delta t}$ とればよい。なぜなら $S = 1.0$ のときのシミュレーションしたものの標準偏差が $\sigma = \sqrt{\pi / \Delta t}$ であるからである。一方、この $\eta(t)$ を入れた応答 $Z(t)$ の標準偏差 σ_g が、式(7)に表わされるのであるから、

$$S = \sigma_g^2 \frac{2\zeta\omega_g^3}{\pi} \quad (8)$$

であらばよい。ゆえに、Gauss分布の標準偏差は、

$$\sigma = \sqrt{\sigma_g^2 \cdot 2\zeta\omega_g^3 \pi / \Delta t} = \sqrt{\pi S / \Delta t} \quad (9)$$

となる。

シミュレーションされた擬似地震波形の一例を FIG. 9 に示す。

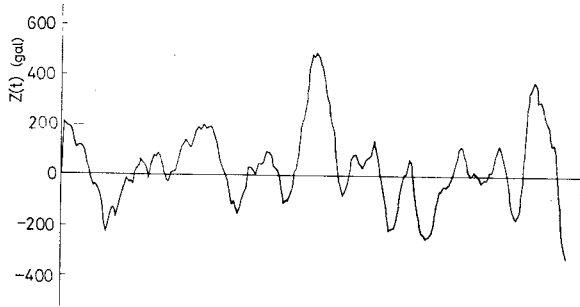


FIG. 9 Simulated earthquake (example)

(iii) 動的挙動と疲労破壊

文献(4)より、地震発生確率のカリフォルニアに於ける一例を、Table 4 に示す。この発生確率に対応するマグニチュードを、構造物の位置を震源地から 100 km の所と仮定し、式(10)、式(11)によって、加速度に換算した。この加速度を絶対最大加速度とする擬似地震波を、パワースパクトル密度をかえてやることによってシミュレーションした。

$$M = 4.85 + 0.5 I \quad (10)$$

$$\log A = I/2 - 0.6 \quad (11)$$

ここに、

M ; マグニチュード

I ; 震度階

A ; 加速度 (gal)

次に、構造物と、年数を仮定する。本研究において想定した構造物を FIG. 10 に、その諸元を Table 5 に示す。

想定した年数により、その間に発生する地震の数を各マグニチュードに対してまとめ、これらに連続的に構造物に作用させる。このとき、1回の地震の継続時間を定め、1回の地震が終了ごとに、応答加速度、応答速度をゼロとし、応答変位の最終値の残留変形値を、次の地震に入力として入れる。この様にして、数回の地震を作用させたときの変位応答を求め、これによってループを描かせ、疲労を計算する。想定した年数間に発生すると考えられる地震の順序をかえて作用させることにより、変位応答は変化し、疲労は違ったものになる。

Earthquake of magnitude greater than	acceleration (gal)	Return period (years)
6.0	3.55	1.01
6.2	5.63	1.37
6.4	8.91	1.89
6.6	14.1	2.70
6.8	22.4	3.85
7.0	35.5	5.89
7.2	56.2	10.0
7.4	89.1	14.9
7.6	141	25.6
7.8	224	50.0
8.0	362	91.0
8.2	562	196
8.4	891	589

地震の発生回数組合せの数のケースが考えられ、その各々のケースについて計算することにより、構造物が動的に

破壊する場合、疲労破壊する場合、破壊しない場合の3通りに分けることができる。これより、構造物の想定した年数における破壊確率が求まり、また動的破壊と疲労破壊の比率を計算することができる。

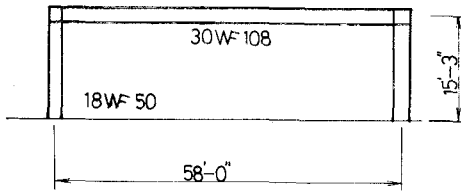


FIG 10 Used structure

Table 5

	Length	Weight (lb)
18 W F 50	15' - 3"	762.5
30 W F 108	58' - 0"	6264.0
Fundamental frequency		
$\omega = 3.07$ (c.p.s)		

4. あとがき

本報告はわれわれが行なっている研究の途中経過を報告したもので、いくつかの問題点も含まれているが、ここにその一部を添表させて頂き、皆様のご批判を頂ければ幸である。なお、一応の成果として、次のことが言える。

この考え方により、地震に対する破壊確率を計算することができ、また、想定する年数を変えてやることにより、地震に対する構造物の耐用年数などを推定することが可能となるであろう。

5. 謝辞

実験に際し、諸君ご協力下さった金沢大学工学部 梶川康男助手、城戸隆良技官、大村外志男君に対し深く謝意を表する。

6. 参考文献

- (1) 河本実、経緯集ニ：“塑性域における疲労現象について、(1)” 材料, 12巻, 115号 pp.194~201
- (2) 大路清嗣：低繰返し数疲労における累積損傷の仮説の検討” 日本機械学会誌, Vol.70, NO.576
- (3) M. Shinozuka and Y. Sato : Simulation of Nonstationary Random Process, Proc. A.S.C.E., EM1, Feb. 1967, pp. 11~40
- (4) M. Shinozuka : Application of stochastic Process Theory to Earthquake Engineering, Columbia University Technical Note. 1969.