

## 2 鋼材の低サイクル疲労

### 2.1 低サイクル疲労の事例

地震直後に鋼製橋脚の隅角部や基部で以下のような亀裂が生じているのが発見された。

- ・鋼製橋脚隅角部で塗膜の割れや剥離が数多くみられ，それらの中には鋼材に亀裂が生じていたものが数カ所あった。亀裂の発生位置は，柱のフランジとウェブを接合する縦方向溶接と，柱と梁のフランジ同士を接合する横方向溶接の交点部で，柱フランジ側の溶接止端である。また，亀裂の進展方向は，柱と梁のフランジ同士を接合する横方向溶接に沿ってほぼ水平方向である。

- ・残留変形が大きい鋼製橋脚基部の三角リブの上端に亀裂が生じているものがあった。亀裂の発生位置は，箱断面柱のフランジとウェブを接合する角継手付近の，柱とベースプレートの間に取り付けられた三角形の補強リブ上端のすみ肉溶接部である。また，亀裂の進展方向は，三角形の補強リブ上端を縫うようにほぼ水平方向である。

これらの亀裂は，地震時に作用する数回程度の繰返し荷重によって生じる極めて短寿命領域の低サイクル疲労により発生した可能性が指摘されている。しかしながら，その挙動に関しては未解明な点が多い。また，これらの亀裂が常時の活荷重や風荷重で生じた高サイクル疲労亀裂が地震時に開口した可能性もあり，今のところ断定することはできない。

### 2.2 模型試験体における低サイクル疲労亀裂の発生・進展挙動

数回程度の過大な繰返し荷重によって鋼製橋脚の隅角部や基部に生じる超低サイクル疲労亀裂の発生および進展挙動について，継手部の模型試験体を用いた繰返し載荷実験が行われ，以下のようなことが確認されている [坂野昌弘,1997a], [坂野昌弘,1997b], [坂野昌弘,1996], [坂野昌弘,1998].

- ・亀裂の発生位置は，隅角部，基部共に，実際と同じく，柱のフランジとウェブを接合する縦方向溶接と，柱と梁のフランジ同士を接合する横方向溶接の交点部で，柱フランジ側の溶接止端，および箱断面柱のフランジとウェブを接合する角継手付近の，柱とベースプレートの間に取り付けられた三角形の補強リブ上端のすみ肉溶接部である。

- ・載荷振幅が降伏変位 ( $\delta_y$ ) の約 10 倍のとき，1～2 回の繰返し載荷で表面長さが 1 cm 前後の亀裂が発生し，3～5 回程度の繰返し載荷でそれらの亀裂は進展し，柱部材のフランジ板厚を貫通する。

- ・隅角部では，ウェブの切欠き部の曲率半径が大きくなるとひずみ集中が緩和され，その結果，亀裂発生寿命が長くなることが確認された。

### 2.3 鋼材の低サイクル疲労強度

### 2.3.1 低サイクル疲労に関する研究の現状

鋼材の低サイクル疲労試験に関しては、主に、機械工学の分野で、航空機や圧力容器への使用を目的に行われてきたものが多い。構造用鋼材については、飯田らが広い範囲での検討を行っている[飯田国広, 1970]。軸方向で平均ひずみを $-4\% \sim 16\%$ 、ひずみ振幅を $14.2\%$ までの広範囲で、亀裂発生寿命および亀裂進展に関して考察している。しかし、得られた結果と実現象との対応はなされていない。また、焼き鈍しを行った低炭素鋼を用いた高ひずみ領域における低サイクル疲労試験では、劣化および損傷挙動が加工硬化と表面き裂の伝播等と関連付けて検討されている。低サイクル疲労寿命は表面の微小き裂の大きさに代表され、高サイクル疲労と同様に微小亀裂伝播則が成立することが示されている[森野数博, 1999]。その際に内部に蓄積される損傷の物理的実体は明らかではないが、大谷等はひずみ振幅により、ひずみ振幅の小さい順に表面き裂の生成・発達、パーライト割れの介在による表面亀裂の成長、パーライト割れを起点とする内部き裂の生成・発達の3通りに分けられると論じている[大谷信雄, 1979]。

土木分野における同種の軸方向载荷による試験は、最近では、構成則の検討を目的に行われており、低サイクル疲労を視野に入れていない[森野数博, 1999]、[大谷信雄, 1979]、[Masaru MINAGAWA, 1987]、[Chi SHEN, 1993]、[田中良仁, 1991]。しかし、先の阪神大震災の被害から予測されるようなひずみ領域は、これまでに考えてきたものを超えており、その詳細な検討において、低サイクル疲労の起こらない範囲で整合性を持たせた構成則では対応できない。したがって、詳細な検討を行うには、低サイクル疲労が問題になる大きなひずみ領域まで整合性を持たせた構成則が必要になるが、実験の難しさのゆえにデータが少なく今後さらに研究が必要である。

### 2.3.2 鋼材の低サイクル疲労強度

ここでは、数種類の鋼材を対象に、丸棒試験片を用いて行われた低サイクル疲労試験について述べる[休場裕子, 1999]。試験は、表-2.3.1の機械的性質および化学成分を示す鋼材を対象に、図-2.3.1に示す試験片により実施された。このとき、試験片の径方向のひずみを計測し、それを軸方向に変換することにより( $\nu_o=0.3$ ,  $\nu_p=0.5$ を仮定)試験機が制御されている。表中のSM490BおよびSM570Q材については結果が得られたが、極低降伏点鋼については、その軟らかさのため同様の試験片では実施不可能であった。

表-2.3.2は、SM490B及びSM570Q材における、試験条件および試験の結果得られた疲労寿命である。なお、ひずみは、軸方向公称ひずみを示し、その詳細は、図-2.3.2による。図-2.3.2(b)に示す入力ひずみは、円筒形鋼製橋脚モデルに対するハイブリッド実験から得られたひずみ記録である。表-2.3.2から、 $4 \sim 9\%$ のひずみが圧縮および引張側に数回程度繰返されると亀裂が発生し(亀裂発生寿命)、数十回程度で破断する(破断寿命)ことがわかる。また、ひずみ履歴が圧縮側から始まると亀裂発生寿命および破断寿命は短くなる傾向が認められる。

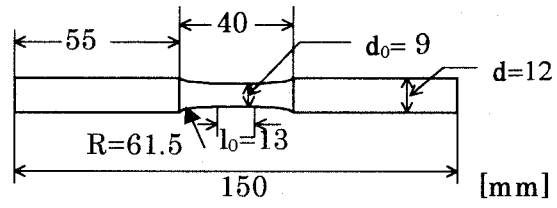
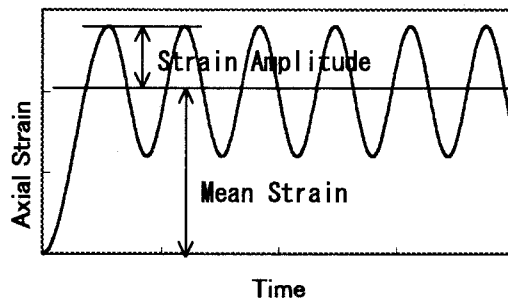
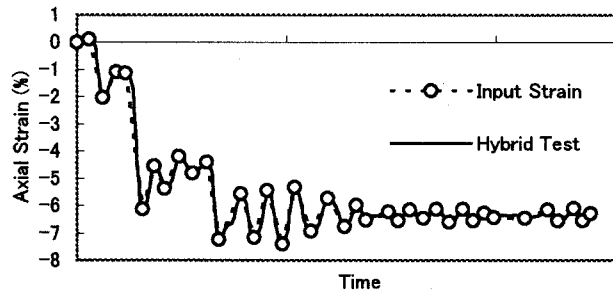


図-2.3.1 試験片



(a) 定常ひずみタイプ



(b) ハイブリッドタイプ

図-2.3.2 入力ひずみのパターン

表-2.3.1 供試材料の機械的性質および化学成分

材料	板厚 [mm]	機械的性質				化学成分 〈重量%〉				
		$\sigma_Y$ [MPa]	$\sigma_U$ [MPa]	伸び [%]	CVN(T) [J]	C	Si	Mn	P	S
SM490B	20	356	518	28	299 (-5)	0.16	0.33	1.24	0.016	0.003
SM570Q	20	560	659	39	191 (0)	0.14	0.23	1.44	0.012	0.005
極低降伏 点鋼	20	95	274	74	-	0.0013	0.02	0.13	0.014	0.005
S A 440 B	20	448	614	44	268 (0)	0.14	0.32	1.39	0.006	0.002
N S F R 490B	20	383	554	23	207 (0)	0.11	0.26	1.14	0.008	0.002
S L A 325A N	20	393	498	53	294 (-25)	0.11	0.25	1.49	0.007	0.003

表-2.3.2 供試試験片の試験条件および疲労寿命

材料	ひずみ振幅 [%]	平均ひずみ [%]	き裂発生寿命	破断寿命	備考
S M 490 B	4	0	4	—	
	5	0	3	4 2	
	7	0	3	3 0	
	9	0	2	—	
	4	+ 4	4	4 6	
	4	+ 1 0	4	3 8	
	ハイブリッド			—	33ブロック
S M 570 Q	4	0	—	3 3	
	5	0	—	5 7	
	7	0	1 4	1 7	
	9	0	2	2 1	
	4	+ 4	4	5 1	
	4	+ 1 0	—	5 3	
	4	+ 1 6	6	9 0	
	4	- 4	6	4 5	
	4	0	3	8	圧縮側から
	5	+ 1 0	7	3 8	
	5	0	2	5	圧縮側から
	7	+ 1 0	3	2 3	
	9	+ 1 0	—	8	

## 2.4 低サイクル疲労に対する照査方法

鋼部材の低サイクル疲労に対する照査は、部材が受けるひずみ履歴（応答値）を求め、それに対して部材に亀裂が発生しない、あるいは亀裂が発生しても部材が破断しないことを確認することが基本になる。しかし、大規模地震時での鋼部材が受けるひずみ履歴を求めるのは容易ではない。そこで、亀裂発生寿命に対応する塑性ひずみ範囲を限界値として設定し、隅角部および基部の亀裂発生が予想される位置の局部的な塑性ひずみ範囲がその限界値を越えないことを照査する方法が考えられる。

この時、どの程度のひずみ履歴を想定するかが問題になる。1.2に述べたように、兵庫県南部地震での研究結果から推定されているひずみ量は、6～20%の範囲にある。ただし、これらは従来の手法で設計された構造物の被害事例を元に推定されたものである。新しい耐震設計基準では、大規模地震に対して変形性能を期待する設計体系に移行する必要があるが、その中で、大規模地震に対する鋼製橋脚の終局限界を最大耐力から95%低下したところを終局限界に設定している。したがって、このことを踏まえて限界ひずみ量を設定する必要がある。

ここでは、鋼管柱の解析の例を示す。

### (1) 解析条件

解析条件を表-2.4.1に示す。また解析モデルのメッシュ図を図-2.4.1に示す。使用鋼材はSM490YBとして、応力歪み関係は、引張試験結果を用い、多直線近似の移動硬化則を用いている。また、このモデルでは、断面変化がないものとしているので、局部座屈は基部に発生すると考えられ、基部付近のメッシュを細かくしている。要素数は約7000である。

### (2) 歪み履歴とその特徴

兵庫県南部地震の際、JR鷹取駅で観測された地震加速度波形のEW成分を水平方向に、UD成分を上下方向に外力として与えた場合の解析結果で、最大応答時に最大歪みが発生していた節点での鉛直方向歪みの時刻歴を図-2.4.2に示す。このように、歪みは局部座屈発生に伴って、10%程度の圧縮最大ひずみが発生しており、歪みは圧縮側に偏っている。これは、別に行った他のモデルでも同様であり、特に圧縮側に歪みが大きく偏る傾向がある。

このような、変動歪み履歴の繰返し数のカウント法として、レインフロー法があるが、これによるとこの場合には、±10%が1回程度に繰返されたことに相当する。

所要靱性値の評価に用いる歪み履歴としては、様々な歪み履歴を包括するひずみ履歴を以って評価するべきであると考えられる。また、歪み履歴は地震波等の入力条件により大きく影響を受けるため、様々な地震波およびモデルで検討を行う必要があること、またラーメン隅角部ではさらにひずみの集中が厳しくなると予想されること等を考慮し、±10%の歪みが3回程度繰返されるような履歴を考えればよいと考えられる。したがって、塑性ひずみの限界値として10%を考える。ただし、表-2.3.2からわかるように、±10%のひずみが数回繰返される場合には、

部材は破断はしないが亀裂の発生を許容することになる．そこでここでは，そのような状況下で亀裂が発生した場合でも，それが脆性破壊に繋がらないような材料特性（破壊靱性値）を鋼材に要求する必要がある．

なお，さらに簡便な照査方法として，亀裂発生位置の局所的な塑性ひずみ範囲の代わりに，標準的な継手ディテールと公称ひずみあるいは継手部の変形量を用いる方法も考えられる．この場合には標準的なディテールについて，公称ひずみあるいは変形量と，亀裂発生位置の局所的な塑性ひずみの関係を予め求めておく必要がある．

表-2.4.1 解析条件

高さ H	15000mm
直径 D	3000mm
板厚 t	60mm
径厚比 Rt	0.0708
細長比 λ	0.373
頂部質量 0.2Py	415.5kgf・sec <sup>2</sup> /mm

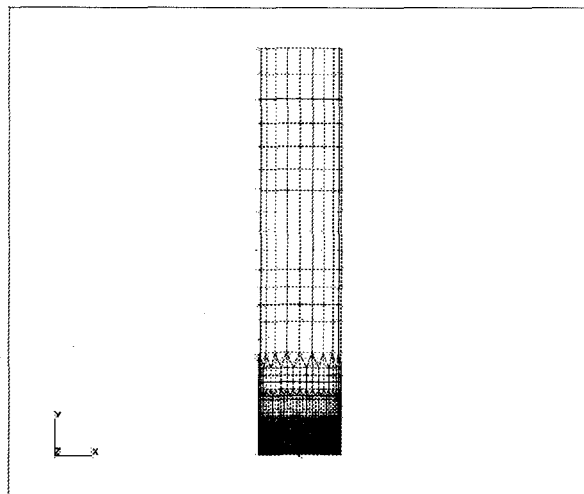


図-2.4.1 解析モデルメッシュ図

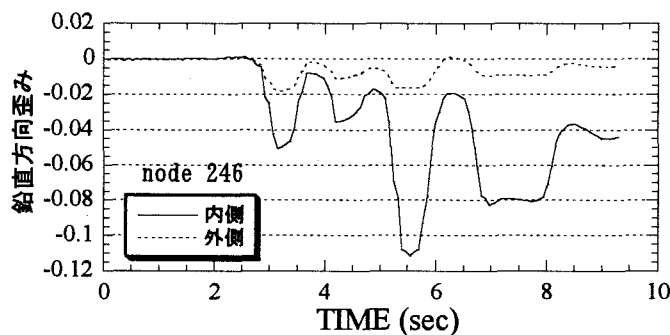


図-2.4.2 歪みの時刻歴

## 参考文献

- [土木学会関西支部, 1998] 土木学会関西支部：大震災に学ぶ——阪神・淡路大震災調査研究委員会報告書——，第 I 巻，第 3 編，1998.
- [阪神高速道路公団, 1997] 阪神高速道路公団：大震災を乗り越えて——震災復旧工事誌——，第 3 編，1997.
- [坂野昌弘, 1995] 坂野昌弘，三上市藏，村山弘，三住泰之：鋼製橋脚基部の超低サイクル疲労破壊挙動，鋼構造論文集，日本鋼構造協会，第 2 巻，第 8 号，pp.73-82, 1995.
- [坂野昌弘, 1997a] 坂野昌弘，三上市藏，鷹羽新二：鋼製橋脚隅角部の低サイクル疲労挙動，土木学会論文集，No.563/I-39, pp.49-60, 1997.
- [坂野昌弘, 1997b] 坂野昌弘，岸上信彦，小野剛史，三上市藏：鋼製ラーメン橋脚柱梁接合部の超低サイクル疲労破壊挙動，鋼構造論文集，日本鋼構造協会，第 4 巻，第 16 号，pp.17-26, 1997.
- [坂野昌弘, 1998] 坂野昌弘，岸上信彦，小野剛史，森川友記，三上市藏：三角リブ付き鋼製橋脚基部の超低サイクル疲労挙動，構造工学論文集，土木学会，Vol.44A, pp.1281-1288, 1998
- [飯田国広, 1970] 飯田国広，井上肇，小林佑規，宮本武：歪制御低サイクル疲労における平均歪の影響，日本造船学会論文集，第 127 号(1970), pp.215-225
- [森野数博, 1999] 森野数博，西村大志，西谷弘信：低サイクル疲労における疲労損傷の検討，日本機械学会論文集 (A 編)，65 巻 633 号，pp.1087-1092, 1999 年 5 月
- [大谷信雄, 1979] 大谷信雄，阿部隆，清水真佐男，国尾武 低炭素鋼の低サイクル疲労における残留破断延性変化と微視破壊挙動との関連について，日本機械学会論文集 (A 編)，45 巻 399 号，pp.1304-1311, 1979 年 11 月
- [Masaru MINAGAWA, 1987] Masaru MINAGAWA, Takeo NISHIWAKI and Nobutoshi MASUDA : Modelling Cyclic Plasticity of Structural Steels, Pros. of JSCE, Structural Eng./Earthquake Eng., Vol.4, No.2, pp.361s-370s, October 1987
- [Chi SHEN, 1993] Chi SHEN, Eiji MIZUNO and Tsutomu USAMI: A generalised Two-surface Model for Structural Steels under Cyclic Loading, Pros. of JSCE, Structural Eng./Earthquake Eng., Vol.10, No.2, pp.59s-69s, July 1993
- [田中良仁, 1991] 田中良仁，水野英二，瀋赤，宇佐美勉：降伏棚を有する鋼材の繰り返し弾塑性モデル—二曲面塑性モデルの開発—，構造工学論文集 I，Vol.37A, pp.1-14, 1991 年 3 月
- [西村宣男, 1995] 西村宣男，小野潔，池内智行：単調載荷曲線を基にした繰り返し塑性履歴を受ける鋼材の構成式，土木学会論文集，No.513/I - 31, pp.27-38, 1995 年 4 月
- [三木千壽, 1999] 三木千壽，休場裕子，沖中知雄：阪神大震災により円形断面鋼製橋脚に生じた脆性破壊の材料特性からの検討，土木学会論文集，No.612/

I - 46, pp.45-53, 1999年1月

[休場裕子, 1999] 休場裕子, 三木千壽: 繰返し大ひずみ下における鋼材の応力-ひずみ挙動, 第3回鋼構造物の非線形解析と耐震設計の応用に関する論文集, 土木学会, pp. 51-56, 2000年1月