

住友建設株式会社 正員 ○羅 文鶴

九州大学工学部 〃〃 山内豊隆

1. まえがき

筆者は先にオ21回年次学術講演で土の疲労の機構について、繰返し載荷試験における繰返し荷重とそれによって生じる変形の巨視的関係より、土供試体と一つの均一で等方性のマスであると仮定してレオロジーおよび微粒子的考察を行ない、さらに繰返し荷重を受ける土の許容変形に対する寿命の概念について述べた。

今回は前回に続き、繰返し荷重を受ける土の疲労の機構をさらに明らかにするため、土を土粒子からなる骨格構造と土粒子間の空隙中にある水分または空気からなる二相系のものであると仮定して考察を行った。それにこれらの考察の結果を基にして繰返し荷重を受ける土の許容変形に対する寿命の求め方、実験結果およびその考察などについて述べようとするものである。

この結果繰返し荷重を受ける土の変形の過程は圧縮、それにいわゆる硬化効果、および脆性的破壊の3つの段階に分けられることを明らかにした。

2. 土の疲労に対する理論的考察

土は土粒子群からなる骨格構造とその空隙を満たす水または空気の二相系であると仮定する。土の強さは一般にこの土粒子間の摩擦力と附着水に起因する粘着力とかうなる。したがって一般に土に対して応力を与えてその密度を増加させると、粒子間の接触面が大きくなりたりまたは数が多くなりそのせん断強さは増大する。それに与えた応力がさらに増大してその応力が土のせん断強さ以上になり土は破壊する。

しかし繰返し荷重を受ける土の破壊に至るまでの変形過程はこの外にさらに下記の3期間に分けられる。

1) 繰返し載荷の初期では土は巨視的変形をおこす。すなわちこの期間では土粒子骨格は圧縮され、空隙は減少し密度は増大する。これは一般の土の締固めにおける密度の増加と類似したものと考える良い。

2) 密度の増加が飽和点に達した後、繰返し荷重の作用により、土内部に生じる応力はその一部を弾性的回復変形となって現われ、その一部は残留応力として土粒子間に蓄積され、巨視的塑性変形は土粒子間において生じる微視的塑性変形に転じる。

3) 土の内部において応力の集中部の土粒子間に最初には、すなわち微視的割れが生じる。この割れ附近で微視的塑性変形がおきながらそれより遠く離れた部分では生じない。したがってこの期間でも巨視的塑性変形はおこらない。なおこの微視的割れの発生に従ってその附近の応力集中度は一様と大きくなり、その部分に生じる応力はその部分の破断強度以上になり、土の内部に蓄積された残留応力の助長により、すぐに発生している割れあるいは新しく発生した割れを引き続き拡大する。それにこの割れの成長速度は繰返し載荷の後期にかなり程早くなり、割れが土の断面を横断したとき土は突然破断する。この割れの発生速度は統計力学的なものであると考えられる。なおこのよう

は破壊は脆性破壊的のものであり構造物の破壊のうちでは最も危険なものである。

以上において繰返し荷重を受けらるる工の変形、したがってその破断に至るまでの過程を3つの期間に分けて述べる。つぎにそれぞれの期間における工の強度の変化について述べる。最初に工のせん断強度は巨視的塑性変形の発生にもなつて増大する。このせん断強度の増加は主に密度の増加によるものであり工の締固め効果に似てゐる。しかしこのせん断強度の増大は後で述べる硬化効果によるものと比べて非常に小さい。工の密度の増加が飽和点に達した後は、工粒子間に残留応力が蓄積されることに起因すると思われる所の硬化効果がおこりせん断強度は著しく大きくなる。その後、ある期間を経たのちに工粒子間における微視的々裂が生じる。すでに述べたようにこの々裂は応力集中率の増大と残留応力の助成により引き続き拡大する一方その速度も漸次大きくなり最後に破壊に至る。この期間ではせん断強度は徐々に減少するがその破壊の直前まで顕著な低下を示さない。したがって繰返し荷重は工に対して2つの相反した作用をもつことがわかる。すなわち一つはいわゆる硬化効果によって工のせん断強度を増大させ、いもう一つは逆に工を破断に導くものであり、前者は工を強化し後者は工を弱化する作用を持つ。

以上より繰返し荷重を受けらるる工の破壊は最初に微視的々裂が発生して、ついでそれが漸次成長して破断に至ると考えてよからう。故に理論的に繰返し荷重を受けらるる工の破壊はこの微視的々裂の発生をもつて破壊とすべきである。しかしこの最初の微視的々裂の発生は実験中ではもとより、実際の工構造物の使用中でも肉眼あるいは電子顕微鏡などをもつて認められるものではなく、それに少なくとも認められよう々裂は疲労寿命の極めて末期におこる。その工又この時点よりの々裂の発生又はその成長の速度は載荷回数が増加と共に上昇する。この過程は巨視的塑性変形をおこす突然破壊に至るといった脆性破壊的のものであるという事実から、工構造物の安定上極めて注意を要するものと思う。

3. 工の疲労破壊に対する実験的考察

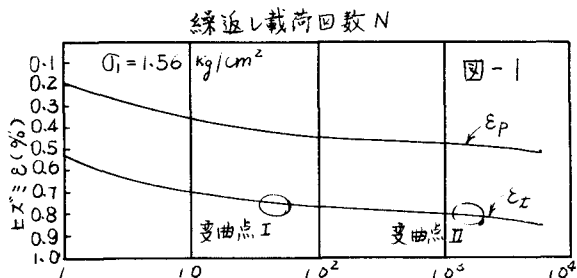
繰返し荷重を受けらるる工のヒズミ ε と載荷回数 N （対数値）の関係曲線は図-1に示すように2個の変曲点を得られる。これらの変曲点はそれぞれつぎのように前節に述べた所の意義をもつものと思われる。

1) 変曲点Ⅰの繰返し載荷回数までは、工は繰返し載荷されることにより巨視的塑性変形をおこす。

2) 変曲点ⅠからⅡの間では工の巨視的塑性変形の発生割合は減少し、そのほとんどは工の内部の工粒子間における微視的塑性変形に転ずる。

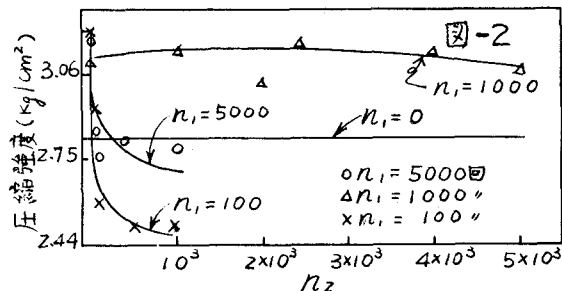
3) 変曲点Ⅱ以後では工の巨視的変形の発生割合はふたたび増加する。したがって変曲点Ⅱは反変曲点になる。しかしこの変形は工の粒子間のずれが大きくなり、々裂が急速に成長することによるものであつてせん断変形である。

いまこのような2つの変曲点の持つ意義を明らかにするためにつぎの二段階二重繰返し載荷試験を行



った。すなわちまず最初に図-1の $\varepsilon - \lg N$ 曲線の繰返し荷重 1.56 kg/cm^2 を一次荷重 σ_1 として、3個の工供試体に対してそれぞれ2つの変曲点を境とした繰返し回数 $n_1 = 100, 1000, 5000$ 回を与えた。ついでそれぞれを荷重 $\sigma_2 = 3.12 \text{ kg/cm}^2 > \sigma_1$ に切り換えてそれぞれ任意の回数をもって繰返し載荷した後一軸圧縮強度 σ_c を測定した。その結果を図-2に横軸に n_2 、縦軸に σ_c を持て示す。こゝに σ_1 および σ_2 はそれぞれ許容ヒズミ $\varepsilon = 1.15\%$ に対する疲労曲線工の最小と最大荷重であり、図-2からわかるように $n_1 = 100$ 回に対して $n_2 = 40$ 回より一軸圧縮強度は急激に減少し、 $n_2 = 1000$ 回値でほとんど破断している。 $n_1 = 1000$ 回に対しては、一軸圧縮強度は $n_2 = 1000$ 回で最大値を示し、その後わずかながら減少しながらも $n_2 = 6000$ 回まで

大きい値を保つ。 $n_1 = 5000$ 回に対しては一軸圧縮強度は $n_2 = 100$ 回の場合と同様に約 $n_2 = 40$ 回で低下するが、その低下率は $n_1 = 100$ 回の場合ほど急激ではなく、ゆるやかである。このことはそれぞれ $n_1 = 100$ 回では工は繰返すが強度はあまり増加せず、



$n_1 = 1000$ 回では硬化効果により工は大きく強化されていること、 $n_1 = 5000$ 回ではこの硬化効果がすでに消失しつつあり、したがって微視的亀裂が漸次成長している段階にあることを示す。これらの結果は上述の繰返し荷重を受けらる工の疲労に因する三つの変形過程を示すものである。したがってこのように実験を多数回繰返し行うことによってこれらの変曲点を明確に決定することが出来る。

4. 繰返し荷重を受けらる工の破壊に対する寿命

上記の工の疲労の本質に対する考察より工の疲労寿命はこの工が繰返し載荷されることによって内部に微視的亀裂が発生するまでの繰返し載荷回数をもって表わすべきであることがわかる。一方、工の疲労寿命としてこの微視的亀裂が成長して工が破断するまでの全繰返し回数をもって表わすことも考えられるが、実際には最初に微視的亀裂が発生した時点で局部的疲労破壊がおこっていることおよび脆性破壊の危険性をも併せ考えると、理論的にも合理的でないことがわかる。一方上記のような硬化効果をもって表わすことも考えられるが、それは不合理であることはいふまでもない。

いま実用上当然の問題として繰返し荷重の作用によって工の寿命を増加させることが要求される。実際問題としては工は様々な繰返し荷重を受けらるのど、このためにはこれらの繰返し荷重の相互作用により工の疲労寿命に対する効果あるいは影響を考察しなければならぬ。いま便宜上これらの荷重を $\sigma_1 < \sigma_2$ の二種類にしばって考えてみる。ここに σ_1 は工を強化する大きな荷重、 σ_2 は工を弱化する小さな荷重とする。そうするとこの工の寿命に影響をおよぼす因子として σ_1 、 σ_2 およびそれぞれの単独載荷に対する疲労寿命すなわち載荷回数 N_1 、 N_2 の四つが考えられる。いまもし σ_1 を平均の工に対して載荷することによって σ_2 に対する N_2 が増加するとしたら、この工の σ_2 に対する寿命は増大したと云える。その逆も又真である。この場合の工の疲労寿命は理論上微視的亀裂の発生までの繰返し載荷回数をとらべきであるが、実際にはすでに述べたようにこのような微視的亀裂は肉眼で検知できるものではないので、許容ヒズミに置きかえて破壊の基準にする。

図-3は同一疲労曲線にある回種類の荷重 $(\sigma_1) < (\sigma_2) < (\sigma_3) < (\sigma_4)$ をそれぞれ一次荷重 σ_1 とし、 $\sigma_2 > (\sigma_1)$

を二次荷重として最初に G_1 を土に対して一定数 n_1 繰返した後 G_2 に切り換え引き続き土が許容ヒズミに達するまで n_2 回繰返した試験結果を横軸に n_1/N_1 , 縦軸に n_2/N_2 をもって G_1 が土の疲労寿命に対する影響を表わしたものである。図-4はさらに横軸に G_1 を縦軸に図-3に示すそれぞれの G_1 に対応した n_1/N_1 および n_2/N_2 のピーク値をもって表わしたものである。これらの試験が示すように

いずれもピークが現われる。これらのピークは図-3では G_1 によって土の G_2 に対する疲労寿命を増加させるのに最も効果のある n_1 を示す。図-4では四つの G_1 のうちで同じく最も効果のあるものを示している。

なお図-3中にそれぞれの供試体が上記の試験で土が許容ヒズミに達したときの一軸圧縮強度 G_c を併せて示したが、その値はいずれも試験前のそれよりははるかに大きく、前記のピークの附近ではっきりはしないがピークらしいものがあり、その後なお大きき低下は見られない。このことは硬化効果、脆性破壊の問題などと併せて土の疲労破壊の本質を究明するには操作も簡単であり、興味深いものであると思う。なおこのことよりこのような硬化効果をもって土の疲労寿命を表わすことは甚だ不合理であることがわかる。

5. 結論

1) 土を土粒子からなる骨格構造と土粒子間の空隙中に含まれた水分又は空気からなる二相系のものであると仮定して、繰返し荷重を受けける土の疲労変形の機構に対して理論的および実験的考察を行った結果、このような土の疲労変形の過程は (i) 土の密度が増加する期間、(ii) 密度の増加が飽和点に達した後さらに土粒子間にずれ、すなわち微視的なき裂がおこるまでの期間と (iii) この微視的なき裂が拡大して破壊に至るまでの期間の三つの期間に分けられることがわかった。

2) このような土の疲労特性より繰返し荷重を受けける土の疲労寿命は土の内部で最初に微視的なき裂がおこるまでの繰返し(載荷回数)をもって表わすべしであることを明らかにした。

3) 以上の考えにもとづいて二段階荷重繰返し(載荷試験)によって繰返し荷重の土の疲労寿命に対する影響も実験的に調べた結果、土の疲労寿命を延長するのに最も良い効果のある一次繰返し荷重 G_1 およびその繰返し(載荷回数) n_1 が得られることがわかった。

なおこの研究における実験データの一部は九大工学部4年生 井上晴武君の協力に負うものである。

