

論文

[1054] PC 鋼棒の応力と超音波伝播特性の関係

正会員○津島 聡 (船舶技術研究所大阪支所)

正会員 吹上 紀夫 (船舶技術研究所大阪支所)

1. まえがき

ハイブリッド海洋構造物は、構造的強度を向上させるために、プレストレストコンクリート (PC) にすることが望ましい。有効プレストレス力は、PC 鋼棒の応力緩和、コンクリートの収縮、クリープなどにより減少していくことが想定される。このため、構造物の信頼性を向上させるために、PC 鋼棒の緊張力を監視する手段が必要である。本報では、この手段として超音波を使った二つの非破壊検査法を試みた。第一は、縦波を使って緊張力と超音波減衰率との関係から緊張力を推定する方法であり、第二は緊張力と表面波速度との関係から緊張力を推定する方法である。以下、応力推定の可能性を検討した結果について報告する。

2. 実験材料

供試体 PC 鋼棒は JIS G 3109 D 種 1 号に準じた丸棒鋼 (直径 12.9mm、以降 D 種と記す)、及び B 種 (丸棒、直径 16.8, 20.6, 25.8mm) である。また、比較のため S45C (丸棒、直径 13.0, 22.0mm) 及び SS41 (丸棒、直径 12.5, 22.1mm) の鋼棒を使用した。以降、PC 鋼棒は鋼種の後に公称直径を記し D-13、B-17 のように表す。表-1 にこれらのうち代表値として径 13 及び 17mm の鋼種の材料特性の実測値を示す。

3. 実験方法

3.1 鋼棒の応力と超音波減衰率

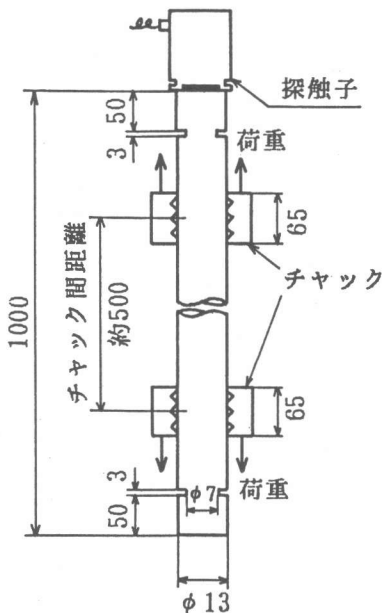


図-1 実験方法概略図

表-1 PC 鋼棒、S45C 及び SS41 鋼棒の機械的性質と表面波速度

呼び名 mm	種・記号 —	降伏点 MPa	引張強さ MPa	表面波速度 m/s
13	D ^a	1390	1460	2940
17	B	1060	1140	2940
13	S45C	391	700	2880
13	SS41	323	463	2860

a) JIS G 3109 D 種 1 号に準ずる

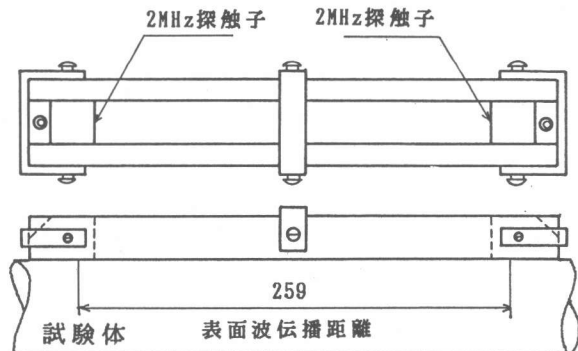


図-2 表面波探触子固定治具

図-1に実験方法の概略図を示す。試験体の長さは1000 mm、チャック間距離は約500 mmとし、アムスラー型引張試験機により引張荷重を加えた。引張荷重は降伏点を越えない範囲とし、各荷重における縦波超音波(周波数5MHz及び2MHz)の減衰率を求めた。減衰率は超音波を試験体端部より長さ方向に入射し、他端からのエコー高さの変化量から求めた。エコー高さの計測は受信波の最初のピーク波で行い、遅れエコーの大きさの変化は無視した。なお、径13mm以下の試験体は径が小さいため、チャック部での影響を受けた音波の受信を避けるため、図-1のように両端から50mmの位置に径 7mmのくびれ部を入れ音軸近傍の音波を受信するようにした。

3.2 鋼棒の応力と表面波速度変化

表面波速度の変化は、前述と同様、各荷重レベルにおける引張方向の表面波の伝播時間の変化を超音波探傷器(設定条件: 200ns/div)で測定し、応力0のときの速度との相対速度変化率を求めた。表面波探触子の周波数は 2MHzとし、探触子間距離は材料の伸びの影響を受けないように図-2に示す固定治具を用いた。

4. 実験結果及び考察

4.1 PC鋼棒の応力と超音波減衰率の関係

図-3はPC鋼棒D-13の引張応力と応力方向に伝播する縦波の相対減衰率(応力0の時の減衰率を基準値 0とする)との関係を示す。なお、D種鋼棒の減衰率は0.5 dB/cm程度と小さく、鋼棒の伸びによる減衰率変化の影響は無視することができる。図中の矢印は負荷と除荷を表している。超音波の相対減衰率は引張応力の増加とともに大きくなる。次に降伏応力の約 73%(1020MPa)の荷重より除荷して行くと相対減衰率は減少するが、負荷時の応力-減衰率曲線とは一致せず、応力を 0にしても初期状態に戻らない。応力 0の状態では放置すると破線で示すように減衰率は時間とともに徐々に初期値に戻る。しかし、鋼のような活性化エネルギーの高い材料では回復は遅い。鋼棒の以後の相対減衰率は20分後に初期値の90%まで回復し、それ以後はほとんど変化しなかった。そこで、試験体を50℃まで加熱

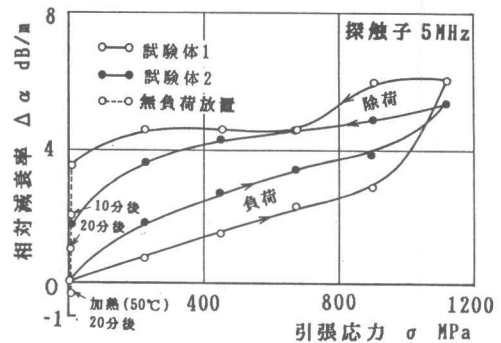


図-3 PC鋼棒(D-13)の引張応力と相対減衰率の関係

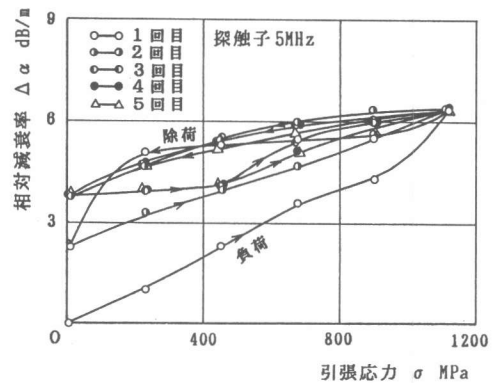


図-4 PC鋼棒(D-13)の繰り返し荷重による相対減衰率変化

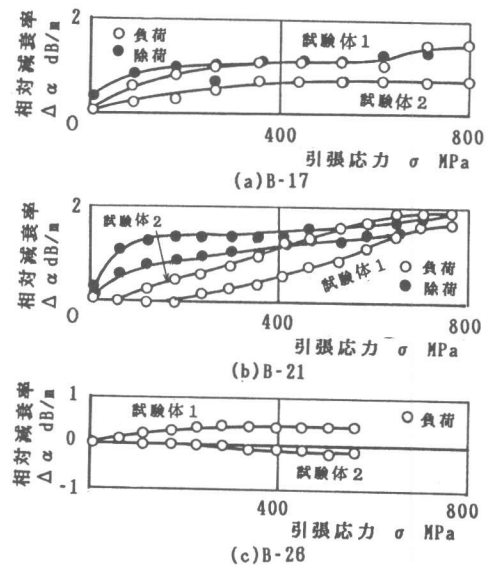


図-5 PC鋼棒(B種)の引張応力と相対減衰率の関係(5MHz)

したところほぼ初期値まで回復した。試験体1と2は同種であるが、試験体により減衰率の変化の仕方に相違があった。この原因については不明であった。

図-4 はD種のPC鋼棒の繰り返し荷重による相対減衰率の変化を示す。1回目の負荷-除荷サイクルにおいては、応力を0に戻しても減衰率は前述のように0に回復しない。しかし、相対減衰率が初期値0に回復していない状態から繰り返し荷重を加えると3回目からはほぼ同様な閉サイクルになった。実際に使われているPC鋼棒は繰り返し応力が作用するため、応力の測定にはこのような閉サイクルの負荷-除荷曲線より推測する必要がある。

B種の場合は図-5(a)-(c)に示すように、D種に較べて相対減衰率の変化は少ない。相対減衰率の最も大きいB-21においても降伏応力の約72%点(760MPa)で2dB/m程度の増加であった。B-26の場合は降伏応力の約55%点(560MPa)までに対して、変化量は少なく最大0.4dB/mの増加であった。また、同種の材料でも試験体2においては、わずかではあるが相対減衰率は減少した。

このような引張応力による相対減衰率の増加の原因は、超音波による転位の振動であると言われている¹⁾。従って、径の大きいB種鋼棒の相対減衰率の変化が小さいのはD種の鋼棒に較べ製作時の引き抜きによる塑性変形が少なく、転位密度が小さいためと思われる。

一般に転位による超音波のエネルギー損失は振動数に依存し低周波数になれば減少する¹⁾。

図-6は2MHz探触子によるD種鋼棒の相対減衰率変化の測定結果で、5MHzよりも減衰率の増加は少なく、B種は相対減衰率の変化はなかった。

これらの結果から初期状態の縦波超音波の伝播量を測定しておくことにより、PC鋼棒の応力状態を推測することができると考えられる。

4.2 S45C、SS41鋼棒の応力と超音波減衰率の関係

図-7に示すようにS45Cの場合、PC鋼棒と反対に応力の増加とともに相対減衰率は減少するがφ13mmの試験体については減衰率の変動が大きかった。この原因については明確ではない。

SS41の場合はS45Cと同様の傾向を示す。この原因として、鋼などの強磁性体に外部から圧力などを加え磁歪を起こさせることにより、磁壁の振動が抑えられ減衰率が減少することが考えられている¹⁾。しかし、SS41などリムド鋼の場合

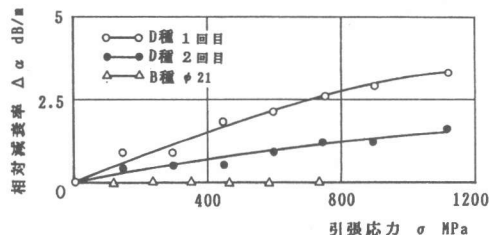


図-6 2MHzの場合のPC鋼棒(D種,B種)の引張応力と相対減衰率の関係

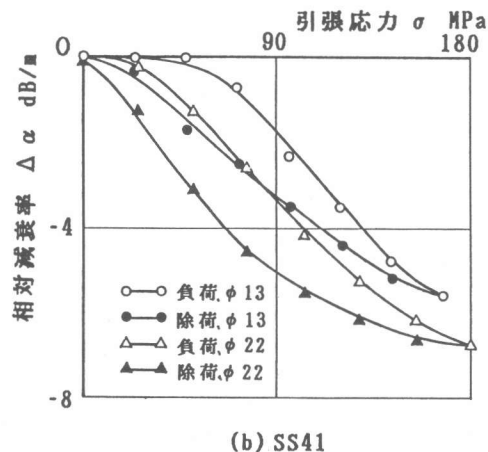
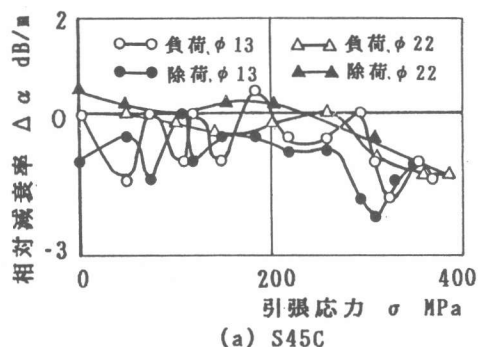


図-7 S45C、SS41棒鋼の引張応力と相対減衰率の関係(5MHz)

気泡などが入ったまま圧延された材料であるため、応力の増加に従って超音波の散乱が減少され、相対減衰率が減少することも考えられる。

4.3 応力と表面波速度の関係

材料の非線形性のために、引張応力の状態により表面波速度は変化する。応力 σ のとき、表面波速度が ΔC だけ減少したとし、表面波速度の減少率 $\Delta C/C_R$ を(1)式で示す。

$$\Delta C/C_R = C_R \cdot \Delta t/L_0 \quad (1)$$

ここに、 C_R ; 応力0のときの表面波速度

L_0 ; 超音波の伝播距離

Δt ; 伝播時間の増分

である。

図-8にPC鋼棒の場合の引張応力と(1)式で求めた表面波速度の減少率の関係を示す。この結果より、応力の増加とともに表面波速度が減少するのがわかる。D種鋼棒では降伏応力の約73%で0.27%の速度減少率があり、表面波速度の変化から応力状態を監視することは可能であると考えられる。しかし、B種鋼棒は応力変化による表面波速度の低下は小さい。本実験で使用した超音波探傷器の精度では応力の監視は難しく、もっと高精度の時間計測装置が必要である。

図-9はS45C、SS41鋼棒の応力と表面波速度の減少率を測定した結果である。S45Cでは降伏応力(390MPa)付近で0.03~0.04%とPC鋼棒のB種と同程度 of 速度減少率が見られた。

SS41では他の鋼棒とは異なった非線形特性を示し、応力の増加とともに表面波速度はわずかなではあるが増加した。

5. あとがき

1) 縦波超音波の相対減衰率によるPC鋼棒のD種及びSS41の応力は初期状態のエコー高さを測定しておくことにより推定可能である。B種及びS45Cについては5MHzの探触子では難しく、もっと高い周波数の超音波を使う必要がある。

2) 表面波速度の変化によるPC鋼棒のD種の応力は推定可能であるが、PC鋼棒B種、S45C、SS41のように減少率の小さい鋼棒については市販の超音波探傷器により簡便に測定することは精度的に難しく、伝播時間の変化量を更に精度良く測定する必要がある。

(文献)

1) 日本学術振興会 製鋼第19委員会編; 超音波探傷法 (日刊工業新聞社) pp.74-75

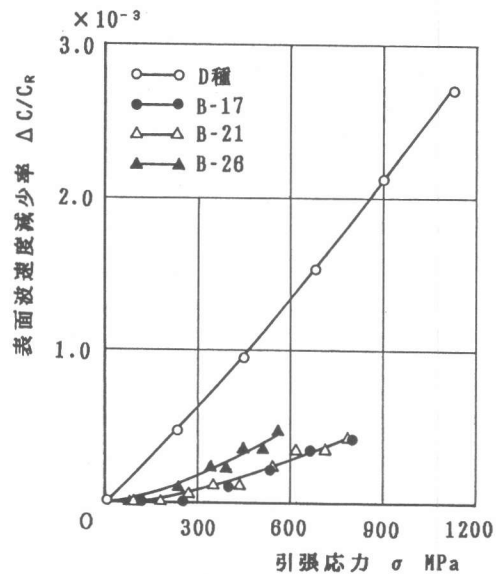
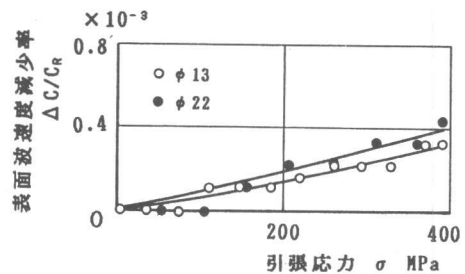
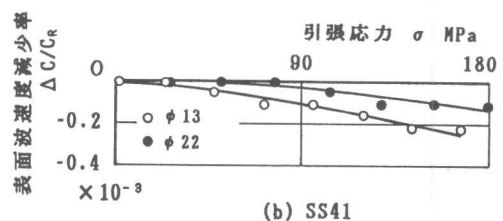


図-8 PC鋼棒の引張応力と表面波速度減少率



(a) S45C



(b) SS41

図-9 S45C、SS41鋼棒の引張応力と表面波速度減少率