

1. はじめに

阪神大震災の被害特性の一つとして、場所打ち杭のひび割れや橋脚や杭の局部座屈が挙げられる。これらの破壊現象の原因の一つとして、鉛直地震動によって発生した衝撃疎密波の影響があったのではないかと考えられる。そこで本研究では阪神大震災で多くみられた座屈現象の破壊メカニズムを解明するための第一歩として、1. 装置を試作し、再現性のある実験を行い、2. 杭などを想定した弾性棒に生じる衝撃応力の基礎的性質を確かめ、実験技術の確立を目指す。これは、数ミリ秒の単位の波動伝播を精密に測定することが、今後の研究の出発点になると考えるためである。

2. 実験概要

長さ 1500mm、直径 19mm の磨き丸鋼棒からなる実験棒の一端を丸鋼棒からなるハンマで、鐘を撞木で撞くように打撃し、実験棒内に発生する衝撃応力波を測定した。表 1 に実験棒とハンマの諸元を、図 1 に実験装置の概要を示す。なお衝突速度はハンマの落下高さ h から $V = \sqrt{2gh}$ として求めた。

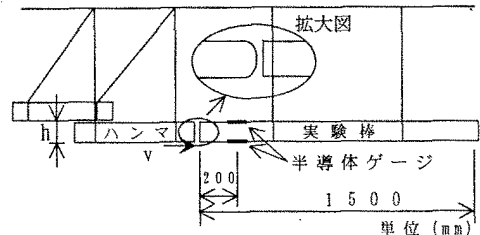
表-1 実験棒とハンマの諸元

	鋼		鋼		
			実験棒	ハンマ	
				1	2
単位体積重量 (gf/cm^3)	7.86	直径 Φ (mm)	19	19	28
弾性係数 (gf/cm^2)	2.1 $\times 10^5$	長さ l (mm)	1500	750	345
弾性波速度 (m/sec)	5120	衝突速度 v (m/s)	—	0.99 1.4	0.99 1.4

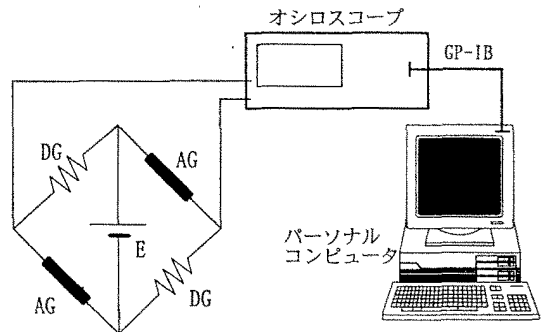
半導体ひずみゲージ (抵抗値 2000Ω , ゲージ率 $K=168$) を実験棒の打撃端から 200mm の位置に実験棒の軸に平行に 2 枚 1 組で貼付し、対辺 2 アクティブゲージ法で結線して、得られた軸ひずみから応力を算出した。アクティブゲージとダミーゲージの抵抗値が等しい時、ひずみゲージのゲージ率を K 、実験棒の Young 率を E 、ブリッジ電圧を V_i とすると、測定される電圧増分 Δe から、実験棒に生じる軸ひずみ増分 $\Delta \epsilon$ と衝撃応力増分 $\Delta \sigma$ は以下のように求められる。

$$\Delta \epsilon = \frac{2 \times \Delta e}{K (V_i - \Delta e)} \quad (1)$$

$$\Delta \sigma = \frac{2 \times E \Delta e}{K (V_i - \Delta e)} \quad (2)$$



(a) 装置概要図



(b) ひずみ出力のしくみ

図-1 実験装置

通常の数 10kHz 程度の帯域幅の動ひずみ計では、矩形波となる衝撃応力波形の高い周波数成分までは正確に測定出来ないことが予期される。そこでブリッジ電圧として 10V を与え、ブリッジの出力を直接デジタルオシロスコープ (帯域幅 100MHz、サンプリング率 25MS/s、感度 2mV/div) に入力した。従来の長残像管を用いたアナログオシロスコープでは管面の写真撮影を行ない、現像後の写真から波形を読みとる必要があったが、本装置では測定データは GP-IB を介してコンピュータに入力することが可能であり、容易に測定を行なうことが可能である。なお、実験に先立ちオシロスコープの応答は十分高速であることを確認している。

3. 衝撃応力

図 2(a,b) にハンマ 1 によって実験棒を打撃した際に発生する衝撃応力波伝播の特性曲線と、その結果予測されるゲージ位置での応力波形を示す。打撃によってハンマと実験棒に発生する応力 σ_{10} および σ_{20} と、境界での n 回目の反射波 σ_{1n} 、透過波 σ_{2n} は次式によって表される¹⁾。

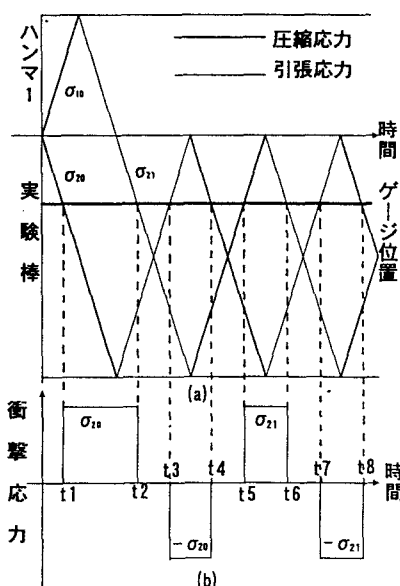


図-2 特性曲線とゲージ位置での応力波形の予測 (ハンマ 1)

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{10} = \frac{r}{1+r} c_1 \rho_1 V \\ \sigma_{20} = \frac{1}{1+r} c_2 \rho_2 V \\ \sigma_{1n} = (-\alpha)^n \sigma_{10} \\ \sigma_{2n} = (-\alpha)^{n-1} \beta \sigma_{10} \\ r = \frac{A_2 c_2 \rho_2}{A_1 c_1 \rho_1} \\ \alpha = \frac{-A_1 c_1 \rho_1 + A_2 c_2 \rho_2}{A_1 c_1 \rho_1 + A_2 c_2 \rho_2} \\ \beta = \frac{2 A_2 c_2 \rho_2}{A_1 c_1 \rho_1 + A_2 c_2 \rho_2} \end{array} \right. \quad (3)$$

ここに、添字 1 はハンマを、添字 2 は実験棒を表し、 A, c, ρ はそれぞれ断面積、弾性波速度ならびに密度である。また、 r は動剛比、 α は反射係数、 β は透過係数である。図 2(b) に示すように衝突・反射によって生じる応力を重ね合わせることでゲージ位置での応力波形を推定することが出来る。なお図中の t_1 から t_2 の最初の応力一定の時間は、応力波がハンマを 1 往復する時間に対応している。

4. 実験結果及び考察

ハンマの直径と長さおよび打撃速度 v を変化させ、各ケースにつき 3 回ずつ実験を行った。図 3-6 にハンマ 1 とハンマ 2 による打撃の結果得られた衝撃応力波の時刻歴を示す。図にはゲージ位置に応力波が伝播された時刻を $t=0$ s とし圧縮応力を正、引張応力を負として 3 回の実験結果を示しているが、ノイズやバラツキはほとんどみられず再現性は良く、衝撃応力は衝突速度 V にほぼ比例している。ハンマ 1 を用いたケースの t_1 から t_2 までの時間とハンマの長さ L_1 から得られる応力波の伝播速度 $c = 2L_1/(t_2 - t_1)$ は 5070 m/s であり、材料物性から得られる値 $c = \sqrt{E/\rho} = 5120$ m/s と良い一致を示している。しかしながら実験結果と理論値を比較

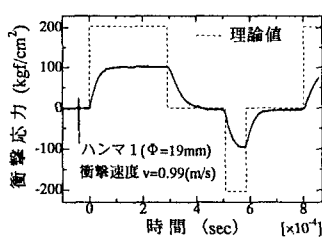


図 3 時間-衝撃応力関係

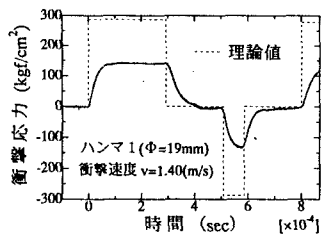


図 4 時間-衝撃応力関係

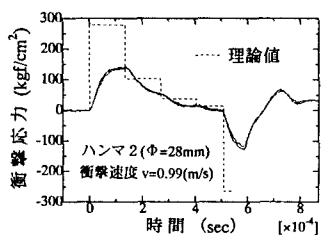


図 5 時間-衝撃応力関係

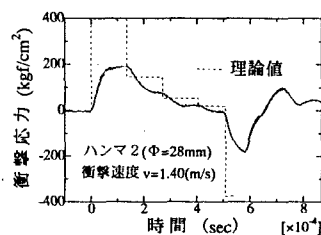


図 6 時間-衝撃応力関係

すると、いずれのケースでも時間軸は良い一致を示しているものの、立上り・立ち下がりにはおよそ 100 μsec 程度の遅れがあり、応力は理論値のおよそ 1/2 程度であった。その結果、応力が一定に保たれる時間の短いハンマ 2 のケースでは明確な階段状の波形を得ることが出来なかった。実験棒の先端処理やひずみゲージの応答性など課題が残されている。

5. おわりに

本研究では杭などに伝播する衝撃応力の測定について実験技術を確立することを目的として実験を行なった。本研究の結論は以下のとおりである。

1. 従来の長残像管式オシロスコープの代わりにデジタルストレージオシロスコープを用い、衝撃応力を容易に計測できるように工夫し、再現性の良い実験装置を作成した。
 2. しかし用いた実験棒では衝撃応力波の立上りに約 100 μsec 必要であり、得られた衝撃応力の振幅は理論値のおよそ 1/2 であった。実験棒の先端処理やひずみゲージの応答性の検討が必要である。
- なお東海大学の宇都一馬先生ならびに冬木衛先生には、実験の遂行にあたり、数々のアドバイスを頂いた。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 鋼管杭協会 (1982) 鋼管杭の打撃応力と適正ハンマ、鋼管杭協会報告、第 3 号, pp. 3-14