

溶接構造物の振動特性 (1次および2次振動に及ぼす影響)

DYNAMIC CHARACTERISTICS OF WELDED STRUCTURE (EFFECT OF WELDING ON FIRST AND SECOND VIBRATION MODE)

青木 繁¹⁾

Shigeru AOKI¹⁾

Welding is widely used for construction of many structures. Effect of welding on dynamic characteristics and reliability has not been clear. In this paper, effect of welding on the damping ratio and the natural frequency is examined by experiment. By using many specimens of same size, the damping ratio and the natural frequency are estimated. It is concluded that the damping ratio of welded specimen is larger than that of base metal. The natural frequency of welded specimen is almost same as that of base metal. Next, effect of welding on reliability of structure is examined for white noise excitation. For first excursion problem, reliability of welded specimen is higher than that of base metal.

Key Words : Vibration, Welding, Damping Ratio, Natural Frequency, Reliability

1. 緒言

溶接は多くの構造物に用いられている接合法である。溶接構造物に関しては、静的な荷重を受けた場合の強度や周期的な荷重を受けた場合の疲労強度に関して多くの研究がなされている[1]-[3]。しかしながら、溶接構造物の振動特性に関する研究はあまりなされていない。

著者はこれまでに簡単な試験片を用いた加振実験によって溶接部が構造物の振動特性に与える影響について検討してきた。その結果、溶接部がある場合にはない場合と比較して減衰比が大きくなり、固有振動数はほとんど変化しないことが明らかになった[4]。

本報告では、同一寸法の多数の試験片を用いた加振実験により、溶接部が構造物の1次および2次の振動特性に及ぼす影響について詳細に検討した。さらに、溶接構造物が不規則振動入力を受けた場合を想定して、理論解析によって溶接部が構造物の信頼性に及ぼす影響について検討した。

2. 加振実験による振動特性の推定

簡単な試験片を用いた加振実験によって、溶接部が構造物の振動特性に及ぼす影響について検討した。

2.1 実験方法

図1に試験片の寸法を示す。この試験片を3本のボルトを用いて加振機に固定した。試験片の材質は一般構造用圧延鋼材(SS400)とした。同一寸法の試験片10本を作

製し、まず(1)溶接部のない試験片(母材)を加振した。次に、(2)左側のボルト穴から250mmのところをカットオフソーで切断し、自動炭酸ガス溶接機で溶接した試験片(溶接試験片)を加振した。開先形状はV型とし、突合せ溶接をした。振動特性としては、1次および2次の減衰比 ζ および固有振動数 f_n を測定した。この際に、1次および2次の振動モードは独立であるとした。固有振動数は周波数掃引によって測定し、減衰比は次の3とおりの方法で求めた。

- (I) 自由振動から対数減衰率 δ を求め、 $\zeta = \delta / 2\pi$ の関係を用いる。
- (II) 応答振幅が共振点の $1/\sqrt{2}$ となる振動数 f_1 および f_2 を求め、 $\zeta = (f_2 - f_1) / 2f_n$ から求める。(半パワー法)
- (III) 共振点での応答と入力の振幅の比が $1/2\zeta$ となることを利用して求める。

周波数掃引においては、入力加速度振幅1Gで一定とし、試験片の自由端の応答を測定した。

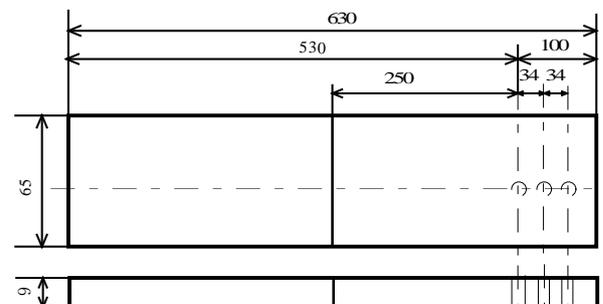


Fig.1 Size of specimen (mm)

¹⁾東京都立産業技術高等専門学校 ものづくり工学科 機械システム工学コース

2.2 実験結果

加振実験によって得られた減衰比および固有振動数を表1および表2に示す。表1は1次振動、表2は2次振動に対する結果である。それぞれの表には溶接試験片と母材の減衰比および固有振動数の比それぞれ ζ_w/ζ_b および f_{nw}/f_{nb} の値をそれぞれの値の右欄に示した。減衰比については測定方法による差はあるが、母材よりも溶接試験片の方が1次振動に対しては約10%、2次振動に対しては約45%大きい。固有振動数についてはほとんど変化がみられない。

表3には、それぞれの測定結果の平均値および変動係数（標準偏差と平均値の比）を示す。減衰比に対しては、1次振動の場合の変動係数はほぼ10%以下となっている。2次振動の場合には(II)の半パワー法による結果の変動係数は30%より大きい。それ以外の方法ではほぼ10%以下となっている。また、溶接試験片と母材の減衰比の比の変動係数はほとんど20%以下である。したがって、減衰比の統計的変動は小さいといえる。一方、固有振動数の変動係数は4%以下で、統計的な変動はほとんどないといえる。とくに、2次振動の場合の変動係数は1%以下である。

Table 1 Damping ratio and natural frequency of specimen for first vibration mode

| Method | | (I) | | (II) | | (III) | | | |
|----------|---|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|-----------------|
| Specimen | | $\zeta(x10^{-3})$ | ζ_w/ζ_b | $\zeta(x10^{-2})$ | ζ_w/ζ_b | $\zeta(x10^{-2})$ | ζ_w/ζ_b | $f_n(\text{Hz})$ | f_{nw}/f_{nb} |
| (1) | A | 6.33 | | 1.94 | | 1.18 | | 28.4 | |
| | B | 4.53 | | 1.47 | | 1.53 | | 28.2 | |
| | C | 5.56 | | 2.31 | | 1.33 | | 28.0 | |
| | D | 6.76 | | 2.11 | | 1.37 | | 28.4 | |
| | E | 6.13 | | 1.94 | | 1.39 | | 28.2 | |
| | F | 6.54 | | 2.48 | | 1.37 | | 27.6 | |
| | G | 6.26 | | 2.11 | | 1.30 | | 28.2 | |
| | H | 6.68 | | 2.50 | | 1.27 | | 28.2 | |
| | I | 7.25 | | 2.48 | | 1.33 | | 28.4 | |
| | J | 6.04 | | 2.25 | | 1.59 | | 27.4 | |
| (2) | A | 7.14 | 1.13 | 2.08 | 1.07 | 1.45 | 1.23 | 28.4 | 1.00 |
| | B | 7.78 | 1.12 | 2.43 | 1.65 | 1.81 | 1.18 | 28.6 | 1.01 |
| | C | 6.06 | 1.09 | 2.14 | 0.93 | 1.35 | 1.02 | 28.6 | 1.02 |
| | D | 7.85 | 1.13 | 2.00 | 0.95 | 1.36 | 0.99 | 29.0 | 1.02 |
| | E | 6.27 | 1.02 | 2.15 | 1.11 | 1.40 | 1.01 | 28.8 | 1.02 |
| | F | 6.89 | 1.05 | 2.27 | 0.92 | 1.37 | 1.00 | 28.6 | 1.04 |
| | G | 6.03 | 0.96 | 2.00 | 0.95 | 1.34 | 1.03 | 28.8 | 1.02 |
| | H | 6.47 | 0.97 | 2.34 | 0.94 | 1.44 | 1.13 | 28.5 | 1.01 |
| | I | 7.98 | 1.10 | 2.28 | 0.93 | 1.37 | 1.03 | 28.5 | 1.00 |
| | J | 6.13 | 1.01 | 2.34 | 1.04 | 1.54 | 0.97 | 28.4 | 1.04 |

Table 2 Damping ratio and natural frequency of specimen for second vibration mode

| Method | | (I) | | (II) | | (III) | | | |
|----------|---|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|-----------------|
| Specimen | | $\zeta(x10^{-2})$ | ζ_w/ζ_b | $\zeta(x10^{-2})$ | ζ_w/ζ_b | $\zeta(x10^{-1})$ | ζ_w/ζ_b | $f_n(\text{Hz})$ | f_{nw}/f_{nb} |
| (1) | A | 1.52 | | 4.07 | | 0.76 | | 171.5 | |
| | B | 1.03 | | 6.43 | | 0.74 | | 175.0 | |
| | C | 1.42 | | 2.02 | | 0.85 | | 171.5 | |
| | D | 1.08 | | 2.73 | | 0.77 | | 172.0 | |
| | E | 1.34 | | 2.63 | | 0.77 | | 171.5 | |
| | F | 1.29 | | 2.65 | | 0.63 | | 170.5 | |
| | G | 1.23 | | 2.49 | | 0.71 | | 171.5 | |
| | H | 1.08 | | 2.49 | | 0.69 | | 171.0 | |
| | I | 1.40 | | 2.49 | | 0.71 | | 171.0 | |
| | J | 1.25 | | 2.93 | | 0.75 | | 172.0 | |
| (2) | A | 1.50 | 0.99 | 5.48 | 1.35 | 1.22 | 1.61 | 172.0 | 1.00 |
| | B | 1.14 | 1.11 | 9.65 | 1.50 | 1.18 | 1.59 | 175.5 | 1.00 |
| | C | 1.50 | 1.06 | 5.82 | 1.99 | 1.22 | 1.44 | 171.0 | 1.00 |
| | D | 1.29 | 1.19 | 5.00 | 1.83 | 1.14 | 1.48 | 170.0 | 0.99 |
| | E | 1.23 | 0.92 | 4.00 | 1.52 | 1.04 | 1.35 | 171.0 | 1.00 |
| | F | 1.40 | 1.09 | 4.09 | 1.54 | 1.02 | 1.61 | 170.5 | 1.00 |
| | G | 1.25 | 1.02 | 6.35 | 2.55 | 1.25 | 1.75 | 172.5 | 1.01 |
| | H | 1.34 | 1.24 | 4.21 | 1.69 | 1.09 | 1.59 | 170.0 | 0.99 |
| | I | 1.51 | 1.08 | 4.26 | 1.71 | 1.09 | 1.53 | 170.0 | 0.99 |
| | J | 1.39 | 1.11 | 4.16 | 1.42 | 1.13 | 1.51 | 170.5 | 0.99 |

Table 3 Damping ratio and natural frequency of specimen for second vibration mode

| Method | | (I) | | (II) | | (III) | | | |
|--------|----------|-----------------------|-------------------|-----------------------|-------------------|-----------------------|-------------------|------------------|-----------------|
| Mode | Specimen | ζ | ζ_w/ζ_b | ζ | ζ_w/ζ_b | $\zeta(x10^{-1})$ | ζ_w/ζ_b | $f_n(\text{Hz})$ | f_{nw}/f_{nb} |
| 1st | (1) Mean | 6.21×10^{-3} | | 2.16×10^{-2} | | 1.37×10^{-2} | | 28.1Hz | |
| | COV | 0.098 | | 0.130 | | 0.032 | | 0.012 | |
| | (2) Mean | 6.84×10^{-3} | 1.12 | 2.20×10^{-2} | 1.05 | 1.44×10^{-2} | 1.06 | 28.6Hz | 1.02 |
| | COV | 0.076 | 0.176 | 0.083 | 0.195 | 0.114 | 0.066 | 0.038 | 0.013 |
| 2nd | (1) Mean | 1.26×10^{-2} | | 3.18×10^{-2} | | 7.36×10^{-2} | | 171.8Hz | |
| | COV | 0.145 | | 0.371 | | 0.106 | | 0.007 | |
| | (2) Mean | 1.36×10^{-2} | 1.08 | 5.30×10^{-2} | 1.71 | 1.14×10^{-1} | 1.55 | 171.3Hz | 1.00 |
| | COV | 0.089 | 0.092 | 0.312 | 0.196 | 0.028 | 0.067 | 0.009 | 0.006 |

3. 溶接部が信頼性に与える影響

溶接部が定常白色雑音で表される加速度入力を受けた場合の信頼性に与える影響について理論解析によって検討した。ここでは、溶接構造物は表1または表2に示した振動特性をもつ1質点系でモデル化できるものとした。さらに、質点と入力端の相対変位応答の絶対値 $|z(t)|$ が最初に破壊レベル B_D を超過した瞬間に破壊が起こるものとする初通過問題を扱った。この場合、破壊確率 P_f は次式で求まる。

$$P_f(t) = 1 - \exp(-2vt) \quad (1)$$

ここで、

$$v = \frac{1}{2\pi} \omega_n \exp\left(-\frac{B_D^2}{2\sigma_z^2}\right) \quad (2)$$

母材に対する破壊レベル B_{Db} を母材の応答の標準偏差 σ_{zb} を基準に次のように定めた。

$$B_{Db} = n\sigma_{zb} \quad (3)$$

溶接試験片と母材の P_f が等しくなるような溶接試験片の破壊レベル B_{Dw} と母材の破壊レベル B_{Db} の比を求めることによって、溶接部が信頼性に与える影響を検討した。

B_{Dw}/B_{Db} は次式で与えられる。

$$\frac{B_{Dw}}{B_{Db}} = \frac{2}{n^2} \frac{\zeta_b \omega_{nb}^3}{\zeta_w \omega_{nw}^3} \left(\log \frac{\omega_{nw}}{\omega_{nb}} + \frac{n^2}{2} \right) \quad (4)$$

表4に $n=1$ とした場合の1次振動および2次振動に対する B_{Dw}/B_{Db} の値を示す。平均して1次振動に対しては約4%、2次振動に対しては約15%溶接試験片の破壊レベルの方が小さい。したがって、溶接試験片の方が信頼性が高いといえる。図2には n の値に対する B_{Dw}/B_{Db} の平均値を示す。1次振動に対しては、 n の値が小さくなるにつれて B_{Dw}/B_{Db} の平均値は大きくなり、溶接試験片の信頼性が低下する。一方、2次振動に対しては、 n の値に対する B_{Dw}/B_{Db} の平均値の変動は少ない。

4. 結言

同一寸法の多数の試験片を用いて溶接部が構造物の1

Table 4 Ratio of tolerance level of welded specimen to base metal ($n=1$)

| Method | | (I) | (II) | (III) |
|--------|----------|-------|-------|-------|
| Mode | Specimen | | | |
| 1st | A | 0.942 | 0.966 | 0.902 |
| | B | 0.758 | 0.772 | 0.913 |
| | C | 0.952 | 1.028 | 0.952 |
| | D | 0.969 | 1.016 | 0.993 |
| | E | 0.978 | 0.940 | 0.986 |
| | F | 0.955 | 1.026 | 0.981 |
| | G | 1.008 | 1.016 | 0.974 |
| | H | 1.011 | 1.028 | 0.934 |
| | I | 0.951 | 1.024 | 0.984 |
| | J | 0.974 | 0.952 | 0.997 |
| 2nd | A | 1.005 | 0.861 | 0.788 |
| | B | 0.949 | 0.815 | 0.791 |
| | C | 0.974 | 0.590 | 0.834 |
| | D | 0.920 | 0.743 | 0.825 |
| | E | 1.045 | 0.812 | 0.861 |
| | F | 0.950 | 0.805 | 0.788 |
| | G | 0.989 | 0.624 | 0.754 |
| | H | 0.900 | 0.771 | 0.795 |
| | I | 0.955 | 0.767 | 0.812 |
| | J | 0.952 | 0.843 | 0.818 |

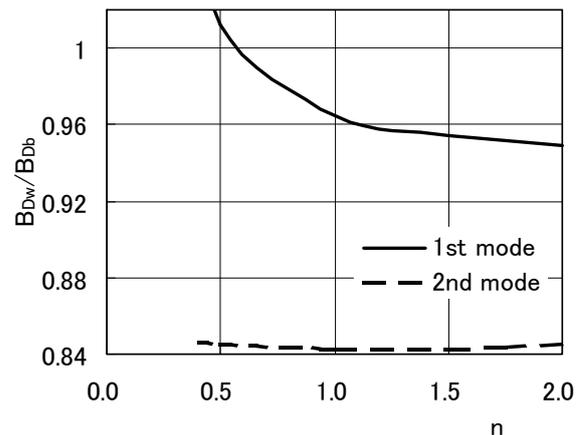


Fig.2 Ratio of tolerance level of welded specimen to base metal

次および2次の振動特性に及ぼす影響について検討した。まず、溶接部のない試験片（母材）で振動特性を測定した。次に、試験片を切断し、自動炭酸ガス溶接機で溶接した試験片（溶接試験片）の振動特性を測定した。得られた結果を以下に要約する。

1)溶接試験片の減衰比は母材と比較して1次振動に対しては約10%，2次振動に対しては約45%大きい。固有振動数は両者ともほとんど差がない。

2)初通過問題に対する信頼性は，一般に溶接試験片の方が母材よりも高い。

文 献

[1] 渡辺正紀・佐藤邦彦・峰久節治・大谷雄康，溶接継手の振動特性に及ぼす残留応力の影響，溶接学会誌，第

24巻，第8,9号，1955，pp.331-336

[2] 本原博・増淵與一，溶接継手の残留応力および変形についての研究展望（IV），溶接学会誌，第25巻，第3号，1956，pp.169-172

[3] 益子正巳・伊東誼，溶接接合部とボルト結合部の減衰能，日本機械学会 RC-SC20 研究成果報告書，1974，pp.351-363

[4] 青木繁，溶接部が構造物の動特性に及ぼす影響，東京都立工業高等専門学校研究報告，34号，1999，pp.1-5