

溶接構造物の振動解析のためのモデル化 ～ 1次および2次振動を考慮した場合～

Modeling of Welded Structure for Dynamic Analysis (Considering First and Second Vibration Modes)

青木 繁¹⁾

Shigeru AOKI¹⁾

Abstract : Welding is widely used for construction of many structures. The dynamic characteristics of the welded structure are important for design of machines, buildings and so on. The effect of welding on the dynamic characteristics is investigated. In this paper, analytical models of welded structure based on experiment are examined. First, the dynamic characteristics of welded structure for the first and the second vibration mode are obtained from experiment using beam type welded specimens. Second, analytical models which represent experimental results are examined. Two models are considered and parameters are estimated based on the experimental results. One is the two-degree-of-freedom lumped mass model is considered. The damping ratios and the natural frequencies of each system are estimated. The other is the proportional damping model which is used for the finite element method is examined. Coefficients of the model are estimated.

Key Words : Vibration, Welding, Damping Ratio, Natural Frequency, Lumped Mass Model, Proportional Damping

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。構造物の内部に溶接が用いられることが多いために、このような構造物の振動解析をする場合には振動特性を明らかにし、モデル化をすることが重要となる。

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1次振動特性に与える影響について検討した[4]。さらに、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、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[5]。

本報告では、前報[5]の結果を用いて溶接構造物の振動解析に用いるためのモデルについて検討する。モデルとしては、集中質量系および比例減衰を考慮したモデルについて検討した。集中質量系では1次および2次振動を対象としているので2自由度系でモデル化した場合のパラメータの特徴について検討した。比例減衰を考慮したモデルでは、係数の値について検討した。

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[5]。

2.1 実験方法

図1に示した試験片を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。(1)溶接部のない試験片(母材)で測定し、(2)同じ試験片を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て(溶接試験片)測定した。同一寸法の試験片10本を作製した。開先形状はV型とし、突合せ溶接をした。試験片の自由端の応答を測定し、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。減衰比は

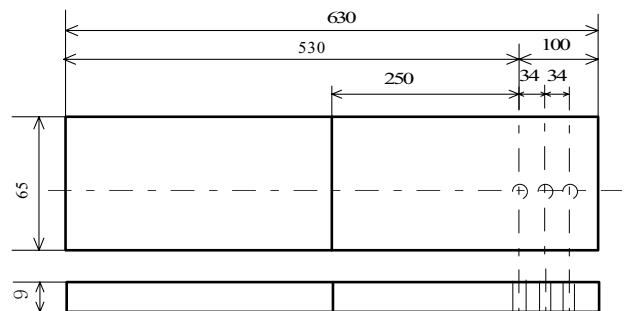


Fig.1 Size of specimen (mm)

(I)対数減衰率を用いる方法, (II)半パワー法, (III)共振点での応答と入力振幅の比を用いる方法で求めた. 固有振動数は入力加速度を1Gで一定として周波数掃引によって測定した.

2.2 実験結果

加振実験によって1次振動および2次振動に対する減衰比 ζ および固有振動数 f_n を求めた. さらに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} の値を求めた. 表1にそれぞれの平均値および変動係数(標準偏差と平均値の比)を示す. 表中の試験片(1)は母材, (2)は溶接試験片を表し, 減衰比測定法の(I), (II), (III)は上記の測定法を表す. 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. また, それぞれの測定値に対する変動係数が比較的小さいことから, 10本の試験片に対して実験で得られた値を基にモデル化を考える.

3. 溶接構造物のモデル化

溶接構造物の1次および2次振動の減衰比と固有振動数を表すことができるモデルとして, 2自由度系と比例減衰を考慮したモデルについて検討した.

3.1 2自由度系モデル

図2に示す集中質量系である2自由度系モデルについて考える. 上質点が図1の試験片の自由端側, 下質点が固定端側を表している. 2自由度系では上質点系の減衰比および固有振動数それぞれ ζ_U および f_U , 下質点系の減衰比および固有振動数それぞれ ζ_L および f_L , 上質点と下質点の質量比 $\gamma=m_U/m_L$ がパラメータとなる. ここでは集中質量系であることを考えて $\gamma=0.5$ とした[6]. f_U および f_L は次式から得られる.

$$\begin{cases} f_L = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{A+B}{2(1+\gamma)}} \\ f_U = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{A+B}{2}} \end{cases} \quad (1)$$

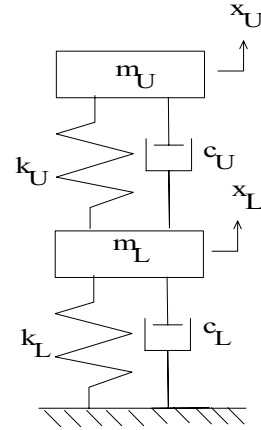


Fig.2 Two-degree-of-freedom system

ここで, $A=\omega_1^2+\omega_2^2$, $B=\sqrt{A^2-4(1+\gamma)\omega_1^2\omega_2^2}$, $\omega_1=2\pi f_{n1}$, $\omega_2=2\pi f_{n2}$ であり, f_{n1} および f_{n2} はそれぞれ1次および2次固有振動数を表す. それぞれの系の減衰比は,

$$\begin{cases} \zeta_L = \frac{C_1C_6 - C_3C_4}{C_1C_5 - C_2C_4} \\ \zeta_U = \frac{C_2C_6 - C_3C_5}{C_1C_5 - C_2C_4} \end{cases} \quad (2)$$

ここで, $C_1=2\omega_L$, $C_2=2\omega_U(1+\gamma)$, $C_3=2\zeta_1\omega_1+2\zeta_2\omega_2$, $C_4=2\omega_L\omega_U^2$, $C_5=2\omega_L^2\omega_U$, $C_6=2\zeta_1\omega_1\omega_2^2+2\zeta_2\omega_1^2\omega_2$, $\omega_U=2\pi f_U$, $\omega_L=2\pi f_L$ である.

式(1)から, f_U と f_L の値がそれぞれ2つ得られる. この場合, 下質点系が試験片の固定端を含むことから, 下質点系のばね定数が上質点系のばね定数よりも大きいと考えられる. この条件を満足するような f_U と f_L の値を採用した.

式(1)および式(2)から10本の試験片に対して ζ_U , ζ_L , f_U , f_L の値を求めた. 表2にそれぞれの系の減衰比および固有振動数の期待値および変動係数を示す. それぞれの期待値の右の欄には溶接試験片の母材に対する値の比を示す. 上質点系の溶接試験片の減衰比 ζ_U は母材よりやや大きい. 下質点系の溶接試験片の減衰比 ζ_L は母材の減衰比と比較して約50%大きい. 固有振動数は上質点系も下質点系もほぼ同じである. この場合, 下質点系は試験片中央部付近の挙動を表している. この部分は2次振動モードの腹に相当する. 実験で2次振動に対する溶接試験

Table 1 Expected value and coefficient of variation damping ratio and natural frequency of specimen

Method		(I)		(II)		(III)		$f_n(\text{Hz})$	f_{nw}/f_{nb}	
Mode	Specimen	ζ	ζ_w/ζ_b	ζ	ζ_w/ζ_b	ζ	ζ_w/ζ_b			
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

Table 2 Expected value and coefficient of variation of damping ratio and natural frequency of lower system and upper system

Method		(I)		(II)		(III)			
Mode	Specimen	ζ	ζ_w/ζ_b	ζ	ζ_w/ζ_b	ζ	ζ_w/ζ_b	$f_n(\text{Hz})$	f_{nw}/f_{nb}
Lower system	(1) Mean	1.22×10^{-2}		2.93×10^{-2}		7.27×10^{-2}		170.6Hz	
	COV	0.122		0.429		0.082		0.007	
	(2) Mean	1.30×10^{-2}	1.08	5.04×10^{-2}	1.82	1.14×10^{-1}	1.57	170.0Hz	1.00
	COV	0.094	0.086	0.322	0.270	0.056	0.076	0.010	0.005
Upper system	(1) Mean	6.33×10^{-2}		2.20×10^{-2}		1.38×10^{-2}		28.3Hz	
	COV	0.112		0.141		0.086		0.011	
	(2) Mean	6.98×10^{-2}	1.12	2.24×10^{-2}	1.04	1.45×10^{-2}	1.05	28.8Hz	1.02
	COV	0.101	0.181	0.065	0.204	0.093	0.080	0.010	0.011

片の減衰比が母材よりも約 45%大きいことから、2 次モードに影響を及ぼす下質点系の溶接試験片の減衰比が大きくなると考えられる。

3.2 比例減衰モデル

有限要素法による解析において、減衰行列を次式のように比例減衰で表すことがある[7].

$$C = \alpha M + \beta K \quad (3)$$

ここで、 C は減衰行列、 M は質量行列、 K は剛性行列を表す。図 2 のモデルでは α および β はそれぞれ次式で得られる。

$$\begin{cases} \alpha = \frac{4\pi(\zeta_1 f_1 f_2^2 - \zeta_2 f_1^2 f_2)}{f_2^2 - f_1^2} \\ \beta = \frac{\zeta_2 f_2 - \zeta_1 f_1}{\pi(f_2^2 - f_1^2)} \end{cases} \quad (4)$$

10 本の試験片で得られた実験結果に対して α および β の値を求め、期待値と変動係数を求めそれぞれ表 3 および表 4 に示す。それぞれの右の欄には溶接試験片で求めた値と母材で求めた値の比を示す。

減衰比測定法 (III) では α の値を求めることができなかったため、他の方法で求めた値から検討すると、溶接試験片に対する α の値は母材とほぼ同じである。溶接試験片に対する β の値は母材よりも約 50%大きい。

4. 結言

溶接は多くの構造物に用いられている。溶接部を含む構造物の振動解析をする場合にはその振動特性を明らかにし、モデル化をすることが重要となることから、溶接構造物の振動解析に用いるためのモデルについて検討した。モデル化においては溶接部のない試験片（母材）および母材の中央部を切断して溶接した溶接試験片を用いた実験で得られた 1 次および 2 次振動に対する減衰比および固有振動数を基にした。試験片の一端はボルトで固定し、他端は自由支持とした。モデルとして、集中質量系および比例減衰を考慮したモデルについて検討した。集中質量系では 1 次および 2 次振動を対象としているので 2 自由度系でモデル化した場合のパラメータの特徴について検討した。比例減衰を考慮したモデルでは、係数の値について検討した。得られた結果を要約すると以下のようなになる。

- 1) 2自由度系モデルでは、試験片の固定端を含む下質点系の溶接試験片の減衰比は母材と比較して約50%大きい。固有振動数は変わらない。
- 2) 比例減衰を考慮したモデルでは、溶接試験片に対する β （剛性行列に対する係数）の値が母材よりも約50%大きい。溶接試験片に対する α （質量行列に対する係数）の値は母材とほぼ同じである。

Table 3 Expected value and coefficient of variation α

Method		(I)		(II)		(III)	
Specimen		α	α_w/α_b	α	α_w/α_b	α	$ \alpha_w - \alpha_b $
(1)	Mean	1.51		5.95		0.60	
	COV	0.131		0.311		0.847	
(2)	Mean	1.69	1.17	4.86	0.91	-1.71	2.32
	COV	0.207	0.290	0.231	0.426	0.367	0.256

Table 4 Expected value and coefficient of variation β

Method		(I)		(II)		(III)	
Specimen		β	β_w/β_b	β	β_w/β_b	β	β_w/β_b
(1)	Mean	2.21×10^{-5}		5.38×10^{-5}		1.37×10^{-4}	
	COV	0.146		0.353		0.112	
(2)	Mean	2.38×10^{-5}	1.08	9.43×10^{-5}	1.94	2.13×10^{-4}	1.57
	COV	0.062	0.094	0.310	0.311	0.004	0.066

5. 参考文献

- [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, 24-8,9, pp.331-336, 1955
- [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, 25-3, pp.169-172, 1956
- [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, pp.351-363, 1974
- [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, pp.1-5, 1999
- [5] 青木繁: 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), 東京都立産業技術高等専門学校紀要, 6, CD-ROM, 2012
- [6] 戸川隼人: 有限要素法による振動解析, サイエンス社, pp.14-23, 1975
- [7] 長松昭男: モード解析, 培風館, pp.169-170, 1985