

衝撃作用を受ける鋼製片持ち梁に適用する相似則に関する一考察

防衛大学校 正会員 ○手嶋 良祐
 防衛大学校 正会員 別府万寿博
 防衛大学校 正会員 市野 宏嘉

1. 緒言

衝撃作用を受ける構造物の性能照査は実規模実験により行われることが多い。一方で、縮小模型実験により性能照査を行うことができれば経済性や効率性および実験ケースの増加による照査結果の信頼性の向上が期待できる。著者らは縮小模型実験を実規模実験と同一材料、かつ重力場で実施可能となる相似則を提案した^{1),2)}。また、提案相似則を適用した片持ち梁と鋼球の衝突実験を行い、片持ち梁の変位等に対する相似則の適用性を検討した。本研究は、前述の衝突実験をモデル化した数値解析により、相似則の適用性を検討したものである。

2. 提案相似則の概要

提案相似則は、幾何学的長さとは異なる次元として扱うことを特徴としており、表-1に示すように、変位 u に対して幾何学的長さの縮尺 S と異なる相似比 S^2 を設定している。これにより、表-1に示したように加速度や物性値に関わるヤング係数、比重および密度の相似比は「1」となり、その他の物理量も矛盾なく相似比を設定できる。例として実規模と縮尺 S の縮小模型の片持ち梁の先端に外力 $F=\rho Vg$ を与えたときに発生する変位 u を考える。実規模と縮小模型の変位 u および u' は式(1)および式(2)により求められ、その比は S^2 となることがわかる。

$$u = \frac{\rho V g l^3}{3EI} \quad (1)$$

$$u' = \frac{\rho' V' g' l'^3}{3E'I'} = \frac{\rho \cdot S^3 V \cdot g \cdot S^3 l^3}{3E \cdot S^4 I} = S^2 u \quad (2)$$

ここで、 ρ は密度、 V は体積、 g は重力加速度、 E はヤング係数、 I は断面二次モーメント、 l は梁長、 x は変位を表す。「'」は縮小模型における値を示す。提案相似則では ρ 、 g 、 E は同一材料かつ重力場での値のため、実規模と縮小模型で同じ値となる。

表-1 各種物理量と相似比

物理量	次元	相似比	物理量	次元	相似比
縮尺		S	加速度	UT ⁻²	1
長さ	L	S	ひずみ	UL ⁻¹	S
変位	U	S ²	応力	MUL ⁻² T ⁻²	S
比重	-	1	力	MUT ⁻²	S ³
密度	ML ⁻³	1	エネルギー	MU ² T ⁻²	S ⁵
質量	M	S ³	ヤング係数	ML ⁻¹ T ⁻²	1
時間	T	S	角速度	T ⁻¹	1/S
速度	UT ⁻¹	S	振動数	T ⁻¹	1/S

3. 実験概要

実規模および縮尺 $S=1/2$ の片持ち梁と鋼球の衝突実験を行った。実験ケースは表-2に示すとおりである。実験方法及び計測位置を図-2に示す。鋼球は自由端から100mmの位置に落下させ、ハイスピードカメラにより自由端の運動を動画撮影し、動画の画像解析により自由端の鉛直変位を計測した。ひずみは固定端から80mmの位置にひずみゲージを貼付し、計測した。実験は各ケースを3回ずつ実施した。

4. 解析モデル

解析モデルの概要を図-3に示す。片持ち梁はソリッド要素でモデル化した。片持ち梁に用いる鋼板の材料モデルは等方弾塑性体のバイリニアモデル（ヤング係数 $E=186000\text{N/mm}^2$ 、降伏点 235N/mm^2 ）とした。鋼球もソリッド要素でモデル化し、大きさは最大で1辺6.4mmの6面体である。鋼球の材料モデルは、鋼板と同様に等方弾塑性体のバイリニアモデル（ヤング係数 $E=208000\text{N/mm}^2$ 、降伏点 1570N/mm^2 ）とした。接触モデルはペナルティ法を用い、ペナルティ係数は0.1とした。静および動摩擦係数は摩擦係数試験より、それぞれ0.3および0.19とした。縮小モデルの要素の形状は縮尺と同様に実規模モデルの1/2とした。解析の初期条件として、実験と同様に鉛直下向きに重力を作用させ、片持ち梁の初期たわみを発生させた。そのうえで、片持ち梁の衝突位置から鉛直上方に鋼球の落下高さを設定し、静止状態から自由落下させた。片持ち梁における衝突位置は実験と同じ

キーワード 縮小模型, 相似則, 衝撃, 片持ち梁, 次元

連絡先 〒102-0083 東京都千代田区麹町5-7-2 バルテクス株式会社 TEL03-3556-0470

表-2 実験および解析ケース

実験ケース	縮尺	片持ち梁形状	鋼球直径	落下高さ
A-1	実規模	幅：200mm 厚さ：12mm 梁長：1200mm	φ 80mm	80mm
A-2				320mm
A-3				640mm
A-4			φ 40mm	80mm
A-5				320mm
A-6				640mm
B-1	縮小 モデル (S=1/2)	幅：100mm 厚さ：6mm 梁長：600mm	φ 40mm	20mm
B-2				80mm
B-3				160mm
B-4			φ 20mm	20mm
B-5				80mm
B-6				160mm

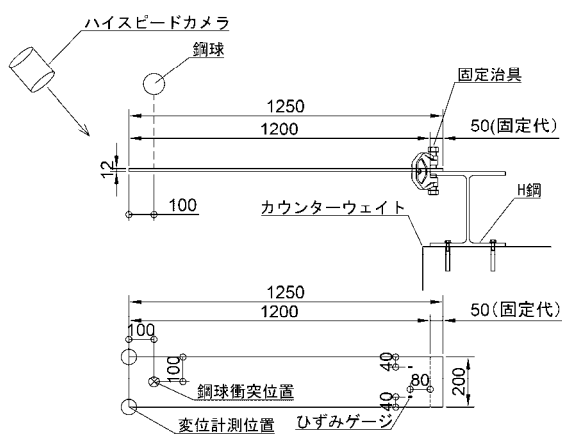


図-2 実験方法および計測位置 (単位：mm)

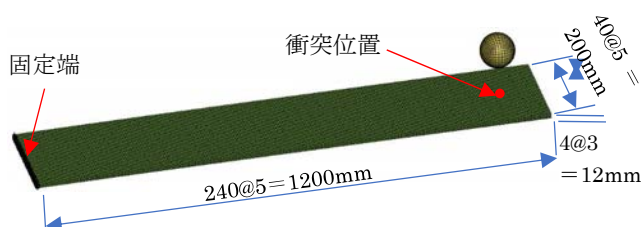


図-3 実規模解析モデルの概要

自由端から 100mm の位置である。解析には ANSYS 社の LS-DYNA を用いた。

5. 解析結果および考察

実験および解析で得られた自由端の鉛直変位-時間関係の一例として A-3 と B-3 を比較した結果を図-4 に示す。縮小模型の値は実規模換算値である。図中横軸の原点は、鋼球と片持ち梁の衝突時刻を示し、縦軸の高さ方向の変位は片持ち梁の自重による初期たわみが発生した状態を原点としている。図から実験値と解析値はよい一致を示している。実験および解析による実規模と縮小模型の振幅の誤差はそれぞれ 10.8% および 1.2% であり、初期の周期の誤差も 6.8% および 1.3% であった。すなわち、実験、解析のいずれも実規模と縮小模型での応答がほぼ一致し、

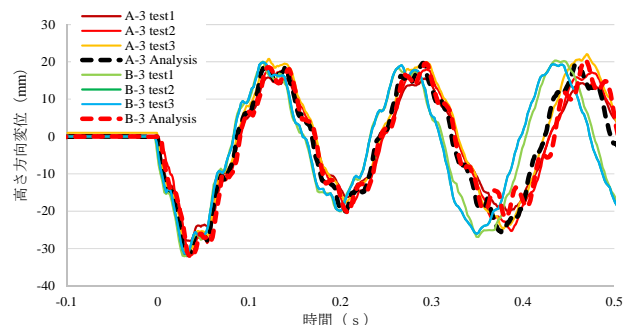


図-4 自由端の鉛直変位-時間関係

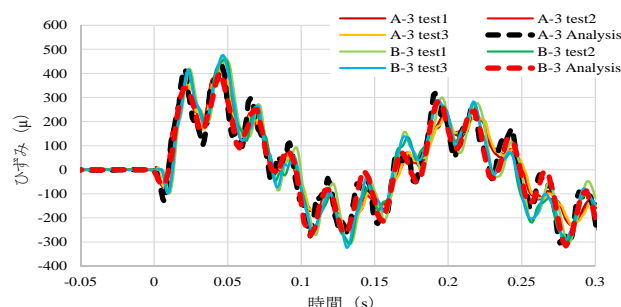


図-5 梁上面のひずみ-時間関係

相似則が成立していると考えられる。

梁上面のひずみ-時間関係の一例として A-3 と B-3 を比較した結果を図-5 に示す。図中横軸の原点は、ひずみの発生時刻を、縦軸は自重による初期ひずみ値を原点に補正している。解析結果にはノイズが含まれたため、データ 3 点間で移動平均した。実験値および解析値の比較から、波形は高次の波形もほぼ一致している。また、実験および解析による実規模と縮小模型のひずみの誤差は 5.1% および 6.7% であり、実験、解析のいずれも実規模と縮小模型での応答がほぼ一致しており、相似則が成立していると考えられる。

6. 結言

本研究では、提案相似則を適用した実規模と縮小模型の片持ち梁と鋼球の衝突実験をモデル化した数値解析を行って、実験と同様に相似則の適用性を確認した。

参考文献

- 1) 手嶋良祐, 別府万寿博, 市野宏嘉, 福永一基: 重力場における縮小模型実験に対する相似則の提案と検証, 構造工学論文集, Vol. 67A, pp.826-837, 2021.
- 2) 手嶋良祐, 別府万寿博, 市野宏嘉: 衝撃作用を受ける構造物の縮小模型実験に用いる相似則の適用性に関する基礎実験, 令和 3 年度土木学会全国大会第 76 回年次学術講演会, I-221, 2021.