

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

ベルテクス株式会社 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

近年、土木・建築構造物の設計法は仕様設計から性能設計へと移行している中、衝撃作用を受ける構造物の性能照査は実規模実験を要求されることが多い。この性能照査を縮小模型実験で実施できれば、経済性や効率性が向上するとともに実験回数を増やすことも可能になり、性能照査の高精度化につながる。縮小模型実験では実験パラメータを決めるための相似則が必要となるが、実規模と同一材料、かつ重力場で実施する縮小模型実験に関する相似則に関する研究は少ないことが縮小模型実験を性能照査に用いる上での問題点として挙げられる。本研究は、同一材料、かつ重力場において、次元解析から導き出した長さの基本単位を緩和した相似則¹⁾が弾性範囲の衝撃実験において適用できることを考察したものである。

2. 提案する相似則の概要

従来、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としてはフルード則とレプリカ則がある。表-1の(A)および(B)に相似則の各種物理量の相似比を示すが、それぞれ密度および加速度の相似比が実規模実験と同一ではない。したがって、縮小模型実験を実規模実験と同一材料、かつ重力場において実施することは力学的な矛盾が生じていると考えられ、性能照査に用いることは難しい。

江守らは、実規模実験と縮小模型実験において、現象が相似となる場合、それぞれ支配的に作用している力の比のピナナンバーが一致すると述べている。この理論を用いて、実規模と縮尺 S の縮小模型の片持ち梁の変形について相似を考える。相似であれば式(1)の左辺が示す、実規模の片持ち梁の自由端に重錘を配置した場合の外力と変形による弾性力の比のピナナンバー π_1 と、右辺の縮小模型のピナナンバー π_1' は等しくなるはずである。

表-1 各相似則における各種物理量の相似比

各種物理量	記号	(A), (B) 次元	(A)	(B)	(C)	(C)
			フルード則	レプリカ則	次元	提案相似則
幾何学的縮尺	S	-	S	S	L	S
長さ	L, l	L	S	S	L	S
変位	u, x	L	S	S	U	S^2
比重・密度	ρ	ML^{-3}	$1/S$	1	ML^{-3}	1
質量	M, m	M	S^2	S^3	M	S^3
時間	T, t	T	\sqrt{S}	S	T	S
速度	v	LT^{-1}	\sqrt{S}	1	UT^{-1}	S
加速度	a, g	LT^{-2}	1	$1/S$	UT^{-2}	1
ひずみ	ε	LL^{-1}	1	1	UL^{-1}	S
応力	σ	$ML^{-1}T^{-2}$	1	1	$MUL^{-2}T^{-2}$	S
力	P, F	MLT^{-2}	S^2	S^2	MUT^{-2}	S^3
エネルギー	E	ML^2T^{-2}	S^3	S^3	MU^2T^{-2}	S^5
ヤング係数	Es, Ec	$ML^{-1}T^{-2}$	1	1	$ML^{-1}T^{-2}$	1
角速度	ω	T^{-1}	$1/\sqrt{S}$	$1/S$	T^{-1}	$1/S$
振動数	f	T^{-1}	$1/\sqrt{S}$	$1/S$	T^{-1}	$1/S$

$$\pi_1 = \frac{\rho V g}{3EI} = \frac{\rho' V' g'}{3E'I'} = \pi_1' \quad (1)$$

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し、 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ことから、式(2)に示す通り、幾何学的長さに関する物理量 l 、 V 、 I は、相似比をそれぞれ S 、 S^3 、 S^4 、変位 x に対する相似比を S^2 とすれば成立する。よって、相似則として基本単位である長さ L を幾何学的長さ L と変位 U の2つの基本単位に分けて相似比を設定すればよい。この相似比を基に各種物理量の相似比を検討すると、表-1の(C)に示す相似比が設定できる。なお、提案する相似則はひずみおよび応力の相似比が S となることから、弾性範囲においてのみ適用可能である。

$$\pi_1' = \frac{\rho' V' g'}{3E'I' x'} = \frac{\rho \cdot S^3 V \cdot g}{3E \cdot S^4 I \cdot S^2 x} = \frac{\rho V g}{3EI} = \pi_1 \quad (2)$$

キーワード 相似則, 相似則の緩和, 衝撃作用, 弾性域

連絡先 〒102-0083 東京都千代田区麹町 5-7-2 ベルテクス株式会社 TEL 03-3556-0470

3. 実験概要

実規模と縮尺 $S=1/2$ の縮小模型において、鋼球を自由落下させ、片持ち梁の鋼板と衝突させる実験を実施した。検証項目は鋼球および鋼板の鉛直方向の変位とした。表-2 に示す通り、実験に用いる鋼球は実規模において $\phi 40\text{mm}, \phi 80\text{mm}$ の2種類とし、材質は SUJ-2、鋼板は実規模の形状が幅 200mm×厚さ 12mm×スパン 1200mm、材質は SS400 である。実規模の鋼球の落下高さ h は 80mm, 320mm, 640mm とし、鋼球と鋼板の衝突位置は自由端から 100mm の位置とした。実験は各ケースに対して3回ずつ実施した。縮小模型における落下高さ h は、次元が U となるため、相似比には $S^2=1/4$ を用いた。ハイスピードカメラ (IDT 社, OS8-S2, 1600×1200 画素 4000fps) を用いて鋼球と鋼板の片持ち梁の鉛直方向の運動を撮影し、高精度動作解析ソフトウェア ViewPoint (Glenallan Technology 社) を用いて画像解析により鉛直変位を計測した。実験の概要図を図-1 に示す。

4. 実験結果および考察

一例として、A-2 および A-2 を縮小した B-2 の鋼球および鋼板の鉛直変位を、それぞれ図-2 に示す。なお、縮小模型の鉛直変位および時間は、実規模換算している。B-2 の鋼球の鉛直変位は、3回とも A-2 とほぼ同じ挙動を示している。A-2 と B-2 の実験結果を比較すると、時刻 0.16s および 0.23s における2回

表-2 実験ケース

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	$\phi 80\text{mm}$	80mm
A-2				320mm
A-3				640mm
A-4			$\phi 40\text{mm}$	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	$\phi 40\text{mm}$	20mm
B-2				80mm
B-3				160mm
B-4			$\phi 20\text{mm}$	20mm
B-5				80mm
B-6				160mm

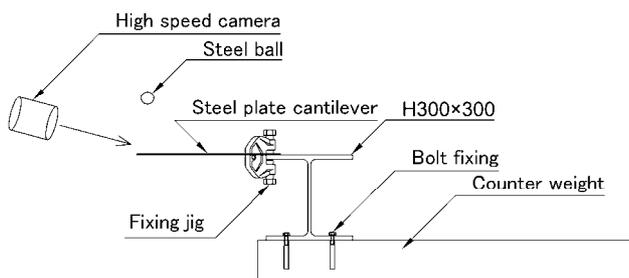
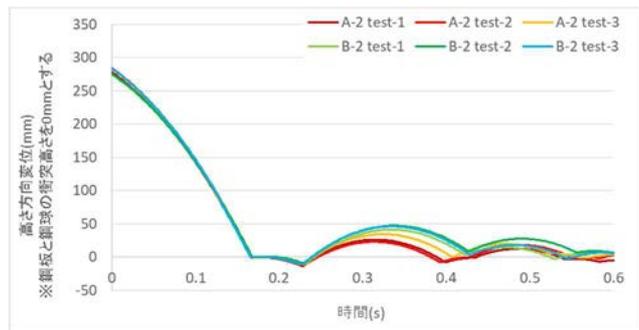
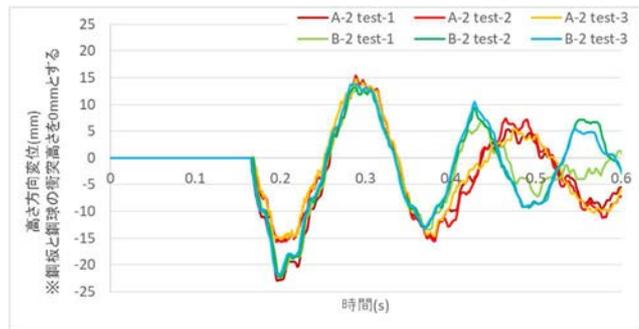


図-1 実験概要



(a) 鋼球



(b) 鋼板の自由端

図-2 鋼球と鋼板の自由端の鉛直変位

の衝突の時間間隔はほぼ一致しており、変位量もほぼ等しい。鋼板の鉛直変位は鋼球の鉛直変位と同様に、B-2 の3回とも A-2 とほぼ同じ挙動を示している。時刻 0.16s において鋼球が鋼板と初めて衝突した後、時刻 0.20s 付近の振幅は A-2 と B-2 において差があるが、その後は時刻 0.40s まで鋼板の振幅や振動波形はほぼ一致している。誤差が生じにくい衝突直後の鋼球と鋼板の変位や再衝突の時刻は A-2 と B-2 においてほぼ一致しており、提案する相似則が成立していると判断される。A-2 と B-2 の実験結果にずれが生じる要因は、鋼球および鋼板のヤング係数のばらつき、固定端における固定治具の固定位置や固定部の締め付け強さの微小な違い、鋼球と鋼板の衝突部に局所的に生じた塑性変形量の差が考えられる。

5. 結言

本研究は、衝撃作用を受ける片持ち梁に対して、同一材料、かつ重力場において、次元解析から導き出した長さの基本単位を緩和した相似則の適用性を考察したものである。今後は数値解析を実施し、相似則の検証をおこなう必要がある。

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(掲載決定), 2021