

重力場における低速衝突実験に適用する相似則に関する実験的研究

Experimental study of a similarity rule for scaled low-speed collision tests under gravity field

手嶋良祐*, 別府万寿博**, 市野宏嘉***
Ryosuke Teshima, Masuhiro Beppu, Hiroyoshi Ichino

*防衛大学校 理工学研究科後期課程 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1 丁目 10-20)

**博 (工), 防衛大学校教授 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1 丁目 10-20)

***博 (工), 防衛大学校准教授 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1 丁目 10-20)

キーワード: 衝突問題, 相似則, 重力場, 縮小模型実験

Keywords: impact problem, similarity rule, gravity field, scaled test

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. 性能設計における性能照査手法は実験, 数値解析, 簡易の方法によって, あるいはこれらを組合せて行われる. 性能照査を実規模実験で行う構造物の例として, 衝突作用を受ける構造物が挙げられる. 落石対策構造物は, 速度 5~25m/s の落石衝突を受ける構造物であり, 設計指針である落石対策便覧¹⁾において実規模実験により構造安全性に関する性能照査を行うことが定められている. また, 剛性車両防護柵は, 速度 7~28m/s の車両による衝突作用を受ける構造物であるが, 防護柵の設置基準・同解説²⁾においては, 強度, 変形, 車両の誘導性能等に関する性能照査を実車衝突実験で行い, 安全性を確認することが求められている. このような実規模実験を行う場合, 実験設備や経済性の観点から実験条件や回数は限定的とならざるを得ない. そのため, 性能照査としての実験条件の妥当性や実験結果の信頼性が十分ではない可能性がある. これに対し, 実規模実験と相似性が高い縮小模型実験を行うことができれば, 性能照査のための実験条件のパラメータの検討や実験回数を増加させることが可能になり, 性能照査の精度や実験結果の信頼性が向上すると考える. 一方で, 縮小模型実験を行う場合には, 実規模実験における試験体の形状, 作用および応答値に対して相似則³⁾⁶⁾を適用する必要がある. しかし, 衝突作用を受ける構造物の縮小模型実験へ適用する相似則に関する検討例は非常に少ない.

既往の研究では, 縮小模型実験に適用する相似則として重力場の振動問題に適したフルード則⁷⁾⁹⁾や主に地盤や土構造物等の力学的挙動に使用されることが多いレプリカ則⁹⁾が用いられている. 酒巻ら⁸⁾や政枝ら⁹⁾は縮尺模

型に対する重錘衝突実験によりフルード則とレプリカ則の適用性について検討した結果, フルード則の適用性が高いことを報告している. ただし, 両者とも実験条件がフルード則の相似比と異なる点があるにもかかわらず, その適用性が高い理由は説明されていない. このように, フルード則やレプリカ則を適用した縮小模型実験は, 重力場において実規模実験と同じ材料を用いて実験した場合, 実験条件と実験結果を理論的に結びつける説明が困難であり, その結果を実規模構造物の性能評価として用いることは難しい.

機械分野では, 神宮ら¹⁰⁾がラプラス変換法と高速フーリエ変換法を用いて, 片持ち梁の任意の位置に球状物体が衝突する場合の衝撃応答の相似則を検討しているが, 縮小模型の相似比に寸法の縮尺が適用されておらず, 実規模の縮小模型となっていない. そこで著者らは弾性範囲において, 実規模構造物と同じ重力場, 同じ実験材料を採用し, 形状をそのまま縮小して縮小模型実験ができる相似則¹¹⁾を提案した. この相似則を用いて, 実規模と複数の縮尺を設定した片持ち梁の静的載荷実験および自由振動実験を行い, 提案した相似則が変位や振動特性において適用可能であることを確認した. 本研究は, 提案した相似則が衝突現象へ適用可能であるかを調べるため, 実規模および縮小模型の片持ち梁に, 鋼球を衝突させる実験を行ったものである. 実験結果から鋼球の衝突速度, 変位および片持ち梁の自由端における変位と固定端付近のひずみなどに対する相似則の適用性を考察した.

2. 提案した相似則の概要

2.1 パイナンバーを用いた相似則の導出

江守ら²⁾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パイナンバーが一致すると述べている。図-1に示すように、実規模と縮尺 S の縮小模型の片持ち梁自由端に、重錘による荷重を与えた場合の、外力と片持ち梁の変形について相似を考える。両者が力学的に相似であれば式(1)の左辺が示す実規模の片持ち梁における外力と変形による弾性力の比のパイナンバー π_1 と、右辺の縮小模型のパイナンバー π_1' は等しくなる。

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

ここに、 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 はスパン長、 u は変位を表し、「 $'$ 」は縮小模型における値を示す。提案した相似則は、同じ重力場、同じ実験材料を採用するため、式(1)における長さに関わる物理量である l 、 V 、 I および u の相似比を調整したものである。 l 、 V 、 I は片持ち梁の幾何学的長さに関わる値であり、外力による変形や衝突による振動が発生した場合でも一定の値を取る定数である。一方、変位 u は外力の値によって変わる物理量であり、自由振動する場合、時間による一階微分で速度、二階微分で加速度となる。つまり、幾何学的長さとは変位は同じ長さの単位で表されるが、異なる性質を持つ値と考えられる。次元は物理量の種類を分類するための概念であり、一般的に力学の物理量は、質量 M 、長さ L 、時間 T の3つの基本次元で構成される¹²⁾。先に述べたように、幾何学的長さとは変位が異なる性質を持つ物理量であるということは、物理量の次元が異なっていると考えられる。そこで、長さ L の次元を幾何学的長さ L と変位 U の2つの次元に分けて、それぞれ異なる相似比を設定するという“相似則の緩和”¹²⁾を行った。これにより、式(1)の右辺は式(2)に示すように幾何学的長さに関連する l' 、 V' 、 I' にはそれぞれ S 、 S^3 、 S^4 を、変位 u' には幾何学的長さとは異なる相似比 S^2 を与えることで π_1' とパイナンバー π_1 は等しくなり、相似が成立する。

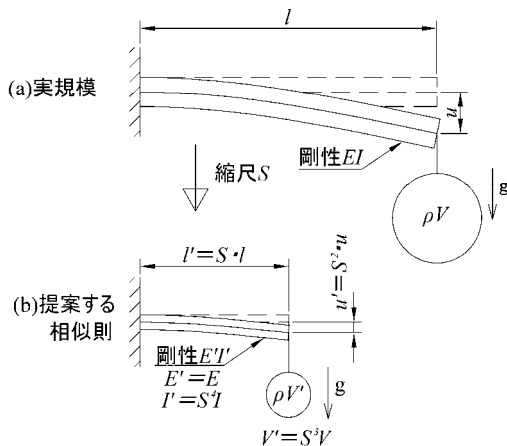


図-1 実規模および縮小模型実験による変形量

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

この相似比を基に各種物理量の相似比を計算した結果を、フルード則およびレプリカ則の相似比とともに表-1に示す。提案した相似則は、加速度、密度およびヤング係数に関して相似比が1となっていることから、縮小模型実験を実規模実験と同じ重力場かつ同じ材料を用いて行うことが可能となる。一方で、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。

2.2 静的載荷実験および自由振動実験による検証

(1) 実験の概要

既報¹¹⁾では、表-2に示す縮尺の異なる5つのタイプの片持ち梁の試験体と重錘を用いて、図-2に示すような静的載荷実験および自由振動実験を行った。実験における計測項目は変位およびひずみとした。図-3に示すように、変位は片持ち梁の自由端から5mm内側をレーザー変位計で計測し、ひずみは片持ち梁の上下面に、固定端から80mm、幅方向は端部から40mmの位置に1箇所ずつひずみゲージを貼り、計4箇所計測した。

(2) 実験結果および考察

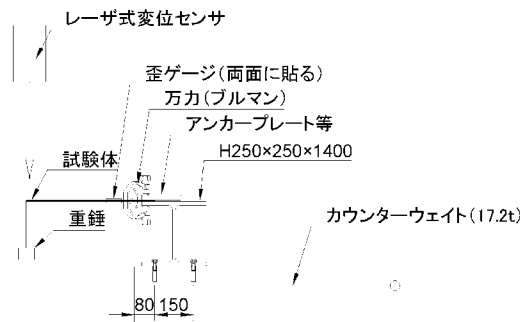
片持ち梁の自由端に重錘を設置し、静的に載荷した時の各試験体の変位 u および各試験体表面のひずみ ε (上面ひずみの平均値) を表-3に示す。表からそれぞれの相似比の誤差を見ると、いずれもほぼ一致している。また、重錘を切り離すことで発生する自由振動の角速度 ω と振幅 D は表-4のそれぞれの相似比の誤差を見ると、いずれもほぼ一致している。相似比の誤差において、縮尺1/4である試験体Aの相似比の誤差が他の縮尺の誤差と比べて大きくなっているが、これは、縮尺が小さいた

表-1 物理量と各相似則における相似比の比較

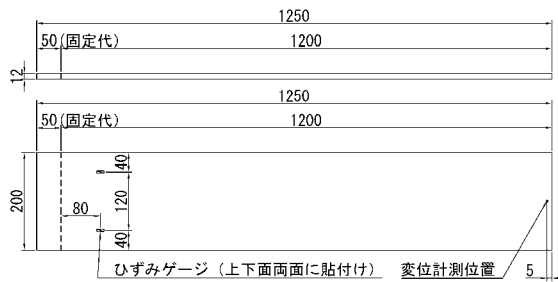
各種物理量	記号	(A), (B) 次元	(A)	(B)	(C) 次元	(C) 提案相似則
			フルード則	レプリカ則		
幾何学的縮尺	S	-	S	S	L	S
長さ	L, l	L	S	S	L	S
変位	u, x	L	S	S	U	S^2
比重・密度	ρ	ML^{-3}	$1/S$	1	ML^{-3}	1
質量	M, m	M	S^2	S^3	M	S^3
時間	T, t	T	\sqrt{S}	S	T	S
速度	v	LT^{-1}	\sqrt{S}	1	UT^{-1}	S
加速度	a, g	LT^{-2}	1	$1/S$	UT^{-2}	1
ひずみ	ε	LL^{-1}	1	1	UL^{-1}	S
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}	$1/S$

表一 片持ち梁の形状寸法および使用する重錘

試験体タイプ		A	B	C	D	E(実規模)
縮尺S		1/4(2/8)	3/8	1/2(4/8)	3/4(6/8)	1/1(8/8)
幅	B mm	50	75	100	150	200
梁スパン	l mm	300	450	600	900	1200
厚さ	t mm	3.0	4.5	6.0	9.0	12.0
断面積	A mm ²	150	338	600	1350	2400
断面係数	Z mm ³	75.0	253.1	600.0	2025.0	4800.0
断面二次モーメント	I mm ⁴	112.5	569.5	1800.0	9112.5	28800.0
重錘の質量	m kg	0.250	0.844	2.000	6.750	16.000
重錘の重量	P N	2.452	8.274	19.613	66.195	156.906



図一 片持ち梁の自由振動計測方法



図三 静的荷重実験計測位置

表三 片持ち梁の変位, ひずみの理論解と実験結果の相似比の比較

試験体タイプ		A	B	C	D	E(実規模)
縮尺S		1/4(2/8)	3/8	1/2(4/8)	3/4(6/8)	1/1(8/8)
固定端から変位計測位置までの距離	mm	295	445	595	895	1195
梁スパン/計測位置		0.983	0.989	0.992	0.994	0.996
(a) 理論解	変位 u mm	0.956	2.170	3.874	8.752	15.592
	相似比 (S^2)	0.061	0.139	0.248	0.561	1.000
(b) 実験結果(平均値)	変位 u mm	1.203	2.353	4.137	9.070	16.467
	相似比 (S^2)	0.073	0.143	0.251	0.551	1.000
	変位の相似比の誤差 (%)	19.1%	2.7%	1.1%	1.9%	---
(c) 理論解	上面ひずみ ϵ	4.36E-05	6.54E-05	8.72E-05	1.31E-04	1.74E-04
	相似比 (S^{-1})	0.250	0.375	0.500	0.750	1.000
(d) 実験結果(平均値)	上面ひずみ ϵ	4.71E-05	6.39E-05	8.46E-05	1.21E-04	1.68E-04
	相似比 (S^{-1})	0.281	0.381	0.505	0.725	1.000
	ひずみの相似比の誤差 (%)	12.4%	1.7%	1.0%	3.4%	---

表四 片持ち梁の自由振動における角速度および振幅

試験体タイプ		A	B	C	D	E(実規模)
縮尺S		1/4(2/8)	3/8	1/2(4/8)	3/4(6/8)	1/1(8/8)
(a) 理論解	ばね定数 k N/mm	2.5000	3.7500	5.0000	7.5000	10.0000
	相似比 (S)	0.250	0.375	0.500	0.750	1.0000
	角速度 ω rad/s	170.8	113.8	85.4	56.9	42.7
	相似比 (S^{-1})	4.000	2.667	2.000	1.333	1.0
	振幅 D mm	0.956	2.170	3.874	8.752	15.5920
	相似比 (S^2)	0.061	0.139	0.248	0.561	1.0000
(b) 実験結果(平均値)	角速度 ω rad/s	159.2	111.7	83.8	55.9	41.5
	相似比 (S^{-1})	3.836	2.692	2.019	1.347	1
	振幅 D mm	1.150	2.200	3.600	8.300	15.700
	相似比 (S^2)	0.0732	0.1401	0.2293	0.5287	1.0000
角速度の相似比の誤差 (a-b)/a	%	4.1%	0.9%	1.0%	1.0%	---
振幅の相似比の誤差 (a-b)/a	%	19.5%	0.7%	7.7%	5.8%	---

めに境界条件の精度の影響が他の縮尺より大きくなったものと考えられる。

2.3 荷重～時間関係を入力した場合の片持ち梁の弾性振動に対する提案相似則の検証

片持ち梁の自由端に対して、図一4 に示す長方形の荷重～時間関係を与える場合、その応答変位の理論式は式(3)および式(4)のように得られる¹³⁾。

$$0 \leq t < t_0$$

$$u = \delta_{st} \cdot (1 - \cos \alpha t) \quad (3)$$

$$t_0 \leq t$$

$$u = \delta_{st} \cdot \{ \cos \omega(t - t_0) - \cos \alpha t \} \quad (4)$$

ここに、 δ_{st} は荷重 P_0 を自由端に静的荷重した時のたわみを示す。

理論計算において、実規模モデルに用いる片持ち梁の形状は幅 200mm×厚さ 12mm×スパン長 1200mm とし、縮小模型モデルは縮尺 $S=1/2$ とした。材質は鋼板(ヤング係数 $E=200000\text{N/mm}^2$)と仮定して、式(3)および式(4)より、自由端の変位の比較を行った。表一5 に示す荷重 P_0 と荷重持続時間 t_0 が異なるケース 1~3 の条件で片持ち梁の自由端に荷重を作用させると、実規模モデルと縮小模型モデルの自由端の変位(実規模換算)は図一5 のグラフのとおり完全に一致する。よって、片持ち梁の自由端に衝撃作用が与えられた場合も理論的には提案した相似則が適用できることがわかる。

3. 片持ち梁を用いた低速度衝突実験における相似則の適用性の検証

3.1 実験概要

既報¹¹⁾では、鋼球の衝突作用により発生する片持ち梁の変位について数値解析を行い、提案した相似則の適

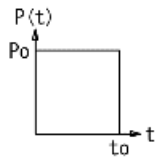
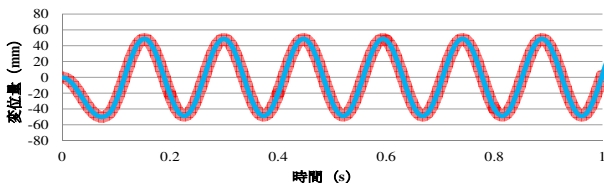


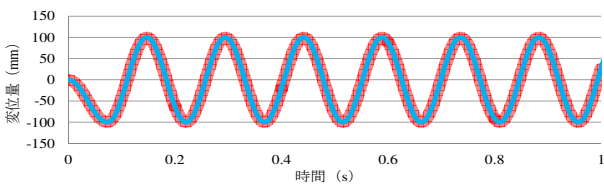
図-4 長方形の荷重～時間関係

表-5 長方形の荷重～時間関係および片持ち梁の静的たわみ δ_{st}

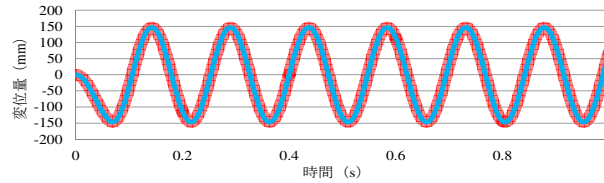
ケース	項目	単位	実規模	縮小模型 (S=1/2)	
				入力値	相似比
1	P_o	N	250	31.25	S^3
	t_o	s	0.084	0.042	S
	δ_{st}	mm	25.0	6.25	S^2
2	P_o	N	500	62.5	S^3
	t_o	s	0.074	0.037	S
	δ_{st}	mm	50.0	12.5	S^2
3	P_o	N	750	93.75	S^3
	t_o	s	0.064	0.032	S
	δ_{st}	mm	75.0	18.75	S^2



(a)ケース 1



(b)ケース 2



(c)ケース 3

図-5 長方形の荷重～時間関係入力時の自由端の振動

用性が確認された。そこで、本研究では実規模および縮尺 $S=1/2$ の縮小模型の片持ち梁に対する鋼球衝突実験を行い、実現象における相似則の適用性について検証する。

(1) 検証項目

相似則の適用性の検証項目は、落石防護構造物および剛性車両防護柵の性能照査確認実験^{2),14),16)}において設定されている実験条件および確認項目を参考に、鋼球衝突速度、片持ち梁の変位およびひずみ、そして片持ち梁に対する鋼球の反発係数の3項目とした。鋼球衝突速度は、自由落下により発生させるため、速くすると落下高さが高くなり衝突位置の精度が落ちる。また落下高さが

低すぎても鋼球設置時の誤差が大きくなってしまおうと考え、落下高さを 20mm~640mm とし、衝突速度がおおよそ 600~3500mm/s となるように設定した。片持ち梁自由端の変位および片持ち梁に発生するひずみは衝突を受けた構造物の応答値であり、構造物の安全性の性能照査に用いる値となるため検証項目として設定した。本実験は自由落下実験のため鋼球が梁へ複数回衝突するが、相似則の適用の検証には鋼球と片持ち梁の1回目の衝突時および衝突直後の値を使用した。この理由は、まず、1回目の衝突直後に梁の応答値が最大となるためである。次の理由として、鋼球が片持ち梁に衝突することにより、衝突位置に写真-1 に示すような局所的なへこみが発生する。鋼球が、再度片持ち梁と衝突する際に、このへこみに接触することで鋼球の速度や変位に影響が出ている可能性があるためである。さらに、剛性車両防護柵では、衝突速度および衝突角度に対して、離脱速度および離脱角度は6割以下とする必要があり、衝突速度に対する離脱速度の比である反発係数は重要な数値となる。そのため反発係数を本実験における検証項目とした。

(2) 試験体

鋼球は材質 SUJ-2 (高炭素クロム軸受鋼材、比重 $7.8t/m^3$ 、ヤング係数 $E=208000N/mm^2$) とし、実規模実験において $\phi 40mm$ 、 $\phi 80mm$ の2種類を用いる。片持ち梁は既報¹¹⁾の静的実験と同じものを使用した。すなわち、鋼板の材質は SS400、実規模実験における形状が幅 200mm×厚さ 12mm×スパン 1200mm とした。縮小模型実験に用いる鋼球および片持ち梁も、静的実験時に使用した縮尺 $S=1/2$ の試験体を使用した。これは、既報¹¹⁾において、寸法精度が表-6 の通り確認できていること、縮尺 $S=3/8$ 以上の試験体を用いれば、試験体設置による誤差の影響が小さくなることが確認できていたためである。また、縮尺



(a)実規模

(b)縮小模型

写真-1 鋼球衝突による塑性変形

表-6 試験体の寸法計測結果

モデル	項目	設定値	計測結果	公差
		(mm)	(mm)	(mm)
実規模 (S=1/1)	幅	200	199.65~199.85	± 0.50
	長さ	1250	1250.5~1251.0	0~+20
	板厚	12	11.95~12.00	± 0.55
縮小模型 (S=1/2)	幅	100	99.85~100.00	± 0.50
	長さ	650	651.0~650.5	0~+20
	板厚	6	5.90~6.10	± 0.50

を $S=1/2$ とすることで各種物理量の相似比が2の倍数となることから、直感的に実験結果の物理量の相似比が判別しやすいためである。

(3) 実験ケース

実験ケースは表-7に示す。実規模実験をケース A、縮小模型実験をケース B とした。A-1 と A-6、B-1 と B-6 は同一衝突エネルギーとなるように実験条件を設定した。

(4) 実験方法

実験の概要および実験状況の写真をそれぞれ図-6 および写真-2 に示す。片持ち梁はカウンターウェイト上に設置した H 鋼にブルマンを用いて固定した。鋼球は片持ち梁を設置した実験設備とは独立した鋼製枠からナイロン製の糸を用いて落下高さ h となるように吊下げ、糸を焼切して自由落下させた。落下高さは実規模実験においては $h=80\text{mm}$ 、 320mm 、 640mm とし、鋼球と片持ち梁の衝突位置は自由端から 100mm の位置とした。縮小模型実験に使用する鋼球や片持ち梁の形状、鋼球と片持ち梁の衝突位置は相似比を $S=1/2$ とするが、落下高さ h の

表-7 実験ケース

モデル	ケース	縮尺	片持ち梁 (SS400)	鋼球 (SUJ-2)	落下高さ	エネルギー (N・mm)
実規模	A-1	実規模 ($S=1/1$)	幅: 200mm 厚さ: 12mm スパン長: 1200mm	φ80mm (2088g)	80mm	1638
	A-2				320mm	6552
	A-3				640mm	13105
	A-4			φ40mm (262g)	80mm	206
	A-5				320mm	822
	A-6				640mm	1644
縮小模型	B-1	縮小模型 ($S=1/2$)	幅: 100mm 厚さ: 6mm スパン長: 600mm	φ40mm (262g)	20mm	51.4
	B-2				80mm	206
	B-3				160mm	411
	B-4			φ20mm (33g)	20mm	6.47
	B-5				80mm	25.9
	B-6				160mm	51.8

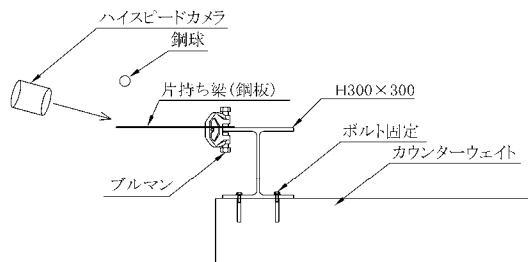


図-6 実験概要図



写真-2 実験状況

次元は既報¹¹⁾より U であるため、相似比は $S^2=1/4$ となる。すなわち、縮小模型実験ではそれぞれ $h=20\text{mm}$ 、 80mm 、 160mm となる。実験は各ケース 3 回ずつ行った。

(5) 計測方法

鋼球と片持ち梁の衝突時の運動をハイスピードカメラ (IDT 社, OS8-S2, 1600x1200 画素, 1000fps) を用いて撮影した。撮影した動画データを、高精度動作解析ソフトウェア View Point (Glenallan Technology 社) を用いて画像解析することで鉛直変位を計測した。ひずみは、鋼材用のひずみゲージ (ゲージ長 5mm) の値を、データロガー (キーエンス社製 NR-600) を用いて 0.5ms 間隔で計測した。計測位置は図-7に示すように、実規模試験体においては延長方向に固定端から 80mm 、幅方向は端部から 40mm の位置に 1 枚ずつ、上下面に同個所の計 4 箇所とし、縮小模型のひずみ計測位置に関しては縮尺に応じた位置とした。

3.2 実験結果および考察

(1) 鋼球の衝突時の速度

各実験ケースにおける鋼球の衝突時および 1 回目の衝突直後の鉛直方向の速度を表-8 に、衝突速度～落下高さ関係を図-8 に示す。表-8 および図-8 より、衝突時の鉛直方向速度は実規模実験および縮小模型実験の落下高さから算出される理論値に対して誤差は 5% 以内であった。図-9 に鋼球の鉛直変位～時間関係の例を示す。図-9 は鋼球と片持ち梁の衝突時刻を横軸の原点に、衝突時の鋼球の高さを縦軸の原点としている。図に示すように、衝突までの鋼球の変位勾配はほぼ重なっていることから、縮小模型実験において鋼球の自由落下運動により発生する速度には提案した相似則が成立していることがわかる。

(2) 片持ち梁自由端の鉛直方向の振幅と周期

各実験ケースにおける片持ち梁の自由端の鉛直変位～時間関係の例を図-10 に示す。図-10 は鋼球と片持ち梁の衝突時刻を横軸の原点に、衝突時の自由端の高さを縦軸の原点としている。ここで、自由端の鉛直方向の変位が負の方向に変位し、次にゼロとなるまで時間を「前半波長」、その後、正の方向に変位し、次にゼロに戻るまでの時間を「後半波長」とし、これら二つを合わせた

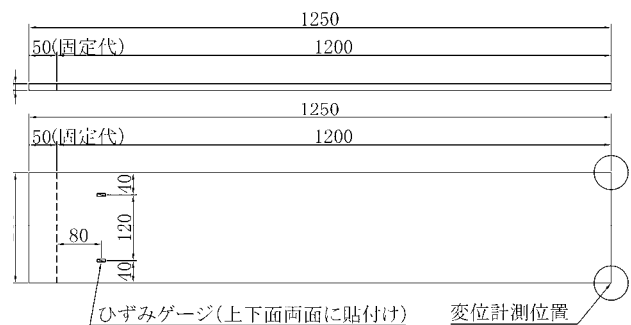


図-7 片持ち梁の計測位置

表-8 衝突前後の鉛直方向速度 (実規模換算値)

モデル	ケース	落下高さ (mm)	衝突時速度理論値 V_0 (mm/s)	衝突時速度 V_1 (mm/s)	理論値との誤差 $(V_0 - V_1)/V_0$ (%)	衝突直後速度 V_2 (mm/s)	反発係数 $e= V_2/V_1 $
実規模	A-1	80	1233.2	1189.7	-3.5	-47.7	0.040
	A-2	320	2486.1	2490.9	0.2	-104.9	0.042
	A-3	640	3523.9	3533.6	0.3	-121.1	0.034
	A-4	80	1233.2	1205.8	-2.2	-397.8	0.330
	A-5	320	2486.1	2455.8	-1.2	-623.4	0.254
	A-6	640	3523.9	3488.4	-1.0	-814.5	0.233
縮小模型	B-1	20	1233.2	1176.7	-4.6	-27.8	0.024
	B-2	80	2486.1	2457.1	-1.2	-95.5	0.039
	B-3	160	3523.9	3493.8	-0.9	-101.1	0.029
	B-4	20	1233.2	1205.3	-2.3	-429.2	0.356
	B-5	80	2486.1	2447.7	-1.5	-686.6	0.281
	B-6	160	3523.9	3571.5	-1.4	-1137.0	0.318

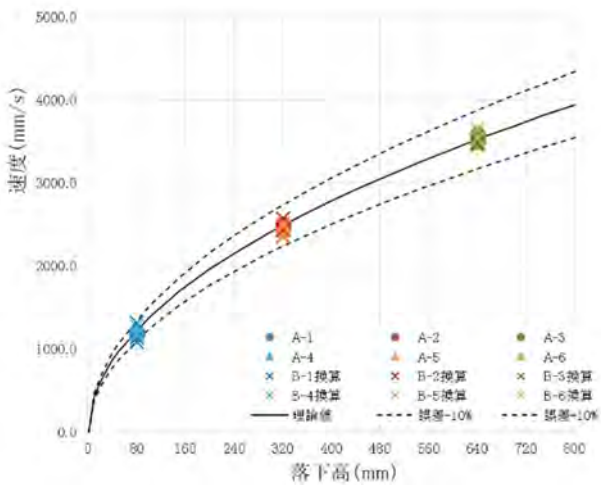
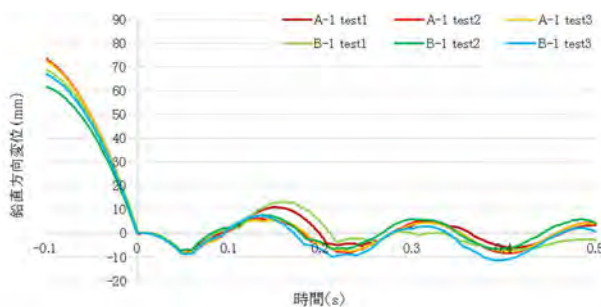
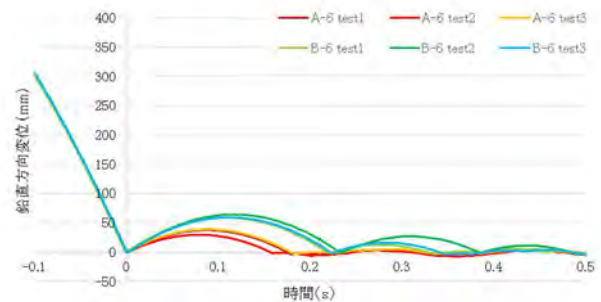


図-8 衝突直前の速度の比較

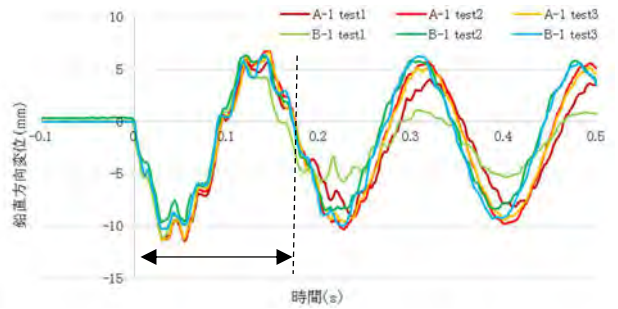


(a) A-1 と B-1 の比較

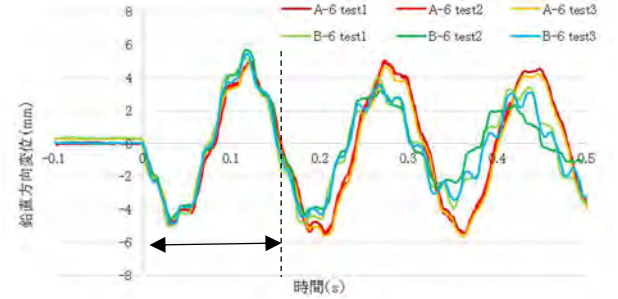


(b) A-6 と B-6 の比較

図-9 鋼球の鉛直変位比較 (実規模換算)
(鉛直方向変位は鋼球衝突時の高さを原点とする.)



(a) A-1 と B-1 の比較



(b) A-6 と B-6 の比較

図-10 片持ち梁の自由端鉛直変位 (実規模換算)
(鉛直方向変位は鋼球衝突時の高さを原点とする.)

表-9 片持ち梁自由端の振動周期 (実規模換算値)

モデル	ケース	鋼球径 (mm)	鋼板形状	1次固有周期 (s)	前半波長 (s)	後半波長 (s)	1波長 (s)	1波長誤差 (%)
実規模	A-1	80 (2088g)	幅 200mm 厚さ 12mm スパン 1200mm	0.1472	0.0937	0.0800	0.1737	-
	A-2				0.0877	0.0833	0.1710	-
	A-3				0.0877	0.0837	0.1713	-
	A-4				0.0800	0.0693	0.1493	-
	A-5				0.0803	0.0707	0.1510	-
	A-6				0.0790	0.0753	0.1543	-
縮小模型	B-1	40 (262g)	幅 100mm 厚さ 6mm スパン 600mm	0.0736	0.0907	0.0780	0.1687	2.9
	B-2				0.0867	0.0800	0.1667	2.5
	B-3				0.0847	0.0767	0.1613	5.8
	B-4				0.0767	0.0687	0.1453	2.7
	B-5				0.0760	0.0733	0.1493	1.1
	B-6				0.0767	0.0733	0.1500	2.8

時間を「1波長」と定義する。実験で得られた1波長目の振動周期を表-9に、実規模実験と縮小模型実験の周期の比較を図-11に示す。なお、図中の丸は1波長、三角は前半波長、四角は後半波長を示している。図-10の矢印で示す区間が各ケースにおける最初の1波長を示すが、この実規模実験結果と縮小模型実験結果を比較して1波長目の波形はどのケースにおいても実規模実験と縮小模型実験の実験結果がほぼ一致している。すなわち、振幅および周期に対して、提案した相似則が適用できることがわかる。表-9および図-11より、実規模実験結果と実規模換算した縮小模型実験結果との片持ち梁自由端の1波長では最大誤差6%程度と小さく、相似が適用できていると判断できる。図-11において前半波長と後半波長のプロットも相似一致の線上にプロットされていることは実規模実験と縮小模型実験の相似が成立している結果

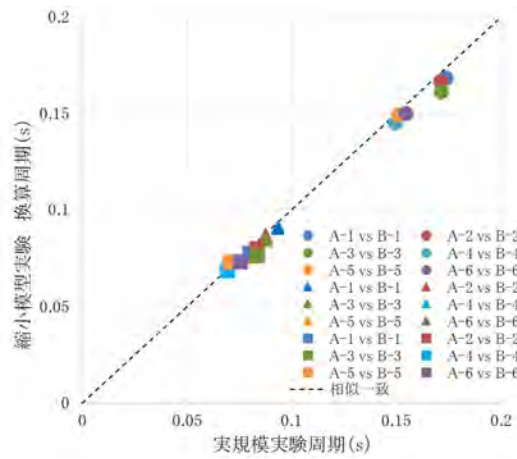


図-11 片持ち梁自由端の周期の比較

であり、片持ち梁の鉛直方向の運動に関しては相似則の適用性が高いと考えられる。片持ち梁自由端の鉛直方向振動の振幅および実規模実験と実規模換算した縮小模型実験の振幅の関係をそれぞれ表-10 および図-12 に示す。表-10 および図-12 より、実規模モデルと実規模換算した縮小模型実験の片持ち梁自由端の振幅の誤差はおおむね 10%程度と小さく、相似が成立していると判断できる。

(3) 片持ち梁に発生するひずみ

各実験ケースにおけるひずみ測定結果の一例として、鋼球衝突時の片持ち梁上面のひずみ～時間関係を図-13 に示す。表-11 は片持ち梁上面ひずみにおける一次固有振動の 1 波長目の周期および、ひずみの最大値を示す。図-13 は衝突によるひずみの発生時刻を横軸の原点に、静止状態のひずみを縦軸の原点としている。そのため、片持ち梁の自重によるひずみは計測値に含まれていない。図-13 から、実規模実験のひずみと実規模換算した縮小模型実験のひずみの一次固有振動と高次固有振動の極大、極小値の時刻がほぼ重なっていることがわかる。表-11 より、ひずみゲージの位置において発生するひずみから一次固有周期を比較するとその誤差は 10%未満、最大ひずみの誤差も 10%未満となっており、衝突を受けた片持ち梁のひずみについても相似性が高いことがわかる。すなわち、片持ち梁に発生する応力や断面力に関しても相似則の適用性が高いことを示しており、縮小模型実験により実規模構造物で生じる断面力特性の推定が可能になると考えられる。

(4) 鋼球の片持ち梁に対する反発係数

鋼球の片持ち梁に対する反発係数 e は式(5)で表される。

$$e = -\frac{v_2}{v_1} \quad (5)$$

ここに、 v_1 は衝突時の鉛直速度、 v_2 は衝突後の鉛直速を表す。前掲した表-8 および図-14 より、反発係数は質量度の大きい鋼球が衝突した A-1~3 および B-1~3 は 0.025~0.042、質量の小さい鋼球が衝突した A-4~6 およ

表-10 片持ち梁自由端の振幅 (実規模換算値)

モデル	ケース	鋼球径 (mm)	静的たわみ (mm)	振幅 (mm)	誤差 (%)
実規模	A-1	80 (2088g)	1.795	17.882	-
	A-2			32.697	-
	A-3			48.997	-
	A-4	40 (262g)	0.225	2.938	-
	A-5			7.015	-
	A-6			9.657	-
縮小模型	B-1	40 (262g)	1.795 (0.449)	16.451	8.0
	B-2			35.683	-9.1
	B-3	20 (33g)	0.225 (0.057)	51.888	-5.9
	B-4			3.305	-12.5
	B-5			7.211	-2.8
	B-6			10.277	-6.4

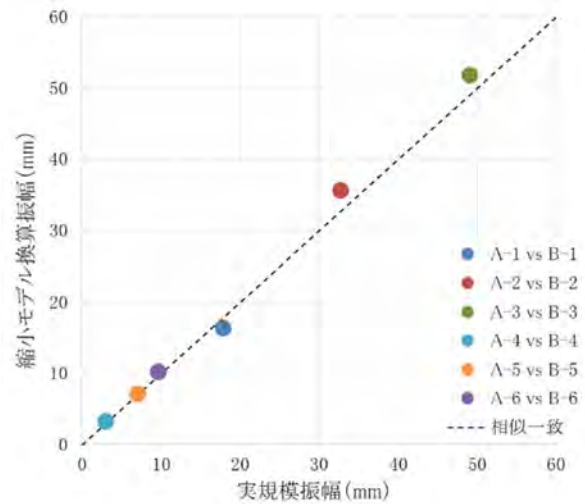
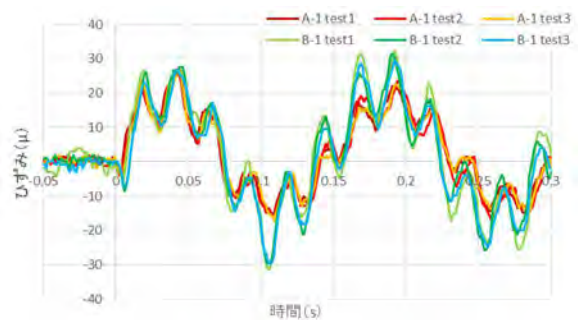
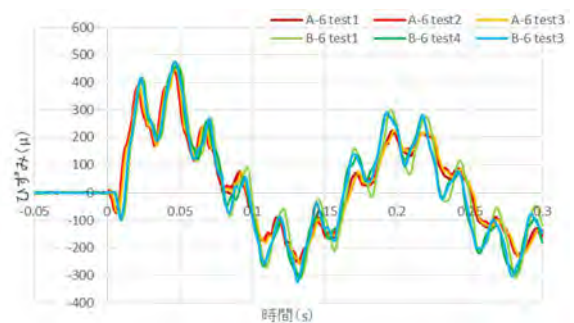


図-12 片持ち梁自由端の振幅の比較



(a) A-1 と B-1 の比較



(d) A-6 と B-6 の比較

図-13 片持ち梁の上面ひずみ比較 (実規模換算)

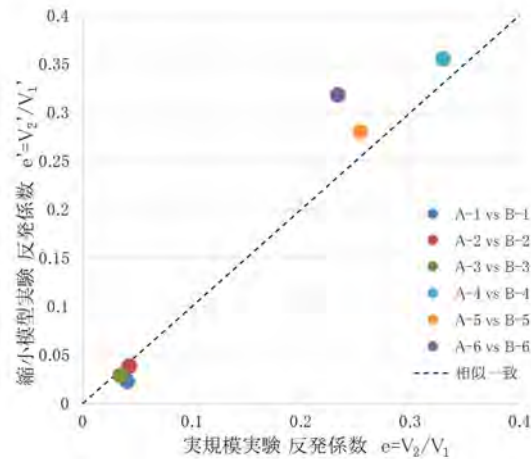


図-14 反発係数の比較

びB-4～6は0.233～0.356となり、重錘の質量の大小で反発係数が分かれる結果となった。反発係数は無次元でありグループ内ではほぼ同じ値を取ることから、反発係数についても相似がほぼ成立していると考えられる。

5. 結言

本研究は、実規模と縮小模型の片持ち梁に対して、鋼球の低速衝突を与える実験を行い、鋼球の挙動および片持ち梁の応答に対する過去に提案した相似則の適用性を検討したものである。以下に、本研究の成果を要約して示す。

- ・鋼球の衝突作用を受ける片持ち梁の自由端では、初期の振幅、振動周期において実規模実験結果と実規模換算した縮小模型実験結果が一致した。すなわち、衝突問題における変形に対して、提案した相似則の適用性が高いことがわかった。
- ・鋼球の衝突を受ける片持ち梁に発生する初期ひずみでは、実規模実験結果と実規模換算した縮小模型実験結果で値がほぼ一致した。提案相似則を適用すると、1次固有振動のひずみだけでなく高次固有振動のひずみも再現できた。したがって、部材に発生する応力や断面力に対しても提案した相似則の適用性が高いものと考えられる。
- ・鋼球と片持ち梁の衝突における反発係数は鋼球の質量の大小でグループ分けでき、このグループ分けは実規模実験および縮小模型実験結果でほぼ一致した傾向が得られることが分かった。

参考文献

- 1) 日本道路協会：落石対策便覧，2017.
- 2) 日本道路協会：防護柵の設置基準・同解説，2008.
- 3) 江守一郎，斎藤孝三，関本孝三：模型実験の理論と応用（第三版），技報堂出版，2000.
- 4) Baker,W.E.,Westine,P.S. and Dodge, F.T.: *Similarity Methods In Engineering Dynamics,Elsevier*, 1991.
- 5) 池畑光尚：2 相似の考え方，日本造船学会誌，第801号，pp.151-155，1996.
- 6) 横瀬景司：機械力学系における相似理論，新潟大学工学部研究報告，第29号，pp.1-7，1980.
- 7) 紺谷修，美原義徳：建屋-地盤相互作用を考慮した相似則に関する研究 その1 相似則の構築，日本建築学会大会学術講演梗概集 21504，pp.1007-1008，1997.
- 8) 酒巻勝，伊藤康人，大野友則：衝撃実験に用いる試験体寸法と相似則の適用，土木学会第49回年次学術講演会，I-782，pp.1560-1561，1994.
- 9) 政枝憲太郎，香月智，石川信隆，松村和樹，竹内大輔：支持フレーム付きセル型砂防ダムの衝撃挙動と相似則に関する実験的検討，構造工学論文集，Vol.47A，pp.1595-1603，2001.
- 10) 神宮利夫，松本浩之，根津紀久雄：はりの衝撃応答の相似則，日本機械学会論文集(A編)，53巻492号，pp.1713-1719，1987.
- 11) 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.
- 12) 青野修：次元と次元解析，共立出版株式会社，1982.
- 13) 石川信隆，大野友則，藤掛一典，別府万寿博：基礎からの衝撃工学，森北出版株式会社，2008.
- 14) (国研) 土木研究所：高エネルギー吸収型落石防護柵等の性能照査手法に関する研究，共同研究報告書，第491号，2017.
- 15) 中村拓郎，今野久志，山澤文雄，寺澤貴裕，西弘明，小室雅人：従来型落石防護柵の実規模衝突実験，寒地土木研究所月報，No.791，pp.14-22，2019.
- 16) 川瀬良司，岸徳光，西弘明，牛渡裕二，刈田圭一：鋼管杭頭部にH型鋼を併用した落石防護擁壁の重錘衝突実験，構造工学論文集，Vol.56A，pp.1113-1122，2010.