

クランクの水平落下による衝撃試験のばらつき検証試験—第1報—

—2020年度 自転車等研究開発普及事業—

一般財団法人 自転車産業振興協会 技術研究所

1. はじめに

JIS 規格や(一社)自転車協会の自転車安全基準(BAA)等に基づき、技術研究所で受託として実施している試験は、ほとんどの場合供試品は1個のみであり、製品の生産時のばらつきを考慮したような試験内容にはなっていない。そのため、過去に試験を実施して数値基準の判定値以内であった同じ製品を再度試験した場合に、判定基準値以上の値が生じることがある。

今回、数値基準のある JIS 規格の試験で、比較的判定基準値以上の結果がでることが多い、クランクの水平落下による衝撃試験について、製品のばらつきについて検証を行ったので、以下に報告する。

2. 供試品

試験に用いた供試品を表 1、写真 1 に示す。同じ製品を 17 本使用して試験を実施した。

表 1 供試品

	仕様
適用車種	シティ車
クランク長(mm)	165
材質	鉄
試験数(本)	17



写真 1 供試品

3. 試験方法

JIS D 9301:2019 一般用自転車 5.6.4.3、JIS D 9313-6:2019 自転車-第6部：駆動装置の試験方法 4.4 クランクの水平落下による衝撃強度に基づく試験を実施した。

図 1 に示すように、鉛直に設置した試験用クランク軸にクランクを水平に固定し、負荷点に質量 10kg (おもり台を含む) を 150mm の高さから 10 回落下させたとき、クランクの破損の有無及び永久変形量について確認した。JIS 規格での判定基準値は、10 回落下させたときの測定点における永久変形量が 5mm 以下となっている。なお、試験用クランク軸にクランクを固定する際のクランク軸ボルトの締付けトルクは 40.0N・m とした。

表 2 試験条件

	試験条件
おもりの質量(kg)	10
落下高さ(mm)	150
落下回数(回)	10

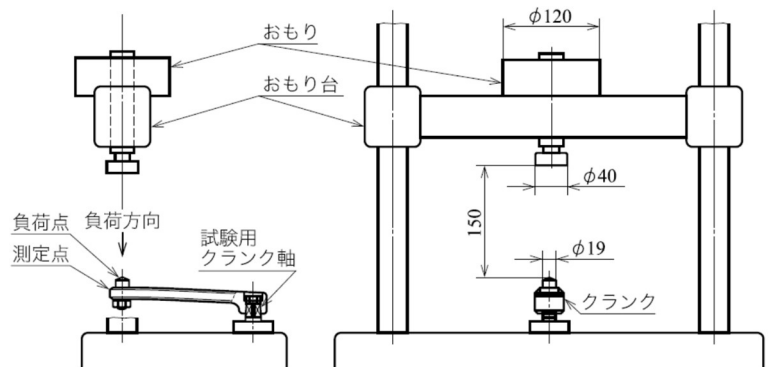


図 1 試験方法

4. 試験結果

試験結果を表3、図2に示す。試験を実施した全17本に破損は認められなかった。

表3 試験結果

(mm)

試料 No. 落下回数(回)	試料 No.									
	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7	No. 8	No. 9	No. 10
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	1.66	2.25	2.05	2.21	1.56	2.50	2.30	2.10	2.24	2.28
2	1.82	2.91	2.68	2.90	2.10	3.28	2.89	2.88	2.91	3.14
3	1.99	3.43	2.84	3.38	2.53	3.55	3.28	3.23	3.41	3.80
4	2.03	3.80	3.21	3.70	2.71	3.72	3.48	3.62	3.69	4.20
5	2.09	3.93	3.41	3.98	2.94	3.97	3.70	3.85	3.86	4.46
6	2.14	4.19	3.53	4.20	3.10	4.04	3.83	3.98	4.02	4.67
7	2.18	4.22	3.68	4.48	3.50	4.19	3.89	4.09	4.10	4.80
8	2.26	4.39	3.87	4.58	3.53	4.34	3.97	4.27	4.22	4.88
9	2.28	4.43	4.09	4.78	3.65	4.62	4.16	4.43	4.37	5.08
10	2.34	4.54	4.18	4.88	3.75	4.68	4.19	4.45	4.48	5.23

試料 No. 落下回数(回)	試料 No.						
	No. 11	No. 12	No. 13	No. 14	No. 15	No. 16	No. 17
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	2.91	2.63	1.16	2.12	1.96	1.89	1.87
2	3.64	3.43	1.28	2.76	2.75	2.58	2.76
3	4.15	3.88	1.48	3.32	3.19	3.07	3.30
4	4.47	4.19	1.61	3.59	3.53	3.26	3.60
5	4.69	4.40	1.69	3.79	3.78	3.48	3.86
6	4.83	4.57	1.73	3.93	3.90	3.66	4.10
7	5.06	4.69	1.79	4.13	4.11	3.77	4.30
8	5.17	4.79	1.83	4.25	4.21	3.89	4.41
9	5.26	4.94	1.91	4.40	4.35	4.01	4.50
10	5.43	5.10	1.94	4.50	4.48	4.12	4.58

永久変形量（落下回数10回での値）

最大値(mm)	5.43
最小値(mm)	1.94
差(mm)	3.49

平均値(mm)	4.29
標準偏差 σ (mm)	0.91

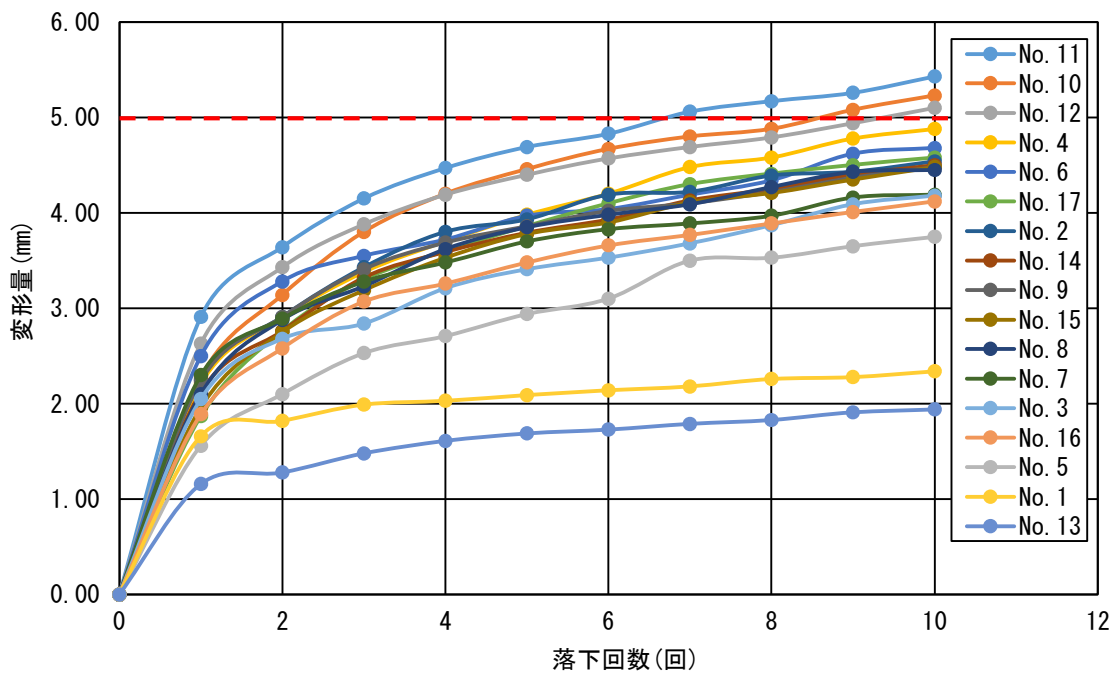


図2 試験結果

- (1) 永久変形量は、最大値が 5.43 mm、最小値が 1.94mm であり、3.49mm の差が認められた。
- (2) JIS 規格の基準値である 5mm を超えたものが、3 本(5.43mm、5.23mm、5.10mm)認められた。
- (3) 全 17 本の永久変形量の平均値は 4.29mm、標準偏差 σ は 0.91mm であった。

5. 考察

5.1 クランクの水平落下による衝撃強度の永久変形量の工程能力について

今回の試験では永久変形量の平均値が 4.29mm、標準偏差 σ は 0.91mm であった。量産にて常にこのばらつきが発生していると仮定し、供試品の状況について整理を行った。

クランクの水平落下による衝撃試験による永久変形量のばらつきが正規分布になると仮定すると、確率分布及び存在確率は、図3、表4に示す形となる。

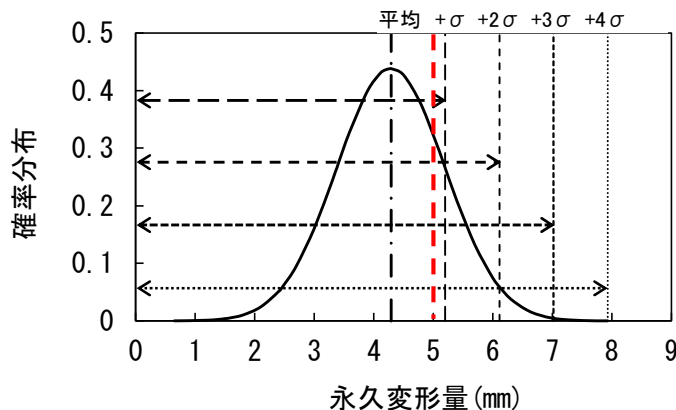


表4 正規分布での存在確率

範囲	存在確率(%)
平均値+ σ	84.2
平均値+2 σ	97.7
平均値+3 σ	99.85
平均値+4 σ	99.96

図3 正規分布として仮定した場合の確率分布

図3の状況における工程能力指数 C_{pk} 及び不良率 P を求める。工程能力指数とは、品質管理の分野において、ある工程の持つ工程能力を標準偏差 σ の3倍を基準に定量的に評価する指標の一つである。

C_p, C_{pk} : 工程能力指数 (C_{pk} は片側規格や実測平均値に偏りがある場合に用いる)

$$C_p = (\text{規格上限} - \text{規格下限}) / (6 \times \sigma)$$

$$C_{pk} = (\text{規格上限} - \text{実測平均値}) / (3 \times \sigma) \quad \text{もしくは}$$

$$= (\text{実測平均値} - \text{規格下限}) / (3 \times \sigma)$$

$C_p, C_{pk} \geq 1.00$ では製品の要求レベルによって、工程能力判断、対応処置に差はあるが、一般的には、表5のような考え方になっている。

表5 工程能力指数について

工程能力指数 C_p, C_{pk}	工程能力判断	対応処置
$C_p, C_{pk} < 0.67$	工程能力は非常に不足	品質が満足できる状態ではなく、規格の再検討、精度向上できる加工工程への変更等、緊急の対策が必要
$0.67 < C_p, C_{pk} \leq 1.00$	工程能力は不足	不良品の発生確率が高く、全数選別検査や工程の管理・改善が必要
$1.00 < C_p, C_{pk} \leq 1.33$	工程能力は許容レベル	現状の管理方法や検査方法の維持が必要
$1.33 < C_p, C_{pk} \leq 1.67$	工程能力は十分	管理方法や検査方法の省力化が可能なレベル
$C_p, C_{pk} \geq 1.67$	工程能力は十分すぎる	安価な加工工程への変更等による原価低減が可能なレベル

不良率 P は、工程能力指数 C_p, C_{pk} を用いることで、以下の式にて計算できる。

$$\text{両側規格の場合} \quad P = (1 - \text{NORMSDIST}(3 \times C_p)) \times 2 \times 100 (\%)$$

$$\text{片側規格の場合} \quad P = (1 - \text{NORMSDIST}(3 \times C_{pk})) \times 100 (\%)$$

NORMSDIST : 表計算ソフトの関数

以上より、今回の試験結果による工程能力指数 C_{pk} 及び不良率 P は、

$$C_{pk} = 0.26 \quad , \quad P = 21.8\%$$

という結果となり、現状では、工程能力が非常に不足するレベルであり、試験に合格しない製品が21.8%含まれるものと予測される。

そこで、今回の試験結果の標準偏差 σ の値(0.91mm)を改善することなく、 $C_{pk} \geq 0.67, 1.00, 1.33$ を満足する状況について計算した結果を表6に示す。

表 6 工程能力と永久変形量の平均値の関係

工程能力 Cpk	不良率 (%)	永久変形量の平均値 (mm)	削減値 (mm)	工程能力のレベル
0.26 (現状)	21.8	4.29	0	非常に不足
0.33 (+ σ 相当)	15.8	4.09	-0.20	
0.67 (+2 σ 相当)	2.30	3.18	-1.74	不足
1.00 (+3 σ 相当)	0.15	2.27	-2.65	許容レベル
1.33 (+4 σ 相当)	0.04	1.36	-3.56	十分

量産での全体的な強度アップにて、表 6 に示すように永久変形量の平均値を低下させる必要があるが、 $Cpk \geq 1.00$ 、1.33 では、削減量の絶対値 > 平均値という状況になっており、現状のばらつきのみでは、到達するのが非常にきびしいことが推定される。

5.2 重さと永久変形量の関係について

クランクの肉厚の差によって永久変形量の差が生じているのか検証するため、肉厚の代替特性としての重さの測定を行った。各試料の重さと永久変形量について表 7 に示す。

表 7 各試料の重さと永久変形量について

試料 No.	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7	No. 8	No. 9	No. 10
重さ (g)	415.3	413.1	413.7	416.7	413.8	414.9	417.3	413.5	415.3	415.1
永久変形量 (mm)	2.34	4.54	4.18	4.88	3.75	4.68	4.19	4.45	4.48	5.23

試料 No.	No. 11	No. 12	No. 13	No. 14	No. 15	No. 16	No. 17
重さ (g)	413.6	413.0	412.7	412.6	414.7	413.7	413.7
永久変形量 (mm)	5.43	5.10	1.94	4.50	4.48	4.12	4.58

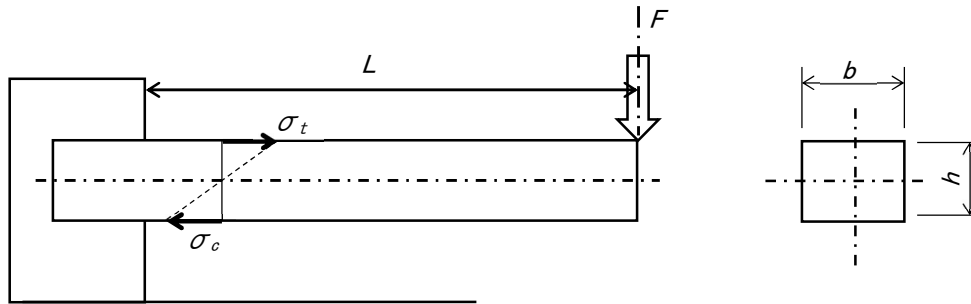
重さの値

最大値 (g)	417.3
最小値 (g)	412.6
差 (g)	4.7
差 (%)	1.1

平均値 (g)	414.3
標準偏差 (g)	1.3

今回の供試品の重さの平均値は 414.3g であったが、最大値と最小値の差は 4.7g、1.1% であった。

クランクの水平落下による衝撃強度の試験は、材料力学の曲げ応力のモデルとしては、一点固定端、一点荷重の単純曲げ(図 4)と類似したものになる。このモデルでの曲げ応力 σ_t は図 4 中の式で表すことができる。



$$\sigma_t = M/Z \quad \sigma_t: \text{曲げ応力} (\sigma_c = -\sigma_t) \quad M: \text{曲げモーメント} \quad M = F \times L$$

$$Z: \text{断面係数} \quad Z = (b \times h^2) / 6$$

図4 一点固定端、一点荷重の単純曲げの曲げ応力

図4中の式において、供試品の肉厚が影響する因子は断面係数: Z であるが、1次元の指標である長さ3つをかけ合わせているため、増加・減少率については、3次元の体積及び重さと同様に扱うことが可能である。つまり、クランクの体積がクランク全体で均一に増加していると仮定すると、重さの101.1%の増加で、曲げ応力 σ_t は逆数分 [100/101.1 × 100 (%)] の減少と概算できる。今回の試験における永久変形量は最大値が5.43 mm、最小値が1.94 mmであり、最小値は最大値の35.7%のため、重さの差から概算される曲げ応力 σ_t の減少量と永久変形量の比率のレベルが全く合致しない。以上より、永久変形量の差は供試品の肉厚の差によって生じている可能性は低いものと推定され、図5に示すとおり、重さの増加と永久変形量の減少には相関は全く認められなかった。

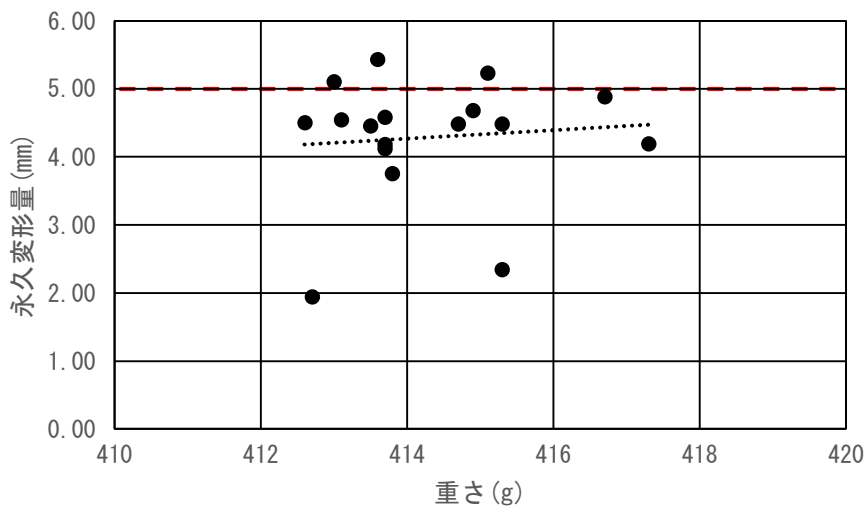


図5 重さと永久変形量の関係

5.3 硬さと永久変形量の関係について

クランクの水平落下による衝撃試験の永久変形量は、クランクの塑性変形による曲がりにて生じるものである。塑性変形に対する抵抗力を表す指標である硬さについて、今回、試験を実施した各試料で測定した結果を表 8 に示す。硬さは、衝撃試験後の反りが硬さの値に対する影響が小さいクランク内側（試験時には下側）の中央部付近を、ロックウェル硬さの B スケール（HRB : 圧子 1.6mm 鋼球、荷重 100kgf）にて、各試料 5 箇所測定した。

表 8 各試料の重さと永久変形量について

試料 No.	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7	No. 8	No. 9	No. 10
硬さ (HRB) 5 点測定	84.9	81.3	79.5	80.5	82.1	83.1	76.1	79.8	79.7	77.3
	85.1	82.8	79.5	80.6	78.6	81.6	73.6	80.3	78.1	77.4
	85.5	78.9	78.9	82.1	79.0	81.3	74.9	79.1	79.0	76.3
	84.9	79.0	76.9	79.6	77.9	80.8	73.5	79.3	78.4	77.5
	85.9	79.3	77.3	79.9	78.7	81.3	73.9	78.8	77.8	76.0
硬さ (HRB) 平均	85.3	80.3	78.4	80.5	79.3	81.6	74.4	79.5	78.6	76.9
永久変形量 (mm)	2.34	4.54	4.18	4.88	3.75	4.68	4.19	4.45	4.48	5.23

試料 No.	No. 11	No. 12	No. 13	No. 14	No. 15	No. 16	No. 17
硬さ (HRB) 5 点測定	77.8	81.1	83.2	77.9	80.5	81.6	82.8
	78.6	81.3	83.6	78.1	82.0	81.7	80.4
	76.2	80.3	83.4	78.6	79.2	79.9	78.3
	77.8	79.6	85.3	79.1	81.2	80.2	76.7
	76.4	80.8	85.8	80.0	79.2	75.9	75.1
硬さ (HRB) 平均	77.4	80.6	84.3	78.7	80.4	79.9	78.7
永久変形量 (mm)	5.43	5.10	1.94	4.50	4.48	4.12	4.58

硬さの値

最大値 (HRB)	85.3
最小値 (HRB)	74.4
差 (HRB)	10.9
差 (%)	13.6

平均値 (HRB)	79.7
標準偏差 (HRB)	2.6

今回の供試品の硬さは、平均値 79.7HRB、最大値 85.3HRB、最小値 74.4HRB であった。この値の範囲 (75~85HRB) を、一般的に使用される硬さの指標の一つであるビッカース硬さに換算すると 140~170HV であり、一般的な炭素鋼の焼きなまし材レベルの硬さであった。以上より、今回の供試品では、硬さの値のレベルから、強度を向上させる熱処理 (焼入れ焼戻し) は実施しておらず、また、硬さにばらつきがあるため、クランクの形状を形成後は、製品の性状を安定させる熱処理 (焼ならし) は実施していないものと推定された。

各試料における硬さの平均値と永久変形量の間関係を図 6 に示す。

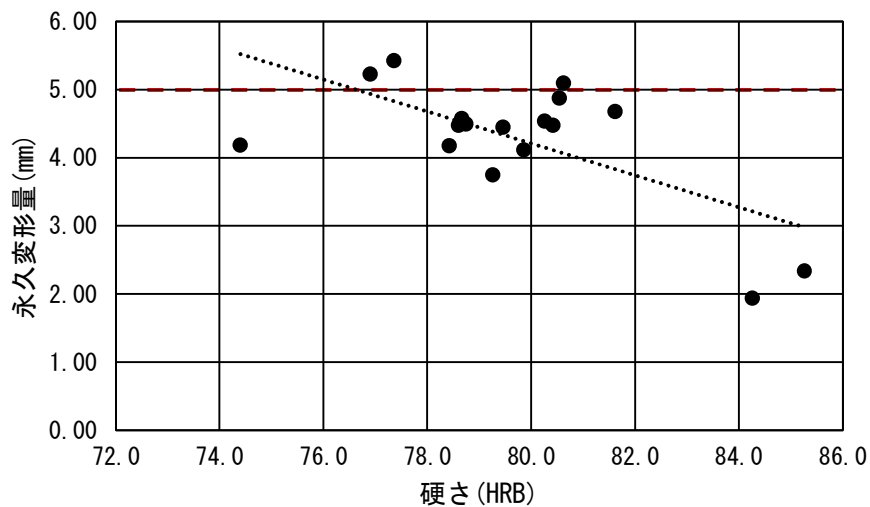


図 6 硬さと永久変形量の関係

図 6 より硬さの増加が、永久変形量の減少に大きく影響する傾向が認められた。今回の供試品の寸法・サイズにおいては、現状の硬さのレベルでは、永久変形量は硬さの影響を受けやすく、JIS 規格の数値基準である永久変形量 5mm 以下に対し、合否の結果が分かれる領域になっているものと推定された。

6. まとめ

クランクの水平落下による衝撃試験のばらつき検証の試験を行った結果、今回の供試品では、以下のような結論が得られた。

- (1) 永久変形量の平均値、ばらつきのレベルより、量産品において、JIS 規格の基準である永久変形量 5mm 以下を満足しない製品が 20%以上含まれている可能性が推定された。
- (2) 重さのばらつきのレベル、重さと永久変形量の関係より、肉厚のばらつきが永久変形量に影響している可能性は低いものと推定された。
- (3) 今回の供試品の寸法・サイズにおいては、現状の硬さのレベルでは、硬さが永久変形量に大きく影響する傾向が確認された。

2021 年度に他のクランクにて同様の試験を実施し、今回の試験結果と合わせて、クランクの水平落下による衝撃試験に対し、クランクの設計及び試験実施時に、検討や確認が必要な項目について整理を行う。