

段差衝突がフレームの疲労強度に及ぼす影響確認試験

－ 2019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

道路上を走行している自転車の前ホークが突然破断する事故が、過去に何件か発生している¹⁾。この破断した前ホークについて原因究明を行った事例の中には、衝突や激しい段差の乗り降り等で大きな衝撃力を受け、その影響により生じた異状に気づかずに使用し続けたことで、疲労破壊により破損に至ったと推定されるものも見受けられる。

道路上での自転車の使用状況は乗員によって様々であり、また、現状の自転車の価格帯を大きく変更させることなく、乗車時の負荷履歴等をデータの蓄積として残すことはできないため、走行中の衝突や段差乗り降り等の衝撃力を定量的に取り扱うことは非常に困難である。

そこで、本研究では、衝突試験機及びフレームの水平疲労試験機を用いて、1回の段差衝突による衝撃力が、自転車の前ホークの疲労強度に対し影響するののかについて確認を行った。今回は、走行中には異状に気づかないという点から、目視では認識できないレベルでの変形について、ホイールベース減少量という簡易的に測定可能な指標で整理を行った。

この試験をすすめる過程においては、以下のようなデータの取得が必要であったため、その結果も併せて報告する。

予備試験 1：衝突時の最大ひずみの比較による実走行と衝突試験機での衝突との相関の整理

予備試験 2：衝突試験機における衝突速度とホイールベース減少量との関係の整理

予備試験 3：衝突なしフレームを用いた水平疲労試験での試験荷重と破損回数の整理

2. 供試品

試験に用いた供試品を表 1、写真 1 に示す。予備試験 1、2 は、供試品のフレーム形式と近い 26～27 インチのシティ車 2 本パイプ仕様の自転車で実施した。本報告書では、予備試験 1 で使用した自転車を自転車 1～4、予備試験 2 で使用した自転車を自転車 5～8 と示す。なお、本報告書では、自転車の製造者、品番 等は公表しない。

表 1 供試品

		仕様
タイヤサイズ		26 インチ
フレーム形式		ダブルループ
材質	フレーム	鉄
	前ホーク	鉄
仕様	フレーム	ラグなし
	前ホーク	ラグなし
備考		BAA 適合車



写真 1 供試品

実走行及び衝突試験機での衝突試験では、ひずみゲージを用いて、ひずみ測定を実施した。ひずみゲージの貼り付け位置を写真2に示す。



写真2 ひずみゲージ貼り付け位置

3. 試験方法

3.1 実走行での段差衝突

実走行での段差衝突は、ひずみ、速度計測用データロガー及びおもりをリュックサックで背負い、段差に衝突した。試験条件を表2に、試験内容の概要を写真3に示す。今回の段差の高さは、歩道の段差を想定して150mmとした。

表2 実走行での段差衝突試験条件

			試験条件
自転車	積載重量 (kg)	シート部	90 (人+計測機器+おもり)
		ハンガ部	
		ハンドル部	
タイヤ空気圧 (kPa)			300
衝突速度 (km/h)			2.5~7.0
衝突部段差高さ (mm)			150
衝突部形状 (mm)			R20



写真3 実走行での段差衝突

3.2 衝突試験機による段差衝突

評価装置は旧 UCI 規則 第 1.3.018 条 車輪の破壊検査に使用していた衝突試験機をベースとした試験機を用いた。試験機の概要を図 1 に、試験条件を表 3 に、試験機の外観を写真 4 に示す。衝突前後の左右のホイールベースを 1500 mm の金尺にて測定し、その差の平均値をホイールベース減少量とした。

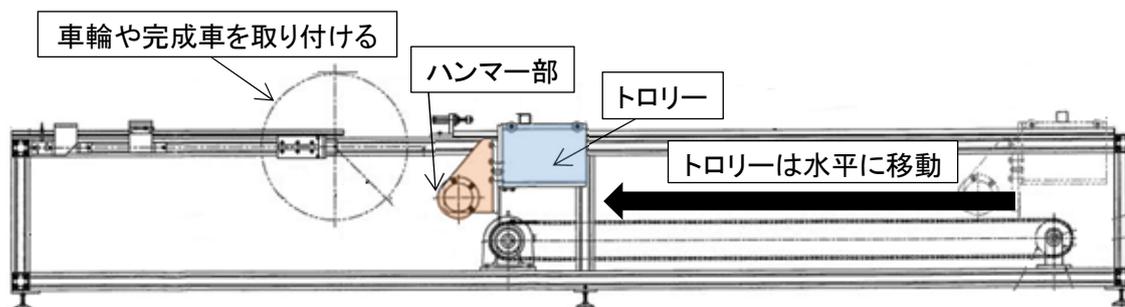


図 1 衝突試験機の概要

表 3 衝突試験機による段差衝突試験条件

			試験条件	
自転車	おもり (kg)	シート部	70	合計 101
		ハンガ部	15	
		ハンドル部	8+8	
	タイヤ空気圧 (kPa)		300	
トロリー重量 (kg)		100		
衝突速度 (km/h)		5.0~10.5		
衝突部段差高さ (mm)		150		
衝突部形状 (mm)		R20		

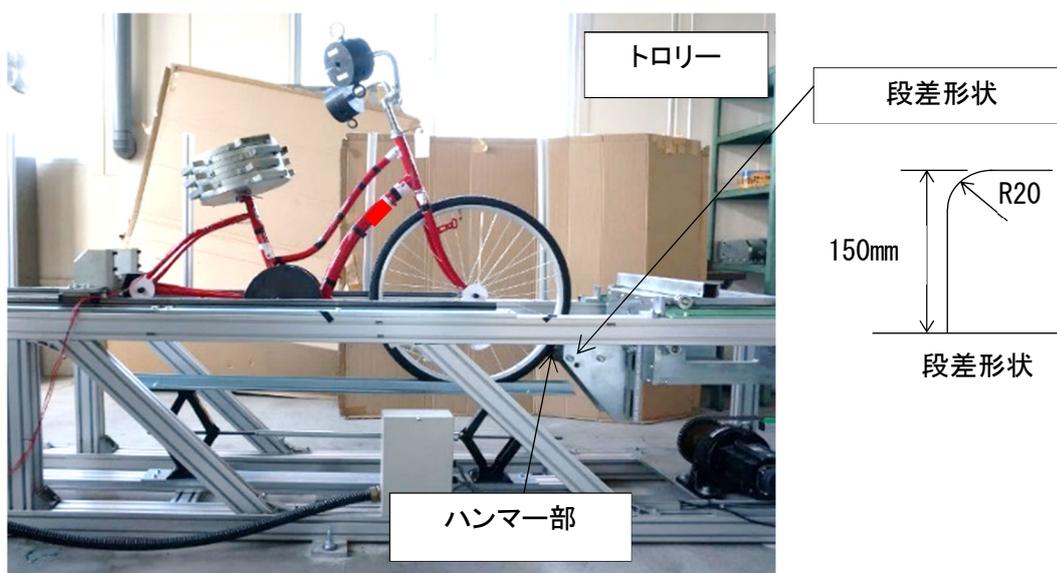


写真 4 衝突試験機の外観

3.3 フレームの水平疲労試験機

JIS D 9313-4:2019（自転車-第4部：車体部の試験方法）4.4 フレーム体の水平力による疲労試験に準拠した試験機を用いた。試験機の概要を図2に、試験条件を表4に、試験機の外観を写真5に示す。

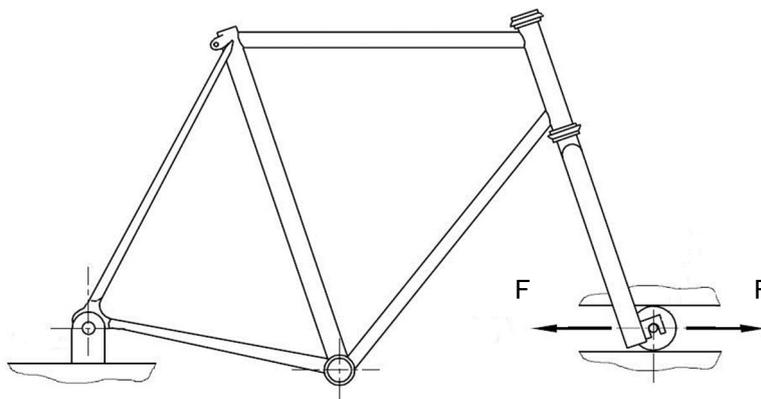


図2 フレームの水平疲労試験機の概要

表4 フレームの水平疲労試験条件

	試験条件		
	荷重 (N)	450	563
荷重比 ^{*)}	1	1.25	1.5
試験周波数 (Hz)	1.25		
試験停止条件	フレームの前後方向の変位が初期値の1.2倍		

*)JIS D 9313-4 4.4 のシティ車向けの荷重450Nを1とした比率



写真5 フレームの水平疲労試験機の外観

4. 試験結果

4.1 衝突時の最大ひずみの比較による実走行と衝突試験機での衝突との相関の整理(予備試験1)

実走行及び衝突試験機で発生した、前ホーク後、上パイプ上及び下パイプ下の各箇所のひずみ波形の代表例を図3に示す。

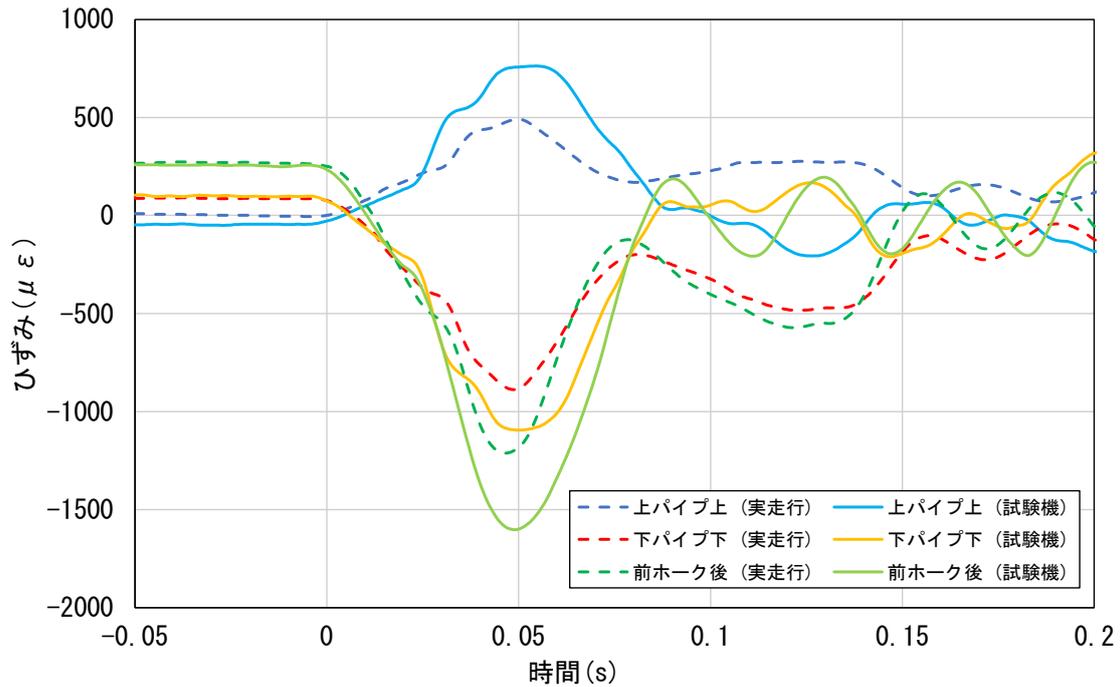


図3 実走行及び衝突試験機で発生したひずみ波形の代表例(衝突速度 4.5km/h)

図3では、実走行、衝突試験機共に、衝突開始後約0.05sでひずみが最大値を示している。今回の試験においては、このひずみの最大値で実走行と衝突試験機の相関を整理することにした。

図4に予備試験1で実施した自転車4台の実走行及び衝突試験機での衝突速度と発生したひずみの最大値の関係を示す。

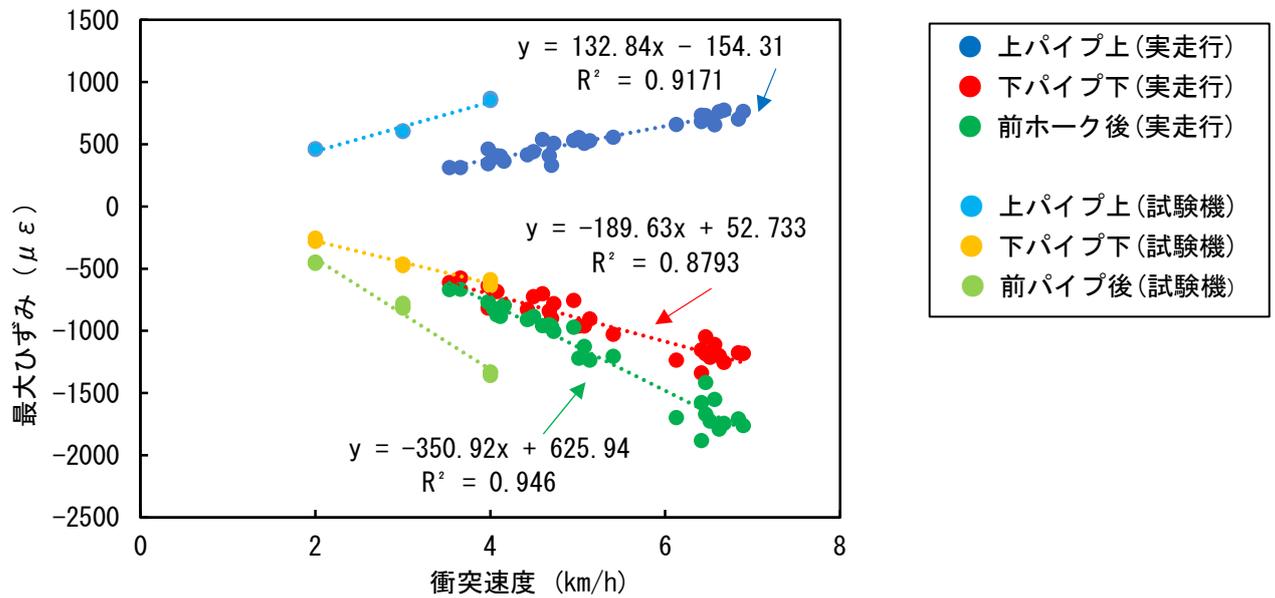


図 4.1 衝突速度と最大ひずみの関係(自転車 1)

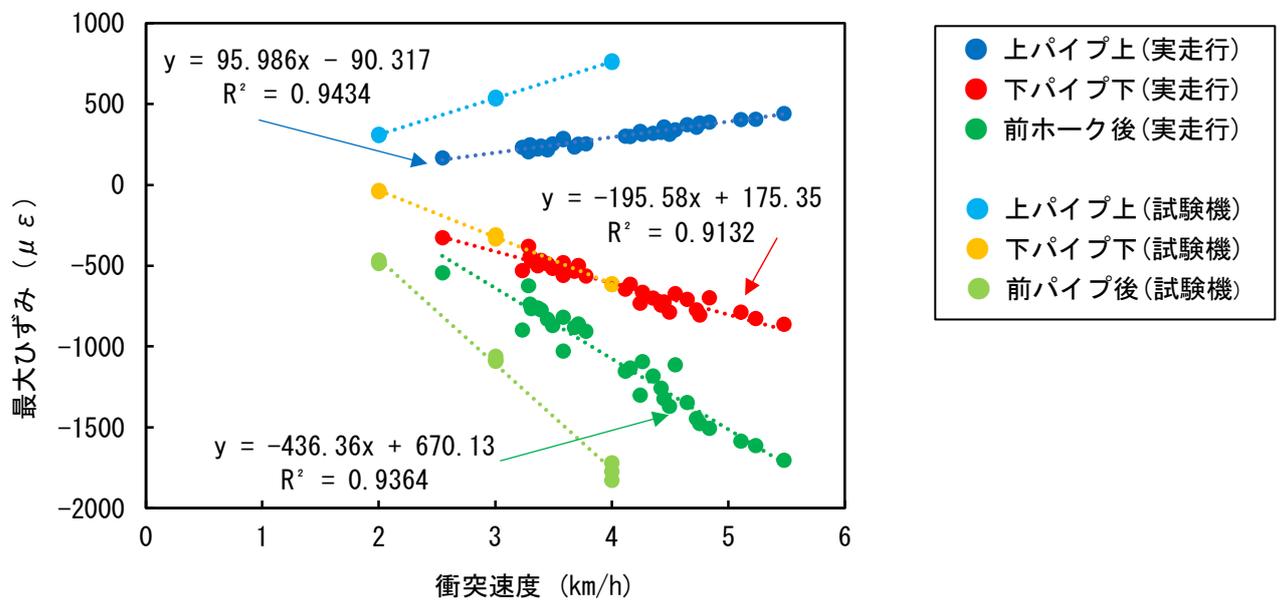


図 4.2 衝突速度と最大ひずみの関係(自転車 2)

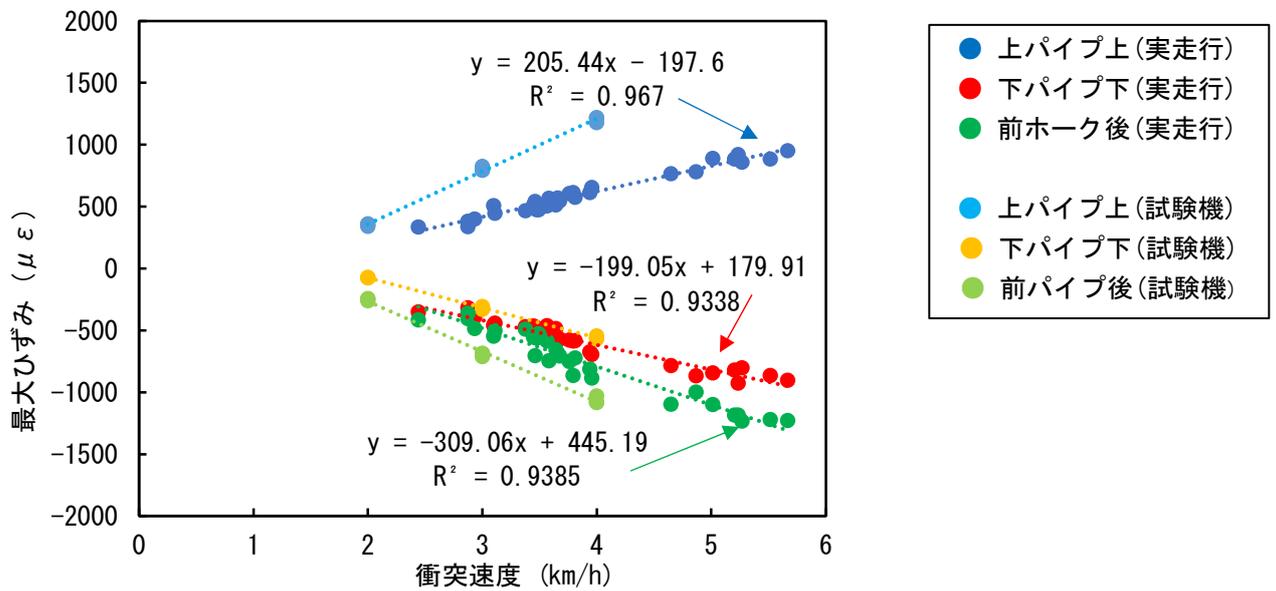


図 4.3 衝突速度と最大ひずみの関係(自転車 3)

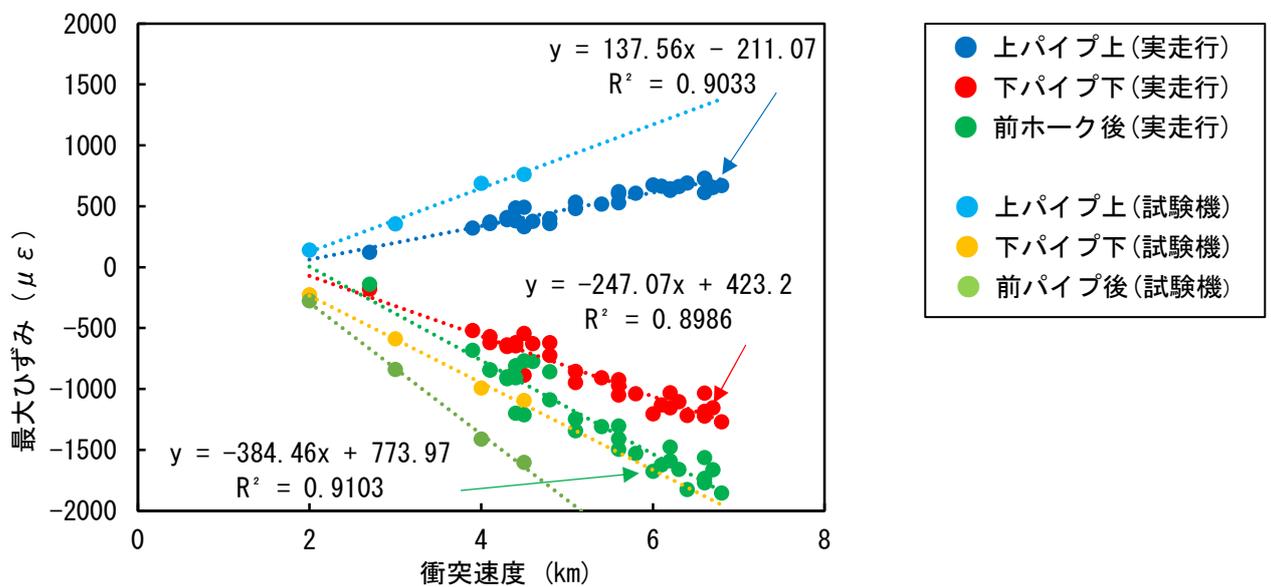


図 4.4 衝突速度と最大ひずみの関係(自転車 4)

図 4 中の式は、実走行における各箇所（前ホーク後、上パイプ上、下パイプ下）の衝突速度とひずみの最大値について、直線近似したものであるが、衝突速度とひずみの最大値は高い相関関係（相関係数 0.9 以上）を示した。また、試験を実施した速度の範囲では、衝突試験機の衝突速度とひずみの最大値との関係も直線近似できる結果であった。

以上より、図 4 の実走行及び衝突試験機の結果について、直線近似した結果より算出した、実走行の 4～6km/h の衝突速度に相当する衝突試験機の衝突速度を表 5 に示す。

表 5.1 実走行 4km/h 相当の衝突試験機の速度 (km/h)

	前ホーク後	上パイプ上	下パイプ下
自転車 1	2.80	1.67	4.51
自転車 2	2.95	1.93	3.98
自転車 3	3.30	2.62	4.24
自転車 4	2.88	2.81	2.93
平均	2.98	2.26	3.91
速度倍率(倍)	0.75	0.56	0.98

表 5.2 実走行 5km/h 相当の衝突試験機の速度 (km/h)

	前ホーク後	上パイプ上	下パイプ下
自転車 1	3.59	2.34	5.63
自転車 2	3.62	2.35	4.66
自転車 3	4.06	3.10	5.06
自転車 4	3.59	3.34	3.62
平均	3.76	2.78	5.12
速度倍率(倍)	0.75	0.41	1.02

表 5.3 実走行 6 km/h 相当の衝突試験機の速度 (km/h)

	前ホーク後	上パイプ上	下パイプ下
自転車 1	4.38	3.01	6.75
自転車 2	4.29	2.78	5.34
自転車 3	4.82	3.58	5.88
自転車 4	4.30	3.87	4.31
平均	4.50	3.12	5.99
速度倍率(倍)	0.75	0.52	1.00

表 5 の 4 台の自転車の平均値で整理すると、ひずみの最大値が同等となる衝突試験機の衝突速度は、実走行の 0.41～1.02 倍であり、発生するひずみが最も大きな値となる前ホークにおいては、衝突試験機の速度は実走行の 0.75 倍であった。

表 5 をもとに、衝突試験機と実走行の衝突速度との関係を整理した結果を図 5 に示す。

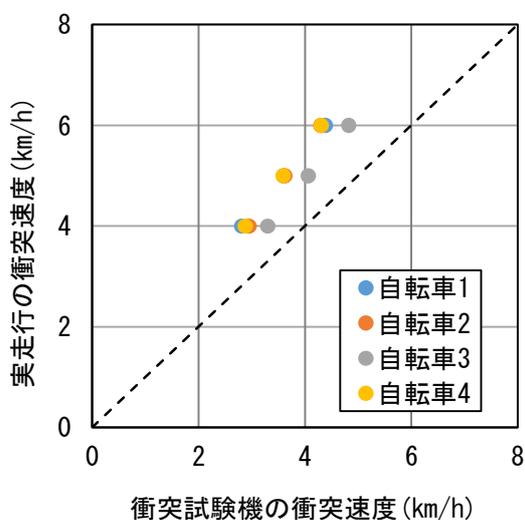


図 5.1 衝突試験機と実走行の衝突速度の関係
(前ホーク後)

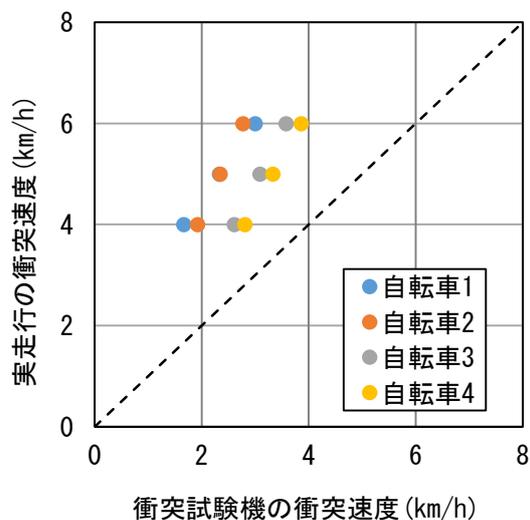


図 5.2 衝突試験機と実走行の衝突速度の関係
(上パイプ上)

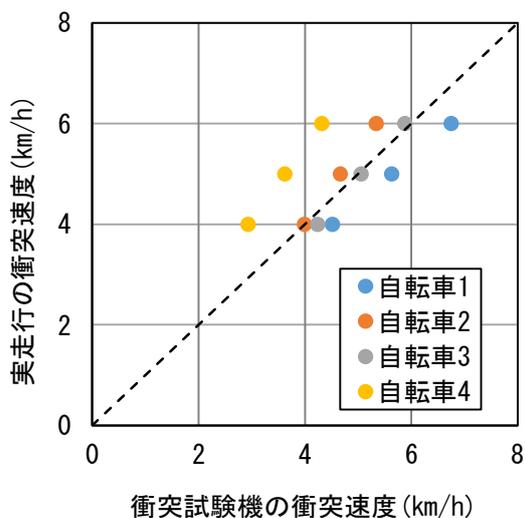


図 5.3 衝突試験機と実走行の衝突速度の関係
(下パイプ下)

図 5 より、一部の自転車の下パイプ下以外は、衝突試験機の衝突速度に相当する実走行の衝突速度の比率は 1 以上になっている。つまり、衝突試験機の衝突速度を実走行に換算すると、1 倍よりも大きな値を示すということである。発生するひずみが最も大きな値となる前ホークにおいては、表 5 の平均値を用いると、衝突試験機の衝突速度は、実走行では 1.33 倍 (0.75 の逆数) と換算できる結果であった。

4.2 衝突試験機における衝突速度とホイールベース減少量との関係の整理(予備試験2、供試品)

衝突試験機の衝突速度とホイールベース減少量との関係を表6、表7、図6に示す。予備試験2の自転車5~8については、同一フレームで各衝突速度の衝突試験を行ったが、その都度、衝突させた前後のホイールベースを測定し、減少量を算出した。

表6 予備試験2の各衝突速度におけるホイールベース減少量 (mm)

衝突速度 (km/h)	目標値	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0						
	実測値	5.0	5.9	6.0	7.1	7.2	7.9	8.0	8.8	9.0	9.9	10.3	10.4
自転車5		1.0		1.0		2.0		2.0		5.5			17.5
自転車6		2.0		1.5	0.0			4.0	13.0			30.0	
自転車7		0.0		0.0	1.0			12.0	16.5			37.0	
自転車8		0.0	2.0		0.0		4.0		12.5		28.0		

表7 供試品の各衝突速度におけるホイールベース減少量 (mm)

衝突速度 (km/h)	目標値	7.5	8.5	9.5
	実測値	7.6	8.4	9.6
供試品	試験結果	5.5	8.5	17.0
	予測値	3.7	8.6	19.7

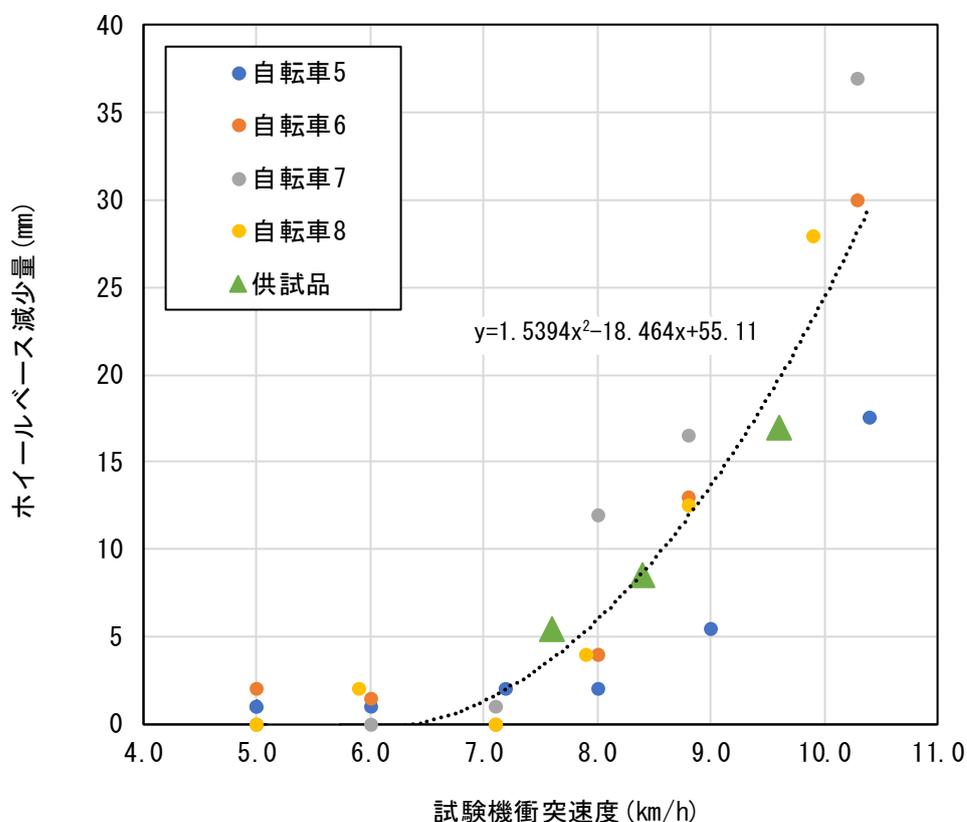


図6 衝突速度とホイールベース減少量との関係

予備試験2の自転車5~8において、衝突速度が7km/hまでは4台の自転車すべてで、ホイールベース減少量は2mm以下であった。衝突速度が8km/hを越えると、自転車4台でバラツキはあるものの、ホイールベース減少量は急激に大きくなる傾向が確認された。

予備試験2は、供試品のホイールベース減少量を予測するために実施したが、表7で示すように、予備試験2の4台の自転車の結果から算出された2次近似曲線から、ほぼ予測された結果となった。

供試品における衝突前後の前ホークの状況を写真6、写真7に示す。



衝突前

衝突後

写真6 ホイールベース減少量 8.5mm の衝突前後の前ホークの状況



衝突前

衝突後

写真7 ホイールベース減少量 17.0mm の衝突前後の前ホークの状況

目視では、衝突後の前ホークは、ホイールベース減少量 8.5mm は変形が認識できないレベルであったが、ホイールベース減少量 17.0mm はわずかではあるが変形が認識できるレベルであった。

4.3 疲労試験での試験荷重と破損回数の整理(予備試験 3、供試品)

フレームの水平疲労試験における破損状況について、衝突なしフレームは表 8 に、衝突試験後フレームは表 9 に、破損状態の代表例を写真 8 に、荷重と破損回数の関係を図 7 に示す。図 7 中の数式は、予備試験 3 の衝突なしフレームの荷重と破損回数の関係を累乗近似したものである(図 7 では、近似式の係数の桁数を大きくするため、横軸を kN で整理している)。

表 8 衝突なしフレームの水平疲労試験の破損状況

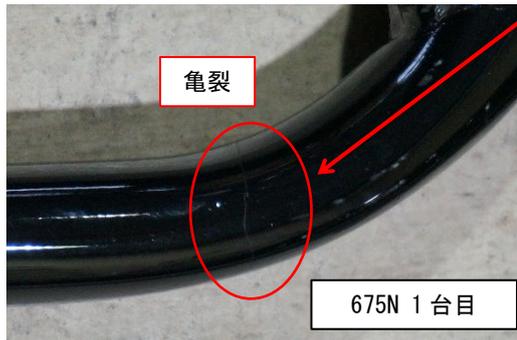
荷重(N)	比率	試験順	破損回数(回)	破損箇所
450	1	1 台目	957, 718	前ホーク 左足溶接部亀裂
		2 台目	1, 494, 122	前ホーク ステム接合部摩耗 ^{*)}
		3 台目	836, 276	前ホーク 右足・左足溶接部亀裂
563	1. 25	1 台目	187, 261	前ホーク 左足ストレート部前側亀裂
		2 台目	189, 683	前ホーク 左足溶接部亀裂 ^{*)}
		3 台目	151, 051	前ホーク 右足ストレート部後側亀裂
675	1. 5	1 台目	28, 718	フレーム 下パイプ下側亀裂
		2 台目	72, 845	前ホーク 左足ストレート部後側亀裂
		3 台目	37, 357	前ホーク 右足ストレート部前側亀裂

*) フレームの前後方向の変位が初期値の 1. 2 倍で試験停止。前ホーク足、フレームに破損はないが、ステム接合部にフレッチングがあることで判断した。写真 8 (b) 参照

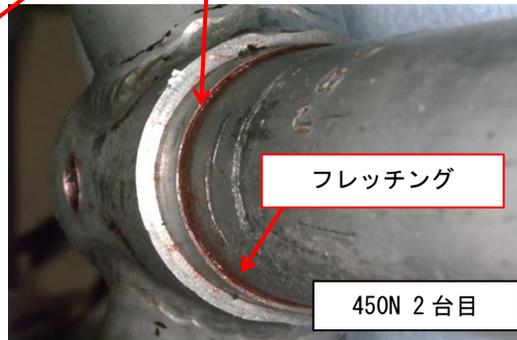
表 9 衝突試験後フレームの水平疲労試験の破損状況

荷重(N)	比率	ホイールベース減少量 (mm)	破損回数(回)	破損箇所
563	1. 25	5. 5	192, 669	前ホーク 右足ストレート部前側亀裂
		8. 5	200, 880	前ホーク ステム接合部摩耗 ^{*)}
		17. 0	174, 379	前ホーク 左足ストレート部後側亀裂

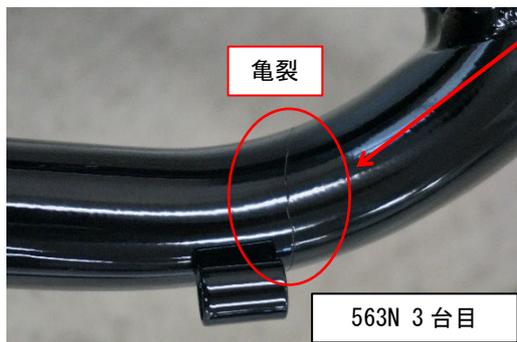
*) フレームの前後方向の変位が初期値の 1. 2 倍で試験停止。前ホーク足、フレームに破損はないが、ステム接合部にフレッチングがあることで判断した。写真 8 (b) 参照



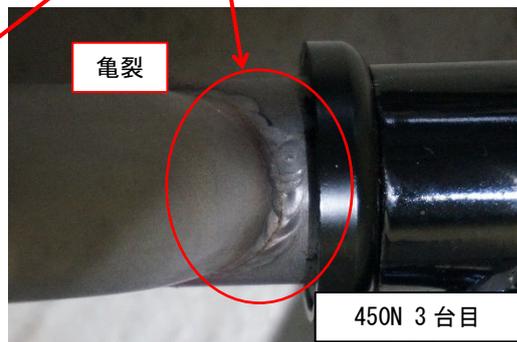
(a) 前ホーク 足ストレート部前側



(b) 前ホーク ステム接合部



(c) 前ホーク 足ストレート部後側



(d) 前ホーク 足溶接部

写真 8 破損状況の代表例

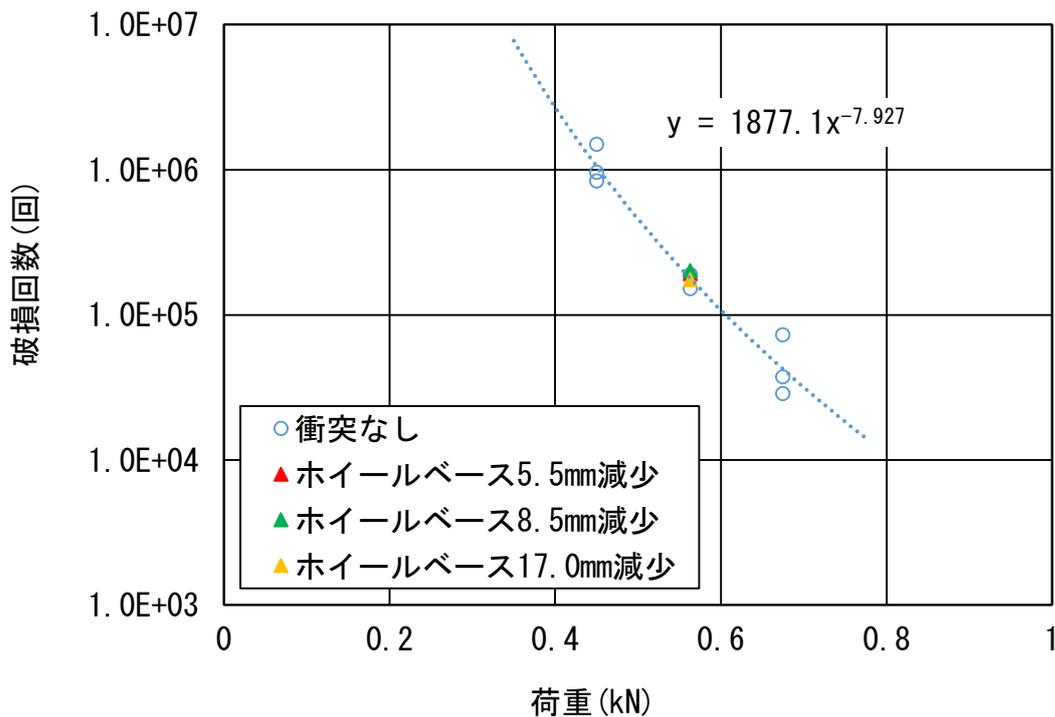


図7 フレームの水平疲労試験における荷重と破損回数の関係

表 8.9 に示すようにフレームの水平疲労試験では、ほぼ全試験で前ホークが破損しており、破損箇所は、前ホークの肩から左右の足がストレートに変わる部分が最も多い結果であった。(この結果より、衝突試験の前ホークでは、この位置にひずみゲージを張り付けた。)

荷重と破損回数の関係については、図 7 における予備試験 3 の衝突なしフレームの累乗近似線より、破損回数は荷重のほぼ 8 乗に反比例する結果であった。

衝突試験による疲労強度の影響については、今回使用したフレームでは、衝突試験後のホイールベース減少量が 5.5mm、8.5mm、17.0mm の各フレームの破損回数に差は認められず、また、それらと衝突なしフレームとの差も認められなかった。

5. 考察

5.1 衝突試験機での衝突速度の実走行相当について

表 5 に示すように、前ホークに発生する最大ひずみが同等となる衝突試験機での衝突速度は、実走行の衝突速度の 0.75 倍であった。つまり、衝突試験機の衝突速度は、実走行に換算すると 1.33 倍 (0.75 倍の逆数) 相当になり、例えば、衝突試験機での衝突速度 10km/h は、実走行では 13.3km/h になるものと想定できる。

実走行の段差衝突では実際に乗車して衝突試験を行ったが、今回の段差では、感覚的には約 7km/h くらいの衝突速度までが、衝突に対する怖さや転倒することに対する怖さを感じないギリギリのレベルであった。

衝突試験機で衝突させた衝突速度 7.6km/h、8.4km/h、9.6km/h は、今回の換算方法では、実走行は、各々10.1km/h、11.2km/h、12.8km/h に相当するため、かなり危険なレベルの衝突になるものと想定され、自転車の乗員が段差に衝突したことを明確に体感できることが予想される。

図 6 より衝突試験機では衝突速度が 8km/h を越えると、ホイールベース減少量が大幅に大きくなる結果であったが、これは実走行ではおおよそ 10.6km/h に相当する。前述しているように、今回、乗車した感覚では約 7km/h くらいが実走行での衝突の危険に対する限界であったため、乗員が危険と思う衝突でもホイールベース減少量は明確にできない、つまり、前ホーク・フレームの変形は目視では判断できないことが想定される。

5.2 今回の試験に使用したフレームの疲労試験と実走行の関係について

今回の試験に使用した供試品の自転車を用いて、街中を実走行し、前ホークに発生するひずみについても測定を行った。実走行のひずみデータのレインフロー法での頻度解析及び水平疲労試験の各荷重条件で前ホークに発生したひずみ、破損回数の結果から得られた近似線について図 8 に示す。

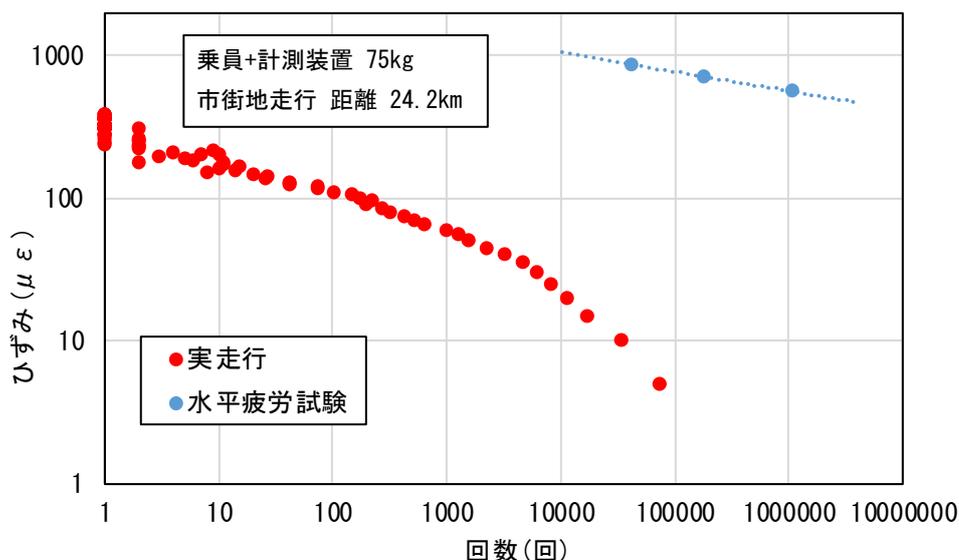


図 8 実走行と水平疲労試験における前ホークのひずみ

図 8 をもとにマイナー則を用いると、今回の実走行の乗員及び走行路の状態であれば、供試品では前ホークが破損することなく、100 万 km 以上の走行が可能という結果であった。

このような実走行と疲労試験でひずみを測定し、そのデータを蓄積していくことで、乗員体重と前ホーク・フレームの疲労強度という観点についても整理できる。例えば、今回の結果からは、乗員体重が前ホークの疲労強度に与える影響については、体重のみの影響を考慮した場合、体重比のほぼ 8 乗に反比例するものと想定される。75kg の乗員で 100 万 km 走行可能なフレームの場合、100kg の乗員では次式より 10 万 km 走行可能となる。

$$100\text{kg の乗員で走行可能な距離} : L \quad 100 \times 10^4 / L = (75/100)^{-8} \quad L = 10 \times 10^4 \text{ (km)}$$

自転車の乗り方は乗員によって様々であるため、今回のデータのみでは、かなり精度が低いおおよその想定ができるのみであるが、乗員の体重・年齢・性別、走行路、フレームの種類等について、適正にサンプリングした実走行のデータを蓄積し統計的なデータの整理を進めれば、前ホーク・フレームの適正体重に関する設計について参考となる指針ができるものと考えられる。

5.3 1回の段差衝突のフレームの疲労強度に対する影響について

今回は、1回の歩道の段差への衝突を想定し、異常に気づかないレベルの変形しか発生しない場合、それが、疲労強度に影響するか確認を行ったが、衝突なしのフレームの疲労強度と差が認められない結果であった。今回の試験の段差衝突は、5.1で述べたように乗員が明確に危険と体感できるレベルのものと想定されるが、疲労強度に対しては影響しなかった。つまり、乗員が危険と認識した1回の段差衝突で、必ず疲労強度が低下するわけではないということであり、市場での前ホークの破損時に衝突の影響という観点のみに注目して調査を進めてしまうと、製品側の問題等の真の主要因を見逃すおそれがあるものと思われる。

今回の衝突試験後フレームの水平疲労試験終了後に衝突があったことを確認するため、ヘッド部の下玉押しの軌道の状況について調査した内容を写真9に示す。

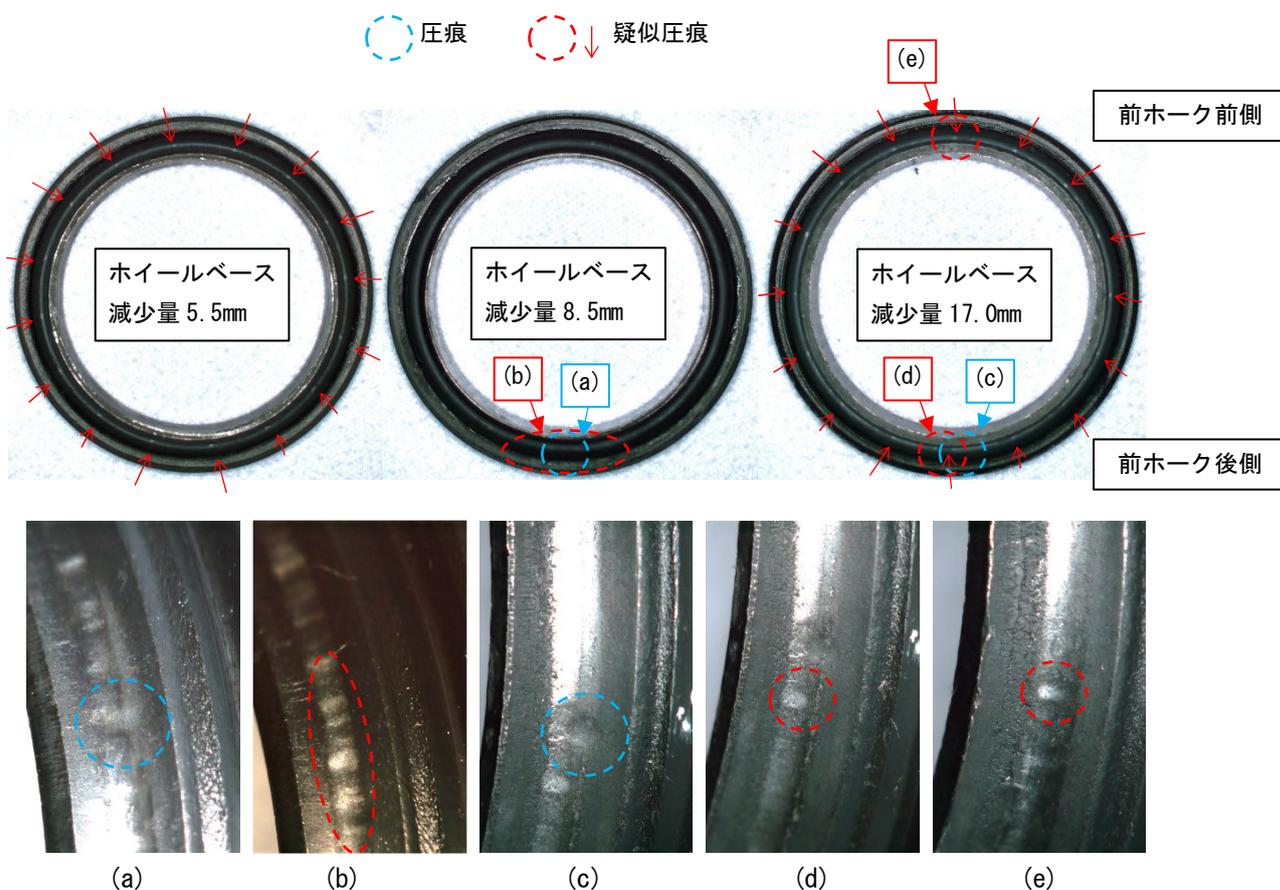


写真9 衝突試験後フレームの水平疲労試験終了後の下玉押し軌道

写真9で示すように衝突試験後フレームの水平疲労試験終了後の下玉押し軌道には、圧痕、疑似圧痕が認められた。圧痕は衝突試験で発生したものであり、疑似圧痕は水平疲労試験で発生したものである。圧痕、疑似圧痕の状況について表10に示す。

表10 圧痕・疑似圧痕の状況について

ホイールベース減少量 (mm)	圧痕	疑似圧痕	疑似圧痕の様相
5.5	なし	あり	全周均等に玉ピッチ
8.5	あり	あり	前ホーク後側に集中
17.0	あり	あり	全周均等に玉ピッチ

なお、圧痕と疑似圧痕の発生メカニズム及び様相は、以下の通りである。

圧痕・・・衝突時の衝撃力により、玉と軌道間に発生した高面圧により、軌道が玉の曲率に合う形で、塑性変形したものである。塑性変形のみのため、周辺の軌道と色合い、粗さ等に変化が生じない。

疑似圧痕・・・水平疲労試験中の玉と軌道の金属接触により生じた摩耗によるくぼみである。摩耗であるため、周辺の軌道と色合い、粗さ等に変化が生じる。今回の試験品では、金属同士の接触や発生した摩耗粉により研磨したような状況になり、周辺の軌道に対し金属光沢が生じた状態になっている。

写真9、表10で示したように、ホイールベース減少量8.5mm、17.0mmでは圧痕の発生が認められたが、ホイールベース減少量5.5mmでは圧痕の発生は認められなかった。また、疑似圧痕は、ホイールベース減少量5.5mm、17.0mmでは全周均等な玉ピッチで発生していたが、ホイールベース減少量8.5mmでは全周均等な玉ピッチではなく、前ホーク後側に集中して発生している状況であった。

ホイールベース減少量8.5mm、17.0mmでは、下玉押しの軌道の圧痕から衝突があったことが確認できたが、疲労強度は低下していない。また、ホイールベース減少量8.5mmでは、疑似圧痕が前ホーク後側に集中して発生しているため、この疑似圧痕を圧痕と誤認識してしまうと、前方からの衝突があった想定になる可能性がある。以上のようなことから、市場での破損品の調査においては、衝突で疲労強度が低下したと安易に結び付けないほうがよいと考えられる。

今回の水平疲労試験では、ヘッド部の軸受の玉は円周方向の移動がない状況のため、かなり疑似圧痕は発生しやすい状態であったが、一般的にも自転車のヘッド部のような揺動運動をする部分で疑似圧痕は発生しやすい。また、ヘッド部の揺動速度は比較的低速なため、グリスによる油膜形成も十分ではなく、金属接触することで疑似圧痕の発生が促進される状況でもある。以上のような状況より、道路上を走行している自転車においても、疑似圧痕が発

生する可能性は十分にあるものと考えられる。今回は試験という入力や使用状態が明確な環境で、圧痕と疑似圧痕が発生したため、その識別は難しくなかった。しかし、市場で自転車以外に使用されている軸受の例でも、十分な調査及び観察を実施しないと、圧痕と疑似圧痕の識別が非常に難しくなり、誤認識することがあるため、自転車のヘッド部の軸受においても同様なことが起こる可能性が考えられる。

5.4 前ホークの仕様と疲労破壊の破損箇所・様相について

今回のフレームの水平疲労試験の破損は、前ホークの肩から左右の足がストレートに変わる部分の亀裂が最も多い結果であったが、ホーク足の接合部に亀裂が発生したものやステム接合部に摩耗が発生したものも認められた。過去の事故事例では、ホークシステムの根元やホーク足とホーク肩の接合部で破断しているものも多く、前ホークの強度や接合方法（ろう付け、TIG 溶接）の違いが、疲労破壊における破損箇所・様相に影響してくるものと考えられる。また、今回の試験に用いた自転車は、ユニクラウン（クラウンを用いずにホーク足の上部を曲げ、そのままステムに溶接）の前ホークであったが、ラグの有無も同様に影響してくるものと推定される。

今回使用したフレーム及び実施した試験条件では、衝突試験後のフレームと、衝突なしのフレームの疲労強度に差が認められなかったが、上述しているような前ホークの仕様によっては、段差衝突による衝撃力が疲労寿命に影響する可能性もあるものと考えられる。

6. まとめ

シティ車 2 本パイプ（ダブルループ）の自転車を用いて、歩道の段差への 1 回の衝突を想定し、それが疲労強度に影響するか確認する試験を行った結果及びその結果を整理していく過程で、以下のようなことがわかった。

- (1) 段差衝突に対する衝突速度がある速度を越えると、ホイールベース減少量が急激に大きくなる傾向が確認された。今回、試験を実施したシティ車 2 本パイプの自転車では、それに相当する実走行での衝突速度はおおよそ 10.6km/h 程度であった。
- (2) フレームの水平疲労試験では、破損回数は荷重の約 8 乗に反比例した。破損箇所は、前ホークの肩から左右の足がストレートに変わる部分が最も多い傾向であった。
- (3) 今回使用したフレーム及び実施した試験条件では、ホイールベース減少量の差で、疲労強度に差が認められなかったため、ホイールベース減少量では疲労強度について整理できなかった。また、衝突試験後のフレームと、衝突なしのフレームの疲労強度にも差が認められなかったため、衝突で疲労強度が低下すると安易に考えるべきではないことがわかった。

7. 参考資料

- 1) 独立行政法人製品評価技術基盤機構 事故情報データベース