

文京区内遊園地コースター部品落下事故調査報告書

平成24年9月
社会資本整備審議会

本報告書の調査の目的は、本件遊戯施設事故に関し、昇降機等事故調査部会により、再発防止の観点からの事故発生原因の解明、再発防止対策等に係る検討を行うことであり、事故の責任を問うことではない。

昇降機等事故調査部会

部会長 向殿政男

文京区内遊園地コースター部品落下事故調査報告書

発生日時：平成22年12月5日 12時20分頃

発生場所：東京都文京区東京ドームシティアトラクションズ

昇降機等事故調査部会	向殿政男
部長	久保哲夫
委員	櫻井敬子
委員	青木義男
委員	辻本誠
委員	藤田聡
委員	稲葉博美
委員	岩倉成志
委員	大谷康博
委員	釜谷池宏
委員	山海敏弘
委員	高木堯男
委員	高橋儀平
委員	田中淳
委員	谷合周三
委員	直井英雄
委員	中里朗
委員	松久寛

目 次

1. 事故の概要	・・・ 1
1. 1 事故の概要	
1. 2 調査の概要	
2. 事実情報	・・・ 1
2. 1 遊園地に関する情報	
2. 2 コースターに関する情報	
2. 3 事故発生時の情報	
2. 4 事故機の構造に関する情報	
2. 5 破断したボルトの状況	
2. 6 ボルトに作用した荷重について	
2.6.1 製造者による下部車輪軸受け台ブロック固定ボルトの取扱いについて	
2.6.2 製造者による下部車輪軸受け台ブロック固定ボルトの強度計算について	
2.6.3 車両にかかる加速度の状況	
2.6.4 事故機による実走試験の状況	
2.6.5 事故機の台車に関する情報	
2.6.6 軸受け台ブロックに関する情報	
2.6.7 ボルトに生じる力について	
2.6.8 ボルトの疲労限度について	
2. 7 コースターの維持保全に関する情報	
2.7.1 ボルトの点検の状況	
2.7.2 車両分解整備チェックリストによるボルトの締め付けトルクの状況	
2. 8 類似機の点検状況	
2. 9 軸受け台ブロックの構造が類似のコースターの軸受け台ブロックの状況	
2. 10 当該コースターに発生した同種の不具合	
3. 分析	・・・ 2 2
3. 1 ボルトに関する分析	
3.1.1 ボルトの品質及び管理状況について	
3.1.2 ボルトの破壊形状について	
3.1.3 疲労破壊の原因となった力について	
3.1.4 ボルトに作用した力について	
3. 2 過去のボルト折損について	
4. 原因	・・・ 2 4
5. 意見	・・・ 2 5

《参考》

本報告書本文中に用いる用語の取扱いについて

本報告書の本文中における記述に用いる用語の使い方は、次のとおりとする。

- ① 断定できる場合
・・・「認められる」
- ② 断定できないが、ほぼ間違いない場合
・・・「推定される」
- ③ 可能性が高い場合
・・・「考えられる」
- ④ 可能性がある場合
・・・「可能性が考えられる」
・・・「可能性があると考えられる」

1. 事故の概要

1. 1 事故の概要

発生日時：平成22年12月5日 12時20分頃

発生場所：東京都文京区 東京ドームシティアトラクションズ「サンダードルフィン」下広場

負傷者：1名（9歳女子、軽傷）

事故概要：コースターの下部車輪軸受台取付けボルトがナット部の根元で破断し、その下にある広場に落下して跳ね上り、被害者の脇腹に当たった。

1. 2 調査の概要

平成22年12月6日 文京区職員、昇降機等事故対策委員会委員、国土交通省職員による現場調査を実施。

平成22年12月9日 昇降機等事故対策委員会委員、国土交通省職員による破断したボルトの調査を実施。

平成23年5月31日 文京区職員、昇降機等事故調査部会委員、国土交通省職員による実走試験の立ち会い

その他昇降機等事故調査部会委員によるWGの開催、WG委員、国土交通省職員による資料調査を実施。

2. 事実情報

2. 1 遊園地に関する情報

所有者：株式会社東京ドーム(以下東京ドーム)

住所：東京都文京区後楽1丁目3番61号

2. 2 コースターに関する情報

(1) 所有者、製造者等

所有者：東京ドーム

管理者：東京ドーム

製造者：インタミン社(スイス)

保守業者：インタミン・ジャパン株式会社(以下インタミン・ジャパン)

構造方法等の認定：当初 平成13年7月13日

(認定番号：BCJ 認定-ST0041)

工作物確認：当初 平成14年3月11日（日本建築設備・昇降機センターにて実施）

完了検査：平成15年4月3日（日本建築設備・昇降機センターにて実施）

営業開始：平成15年5月（東京ドームによる）

直近の定期検査：平成22年10月7日

(2) コースターの仕様表

項目	仕様
固有名称	サンダードルフィン
乗物数及び定員	1編成24人（6両、1両当り4人）×2編成
軌道	全長：1124.8m、最高部高さ：80.55m、最大勾配：約74度
乗物の運動	最高走行速度：127km/h、 最大加速度：垂直（下向き）4.39G（先頭車両） 垂直（上向き）-0.68G（最後尾車両） 水平（左方向）1.08G（最後尾車両）
車両の構造 （図1）	車両は、左右の丸形軌道を抱え込む構造のボギー台車に支えられている。ボギー台車は、先頭車両には4個、その他の車両には各2個設けられている。 各ボギー台車は、車体の重量を支える左右各2個の主車輪、横荷重を支える左右各2個の側車輪、及び、車体の浮き上りを防止する左右各2個の下部車輪に構成されている。
車体の質量	固定荷重：7991kg（1編成）、積載荷重：1560kg（24人）
乗客の利用制限	身長120cm未満の者、7歳未満の者、ラップバーを装着出来ない者、心臓病等乗車に支障のある者

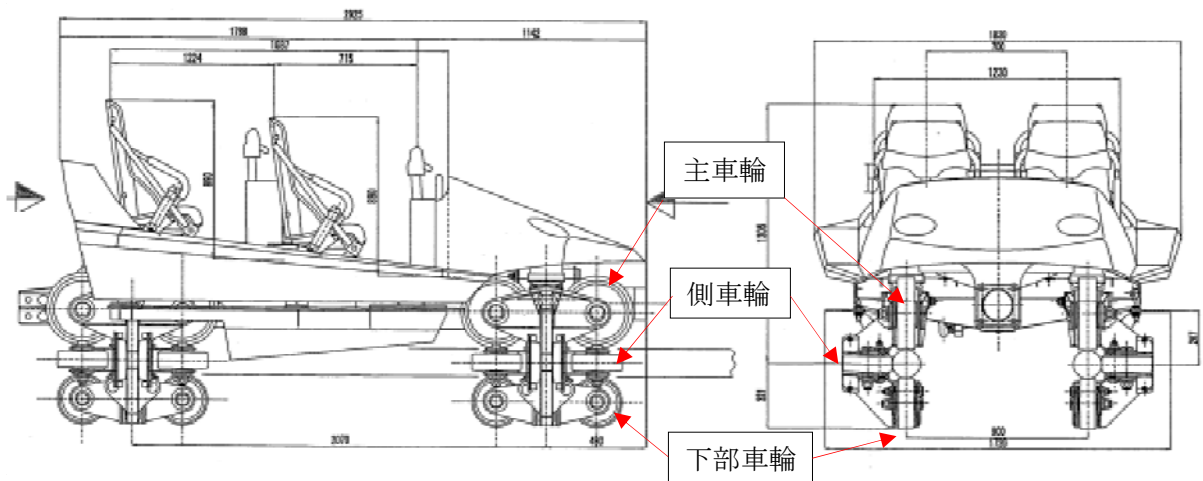


図1 先頭車両の寸法・構造

2. 3 事故発生時の情報

東京ドームによると平成22年12月5日(日)12時20分頃、サンダードルフィンの先頭車両の右前の軸受台取付けボルト(M12×280mm)1本が破断し、走路の下にある広場に落下して跳ね、その場にいた被害者(9歳)の脇腹に当たったとのことである。

なお、破断したボルトを留めていたナットも、ボルトの落下位置から十数メートルのところに落ちているのが発見された。

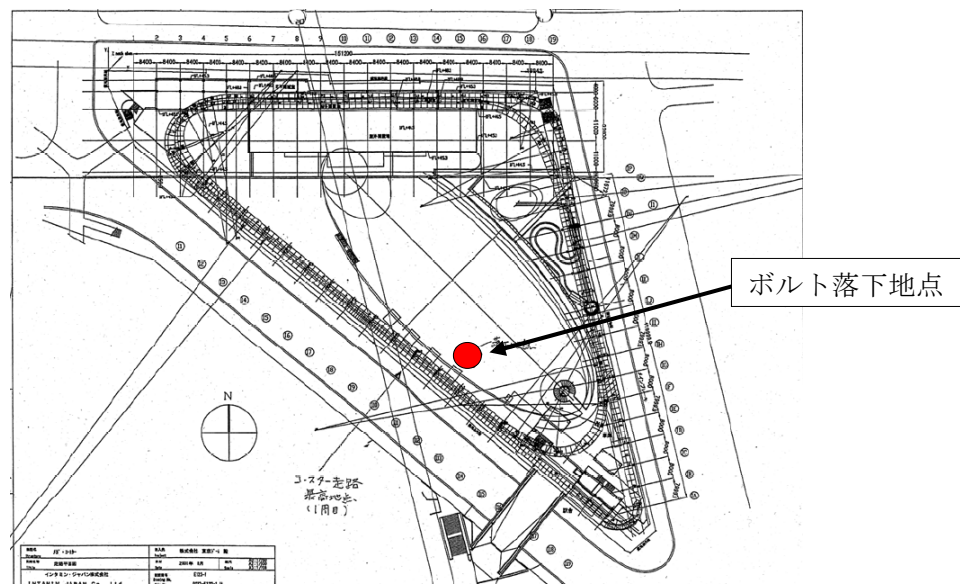


図2 ボルトが落下した地点

コースターは、出発して最上部に引上げられた直後の落下開始時点、周回後の高さが低くなった時点の2度、落下した広場の上を通過するが、どちらの時

点を走行中にボルトが落下したかは不明であった。

事故機は走行中に前記ボルト及びナットを落としながらも軌道から脱輪する等の異常を生じることなく停車場に戻って乗客を降ろした。その後、台車の各部を点検したが、前記のボルトとナットの脱落以外には、特に異常は発生していなかった。(写真1参照)

2. 4 事故機の構造に関する情報

破断したボルトは、先頭車両の前右側のボギー台車の下部車輪をボギー台車のフレームに取り付ける部品の一部を構成している。

ボルトが落下した下部車輪は、車体に浮き上がり荷重が生じる区間において浮き上がりを押さえる役目を果たしている。

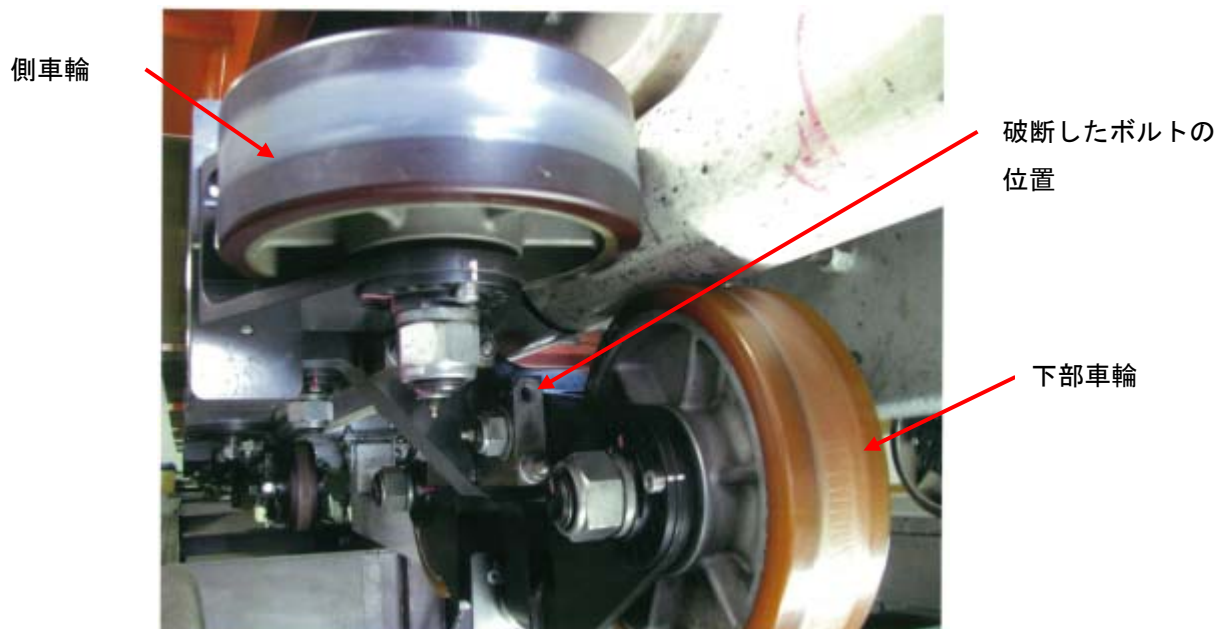


写真1 先頭台車進行右側の下部車輪、側車輪付近の構造と破断したボルトの位置

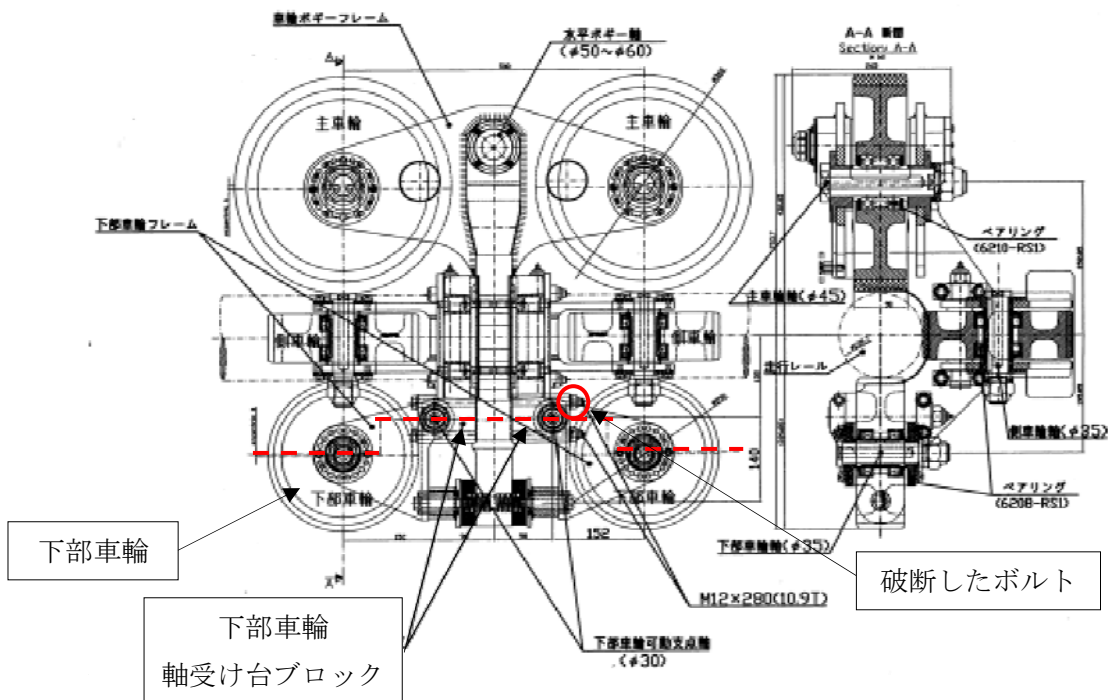


図3 ボギー台車の車輪部の構造

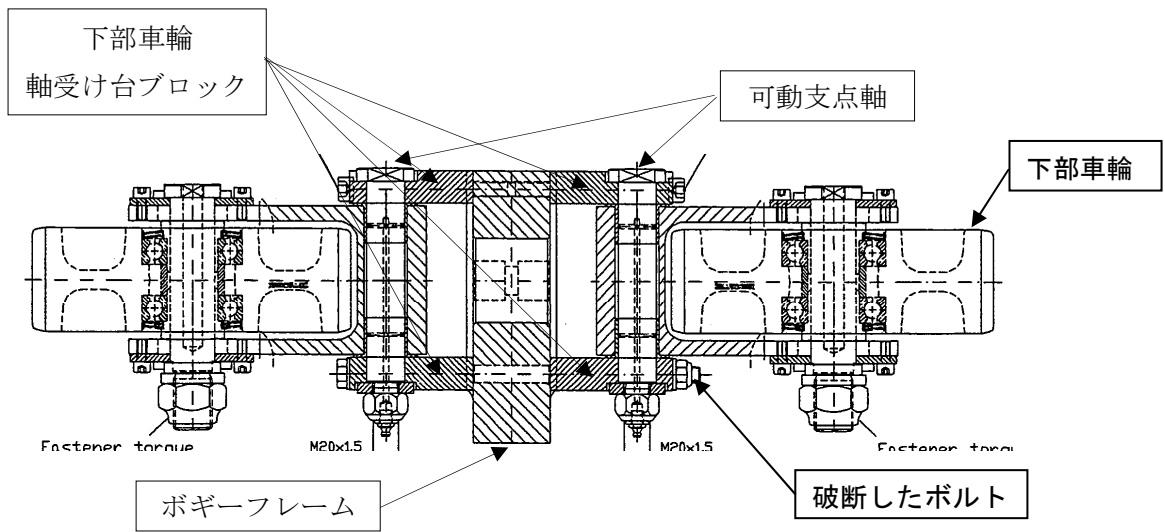


図4 破断したボルトの取り付け位置（下部車輪の上視図）

2. 5 破断したボルトの状況

(1) ボルトの仕様

部 位	ボルト仕様（高力ボルト）	
外側下部車輪用 ボルト	M12×280（10.9T）	最小引張強さ：1040N/mm ² 0.2%耐力：940N/mm ² 破断伸び（%）：9

（注）折損したのは、先頭車両右側ユニットの下部車輪用ボルトの外側の上側当初の設計では、強度区分 8.8T の高力ボルトであった。

(2) 高力ボルトの強度について

インタミン・ジャパンによると、製造者であるインタミン社(スイス)の当初の設計では、8.8T (DIN 規格) の高力ボルトが使用されていた。しかし、平成20年6月の同型車両(イエロー車両)の分解整備時より、強度が1ランク上の10.9T (JIS 規格) に交換され、以降は毎年交換とされているとのことである。

その理由は、平成20年4月の定期報告制度見直しで、走行台車枠、走行台車中心軸、走行台車先端軸、車輪軸、車輪取り付け枠が告示により探傷試験の対象項目であることが明確化されたため、併せて走行台車周りのボルトの疲労強度計算を行ったところ、下部車輪については疲労限度を下回ったが余裕はなく、側車輪軸受け台ブロック固定ボルトについては疲労限度を上回ったため、ボルトの強度を10.9Tに上げるとともに1年で交換を行うこととしたということであった。両高力ボルトの機械的特性を比較すると表1のようになる。

表1 高力ボルト8.8Tと10.9Tの比較

種類		DIN 規格 8.8T	JIS 規格 10.9T
破断強度	引張り	800N/mm ² 以上	1040N/mm ² 以上
0.2%耐力	引張り	640N/mm ² 以上	940N/mm ² 以上
保証荷重応力	引張り	580N/mm ²	830N/mm ²
破断伸び (%)		12%以上	9%以上

(3) 破断したボルトの損傷状況

ボルトの破断位置は、ナットとの嵌合い端(ナット内側からねじ1山分の谷部)であり、破断角度はねじに沿ってほぼ直角である。ボルト破断面の外周部と中央部には錆の発生が見られる。

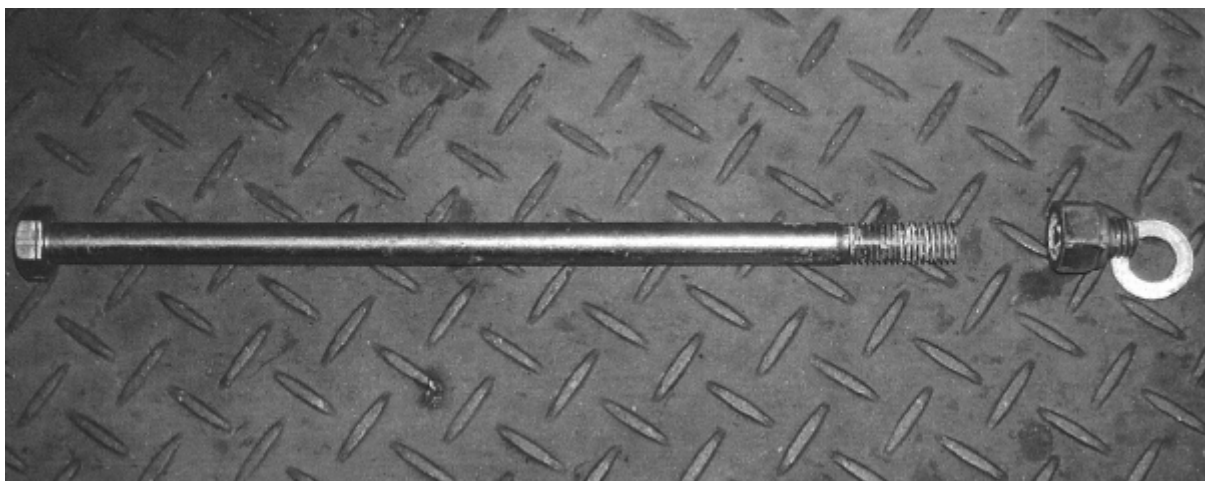


写真2 破断したボルトとナット



写真3 破断したボルトの先端部とナット

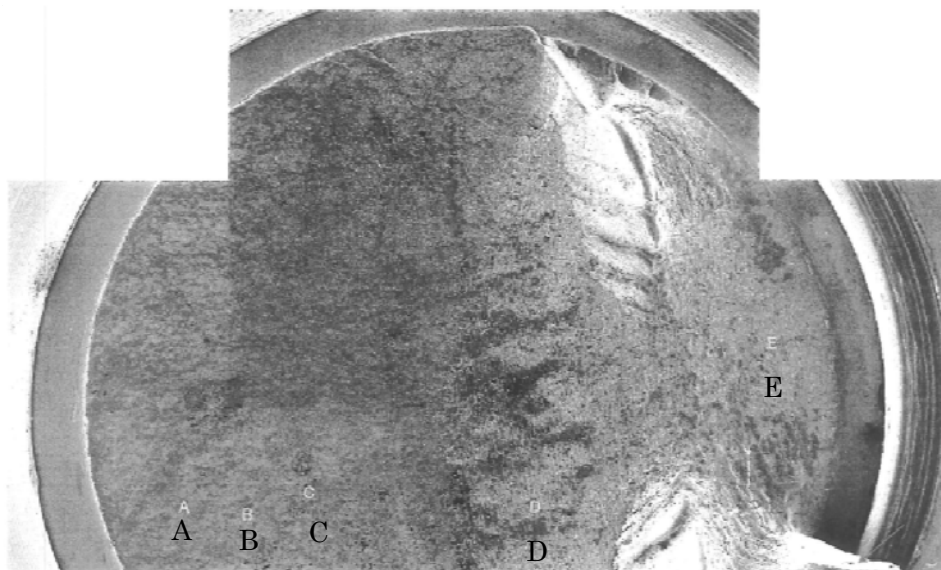


写真4 破断したボルトの破断面とナット表面の状況

(4) 破断したボルトの断面の状況

① JFE テクノリサーチによる分析結果

進行
方向
左側



進行
方向
右側

写真5 JFE テクノリサーチによるボルトの破断面の写真

インタミン・ジャパンの依頼による JFE テクノリサーチによるボルトの調査結果は以下の通りであった。

イ 写真5のA部側からE部側に疲労破壊が進展したものと推察される。

ロ 起点の特定は困難であった。

ハ B部にはき裂の進展に伴って、1回の繰返し応力が作用する毎にき裂がわずかに進み、その跡が縞模様となって残ったストライエーションが観察される。

ニ C部には、ストライエーション、2次クラック、および延性的に破壊した痕跡であるディンプルと呼ばれる窪みが観察され、疲労破壊の後期と推察される。

ホ D部はディンプル主体の破断面でこの位置の破壊モードは、低サイクル疲労破壊であると推察される。

へ E部はディンプルが観察され、最終破断面と推察される。

ト ボルトの破壊方向から、軸受け台ブロックに対して水平方向に繰返し力を受けねじ底部に疲労破壊が発生し、ボルトの半径方向に進展後、破断に至ったものと推察される。

② 都立産業技術センターの分析結果

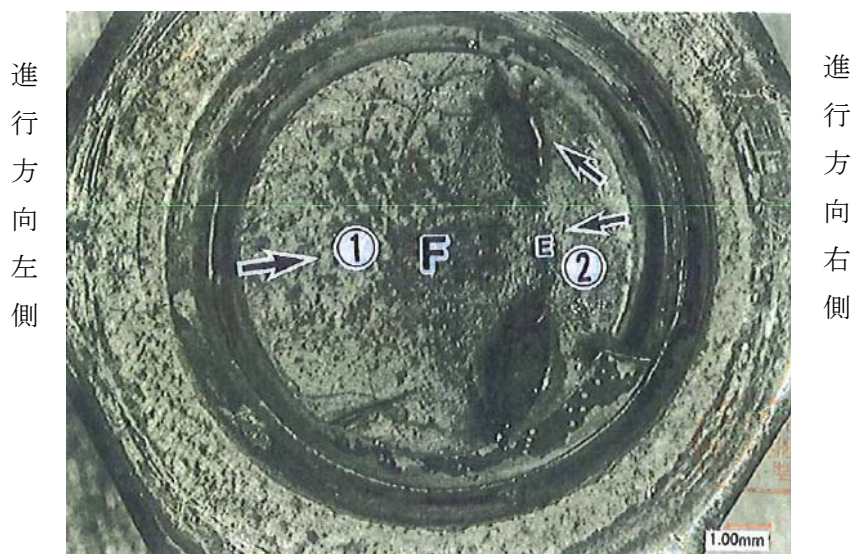


写真6 都立産業技術センターによるボルトの破断面の写真

東京ドームの依頼による都立産業技術センターの分析結果は以下の通りであった。

破断面は写真6の①部、②部とあり、亀裂は①、②ともに曲げ応力の作用で進展している。破断面①の面積は破断面②より広いことから破壊は部分両振りであることがわかる。また、破断面F部は疲労破壊模様のビーチマークが観察される。

(5) 軸受け台ブロック取付けボルトの劣化診断検査結果

東京ドーム及びインタミン・ジャパンは、平成23年1月19日に、東京ドームにおいて、事故機に当時に取り付けられていたボルト（破断したボルトを除く。）、平成22年2月に交換されたボルトの一部及び兄弟機の軸受け台ブロック取付けボルトの探傷試験を実施した。

①探傷検査の内容

- イ 磁粉探傷検査
- ロ 超音波探傷検査

②探傷検査結果

表2に示すとおり、特に異常はなかった。

表 2 探傷検査結果

車 両	ボルト部位	ボルトの仕様	本数	試験結果
オレンジ車両 (事故機)	下部車輪用軸受け台 ブロック取付け用	六角ボルト M12×280	27 本	異常なし
		六角ボルト M12×280 (H22 年 2 月交換の既設品)	10 本	異常なし
		六角穴付きボルト M12×115	56 本	異常なし
	側車輪用軸受け台 ブロック取付け用	六角ボルト M12×220	56 本	異常なし
イエロー車両 (兄弟機)	下部車輪用軸受け台 ブロック取付け用	六角ボルト M12×280 (H22 年 6 月交換の既設品)	10 本	異常なし

(6) 運転回数に関する情報

東京ドームによると、事故車両の下部車輪軸受け台ブロック固定ボルトは年 1 回の分解整備時に交換を行っており、平成 22 年 2 月 11 日に交換された後、事故車両が平成 22 年 12 月 5 日までの約 10 ヶ月の間に 15,477 回走行していたとのことであった。

2. 6 ボルトに作用した荷重について

2.6.1 製造者による下部車輪軸受け台ブロック固定ボルトの取扱いについて

確認申請書では、下部車輪軸受け台ブロック固定ボルトについての強度計算は行われなかった。

2.6.2 製造者による下部車輪軸受け台ブロック固定ボルトの強度計算について

インタミン・ジャパンは、2. 5 (2) のとおり、平成 20 年 6 月に下部車輪軸受け台ブロック固定ボルトの強度計算を行った。

下部車輪に係る力を、図 5 のように、車両に上向きの加速度が働いたときに車輪が軌道から受ける下向きの力のみを考慮しており、横向きについては考慮していなかった。

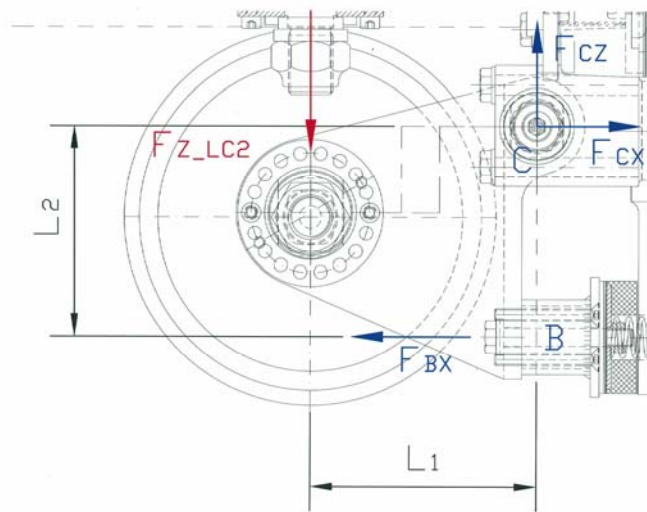


図5 当初想定された下部車輪にかかる荷重

2.6.3 車両にかかる加速度の状況

インタミン・ジャパンによると、シミュレーションにより先頭車両に上向きの加速度が生じ、下部車輪に応力が作用するのは、表3及び図6の三箇所であった。

上向きの加速度が生じているいずれの箇所においても計算上、ほとんど左右方向には加速度が生じないこととなっている。

表3 コースシミュレーションによる上向き加速度が発生する地点

コース上の位置	スタートからの距離	先頭車両にかかる上向き加速度	左右加速度
ポイント 70	136.6m	0.34G	0G
ポイント 313	666.3m	0.25G	0G
ポイント 360	768.8m	0.49G	0.03G (左向き)

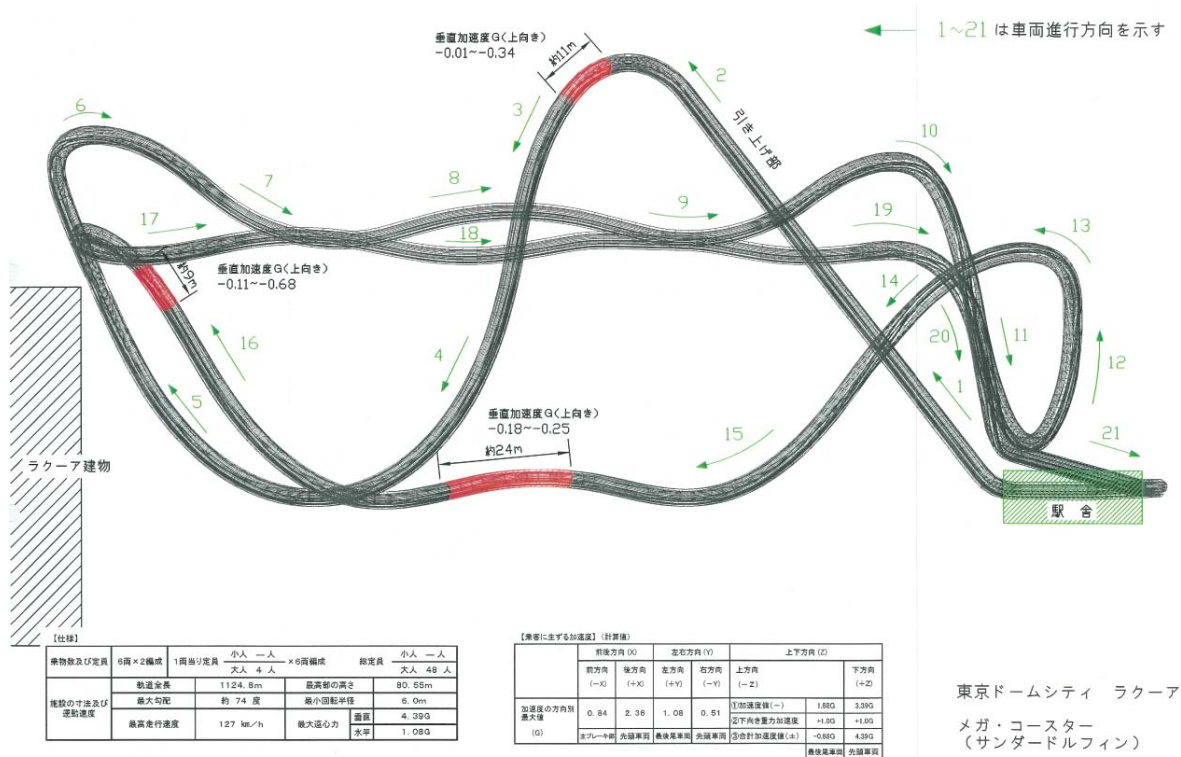


図6 コースターの走路の概要と上向き加速度の生ずるゾーン

2.6.4 事故機による実走試験の状況

東京ドームは、平成23年5月31日に事故機にセンサーを設置し実走試験を行い、車両の加速度等が測定された。その結果は以下の通り。

(1) 実走試験の条件

6両のうち、1, 2, 4, 6号車には各座席54kgのウェイトを設置、3号車には前列にウェイト、後列にデータ記録器を設置、5号車はウェイトが用意できず空車であった。

(2) 実走試験の計測項目

- ①下部車輪、側車輪軸受け台ブロック固定ボルト軸力
- ②下部車輪軸の衝撃加速度
- ③1両目、3両目、6両目の車体の3軸の加速度
- ④車両速度

(3) 実走試験の結果

- ①最高速度は、設計値127km/hに対して126km/hを記録した。
- ②図7のように、コースシミュレーションでの直線部分であり、予想水平加速度が0Gの範囲においても、左右への水平加速度が検出された部分があった。
- ③浮き上がり荷重がかかる場所およびその地点での左右方向の加速度は表の

とおりであり、直線部分であるポイント 70、ポイント 313 近傍で、左向き
の加速度が測定された。

- ④ボルトの軸力は、ねじ部にオイルを塗布した状態で、100Nm の締め付けトルクで締められ、締め付けトルクによるボルトの軸力は、54.4kN～65.9kN であった。

表 5 実走試験により車両に上向き加速度が発生した地点

	スタートからの距離	先頭車両にかかる上向き加速度	左右加速度
ポイント 70 近傍	136.6m	0.3G	0.4G (左向き)
ポイント 313 近傍	666.5m	0.1G	0.1G (左向き)
ポイント 360 近傍	769.0m	0.4G	0.3G (左向き)

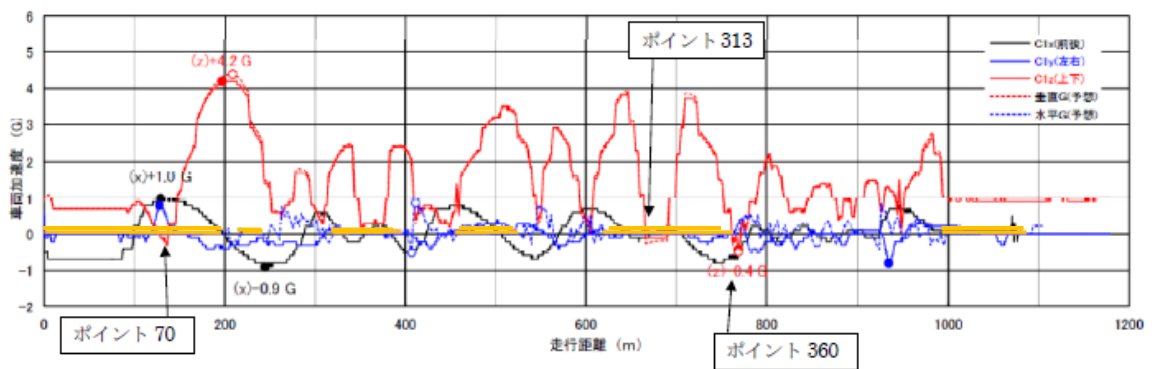


図 7 実走試験での車両の加速度 (——— は予想水平加速度が 0G の部分)

2.6.5 事故機の台車に関する情報

事故機の台車は、車体の 4 隅にピボットピンで台車に取り付けられている独立型ボギー台車と言われる構造であった。

より一般的なボギー台車の構造としては、左右のボギー台車が車軸でつながれている一体型ボギー台車と言われる構造がある。

東京ドームによると、独立型ボギー台車は、図 9 のように台車の構造上カーブに追従するため、側車輪が軌道幅 900mm 以上を開く構造となっている。

事故機の場合最少のカーブであるプラットフォーム入り口部分の軌道半径は 6,000mm であるため、このときのピボット間の軌道幅は約 915mm になるので、側車輪は外側に左右それぞれ 7.5mm 開くことになる。

側車輪は騒音防止のため、図 8 のようにばねにより軌道に押し付けられているが、ばねの強さは、走行中の車体が左右に動くのを制限するほどの強さではないので、直線部分ではコースターは左右にそれぞれ数 mm 程度動くことができ

る構造になっている。

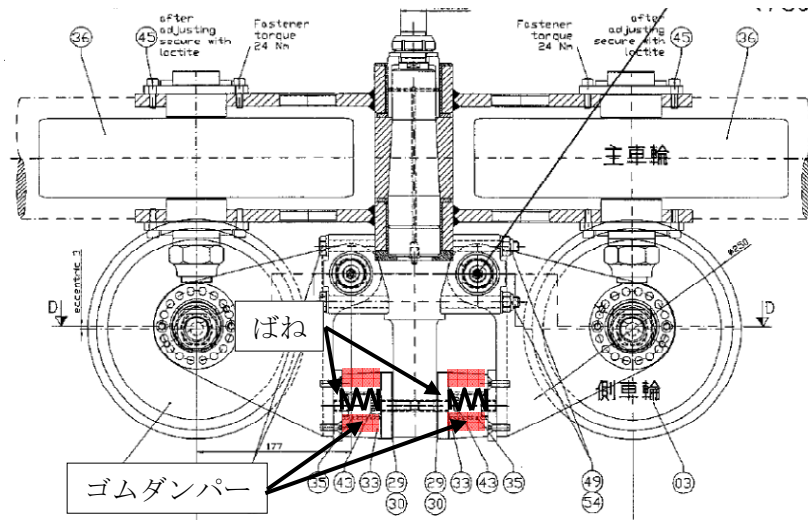


図8 側車輪の構造

図10の一体型ボギー台車の場合は、同様の軌道半径でも、直線部分において、左右合わせて1.1mmしか隙間が生じないとのことである。

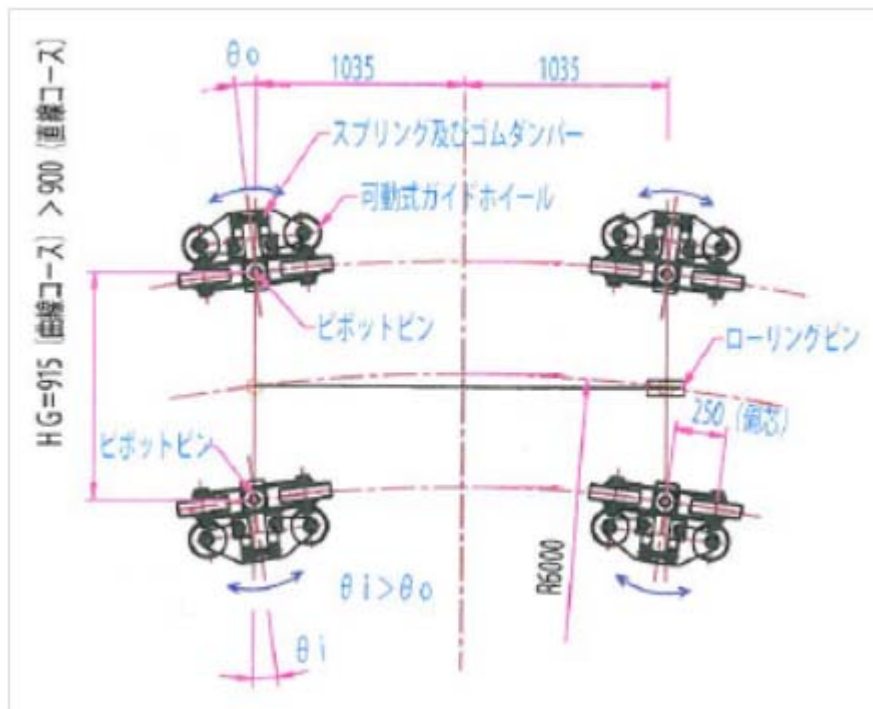


図9 独立型ボギー台車の最小半径部での状態

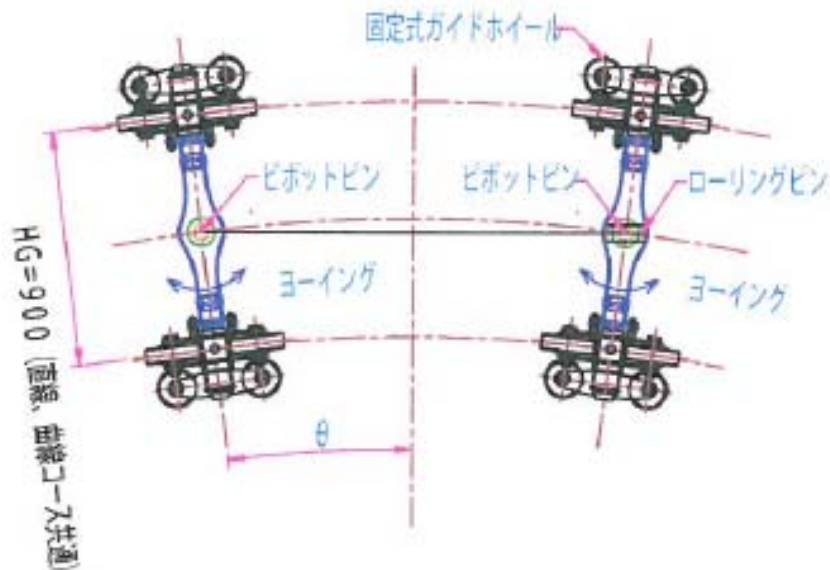


図10 一体型ボギー台車の最小半径部での状態

2.6.6 軸受け台ブロックに関する情報

(1) 軸受け台ブロックの構造について

東京ドームでは、事故後、旭エンジニアリングに依頼し、下部車輪軸受け台ブロック(図11)まわりの強度の検証を行った。

それによると、横方向からの力によってボルトに生じる力は、図12のように、軸受け台ブロックと可動支点軸の隙間がない場合とある場合で大きく異なる。

軸受け台ブロックと可動支点軸の隙間がない場合は、横方向の力に対して、軸も応力を負担できるので、軸受け台ブロックにかかる力は少ない。

一方、軸と軸受け台ブロックのはめ合いに隙間がある場合は、ブロックが傾く方向の力を、軸とブロックのはめ合いにより負担できないため、軸受け台ブロックに大きな力がかかることとなるとのことであった。

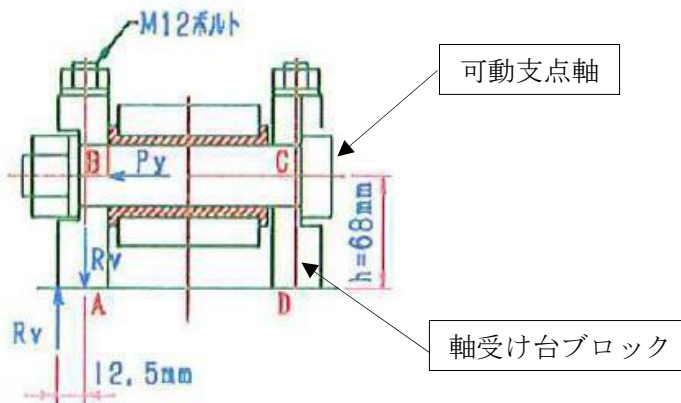


図11 下部車輪軸受け台ブロック

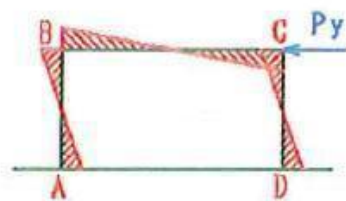


Fig (1)

軸がモーメントを負担する場合

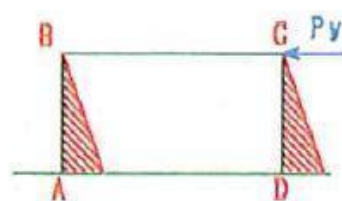


Fig (2)

軸がモーメントを負担しない場合

図 1 2 軸と軸受け台ブロックの隙間が無い場合(左)ある場合(右)の軸受け台ブロックにかかるモーメント図

(2) 下部車輪軸受け台ブロックの設計による指定値について

表 6 のとおりインタミン社(スイス)の設計図面での下部車輪軸受け台ブロックの軸穴の寸法公差は、 $\phi 30\text{-H7}$ が指定されており、基準値に対して $-0\sim +0.021\text{mm}$ で製作される。軸穴の仕上げは、算術平均粗さ $1.6a$ とされている。

インタミン・ジャパンが国内で部品を製作したときに東京ドーム側に渡した図面では、下部車輪軸受け台ブロックの軸穴の寸法公差は、 $0\sim +0.03\text{mm}$ となっており、軸穴の仕上げは、指示記号が無かった。インタミン・ジャパンによると、軸穴の仕上げは、設計図面と同じ $1.6a$ で、実際に機械加工を行う際には、図面に記入して製作指示したとのことであった。

なお、インタミン・ジャパンによると軸の公差は、 $\phi 30\text{-h8}$ が指定されており、基準値に対する寸法許容差は $-0.033\sim +0$ であり、軸穴が基準値以上、軸が基準値以下になるように製作されるので、はめあいは軸と軸穴に隙間があるすきまばめとなっているとのことである。

(3) 下部車輪軸受け台ブロックの状況

東京ドームによると事故機の 1 号車前部右側の外側下部車輪軸受け台ブロックの軸穴の直径は、交換基準が、 30.30mm のところ、前後方向で 30.20mm 、上下方向で 30.18mm で、交換基準内であったが、軸穴の部分に傷が見られた。

東京ドームによると、下部車輪軸受け台ブロックは、平成 22 年 1 月 13 日～2 月 11 日の期間に実施された分解整備時に交換されたとのことである。

交換された部品は、インタミン・ジャパンにより国内で製作されたもので、当初ついていたオリジナル部品との違いは表 6 の通りである。

表6 軸受け台ブロック比較

	オリジナル部品	国内製作品(写真7)
材質	S355J2G3 (DIN 規格)	SM490 (JIS 規格、S355J2G3 の同等品)
設計上の軸穴の寸法公差	$\phi 30H7 (0, +0.021)$	$\phi 30 (0, +0.03)$
設計上の軸穴の仕上げ(指示値)	1.6a (図面指示値)	1.6a(使用した工具と加工方法による。)
軸穴の仕上げ(測定値)	現物無し。	50S (12.5a) (面粗さ標準片との触診比較による。)
基準値(30mm)からの摩耗量	H15～H22 で使用限度 (年約0.04mm)	10ヶ月で0.2mm(年約0.24mm) 破断したボルトがついていたブロック

※1.6a とは、算術平均粗さ Ra での表面粗さを表し、粗さ曲線の平均線からの絶対値を基準長さだけ積分したものを基準長さで除した値をマイクロメートルで表したものをいう。



写真7 軸受け台ブロック軸穴部表面粗さ

2.6.7 ボルトに生じる力について

東京ドームでは、破断したボルトの分析結果を踏まえて、ボルトに水平方向の力がかかる場合を想定し、車両に上向きの加速度がかかるときに軌道から受ける垂直方向の力と、車両が横滑りすることにより下部車輪が軌道との摩擦により受ける水平方向の力について、折損部のボルトの強度計算を行った。

その計算結果では、車輪が反力を受けていない場合に比較し、ボルトの最大応力として 1001.8N/mm^2 が加わり、ボルトの応力振幅として 90.1N/mm^2 が加わることとなることであった。

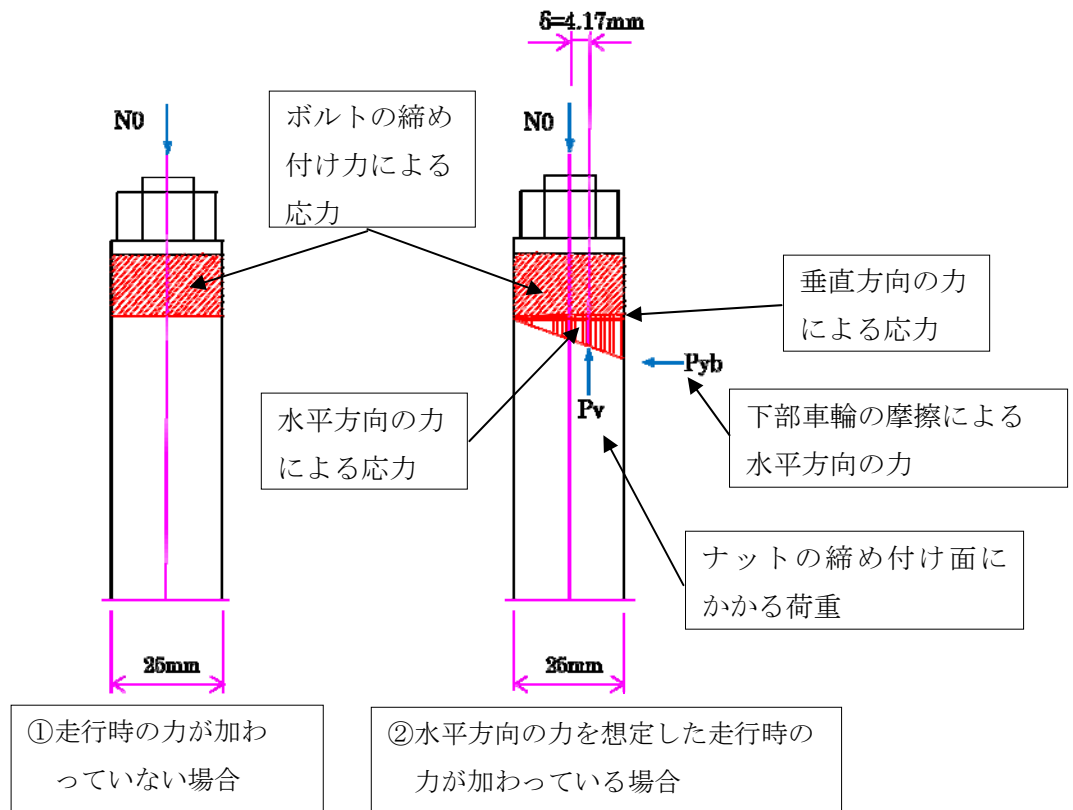


図 1 3 ナットの締め付け面に働く応力

(参考) 計算式と関連図

(1) 第一ボギー台車の下部車輪反力

コースシミュレーションで、ポイント 360 で最も大きい上向きの加速度 (-0.49G) が発生するためこの地点における下部車輪反力 R_{1u} は

$$R_{1u} = 0.49G \times R_{1s} \times k$$

R_{1s} 第一ボギー台車の前方走行車輪 (4カ所) のボギー台車及び乗客の荷重により生じる反力 : 10.859 (kN) (第一ボギー台車重量 18,247N、乗客 640N/人として荷重がかかる位置を考慮して算定)

衝撃係数 : $k=1.2$

(2) 下部車輪軸受け台ブロック

下部車輪の横滑り荷重

$$P_y = \mu \times R_{1u} / N$$

下部車輪にかかる下方向の荷重

$$P_z = R_{1u} / N$$

車輪と軌道の摩擦係数 : $\mu=0.6$

N : 車輪数 (4個)

(3) 支点軸の反力

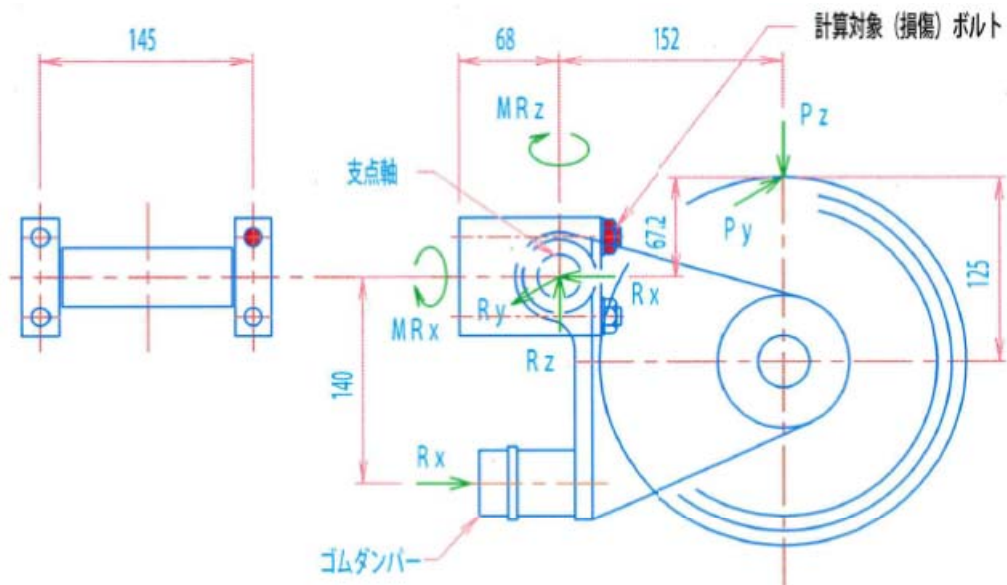
支点軸の X 方向の力 = ゴムダンパーの反力 : $R_x = P_z \times 152 / 140$

支点軸の Y 方向の力 : $R_y = P_y$

支点軸の Z 方向の力 : $R_z = -P_z$

可動支点軸中心を通る X 軸まわりのモーメント : $MR_x = P_y \times 67.2$

可動支点軸中心を通る Z 軸まわりのモーメント : $MR_z = P_y \times 152$



参考図1 下部車輪および軸受け台ブロックにかかる力

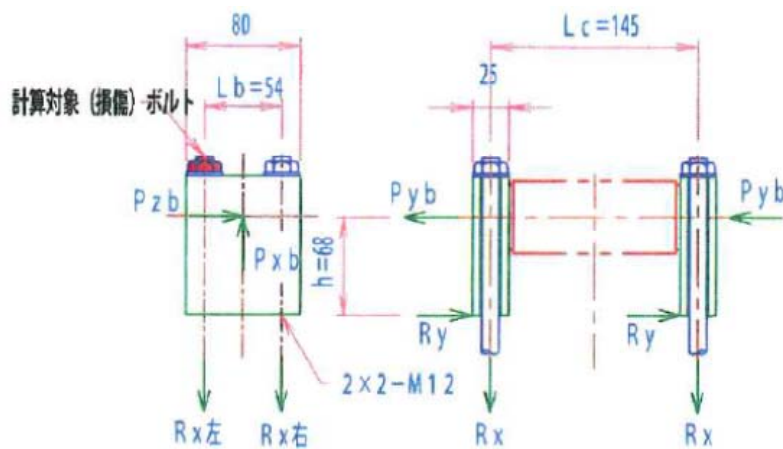
(4) 損傷ボルト側の軸受け台ブロックに作用する荷重

軸受け台ブロックには、参考図2のように、下部車輪フレーム及び下部車輪可動支点軸により、 P_{xb} 、 P_{yb} 、 P_{zb} が係る。

$$P_{zb} = R_z / 2 + MR_x / L_c$$

$$P_{xb} = R_x / 2 - MR_z / L_c$$

$$P_{yb} = R_y / 2$$

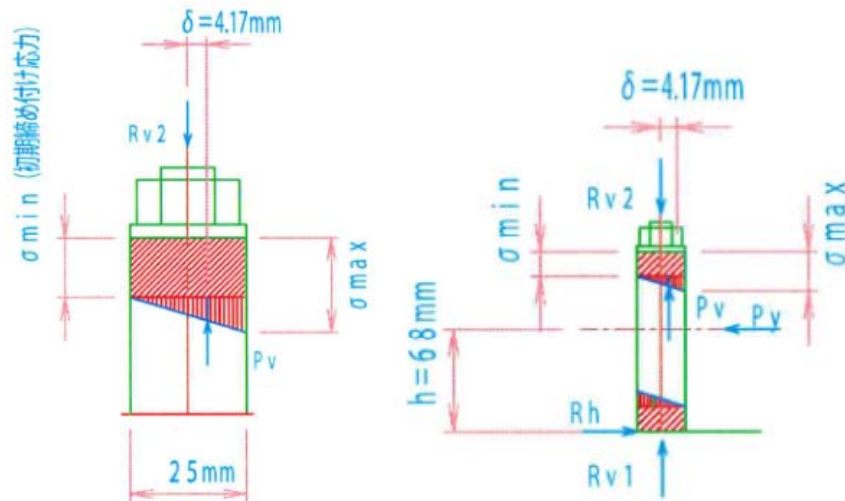


参考図2 軸受け台ブロックに加わる力

(5) 折損したボルトにかかる応力

下部車輪可動支点軸の中心から、軸受け台ブロックに水平方向の力が働いた場合、ボルトの

締め付け力は十分大きいので軸受け台ブロックは傾かないが、ナットの締め付け面には参考図3のように P_{yb} により三角形の力が働き、ボルトの中心から δ だけ離れた三角形の図心の位置がナットへの作用点となり、ボルトに曲げモーメントが働くとのことによりボルトの表面に引っ張りと圧縮応力が働くとのことである。



参考図3 軸受け台ブロックにかかる横方向からの力

横滑りによる荷重 P_{yb} により、ナットの締め付け面には、図のように三角形の面圧分布が考えられ、ボルト中心から面圧分布の図心までの距離を δ だけ離れたナット締め付け面にかかる力の大きさを P_v とすると。

$$\delta = 25 \times 2/3 - 12.5 = 4.17 \text{ (mm)}$$

$$P_v = P_{yb} \times h / (n \times \delta) \quad n: \text{ボルトの本数 (2 本)}$$

ボルトの曲げ応力度

$$\sigma_b = P_v \times \delta / Z$$

ボルトの最大軸力

$$N_{\max} = N_0 + P_{zb} \times h / L_b + P_{xb} / 2$$

ボルトの最大応力度

$$\sigma_{\max} = N_{\max} / A + \sigma_b = 1001.8 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

ボルトの最少応力度

$$\sigma_{\min} = N_0 / A = 821.7 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

実測されたボルトの初期締め付け軸力の最大値: $N_0 = 65.9 \text{ (kN)}$

M12 ボルトの谷径断面積 $A = 80.2 \text{ (mm}^2\text{)}$ 谷径断面係数 $Z = 101 \text{ (mm}^3\text{)}$

$h = 68 \text{ mm}$ $L_b = 54 \text{ mm}$ $L_c = 145 \text{ mm}$

(6) ボルトの応力振幅

$$\sigma_a = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) / 2 = 90.1 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

2.6.8 ボルトの疲労限度について

M12 のボルトの疲労限度の推定値は、「2010 年版遊戯施設技術基準の解説」(日本建築設備・昇降機センター)によると、8.8T で 54.9N/mm^2 、10.9T で 63.7N/mm^2 とされている。

2.7 コースターの維持保全に関する情報

2.7.1 ボルトの点検の状況

遊戯施設の維持保全計画書が作成されており、定期点検、法定定期検査、保守部品交換に関する事項等が定められていた。サンダードルフィンの台車のボルトについては、以下のような定期点検が行われていた。

- (1) 毎日点検・・・始業時、すべてのボルトに対して、締め付けの合いマークの目視確認及びテストハンマーによる打検が行なわれていた。
- (2) 毎月点検・・・ボギー台車の各車輪軸にグリースを塗布していた。
- (3) 年次点検・・・インタミン・ジャパンによると事故機であるオレンジ車両は、毎年2月頃の分解整備の際、工場において、当該箇所ボルトは毎年新品に交換し、トルクレンチにより締め付けられていたとのことである。

2.7.2 車両分解整備チェックリストによるボルトの締め付けトルクの状況

年1回の工場での分解整備の記録である車両分解整備チェックリストによると、平成16年～平成20年までは、軸受け台ブロック取り付けボルトの締め付けトルクの記載が無く、平成21年には、締め付けトルクが125Nmの記載があったが、直近の平成22年2月のチェックリストには、締め付けトルクの記載がなかった。

インタミン・ジャパンによると、平成22年2月には、ねじ部にオイルを塗布した上で締め付けトルクは100Nmとしたとのことであった。また、適正な締め付けトルクはねじ部にオイルを塗布して $100\text{Nm} \pm 10\%$ であるとのことであるが、平成21年はねじ部にオイルを塗布しなかったため125Nmとしていたとのことであった。

2.8 類似機の点検状況

同一製造者のコースターで当該コースターと下部車輪の構造が類似のコースターは国内に2箇所あるが、事故後の点検の結果、下部車輪軸受け台ブロック固定ボルトに特に異常は見られなかった。

2.9 軸受け台ブロックの構造が類似のコースターの軸受け台ブロックの状況

インタミン・ジャパンによると事故機と類似の下部車輪構造を持つコースターの軸受け台ブロックは、表7の通りで、事故機は、類似のコースターと比較

すると、浮き上がり方向の加速度は、約 1/2 倍だが、可動支点軸中心からブロック下端までの距離は、約 2.1 倍、軸受け台ブロックの幅は、0.83 倍となっている。

それぞれのブロックが同じ荷重で可動支点軸中心部分で押されて下端の角を支点として傾くときの傾きやすさは、事故機は傾き方向の力が 2.1 倍となり、ボルトの軸力により傾きを防ぐ力が 0.83 倍なので、類似のコースターより 2.5 倍傾きやすい構造である。

表 7 事故機と類似のコースターの下部車輪軸受け台ブロックの寸法比較

	事故機	コースターA	コースターB
営業開始時期	平成 15 年 5 月	平成 18 年 4 月	平成 20 年 3 月
浮き上がり方向最大加速度	-0.49G	-1.09G	-0.97G
可動支点軸中心からブロック下端までの距離	68mm	32mm	32mm
固定ボルトの中心からブロック端までの距離	12.5mm	15mm	15mm

2. 10 当該コースターに発生した同種の不具合

東京ドームによると、平成 19 年 12 月 17 日にも、当該コースターにおいて、2 両目左側の下部車輪軸受け台ブロックの上部固定ボルトが折損したとのことであった。折損したボルトは、導入時から使用していたスイス製の強度区分 8.8T のボルトとのことであった。ナットはブレーキゾーン下部付近で発見されたがボルトは見つからなかったとのことであった。

当時は、人への接触や物損がなかったため、ボルトを交換するだけで調査等は行われなかったとのこと、折損の原因は不明とのことであった。

インタミン・ジャパンも、技術的問題を伴わない通常の交換部品として処理し、その経緯が社内に報告されることもなかったため、当時の状況は不明とのことであった。

3. 分析

3. 1 ボルトに関する分析

3.1.1 ボルトの品質及び管理状況について

2. 5 (5) により、事故機の他のボルトには損傷は見られなかったことから、ボルトの品質上の問題により折損した可能性は低いと考えられる。

2. 7 より、ボルトは、締め付けられた後、始業点検で打検及び合いマーク

による緩みの確認を行っていることから、ボルトの緩みにより疲労破壊した可能性は低いと考えられる。

また、打検はテストハンマーで行われており、打検の衝撃でボルトが破損した可能性は低いと考えられる。

3.1.2 ボルトの破壊形状について

2.5(4)により、ボルトの破壊形状は繰り返し応力を受けたことによる疲労破壊であると認められる。また、新品ボルトに交換してからの運転回数が15,477回と比較的少ないことにより、比較的大きな応力による疲労破壊であると推定される。

また、ボルトの破壊の方向から、横方向に働く力が繰り返しかかったことにより破壊に至ったと推定される。

3.1.3 疲労破壊の原因となった力について

破壊の原因となったボルトに働く横方向の力は、車輪が横方向に受けた力が軸受け台ブロックを通じて働いたものと認められる。

車輪が横方向に大きな力を受ける機会は、車両に浮き上がりが生じ下部車輪が軌道から押し付けられた時に車両に横方向の力が働き、それが車輪と軌道の間で働く摩擦力により伝わる機会が考えられる。

2.6.3より、シミュレーションでは車両に浮き上がりが生じる場合は、ほとんどが直線部であり、車両に働く遠心力が小さいことから下部車輪には横方向には小さな力しか働かないものとされている。

しかしながら、2.6.4の実走試験の結果では、直線部においても左右方向の加速度が生じており、浮き上がりが生じる部分でも0.3～0.4Gの左方向の加速度が計測されている。

この加速度は、走行中の車両の揺動、がたつき等により生じているものと考えられ、特に事故機においては、2.6.5のとおり、独立型のボギー台車を採用していることから、左右方向の揺動等が発生しやすいものと考えられる。

この加速度は、不規則に生じる力であるため、明確に算定・計測することは困難であるが、左右方向の揺動等が発生した場合、車輪が軌道との間に生じる摩擦力だけでは耐えきれず部分的に横滑りをする場合も考えられる。

この場合、下部車輪には、下部車輪が軌道を押している加速度に摩擦係数を乗じた力が横方向の力として作用するものと考えられる。

製造者は、平成20年のボルトの交換基準決定時に疲労計算を行った際にも

又、事故後に製造者が検証した際にも揺動等により生じる力については、考慮されていなかったことから、製造時には独立型ボギー台車の特性により横方向のズレによる力が生じることを想定していなかったと認められる。

3.1.4 ボルトに作用した力について

車輪が3.1.3の力を受けた場合、その力を受ける二つの軸受け台ブロックが、横方向には奥行きが小さい形状であったため、横方向から力が加わった場合、軸受け台ブロックを留めるボルトに大きな力がかかる構造であった。

また、2.9より事故機の軸受台ブロックは、類似のコースターと比較しても、横方向から同じ大きさの力が加わった場合、ボルトに大きな力がかかりやすい構造であった。

なお、軸受台ブロックと二つの軸受台ブロックを貫通する可動支点軸が、常に密着しているようなはめあいの場合には、可動支点軸が二つの軸受台ブロックをつなぐ形で横からの力を負担できるが、事故機のはめあいは、すきまばめであり、水平方向の力が加わった場合、可動支点軸が力を負担できる構造ではなかった。

2.6.7の東京ドームによる計算では応力振幅 90.1N/mm^2 が加わった可能性があり、この力は2.6.8の文献の疲労限度を上回っているため、左右方向の揺れ等による力によりボルトが疲労破壊する可能性がある。また、ボルトにかかる最大応力は、 1001.8N/mm^2 とボルトの降伏応力 940N/mm^2 を上回る可能性があるため、走行回数が15,477回と比較的少ない回数で、ボルトが疲労破壊したと考えられる。

なお、東京ドームの計算では、衝撃力による割り増しを1.2としているが、平成12年建設省告示第1419号では、衝撃力による割り増しが1.5とされていることから、さらに高い力が衝撃力としてかかっている可能性がある。

3.2 過去のボルトの折損について

ボルトの折損は今回の事故で二度目であり、一度目の折損の際には原因の究明を行わずボルトの交換を行っただけであった。この機会に原因の究明が行われ、必要な再発防止対策を行っていれば、今回の事故を防ぐことができたと考えられる。

4 原因

下部車輪軸受け台ブロック固定ボルトが折損した原因は、下部車輪に力が加わる車両の浮き上がり時に、車輪に水平方向の力が働くことによりボルトに疲労限

度を超える応力がかかったことによるものと考えられる。

このような疲労破壊が生じる構造であったのは、事故機の台車が独立型ボギー台車であることから、走行時に左右に動きやすい構造であるにも関わらず、下部車輪に走行中の揺動によって生じる横方向の力が生じるおそれがあることを想定せずに、必要な対策を講じた設計を行わなかったことによるものと考えられる。

また、平成19年にボルトが折損したときに、原因究明が適切に行われなかったことにより、必要な対策が行われずボルトの折損を再発し、事故に至ったものと認められる。

5 意見

- (1) 国土交通省は類似の独立型ボギー台車を用いている遊戯施設について、車両の揺動等による横方向の加速度による力の検討が行われているか調査を行い、行われていない場合には、安全性について検証を行うよう指導すること。
- (2) 国土交通省は、遊戯施設の所有者に対して遊戯施設で部品の折損があった場合、十分な原因究明を行った上、再発防止対策を行うよう指導するとともに、その結果を定期検査報告で報告するよう定めること。
- (3) 国土交通省は、既存の遊戯施設に対し、これまでボルトの折損等による部品の落下が生じていないか、落下している場合には十分な原因究明及び再発防止対策が行われているか調査し、行われていない場合には、行うよう指導すること。
- (4) 国土交通省は、(1)、(2)、(3)の措置によっても防ぐことのできない遊戯施設のボルトの落下による被害を防止するため、ボルトの脱落防止、走路の下の立入禁止措置等抜本的対策の検討を行うこと。