列車衝突事故時の回転リクライニングシート着座乗客の傷害評価

沖野 友洋^{*1}, 中井 一馬^{*1}, 高野 純一^{*1}, 榎並 祥太^{*2}, 長尾 裕^{*3}, 小川 征輝^{*3}Injury evaluation for passenger seated in the rotating and reclining seat
in the event of a train collisionTomohiro OKINO^{*1}, Kazuma NAKAI^{*1}, Junichi TAKANO^{*1}, Shota ENAMI^{*2},
Yutaka NAGAO^{*3} and Masaki OGAWA^{*3}^{*1, *2} Railway Technical Research Institute

2-8-38 Hikari-cho, Kokubunji-shi, Tokyo 185-8540, Japan

^{*3} Koito Electric Industries, LTD.

100 Maeda-cho, Totsuka-ku, Yokohama-shi, Kanagawa 244-8571, Japan

Received: 24 May 2016; Revised: 13 October 2016; Accepted: 28 December 2016

Abstract

In the event of a level crossing accident, train passengers seated in a rotating and reclining seat have a risk of getting injured due to collision with seats in front of them. In order to evaluate the passenger's kinematic behavior and injury quantitatively in this situation, firstly the authors carried out dynamic tests by striking the seats with an impactor to grasp the physical properties of the seat in terms of dynamic strength. Secondly, the authors carried out impact tests using crash-test dummies, and FE analyses under the same condition as the tests. As a result, it was clarified numerically that the most important passenger's part to which attention should be paid was the femur, and the head and the chest had a low risk of serious injury. However, if the impact acceleration was increased, the forward seat was not able to catch the passenger because of its revolution or deformation and there was a possibility of injury caused by jumping out forward. Furthermore, the numerical results obtained by the FE analyses by means of a rigid dummy model developed for the automobile were generally consistent with the empirical results in terms of dummy's behavior and injury values.

Key words : Railway, Passenger seat, Impact test, Finite element method, Human engineering

1. 緒 言

鉄道車両が大型自動車等と衝突した場合、客室内では衝撃加速度によって乗客が進行方向に投げ出され、内装品と衝突（以後、2次衝突と呼ぶ）して負傷する可能性がある。この時の乗客の挙動や負傷する箇所、負傷の程度を検討することは、乗客の安全性向上の観点から重要である。一方、実際の衝突を検討する場合、客室内には様々な内装品があり、乗客の姿勢も様々であるため、多くの状況が考えられる。欧州や米国において、固定式のクロスシートに着座した乗客の2次衝突時の安全性評価に関する研究がなされている（Severson et al., 2005）（Carvalho et al., 2011）。また、我が国においても、ロングシートに着座した乗客の袖仕切りへの衝突（Nakai et al., 2015a）、立位乗客の床面への衝突（Nakai et al., 2015b）、クロスシート着座乗客の客室仕切りへの衝突（田口他, 2014）が検討されている。しかしながら、我が国において在来線特急車両等に多く採用されている回転リクライニングシートに着座した乗客を対象とした報告は認められない。一方、旅客用腰掛に関する日本工業規格（日本規格協会, 2015）があるが、強度に関しては、利用時に発生する力に対する静的強度試験方法の規定と、2次衝

No.16-00235 [DOI: 10.1299/transjsme.16-00235], J-STAGE Advance Publication date: 13 January, 2017

^{*1} 正員, (公財) 鉄道総合技術研究所 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)^{*2} (公財) 鉄道総合技術研究所^{*3} コイト電工 (株) 横浜工場 (〒244-8571 神奈川県横浜市戸塚区前田町 100)

E-mail of corresponding author: okino.tomohiro.10@rti.or.jp

突対策としては、けがの原因となる可能性のある箇所を丸くすることや、緩衝材を付けることの記述に留まっている。そのため、衝突事故時において、乗客が2次衝突により負傷する箇所やその程度などの具体的な被害状況や負傷する原因を明確にすることは重要である。

2次衝突時の乗客被害を検証する方法として、乗客を模擬した人体ダミー人形とシートをスレッド（土台）上に設置し、スレッドに衝撃加速度を負荷するスレッド試験がある。しかしながら、スレッド試験はシートの塑性変形や破損を伴い、多数の試験を実施するには多大なコストを必要とする。また、ダミー人形およびシートが相互に影響を及ぼすため、これらの衝撃挙動の詳細を把握することは困難である。一方、FEM解析による検証は、多くのケーススタディが実施可能であり、さらには詳細な情報が得られ、試験結果をより深く検証できる。FEM解析では、汎用のダミーモデルを用いるが、自動車用に開発されたため、シートベルトやエアバッグ使用を前提としたものであり、他の用途に用いる場合にはダミーモデルの挙動や傷害値に関して妥当性の確認が必要である。また、回転リクライニングシートは複雑な構造であるため、シートモデルの衝撃挙動の精度が重要である。

本研究では、回転リクライニングシートに着座した乗客が前席の背面に衝突するケースを最も基本的な状況の1つとして検証対象とした。まず、複雑な構造である回転リクライニングシートの衝撃強度特性を把握すること、および2次衝突時の乗客被害を精度良く評価できるシート単体のFEM解析モデルを構築することを目的として、背面から半球状のインパクトを衝突させる打当て試験を実施した。次に、鉄道車両が大型自動車と衝突した際の乗客およびシートの挙動、乗客が衝突する箇所と衝突による傷害値を把握することを目的として、スレッド試験を実施し、ダミー人形の傷害値が比較的大きくなる部位を明確にし、その原因を考察した。さらに、スレッド試験に相当するFEM解析を実施して試験結果と比較検討することにより、ダミーモデルの各傷害値の解析精度を検証するとともに、各試験条件による傷害値の差異の原因について考察した。最後に、試験および解析による検証結果から、より安全なシートを設計するための方向性を示した。

2. 回転リクライニングシートの衝撃強度特性評価

2・1 回転リクライニングシート供試体

本研究で評価対象とした腰掛けは、図1に示す我が国における標準的な在来線特急車用回転リクライニングシート（以後、シートと呼ぶ）である。背面からの衝撃荷重負荷時の基本的なシートの強度特性を取得すること、シートに衝突した際の乗客を模擬した人体ダミー人形の基本的な挙動把握と傷害値取得を目的としているため、試験の再現性を確保するために背面のドリンクホルダ、網袋、テーブル、ラッチを取り外した。なお、打当て試験用供試体は背面カバーなし、スレッド試験用供試体は背面カバーありとした。これは、スレッド試験時は脛が背面カバーに衝突することが考えられるが、打当て試験時は強度上特に影響しないと判断したためである。

Fig. 1 Rotating and reclining seat specimen.

Fig. 2 Impact test condition.

2・2 回転リクライニングシートの打当て試験

(1) 試験方法

図2に示すように、剛体壁に固定治具を介してシートを取付け、衝突事故時に乗客の膝が衝突すると想定される位置（床から500mm）に半球状のインパクト（直径165mm、質量6.8kg）を速度6m/s程度で衝突させる条件（以後、膝衝突条件と呼ぶ）、頭部が衝突すると想定される位置（床から913mm）にインパクトを速度10m/s程度で衝突させる条件（以後、頭部衝突条件と呼ぶ）の2条件にて試験を実施した。なお、インパクト速度と衝突位置は第3章で示すスレッド試験の事前解析により頭部、膝がシートに衝突する速度と位置を推定して決定した。

計測項目は、インパクトの加速度、進行方向変位、シート各部の加速度とひずみ、高速度カメラによる全体の変形挙動である。

(2) 試験結果

それぞれの試験後のシートの変形状況を図3に、荷重－変位曲線を図4に示す。なお、荷重はインパクト進行方向の加速度と質量の積で、変位はインパクト進行方向変位である。

図4より、いずれの条件も、1つめの極大値は膝衝突条件が2.5kN、頭部衝突条件が5kN程度となり、一旦荷重が低下した。その後、膝衝突条件では、変位50mmで4.5kN程度まで荷重が上昇し、インパクトが反射して戻された。頭部衝突条件では、変位60mmで5kN程度まで荷重が上昇した後、1kN程度まで大きく減少し、この荷重を維持して最終的に変位140mm程度でインパクトが戻された。

Fig. 3 Test results of deformed shape. The receiver overrode the stopper under the head impact condition.

Fig. 4 Load - Displacement relation. The first maximal value was approximately 5kN (head impact condition) and 2.5kN (knee impact condition).

Fig. 5 Load, Displacement - Time relation (Head Impact Condition).

ここで、頭部衝突条件についてより詳細な検証をするために、荷重および変位と時間との関係を図5に、代表的な時刻における高速度カメラ画像（シートの変形状況）を図6に示す。なお、時間は荷重の立ち上がりを時刻0とする。1つめの極大値が見られる時刻3msでは図6(b)のようにシート全体に明瞭な挙動が見られず、慣性の影響により、背ずり背面の金属板の局所的な変形が進行する。その後、背ずり全体の変形が進行して荷重が低下し、時刻11msでは1kN程度となり、図6(c)の変形状況となる。さらに、シート全体で荷重を受けるモードとなって前傾し、時刻34msでは図6(d)の変形状況となる。この時、シートの右回転を止める受けが図3(b)に示すようにストッパを乗り越え、回転機構により20mm程度左回転した状態で停止した。膝衝突条件も同様な挙動であり、慣性の影響による荷重の極大値が2.5kN程度、シート全体で荷重を受けるモードでは4.5kN程度となった。

Fig. 6 High speed camera images of impact test (Head impact condition). The back of the seatback was deformed locally at 3ms (b), the whole seatback was deformed at 11ms (c), the whole seat was deformed at 34ms (d).

2・3 シートの打当て試験に対応するFEM解析

打当て試験で使用したシートを対象として、FEM解析モデルを構築した。金属や樹脂板等は要素ピッチ12mmを基本とするシェル要素、鋳物やクッション等はピッチ13mmを基本とするソリッド要素で構成した。なお、解析には汎用の陽解法有限要素解析プログラムPAMCRASHを使用した。

構築した解析モデルを用いて、図7に示すように、打当て試験の頭部衝突条件および脚部衝突条件に相当する解析を実施した。それぞれの条件における荷重－変位曲線を試験結果とあわせて図8に示す。

図8より、いずれの条件も荷重の立ち上がり波形や慣性の影響による極大値が良く一致しているのをはじめ、全体の応答が概ね整合した。膝衝突条件での解析において、変位30mm以降の剛性が低く推移していることが違いとして挙げられる。第3章で述べる人間の傷害評価のうち、膝（大腿部）傷害値は1つめの極大値が重要であることからこの違いは問題とはならない。なお、この原因として、数値解析のパラメータスタディより、背ずりのクッション材の材料特性、クッション材と背ずり背面の金属板との接着剤の特性による影響が大きいと考えられる。

以上のように、乗客の頭部および膝が衝突した際の変形挙動を精度良く再現できるシートの解析モデルを構築できた。

Fig. 7 FE seat model.

Fig. 8 Comparison of Load - Time relation. The FE results were consistent with the test ones under the both conditions.

3. 回転リクライニングシートに着座した乗客を想定したスレッド試験

3・1 スレッド試験方法

シートと乗客を模擬した前面衝突試験用人体ダミー人形 (Hybrid-III50th, 以後、ダミー人形と呼ぶ) を用いて、スレッド試験を実施した。図 9 に示すように、レール①上にあるスレッド②にはワイヤーを介して錘④が取り付けられている。まず、スレッド上に供試体を搭載した後、ウインチ③にて、位置⑤(スレッド切離し装置)までスレッドを移動させる。次に、スレッドとウインチを切離すことで、錘によってスレッドは加速され、スレッドが停止材⑥と衝突して急停止し供試体に衝撃加速度が負荷される。

Fig. 9 Sled test equipment.

試験条件は表 1 に示す 4 条件とした。1A および 1B 条件ではダミー人形 1 体を進行方向右側 (窓側) に着座させた。これは、1 人着座の場合、窓側の着座頻度が比較的高いと考えたものであり、左側に回転ペダルがある。2A および 2B 条件ではダミー人形を 2 体着座させた。入力加速度波形は 1A および 2A が最大 7G を、1B および 2B が最大 14G を目標とする波形とした (以後、それぞれ 7G 波形、14G 波形と呼ぶ)。各試験条件で目標とする衝撃加速度波形を図 10 に示す。7G 波形は過去の踏切重大事故の統計調査結果から、22 トンの大型トレーラの側面に速度 15m/s で列車が衝突する解析 (沖野他, 2012) を実施して得られた客室内の衝撃加速度波形を基に、当該スレッド試験装置で再現可能な範囲で設定した。また、3.2(1)に詳細を示すように、7G 波形ではダミー人形の各傷害値が基準値に対して低かったため、より厳しい 14G 波形を条件に加えた。

いずれの条件とも、ダミー人形を座らせる座席と衝突させる座席はいずれも進行方向を向き、相互の間隔は一般的な値 (960mm) とした。1A 条件での試験状況を図 11 に示す。ダミー人形の額、手、膝、脛および靴には、衝突箇所が分かるようにペイントを施した。

Table 1 Test condition.

Test condition	1A	2A	1B	2B
Number of Dummy	1 (Right side)	2	1 (Right side)	2
Input pulse	7G pulse	7G pulse	14G pulse	14G pulse

Fig. 10 Target input pulses.

Fig. 11 Test situation (1A condition).

計測項目は、スレッドの加速度、ダミー人形の頭部、胸部加速度および大腿部荷重、シート各部の加速度とひずみおよび取付け部の荷重ならびに高速度カメラによる全体の映像である。シート各部の加速度とひずみおよび取付け部の荷重については、紙面の都合上、詳細には触れないが、各部の時々刻々の挙動評価や解析との比較に活用した。道路運送車両の保安基準（交文社，2009）の前面衝突時の乗員保護の技術基準では、ダミー人形の傷害評価は HIC，胸部合成加速度の累積時間 3ms の値，大腿部荷重の 3 つの指標が定められている。本研究では、これらの指標を頭部傷害値（HIC36），胸部傷害値（3msG），大腿部傷害値（大腿部荷重）と定義する。頭部、胸部傷害値は加速度から、大腿部傷害値は荷重から求める。これらの指標に対して、傷害基準（HIC36：1000 以下，3msG：60G 以下，大腿部荷重：10kN 以下）を定めており、本試験においてもこれらを準用した。

なお、試験実施回数の制約から、同条件での複数回の試験実施による試験結果の再現性の検証はできなかったが、試験結果に影響を及ぼすと考えられるダミー人形の初期位置と姿勢、および入力加速度波形が同等となるように試験設定を行った。

3・2 スレッド試験結果

図 12 に 4 条件で行った試験より得られた入力加速度波形（スレッド減速度波形）を示す。なお、入力加速度の立ち上がり時刻を時刻 0 とする。図より 7G 波形は目標波形とほぼ一致したが、14G 波形は後半の加速度が目標値より低めとなった。ただし、1A，2A 条件（7G）ならびに 1B，2B 条件（14G）の波形には良好な再現性が認められる。以後、入力波形毎に結果を示す。

(a) 7G pulse

(b) 14G pulse

Fig. 12 Test results of input pulses. The input pulses of 1A and 2A were consistent with the target (a). Ones of 1B and 2B were lesser than the target after around 130ms, but they were quite similar (b).

(1) 7G 波形

表 2 に 7G 波形の各試験条件におけるダミー人形の傷害値の結果一覧を、図 13 および図 14 にそれぞれ 1A および 2A 条件におけるダミー人形の頭部、胸部加速度および大腿部荷重波形を、図 15 にダミー人形の脛、膝および頭部がシートに衝突した時の高速度カメラの画像を、図 16 および図 17 にそれぞれ 1A および 2A 条件における試験後の状況とダミー人形の脛、膝、頭部が衝突した箇所を示す。なお、図 13 および図 14 の大腿部荷重は負の値が圧縮を示す。

表 2 より、今回の試験条件において、各ダミー人形の傷害値が前述の傷害基準値を超えることはなかった。頭部傷害値は 1 人着座が 65、2 人着座は左右ほとんど差がなく 120～130 程度であり、基準値 1000 に対して十分小さかった。胸部傷害値はいずれも 10G 程度で基準値 60G に対して十分小さかった。なお、今回は胸部が直接シートに衝突することはなかった。大腿部傷害値は 1 人着座の方が大きく、左大腿部で 5.4kN、2 人着座は 3.6kN となり、最大でも基準値 10kN の 54%程度となった。図 13～17 より、まず脛および膝が 125ms 程度時に背ずり下部に衝突し、これによりシートとダミー人形がともに前傾し、190ms 程度時に頭部が背ずり上部に衝突した。膝衝突時に、前節の打当て試験（頭部衝突条件）と同様の理由でシート上部がストッパを乗り越え、2A 条件では、2 体のダミー人形がほぼ同時にシートに衝突するため、頭部が衝突した後、シート上部は回転せずダミー人形は後方に戻されたのに対し、1A 条件では、シートの右側のみの衝突のため、シート上部が左回転し、頭部が衝突した後、ダミー人形は側方に倒れ込んだ。そのため、2 人着座はほぼ背ずり中央に頭部が衝突したのに対し、1 人着座は左にずれて衝突した。

1 人着座の頭部傷害値が 2 人着座のそれよりも低くなったのは、背ずりが逃げる方向に挙動したことで衝突位置による影響と考えられる。大腿部傷害値に左右の足で差が発生したのは靴が前席の脚台に衝突することによって、脛および膝がシートに衝突するタイミングがずれ（図 13(c)および図 14(c)参照）、先に衝突した方が大きくなること、および背ずりの取り付け方に起因する背ずり剛性の違いが要因であると考えられる。

Table 2 Test results of injury value (7G). All values did not exceed the threshold values.

Test condition		1A	2A	
Dummy		Right side	Left side	Right side
HIC36 Threshold value 1000		65	130	120
3msG Threshold value 60G		9.7G	9.5G	10.4G
Femur load Threshold value 10kN	Left	5.4kN	2.8 kN	3.4 kN
	Right	3.4kN	3.6 kN	2.4 kN

Fig. 13 History of head and chest acceleration, femur load (1A condition). Firstly, the left leg collided at approximately 125ms and the maximum femur force was 5.4kN (c). The head collided at approximately 190ms and HIC36 was 65 (a).

Fig. 14 History of head and chest acceleration, femur load (2A condition). Firstly, the right leg of left dummy and the left leg of right dummy collided at approximately 125ms, and the maximum femur force was 3.6kN (c). The heads collided at approximately 195ms and the maximum HIC36 was 130 (a).

Fig. 15 High speed camera images of sled test (1A and 2B condition). These photos show the behavior of the dummy and the seat when the knee or head collided with the seat.

Fig. 16 Situation after sled test and dummy's impact point (1A condition). The paint shows the area where each part of the dummy collided with. The seat was rotated by the collision and the dummy fell down.

Fig. 17 Situation after sled test and dummy's impact point (2A condition). The paint shows the area where each part of the dummy collided with. The seat was not rotated and the dummies did not fall down.

(2) 14G 波形

14G 波形の各試験条件におけるダミー人形の傷害値の結果一覧を表 3 に、ダミー人形の脛、膝および頭部がシートに衝突した時と 250ms 時の高速度カメラの画像を図 18 に、1B および 2B 条件におけるダミー人形の頭部、胸部加速度および大腿部荷重波形をそれぞれ図 19 および図 20 に、試験後の状況とダミー人形の脛、膝、頭部が衝突した箇所をそれぞれ図 21 および図 22 に示す。なお、図 18 における安全帯はダミー人形の頭部が前席に衝突した後に、さらに前方へ進行した際にダミー人形を含め装置を破損しないように、ダミー人形を拘束するよう設置したもので、各部傷害値結果に影響を与えるものではない。

表 3 より、全ての傷害値が 7G 波形の試験結果よりも大きくなり、1B 条件における左大腿部傷害値が基準値を超えた。ただし、それ以外は基準値を超えなかった。頭部傷害値は 1B 条件が 288、2B 条件の左側ダミーが 219、右側ダミーが 161 であり、基準値 1000 に対して 29%弱と小さかった。胸部傷害値は 1B 条件が 50.5G と基準値 60G に対して 84%と大きくなったが、2B 条件では 33%程度であった。いずれも胸部が直接シートに衝突しなかった

ため評価対象とはならない。なお、胸部傷害値は胸部加速度から算出し、図 19(b)における 1B 条件の著大値は上下方向成分によるものであったが、その原因は特定できなかった。

Table 3 Test results of injury value (14G) . Femur load exceeded the threshold value under 1B condition.

Test condition		1B	2B	
Dummy		Right side	Left side	Right side
HIC36 Threshold value 1000		288	219	161
3msG Threshold value 60G		50.5G	12.3G	20.0G
Femur load Threshold value 10kN	Left	12.8kN	4.7 kN	6.6 kN
	Right	5.9kN	5.6 kN	5.3 kN

Fig. 18 High speed camera images of sled test (1B and 2B condition) . These photos show the behavior of the dummy and the seat when the knee or head collided with the seat and at 250ms.

Fig. 19 History of head and chest acceleration, femur load (1B condition) . Firstly, the left leg collided at approximately 110ms and the maximum femur force was 12.8kN (c). The head collided at approximately 160ms and HIC36 was 288 (a).

Fig. 20 History of head and chest acceleration, femur load (2B condition) . Firstly, the legs collided at approximately 110ms, and the maximum femur force was 6.6kN (c). The heads collided at approximately 200ms and the maximum HIC36 was 219 (a).

大腿部傷害値は 1B 条件が 12.8kN と基準値 10kN に対して 128%となり基準値を超えた。2B 条件では 6.6kN と
なり、66%程度となった。

図 18 より、1B 条件では脛および膝がシート背面下部に衝突し（この時、図 21 のように背ずり背面のリベット
部が破断したと推定される）、これによりシートが前傾して回転し、約 163ms で頭部が背ずり背面上部に衝突し
た。その後もダミー人形の進行が止まらず、シートは 90° 以上回転し、約 250ms では安全帯によりダミー人形が
拘束された。最終的には図 21 のようにダミー人形は右側方に転倒した。なお、図 19(c)の左大腿部荷重の波形は
最大荷重 12.8kN の後、急激に荷重が低下した。試験後にダミー人形を調査したところ、左脚の膝関節下部の脛の
溶接部が破断しており、これが荷重低下に影響したと推定される。図 21 に示すように脛が衝突したバックカバー
と比較して、膝が衝突した背ずり下部の方が変形量が大きくなった。これにより、膝下に著大なせん断力が発生
したことが破断の原因と考えられる。2B 条件では左右 2 体ほぼ同時に衝突するため、シートはほとんど回転しな
いが、シートの脚台が前方へ大きく変形して破断し（図 22 参照）、約 250ms では安全帯によりダミー人形が拘束
された。最終的には図 22 のようにダミー人形は左右いずれも側方に転倒した。いずれの条件も安全帯がなかった
場合、ダミー人形は前方へ飛び出すと推測される。

大腿部傷害値の左右差および 1 人着座の方が大きくなる傾向は 7G 波形と同様であったが、頭部傷害値は 1 人
着座の方が大きくなった。これは、14G 波形の 2 人着座ではシートの脚台が破断し、シートが大きく前傾した状
態で頭部が衝突したためであると考えられる。

(3) スレッド試験結果のまとめ

スレッド試験結果から、今回の試験条件（テーブルがない等）において着座乗客が前席に衝突することによっ
て重傷となる可能性が高いのは、大腿部であり、2 人着座よりも 1 人着座の方が傷害値が高くなることが明確と

なった（理由については、第4章の解析にて示す）。また、膝が衝突する背ずり下部と比較して脛が衝突するバックカバー部（シートフレーム）の強度剛性が高いため、膝下に著大なせん断力が発生する可能性があることが分かった。一方で、膝等との衝突により背ずりが前方へ傾斜する過程で頭部が衝突するため、頭部は重傷となる可能性が低いことが明確となった。ただし、衝撃加速度が大きくなると前席の変形や回転により、乗客を受け止められず、前方へ飛び出す可能性がある。この場合、他の内装品に衝突して重傷となる可能性が考えられる。

Fig. 21 Situation after sled test and dummy's impact point (1B condition). The seat was rotated by the collision and the dummy fell down. The seatback was deformed with rupture of rivets.

Fig. 22 Situation after sled test and dummy's impact point (2B condition). The seat was bent forward by the collision and the dummies fell down. The pedestal was deformed and ruptured.

4. スレッド試験に相当する FEM 解析

4・1 FEM 解析のための着座シートモデルの材料特性

スレッド試験相当の FEM 解析を実施するにあたり、ダミー人形の飛び出し挙動を検証した。これは最終的に得られる頭部傷害値や大腿部傷害値の精度に対して、ダミー人形の衝突位置や角度が非常に重要であることによる。ダミー人形の飛び出し挙動は着座時の座ぶとんの沈み込み量が重要であるため、座ぶとん単体の強度試験より荷重-変位特性を取得し、図 23 の解析モデルでダミー人形の自重による着座時の状態を解析した上で（図 24 参照）、これを初期状態として 2A 条件のスレッド試験に相当する解析を実施した。ダミー人形の挙動結果を図 25(a)に試験結果と併せて示す。挙動比較は図 11 のターゲットマークの軌跡で行い、図 25 中のダミー人形はターゲットマーク位置を明示するための参考図である。図 25(a)より、着座時の初期姿勢が一致していても解析結果は試験結果に比べて飛び出し角度が低く、前列シートの少し低い位置に衝突する結果となった。

Fig. 23 FE model.

Fig. 24 FE analysis result of seat bottom's deformation at seating.

The contour shows the vertical deformation of the seat bottom.

この衝突位置の違いを補正するため、座ぶとんの材料物性をひずみ速度依存性を考慮したものに変更した。ひずみ速度依存性に着目した理由としては、以下の 2 点による。

- 初期状態（静的状況）では試験結果と解析結果に差はないが、飛び出しが進む（動的状況）につれて解析の軌跡が徐々に下方へずれていくこと
 - 差が出ているのがクッション硬さの影響を受ける頭から大腿部に限られ、膝と足首には差が出ていないこと
- ひずみ速度依存性を考慮した解析と試験の挙動比較結果を図 25(b)に示す。飛び出し角度はほぼ一致し、衝突位置の差は小さくなった。この補正により頭部傷害値や大腿部傷害値などの最終的な計算結果の精度が向上した。

(a) no reflect strain-rate dependence of seat bottom

(b) reflect strain-rate dependence of seat bottom

Fig. 25 Comparison of dummy's behaviour (2A condition). The FE results were correspondent with the test ones by reflecting strain-rate dependence of the seat bottom.

4・2 シートのスレッド試験に相当する FEM 解析

2.3 節で構築したシート解析モデルと、前面衝突用のダミー人形を模擬した FEM 剛体ダミーモデル（以後、ダミーモデルと呼ぶ）（PAM-SAFE User's Manual, 2000）を用いて、図 23 に示すようにスレッド試験に相当する衝突解析を実施した。各解析の入力波形は図 12 に示す試験結果を用い、各試験結果に応じてダミーモデルの初期姿勢を調整した。それぞれの条件におけるダミーモデルの傷害値の解析結果を試験結果とあわせて表 4 に、各傷害値を基準値で除した結果を図 26 に示す。また、ダミーモデルの脛、膝および頭部がシートに衝突する時刻付近での状況を図 27、図 28 に示す。

Table 4 Comparison of injury value between FE analyses and Tests.

Test condition		1A	2A		1B	2B	
Dummy		Right side	Left side	Right side	Right side	Left side	Right side
HIC36		54(65)	70(130)	63(120)	183(288)	153(219)	169(161)
3msG (G)		11.1(9.7)	11.0(9.5)	9.4(10.4)	19.5(50.5)	21.9(12.3)	22.2(20.0)
Femur Load (kN)	Left	4.8(5.4)	3.2(2.8)	4.2(3.4)	12.7(12.8)	6.4(4.7)	8.6(6.6)
	Right	3.4(3.4)	4.7(3.6)	2.9(2.4)	6.1(5.9)	7.3(5.6)	6.8(5.3)

Note: Figures in brackets show the test results.

Fig. 26 Comparison of injury-value / threshold-value between FE analyses and Tests. FE results of HIC36 were generally lesser than test results. Concerning femur load, FE results of 1A and 1B were consistent with test results, but FE results of 2A and 2B were slightly higher than test results in general.

表 4 および図 26 より、頭部傷害値は試験結果と比較して概ね低い値となり、7G 波形の試験では最大 60（46%）の誤差、14G 波形の試験では最大 105（36%）の誤差となった。一方、胸部傷害値は 1B 条件が誤差 31G（61%）であったが、それ以外はほぼ一致した（ただし、今回の条件では胸部がシートに直接衝突することはなかった）。解析においては、1B 条件のスレッド試験で生じた高い胸部傷害値を再現できず、その原因を特定することはできなかった。また、大腿部傷害値は 1 人着座である 1B および 1A 条件は良く一致したが、2 人着座条件は全てスレッド試験より高い値となり、2A 条件では最大 1.1kN（31%）の誤差、2B 条件では最大 2.0kN（30%）の誤差となった。これは、ダミーモデルが 2 体ほぼ同時に衝突するため、初期姿勢の僅かな違いが相互に影響を及ぼし、解析の再現性が低下しているためと考えられる。

図 15 と図 27 を比較すると、膝衝突および頭部衝突時の時間やダミーモデルの姿勢は概ね一致しており、ダミーモデルの挙動はスレッド試験の結果と良く一致することが分かる。また、いずれの条件も試験結果と同様にシート上部がストoppaを乗り越え、1A 条件では回転する状況が再現できた。

図 18 と図 28 を比較すると、脛、膝衝突時の時間やダミーモデルの姿勢は概ね一致しているが、頭部衝突時は

脚を抱え込むような姿勢となり、ダミーモデルの太腿と腹部が干渉した (2B 条件でより顕著であり、頭部衝突時間が 20ms 程度早くなった)。これは、ダミーモデルの各部が剛体要素で構成され、相互の接触を考慮できないためである。ただし、最終的なシートの回転や前傾、ダミー人形の前方への挙動は再現できた。

以上の結果から、剛体要素で構成されたダミーモデルを使用する本解析手法では、今回のように脚を抱え込むような姿勢となる条件について、姿勢や頭部傷害値の絶対値を再現することは困難である。一方、図 26 に示すように頭部傷害値は基準値に対して 30%以下と大幅に低い試験結果であり、これに基づく解析精度の評価は困難である。そのため、頭部傷害値が基準値に近くなる条件での試験結果との比較が必要である。胸部傷害値については、全ての条件において胸部が直接シートに衝突しなかったため、精度検証は行わなかった。また、大腿部傷害値については、1 人着座の条件の誤差が $-0.6 \sim +0.2\text{kN}$ ($-11 \sim +3\%$) の範囲なので、傷害評価するのに十分な精度がある。

Fig. 27 FE analysis results of dummy's behavior (1A and 2A condition). FE results were consistent with test results.

Fig. 28 FE analysis results of dummy's behavior (1B and 2B condition). FE results were consistent with test results, but the thighs penetrated in the abdomen.

第3章のスレッド試験において、重傷となる可能性が高いのは大腿部であり、2人着座よりも1人着座の方が傷害値が高くなることおよび膝下に著大なせん断力が発生する可能性があることを示した。これらを検証するために、2A条件の解析モデルの左側ダミーモデルを削除し、その他の条件を同等とした解析を実施した。その結果、右側ダミーモデルの左および右大腿部傷害値がそれぞれ4.2kNが5.0kNに、2.9kNが3.5kNに増加し、1人着座の方が傷害値が高くなることを確認した。さらに、2A条件の解析において、図29に示すように背ずり（主に膝と衝突）およびシートフレーム（主に脛と衝突）がダミーモデルの足と衝突した際の接触荷重を計算した。ダミーモデルがシートと衝突した際の応力コンター図を図30に、右側ダミーモデルの接触荷重波形を大腿部荷重波形とあわせて図31に示す。なお、図30において赤色が高応力発生箇所である。図30および図31より、大腿部荷重はシートフレームと脛との接触によって発生し、シートフレームのうち、背面カバーの内側にあるバックバーの影響が大きいことが分かった。バックバーは左右座席を貫通した一本の棒であるため、2人着座の条件では2体のダミー人形が分担して前方に押し出すことになる。そのため、2人着座の方が大腿部傷害値が低下したと考えられる。

Fig. 29 Seat back and Seat frame.

Fig. 30 FE analysis result of stress contour (2A condition).
High stress occurs in the back bar.

(a) Left Leg

(b) Right Leg

Fig. 31 FE analysis results of force applied to dummy's leg (2A condition, Right dummy). The femur load occurs when the legs (shin) collide with the seat frame.

スレッド試験および FEM 解析による検証の結果、乗客の安全性向上のための対策としては、大腿部傷害値や膝下のせん断力を下げるために脛および膝が衝突する箇所の強度、剛性を揃えつつ全体的に下げる一方で、乗客を確実に受け止めるためにシートの回転を抑止し、全体（特に脚台）の変形量を抑えたとともに、それによる頭部傷害値の上昇を最小限とする必要がある。

5. 結 言

鉄道車両が大型自動車等と衝突した場合、客室内では衝撃加速度によって乗客が進行方向に投げ出され、内装品と2次衝突して負傷する可能性がある。多くの客室内の状況のうち、回転リクライニングシートに着座した乗客が前席の背面に衝突するケースを最も基本的な状況の1つとして検証対象とし、スレッド試験による乗客の挙動や傷害値を検証するとともに、試験に相当するFEM解析を実施することで以下の結論を得た。

(1) 着座乗客が前席に衝突することによって重傷となる可能性が高いのは、大腿部であり、2人着座よりも1人着座の方が傷害値が高くなる。また、脛および膝が衝突する箇所の強度や剛性の差により、膝下に著大なせん断力が発生する可能性がある。一方、胸部は直接シートに衝突することはないため、重傷となる可能性は低い。

(2) 膝等との衝突により背ずりが前方へ傾斜する過程で頭部が背ずりに衝突するため、頭部は重傷となる可能性が低い。ただし、衝撃加速度が大きくなると2人着座の場合、前席の前方への変形で、1人着座の場合、シート上部の回転により乗客を受け止めることができず、前方へ飛び出す可能性がある。この場合、他の内装品に衝突して重傷となる可能性がある。

(3) 自動車用に開発されたFEM剛体ダミーモデルを用いたスレッド試験に相当するFEM解析では、ダミー人形の挙動は概ね再現できるが、例えば脚を抱え込むようなダミー人形の部位同士が相互に作用する姿勢の場合、再現が困難となる。解析における傷害値に関しては、大腿部傷害値は概ね試験結果を再現できるが、頭部傷害値は試験結果と比較して低くなる傾向があり、最大誤差は46%であった。ただし、基準値1000に対して全試験結果が288以下と低い数値の中での比較のために、誤差率が大きく見積もられた可能性があり、頭部傷害値が基準値に近くなる条件での試験結果との比較が必要である。

(4) 乗客の安全性向上のための対策としては、大腿部傷害値や膝下のせん断力を下げるために脛および膝が衝突する箇所の強度、剛性を揃えつつ全体的に下げる一方で、乗客を確実に受け止めるためシートの回転を抑止し、全体（特に脚台）の変形量を抑えて頭部傷害値の上昇を最小限とすることが考えられる。

文 献

- Carvalho, M., Ambrosio, J. and Milho, J., Implications of the inline seating layout on the protection of occupants of railway coach interiors, *International Journal of Crashworthiness*, Vol.16, No.5 (2011), pp.557–568.
- 日本規格協会, JIS E7104 (鉄道車両—旅客用腰掛) (2015).
- 交文社, 新・道路運送車両の保安基準 (2009), p.756.
- Nakai, K., Suzuki, D., Enami, S., Okino, T., Takano, J. and Palacin, R., An estimation of behaviour and severity of injury to rail passengers occupying longitudinal seats in the event of collision, *Proceedings of IRCOBI Conference 2015* (2015a), pp.315–326.
- Nakai, K., Suzuki, D., Enami, S. and Palacin, R., Research of standing passenger's safety on board a train in the event of a train collision, *Proceedings of the 10th International Symposium PASSIVE SAFETY of RAIL VEHICLES* (2015b), pp.105–115.
- 沖野友洋, 山本勝太, 高野純一, 宇治田寧, 列車乗務員の傷害度を指標とした踏切事故時の車両の衝突安全性評価, 第19回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, No.12-79 (2012), pp.557–560.
- PAM-SAFE User's Manual, Hybrid II and hybrid III articulated rigid body (ARB) dummy models (2000).
- Severson, K. J., Tyrel, D. C. and Rancatore, R., Crashworthiness requirements for commuter rail passenger seats, *Proceedings of IMECE2005* (2005).
- 田口真, 藤本亜紀子, 吉川孝男, 鉄道車両における乗客の衝突安全性評価に関する研究 (衝突加速度と傷害値の関係の研究), *日本機械学会論文集*, Vol.80, No.814 (2014), DOI: 10.1299/transjsme.2014tl0179.

References

- Carvalho, M., Ambrosio, J. and Milho, J., Implications of the inline seating layout on the protection of occupants of railway coach interiors, *International Journal of Crashworthiness*, Vol.16, No.5 (2011), pp.557–568.
- Japanese Standards Association, JIS E 7104 (rolling stock-seats for passengers) (2015) (in Japanese).
- Kobunsha, The safety standards for road trucking vehicles (2009), p.756 (in Japanese).
- Nakai, K., Suzuki, D., Enami, S., Okino, T., Takano, J. and Palacin, R., An estimation of behaviour and severity of injury to rail passengers occupying longitudinal seats in the event of collision, *Proceedings of IRCOBI Conference 2015* (2015), pp.315–326.
- Nakai, K., Suzuki, D., Enami, S. and Palacin, R., Research of standing passenger's safety on board a train in the event of a train collision, *Proceedings of the 10th International Symposium PASSIVE SAFETY of RAIL VEHICLES* (2015), pp.105–115.
- Okino, T., Yamamoto, M., Takano, J. and Ujita, Y., Crashworthiness evaluation for train carbody in the event of level crossing accident by driver's injury indexes, *Proceedings of The 19th Jointed Railway Technology Symposium 2012*, No.12-79 (2012), pp.557–560 (in Japanese).
- PAM-SAFE User's Manual, Hybrid II and hybrid III articulated rigid body (ARB) dummy models (2000).
- Severson, K. J., Tyrel, D. C. and Rancatore, R., Crashworthiness requirements for commuter rail passenger seats, *Proceedings of IMECE2005* (2005).
- Taguchi, M., Fujimoto, A. and Yoshikawa T., Study of occupant safety evaluation for collision accident of railway vehicle (Investigation of relation between deceleration during collision and injury parameters), *Transactions of the JSME* (in Japanese), Vol. 80, No. 814 (2014), DOI: 10.1299/transjsme.2014tl0179.