407 側方衝突時における自動車乗員の頸椎三次元挙動解析

Three Dimensional Analysis for Cervical Vertebrae Responses of Automobile Passengers due to Lateral Impact

○ 小林 英夫 (東工大)
 正 小野 古志郎 (日自研)
 金岡 恒治 (早大)
 椎名 逸雄 (筑波大)

正 宇治橋 貞幸 (東工大)
 正 江島 晋 (日自研)
 福島 真 (筑波メディカル)

Hideo KOBAYASHI : Tokyo Institute of Technology, 2-12-1, Oh-okayama, Meguro-ku, Tokyo

Sadayuki UJIHASHI : Tokyo Institute of Technology

Koshiro ONO, Susumu EZIMA : Japan Automobile Research Institute

Koji KANEOKA : University of Waseda

Makoto FUKUSHIMA : Tsukuba Medical Center

Itsuo SHIINA : University of Tsukuba

Key Words : Neck Injury, Cervical Spine, Three Dimensional Motion Analysis, Lateral Impact

1. 緒言

頸椎捻挫をはじめとする軽度の頸部傷害は自動車の後面衝突事故によって発生することが多いと考えられてきたが、側面衝突事故（以下「側方衝撃」とする）においてもかなりの頻度で発生することが報告されている⁽¹⁾。しかし、側方衝撃に対する乗員の頸椎挙動の衝撃応答に関する報告は少なく、著者らのグループの先行研究（山田ら⁽²⁾）による報告しか見当たらない。また、屍体実験において側方衝撃に対し、頸椎は側屈運動の他に回旋、屈曲-伸展運動を伴う三次元挙動を示すことが報告されている⁽³⁾。しかし、乗員の頸椎挙動は前額面内の二次元解析しか行われておらず、三次元解析を行った研究は見当たらない。そこで本研究では側方衝撃時の頸椎三次元挙動を把握するために、山田ら⁽²⁾により行われた実験で撮影されたシネ画像を解析し、頸椎の相対的な三次元回転角を算出した。そして、志願者の自動的な側屈における頸椎挙動（自動挙動）と、衝撃を負荷した強制的な側屈における頸椎挙動を比較し、側方衝撃における三次元解析の重要性を示し、さらにこの解析によって傷害が惹起されやすい部位について考察を行った。

2. 志願者による肩部側方衝撃実験

山田ら⁽²⁾の側方衝撃実験において、志願者は頸部傷害の既往症のない健康成人6名（男性4名、女性2名）である。実験の概要を再掲すると次のとおりである。図1に示すように志願者をシートに着座させ、空気圧縮式のインパクトにより志願者の肩部に対して右側方から衝撃を加えた。頸椎挙動を記録するためにX線シネ撮影装置（Philips BH5000：60fps）を用いて図2(a)に示すような経時的なシネ画像を記録した。また、図3(a),(c)に示す前額面および矢状面の静止X線画像の撮影も行った。実験条件は、筋緊張の有無についても調べるとともに、衝撃荷重300N,400N,500Nの3段階強度の衝撃を負荷した。なお、男性志願者では600Nの衝撃負荷も追加した。

3. 頸椎三次元挙動の解析手法

実験によって得られたシネ画像から各志願者の第5～7頸椎、第1胸椎（以下「C5～C7,T1」とする）の回転角を算出するために、各頸椎に図3(b)のような特徴点を3点定義し、特徴点はそれぞれ①：右椎弓根中央、②：左椎弓根中央、③：棘突起下端とした。矢状面において点①および点②は判別が困難なため、それらの点を椎体後縁（図3中緑点線上）に位置すると仮定した。これらの3点間距離を仮定と前額面および矢状面静止X線画像より算出した。次に3点間距離および図

2(a)に示すシネ画像内の特徴点3点の二次元座標より、3点の相対的な三次元座標を算出し、各頸椎に点③を原点とする局所座標系を図2(b),(c)のように定義した。なお、局所座標系は点③から点①および点②の中点へのベクトル $\mathbf{a}$ と点①から点②へのベクトル $\mathbf{b}$ を用いて、 x,y,z 軸の単位ベクトル $\mathbf{i},\mathbf{j},\mathbf{k}$ を式(1)のように定義した。

$$\begin{aligned} \mathbf{i} &= \mathbf{j} \times \mathbf{k} \\ \mathbf{j} &= \mathbf{k} \times \mathbf{b} / |\mathbf{b}| \\ \mathbf{k} &= \mathbf{a} \times \mathbf{b} / |\mathbf{a} \times \mathbf{b}| \end{aligned} \quad (1)$$

そして、局所座標系を z,y,x 軸回りの順に回転させるCardan Angleを用いて、500Nおよび600Nの非緊張の試技と自動挙動の下位頸椎に対する相対三次元回転角を算出した。

Fig.1 Frontal and lateral views of experimental apparatus

Fig.2 Definition of local coordinate system

Fig.3 Definition of three feature points in frontal and sagittal X-ray images

4. 結果および考察

(1) 自動挙動と衝撃時における頸椎挙動の比較

自動挙動(Active)と衝撃時の頸椎挙動を比較するために各志願者の C6/C7, C7/T1 の三次元回転角平均値を図 4 に示す。試技 500N では図 4(c) に示す C6/C7 において x 軸の回転角が図 4(a) に示す自動挙動を上回り, y 軸(70ms 以降)と z 軸(90ms 以降)の回転方向が自動挙動と逆転する傾向を示した。図 4(d) に示す C7/T1 では z 軸(50ms~80ms)の回転方向が図 4(b) に示す自動挙動と逆転する傾向を示した。この傾向は Panjabi ら⁽³⁾により行われた屍体実験においても確認されている。また, 同実験において衝撃を荷した方向の反対側の関節包靱帯が裂けたと報告されていることから, 関節包靱帯に極度の引張が作用したと考えられる。そのため, 逆転する傾向は衝撃前の姿勢で前方(x 軸正方向)に傾斜している関節包靱帯, 横突起靱帯が衝撃により大きな引張をうけ, z 軸と平行な直線上に並ぶ様に頸椎が回転したため生じたと考えられる。また, この傾向は C7/T1, C6/C7 の順であった。これは衝撃が肩より入力され, 体幹, 下位頸椎, 上位頸椎の順で伝わるためと考えられる。試技 600N では図 4(e) に示す C6/C7 において y, z 軸(100ms 以降)の回転方向が逆転する傾向を示し, 図 4(f) に示す C7/T1 では x 軸の回転角が自動挙動を上回り, z 軸では回転方向が自動挙動と一致した。頸椎の側屈と回旋の複合運動はくさび状の椎間板, 左右の椎間関節のすべりにより生じると考えられている⁽⁴⁾。このことから, 600N の C7/T1 で z 軸の回転方向が自動挙動と一致した傾向は, 衝撃により x 軸において自動挙動を上回る回転が急激に生じ, 右椎間関節が圧縮され, 強制的に自動挙動と同じ方向に椎体が回転したため生じたと考えられる。このように頸椎が自動挙動を上回る側屈を示す領域においては, 衝撃の程度により屈曲-伸展, 回旋の回転方向が逆転することがある。このような現象を把握する上でも頸椎の三次元挙動の解析は必要である。

Fig.4 Three-dimensional cervical vertebrae rotational angles

(2) IV-NIC による評価

各頸椎について衝撃荷荷により生じた右側屈回転角 (x 軸回り)の定量的な比較を Panjabi らにより提唱されている傷害指標 IV-NIC⁽⁵⁾により行った。IV-NIC は衝撃時の頸椎回転角を自動挙動の頸椎回転角で除することにより算出した。算出した各志願者の C5/C6, C6/C7, C7/T1 の IV-NIC を図 5 に示す。図 5(a) に示す試技 500N では志願者 5 を除く全ての志願者において C6/C7 の IV-NIC が最大となった。これは山田ら⁽²⁾により報告された同実験の二次元解析結果と一致している。側方衝撃は肩より入力され, 体幹, 下位頸椎, 上位頸椎, 頭部の順に伝わる。そのため下位頸椎ほど回転角, IV-NIC が大きくなり, C7/T1 で最大となると考えられる。しかし, 500N では C6/C7 の IV-NIC が最大となった。これは C5/C6, C7/T1 の IV-NIC が大きいこと, 衝撃が C5/C6~C7/T1 で分散していると考えられること, さらに C7/T1 は他の部位と比べると可動範囲も狭く側屈しにくいことから, C6/C7 が大きく回転したと考えられる。図 5(b) に示す試技 600N では C6/C7 の IV-NIC は 500N に対して減少し, C7/T1 の IV-NIC が最大となった。600N では衝撃が増加したことにより, 下位頸椎から伝わる衝撃が分散せずに C7/T1 に集中し, IV-NIC が最大になったと考えられる。試技 500N の C6/C7, 試技 600N の C7/T1 において最大となる IV-NIC は共に 1 を超えており, 頸椎の側屈が自動挙動における側屈を上回ることを示している。これらの下位頸椎(C6/C7, C7/T1)において IV-NIC が最大となる傾向は, 側方衝突事故時の頸部傷害が頸部下位に集中すると言われる臨床的な知見と一致している。このことより, C6/C7, C7/T1 における椎間板, 椎間関節に極度の圧縮, 引張が作用し, 頸部傷害が惹起されやすいと考えられる。

Fig.5 Comparison of IV-NIC

5. 結言

志願者実験より得られたシネ画像の三次元解析を行い, C5/C6~C7/T1 の下位頸椎に対する相対三次元回転角を算出した。自動挙動と衝撃時の頸椎挙動を比較し, 頸椎が自動挙動を上回る側屈を示す領域において, 衝撃の程度により屈曲-伸展, 回旋の回転方向が逆転する傾向を明らかにし, 側方衝撃時における頸椎三次元挙動解析の重要性を示した。また, 衝撃を荷した強制的な右側屈において衝撃の強度が 500N から 600N に増加すると, IV-NIC が最大となる部位が C6/C7 から C7/T1 と変化する傾向を明らかにした。

参考文献

- (1) (財) 交通事故総合分析センター, H16 年度交通事故調査・分析報告書, III-4-3, 461-464, 平成 17 年 3 月発行
- (2) 山田新太郎, 側方衝撃時における乗員の頭部・頸部・体幹の挙動解析, 76-81, 平成 18 年度 修士論文
- (3) MANOHAR M. PANJABI and PAUL C. IVANCIC, "Intervertebral Neck Injury Criterion for Prediction of Multiplanar Cervical Spine Injury Due to Side Impacts", Traffic Injury Prevention, 6, 390-392, 2005
- (4) I. A. KAPANDJI, "カバンディ関節の生理学", 医歯薬出版株式会社, 194-195, 1998