

有限要素法による人体被災度計測 シミュレーションの基礎的検討

宮野道雄¹・生田英輔²・長嶋文雄³・西村明儒⁴・田中裕⁵・熊谷良雄⁶

¹工博 大阪市立大学教授 大学院生活科学研究科 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本3-3-138)

²修士 大阪市立大学大学院生 生活科学研究科 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本3-3-138)

³工博 東京都立大学助教授 大学院工学研究科 (〒192-03 東京都八王子市南大沢1-1)

⁴医博 横浜市立大学助教授 法医学教室 (〒236-0004 横浜市金沢区福浦3-9)

⁵医博 大阪大学助教授 大学院医学系 (〒565-0871 吹田市山田丘2-15)

⁶工博 筑波大学教授 社会工学系 (〒305-8573 つくば市天王台1-1-1)

We have considered a casualty due to the collapsed building or toppled furniture in the Great Hanshin-Awaji Earthquake Disaster for three years. The purpose of this study is to get new findings being good for development of the dummy that is useful for estimation of human damage by the earthquake. In this report, an experimental simulation making use of finite element method was mentioned.

Key Words : *casualty, damage estimation, the Great Hanshin-Awaji Earthquake Disaster, simulation*

1. はじめに

筆者らは、これまでに地震時の建物倒壊や家具転倒に関わって生じる死傷のメカニズムを明らかにするための人体被災度計測用ダミーを用いた計測手法の開発を目指す研究を3年間にわたって行ってきた^{1),2),3)}。この間の成果としては、新たに作成した阪神・淡路大震災における建物被害と人的被害の統合データベースおよび重傷者発生世帯に対するアンケート・聞き取り調査に基づき、死亡から軽傷に至る被災程度別の人体の主な被災部位と成傷器を明らかにした。

本報告では、これまでの研究で明らかになった同震災における死者と重傷者の発生状況を改めて整理するとともに、有限要素法による衝撃破壊シミュレーション手法を援用した地震時の人体被災度計測シミュレーションの可能性を明らかにするための基礎的な検討を行う。具体的には、転倒家具や建物主要部材の落下による衝撃を原因とする骨折のメカニズムをシミュレートするための手法と各種パラメータの適応性について検討する。

2. 阪神・淡路大震災における人的被害

(1) 死者発生状況の検討

阪神・淡路大震災における死者データ⁴⁾と建物被災状況データ⁵⁾とを統合して筆者らが作成したデー

タベースに基づき、以下に述べる検討を行った。有効データ数は4956件であった。まず、直接死因内訳は図-1に示すように圧死(窒息)が3156人(64%)で最も多く、ついで外傷(骨折)が862人(17%)、焼死(熱傷)451人(9%)などである。また、別に整理した死亡原因をより詳細に示す指標である原死因による内訳をみると、圧迫1339人、鼻腔閉塞60人、鼻腔圧迫21人、気道閉塞11人であり、原死因が判明した1665人中1431人(86%)が圧迫または閉塞による窒息死であったことを示唆している。

さらに、図-2で表わしたように、直接死の成傷器は3071人について明らかとなったが、3038人が家屋であり、家具によるものは33人とどまっている。すなわちこの結果では死者のほとんどは家屋の被害に伴って発生しており、家具転倒などを原因とするものは直接死の成傷器判明分の1%であったことを示している。

ここで用いた統合データベースには建物被災度と構造種別も含まれている。そこで、死者を発生させた建物の被災度と構造種別の関係を整理すると図-3のようになった。データ総数は前述のように4956件であるが、その内の4369棟が木造を主体とする非堅牢建物であり、鉄筋コンクリート造や鉄骨造などの堅牢建物506棟に比べはるかに多い。この結果は、死者のほとんどが木造住宅で亡くなったことを示唆している。さらに図-3が示すように、非堅牢建物の火災による損傷を除けば、建物

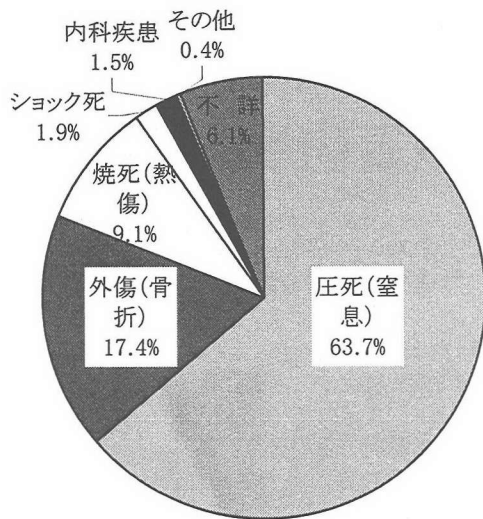


図-1 直接死因別分布

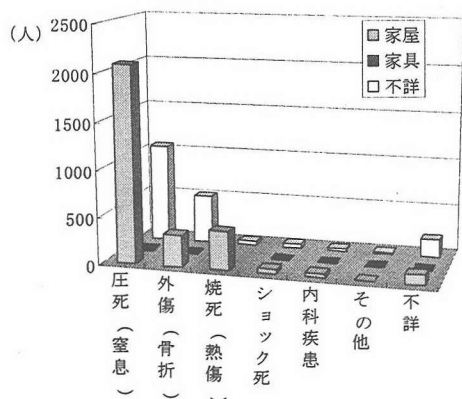


図-2 成傷器別の直接死因

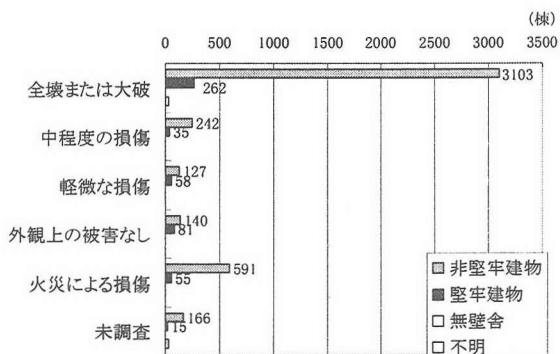


図-3 死者発生建物の構造種別と被災度の関係

構造種別に関わらず全壊または大破の建物における死者が非常に多かったことが明らかである。

一方、後述する地震時の人体被災度計測シミュレーションを行うために、死者の主要な被災部位を明らかにする必要がある。そこで、データベースに基づき原死因による被災部位とその内容を死亡までの時間と関連させて整理した(表-1)。その結果、原死因による部位は胸部693人、胸腹部421人であり、両方で部位判明分の67%を占めることがわかる。さらに、原死因の内容によれば、胸

部、胸腹部に受傷し死亡した人の94%(1048人)は圧迫により亡くなっており、このほとんどが窒息死を意味すると考えられる。

以上により、阪神・淡路大震災における死者の典型的な発生状況を極めてマクロ的に表わすと、つぎのようになる。すなわち、木造住宅に居住していた被災者が建物の全壊に伴って、胸部を圧迫され地震発生後15分以内という短時間内に窒息により死亡したというものである。

なお、ここにいう全壊は筆者らのこれまでの研究により、住宅の1階または2階、あるいは1、2階ともが倒壊し、室内空間の欠損を伴うような大被害であることが指摘されている。

(2) 重傷者発生状況の検討

前述の統合データベースには、文献6)に基づく重傷者データが含まれている。このデータによって検討した、阪神・淡路大震災における重傷者発生と建物被害との関係については文献2)に詳述したので、本報告では前述の死者発生状況と比較する目的で、その概要を改めてまとめることとする。

検討に用いたデータは1349件であった。重傷の成傷器として判明したものの内、家屋は428人、家具は443人であり、両者の件数はほぼ等しい。また、負傷の内容としては最も多かったものは骨折で750人(56%)、つぎに挫創が368人(27%)でありこの二つで全体の83%を占める。両者の成傷器との関係は、家屋による骨折は230人、家具による骨折は264人であり、家屋による挫創は137人、家具による挫創は127人であった。

つぎに、重傷者発生建物の被災度と建物構造の関係は図-4に示すとおりであり、木造の全壊で多いものの、半壊以下の相対的に軽微な被害の建物でも発生している。堅牢建物では、全壊よりもむしろ軽微な被害が多く、無被害建物で121人と最多となっている。これは、上述のように重傷の成傷器が死亡とは異なり、家屋と家具がほぼ等しい比率となっていることと関わっている。すなわち、重傷は家屋被害が軽微でも、転倒家具により発生する危険があることを示している。

さらに、死者発生状況の検討と同様に、後述のシミュレーションに用いるために、重傷を負った人の主要な被災部位について考察した結果は以下のようなものである。すなわち、図-5(1)(2)のように、木造(非堅牢)および堅牢建物において、主要な人体被災部位は腹腰部、下肢または胸部である。

したがって重傷の発生状況としては、家屋(とくに木造)と家具のいずれかを成傷器として、腹腰部、下肢といった下半身の部位または胸部に骨折または挫創を負うというケースが典型的なものの一つとして想定される。

表-1 原死因による被災部位・内容と死亡までの時間の関係

原死因部位	原死因内容	15分まで	1時間まで	24時間まで	72時間まで	72時間以上	不詳	総計
頭部	圧迫	124					5	129
	外傷	5		2		1	2	10
	骨折	10		1			7	18
	打撲	43	1	4	2	1	1	52
	鼻口圧迫	21						21
	鼻口閉塞	59					1	60
頭部計		262	1	7	2	2	16	290
頸部	圧迫	15						15
	気道閉塞	11						11
	骨折	16	1	2				19
	不詳	1						1
頸部計		43	1	2				46
胸部	圧迫	617	3	4	1		5	630
	骨折	10	2	2			4	18
	挫創	16						16
	損傷	1			1			2
	打撲	20	2	1				23
	内臓破裂	1						1
	内臓病						1	2
胸部計		665	7	7	2	1	11	693
胸腹部	圧迫	403	3	1	1		10	418
	打撲	3						3
胸腹部計		406	3	1	1		10	421
腹部	圧迫	10			2			12
	骨折	2		5	1			8
	挫滅			1				1
	出血			3		1		4
	損傷			1		1		2
	打撲	2		1	1			4
	内臓破裂	1						1
腹部計		15		11	4	2		32
上肢	骨折	1						1
	打撲					1		1
上肢計		1				1		2
下肢	圧迫	1		1	1			3
	壊死			1				1
	骨折	1		1				2
	挫創			1				1
	挫滅					1	1	2
	打撲	5						5
下肢計		7		4	2	1		14
体幹部	圧迫	100		1	1			102
全身	圧挫	1		1				2
	圧迫	27	1	1			1	30
	火傷	5						5
	衰弱				1			1
	打撲	11	2	5	6	2	1	27
全身計		44	3	7	7	2	2	65
不詳	記入なし	1611	67	512	28	15	1058	3291
総計		3154	82	552	47	24	1097	4956

3. 人体被災度計測シミュレーションの基礎的検討

(1) シミュレーション手法

本報告では汎用ソフトとして提供されているLS-DYNAを用いて以下の検討を行った。LS-DYNAのプロトタイプは、1976年に Lawrence Livermore National Laboratory において、John O. Hallquist を中

心に世界初の有限要素法による非線形衝撃応答解析コードとして開発された。LS-DYNAは有限要素法による空間の離散化と、中心差分に基づく陽的時間積分法を用いた非線形問題解析用の汎用プログラムである。解析対象としては、衝突・衝撃問題などの動的解析から、塑性加工解析などの準静的解析までの幅広い分野をカバーするといわれている⁷⁾。

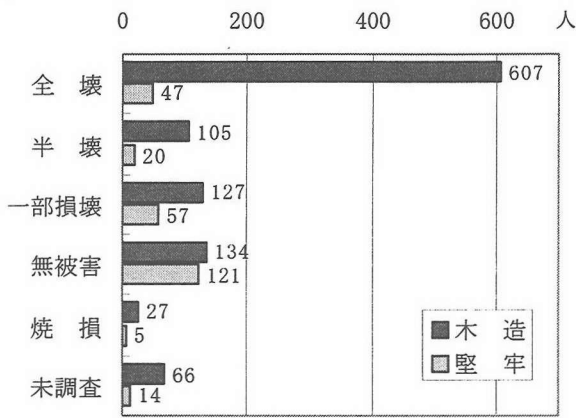


図-4 重傷者発生建物の被災度と構造の関係

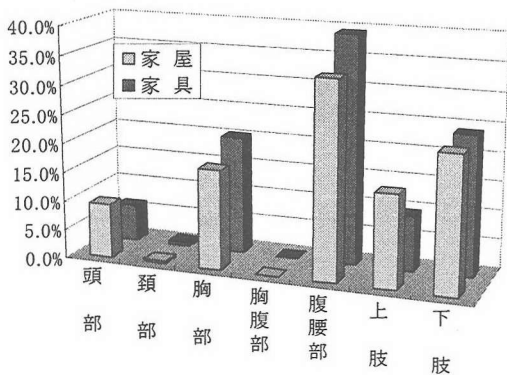


図-5 (1) 重傷者を生じた木造建物における被災部位と成傷器の関係 (受傷機転: 下敷・閉じ込め)

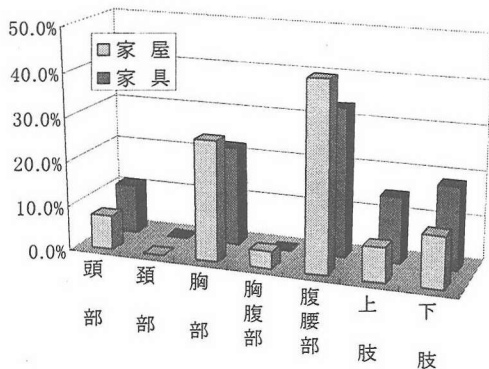


図-5 (2) 重傷者を生じた堅牢建物における被災部位と成傷器の関係 (受傷機転: 下敷・閉じ込め)

LS-DYNAの特徴を列挙すると以下のようである。

- ①衝撃応答解析用汎用ソフト
- ②接触問題が可能
- ③豊富な要素タイプ
- ④再要素分割が可能
- ⑤数値積分は陽解法
- ⑥1点積分による高速演算
- ⑦流体・音響・熱伝達解析も可能
- ⑧プレ・ポストプロセッサが充実
- ⑨結果のアニメーション表示が可能

(2) LS-DYNAの下肢骨折シミュレーションへの適用

筆者らによる一連の研究の目的は、大型三次元震動台を用いた実大建物破壊実験に供する地震時の人体被災度計測用ダミーの製作に資する知見を得ることである。ダミー製作の第一段階としては、地震時の人体被災度を計測するためにどのようなセンサーを人体のどの部位に装着するのが最適かを明らかにする必要がある。

したがって、本報告では阪神・淡路大震災における人的被害発生状況を筆者らが作成したデータベースに基づく検討により詳細に明らかにし、死亡および重傷が発生した典型的なパターンを想定することを目指した。その結果によれば、重傷の多くが下肢または腰部の骨折を負っていることが判明した。重傷者の成傷器は家屋と家具がほぼ等しい割合であり、家屋の場合は梁や柱など建物の主要部材による。また家具の場合は、その転倒による打撃が骨折を引き起こしたと考えられる。

そこで本報告では、木造住宅の梁が一般的な階高である3mの高さから自然落下し、大腿部に衝突する場合を想定して、骨折の状況をシミュレートすることとした。プロトタイプとして用いた人体大腿部モデルの骨はLS-DYNAの物性ライブラリーの中から人体の骨の物性値に近いと考えられる剛体を、また筋肉については同じくライブラリーの中から弾性ゴムを選定し計算を行った。

(3) シミュレーション結果

LS-DYNAによる数値解析の実施にあたり、まず図-6に示すように解析対象である大腿部のモデル化を行った。被災時の状況は、仰臥姿勢で横たわった状態を想定した。現実には布団などの寝具の衝撃吸収効果が期待できると思われるが、今回は適用性の検討が主たる目的であるため、単に落下物が直接大腿部に衝突する場合を考えた。床は剛体とした。また、落下物は前述のように木造住宅の梁を想定したが、大腿部への接触面積を考慮して100mm角の立方体としている。

つぎに、図-7はシミュレーション全体のフローを示したものである。モデルのメッシュ化による要素分割においては、容量、計算時間を少なくする目的で、モデル全体を4分割し、計算も1/4モデルについて行った。

数値解析の結果を描画として図-8 (1) ~ (6) に示す。ここで図-8 (1) は、落下物が大腿部に衝突する直前の状態であり、これを算定の開始点として、以後0.0005秒間隔で計算を行った。図-8 (2) ~ (6) は、落下物が大腿部に衝突した後の筋肉、骨相当部分の変位および応力状態を表わしており、算定開始後の2ステップ間隔すなわち0.001秒ごとの状態に相当している。

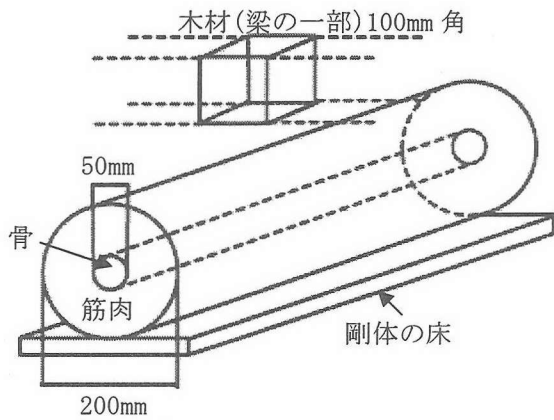


図-6 解析対象モデル

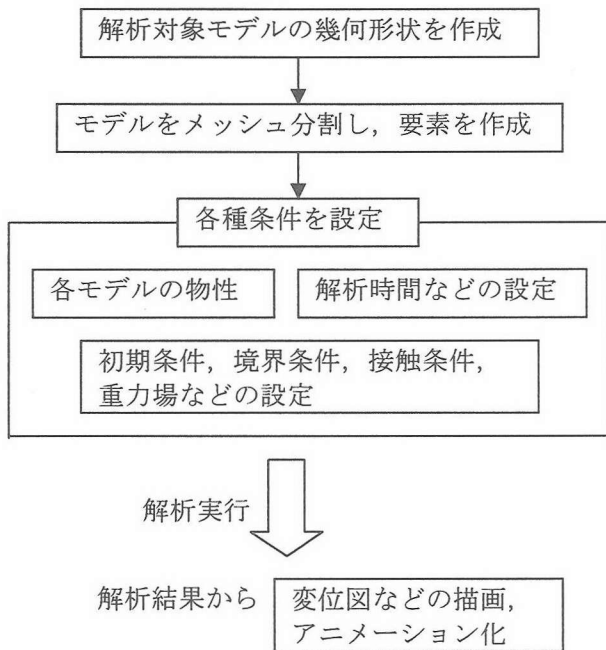


図-7 シミュレーションの流れ

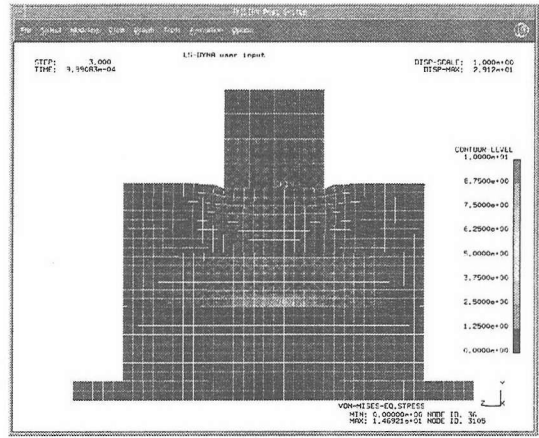


図-8 (2)

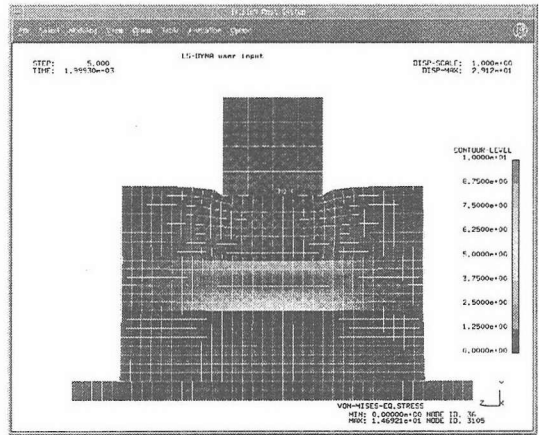


図-8 (3)

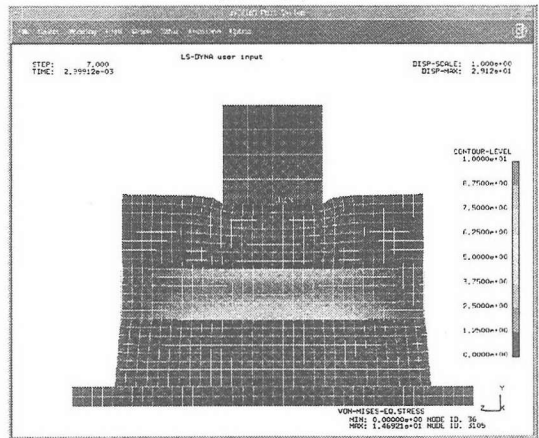


図-8 (4)

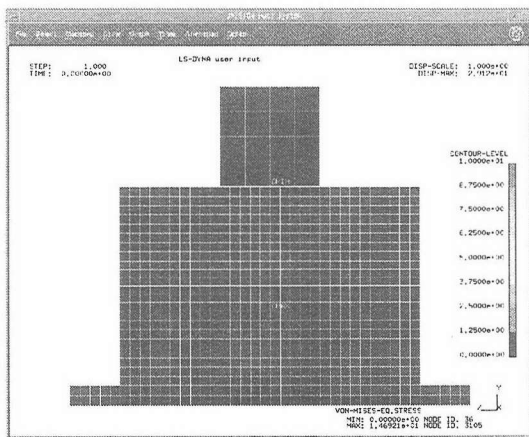


図-8 (1)

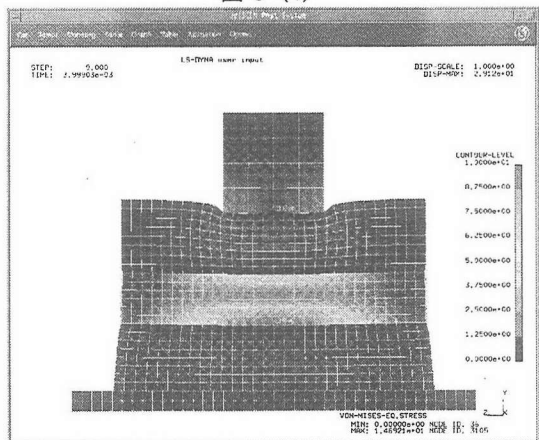


図-8 (5)

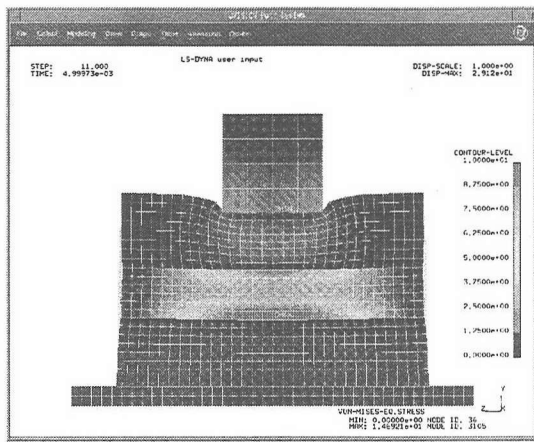


図-8 (6)

図-8 大腿部骨折モデルの数値解析結果

結果によれば、図-8 (2) から図-8 (6) に至って徐々に変形が増大し、大腿骨の応力が図-8 (6) でほぼ最大になっている様子が明らかである。今回の算定では、骨モデルは剛体としているため、骨折の状況は表現し得ていないが、大腿骨の各組織物性値を人の値に近づけることにより、より現実的な状況を再現できると思われる。したがって、今回の試行によって、LS-DYNAを地震時の人体被災度計測シミュレーションの手法として用いることの基本的な確認ができたと考えている。

4. まとめ

本報告では、まず筆者らの一連の研究において作成された阪神・淡路大震災における建物被害と人的被害の統合データベースに基づき、死者と重傷者の成傷器や受傷部位などの被災状況を詳細に検討した。つぎに、その結果によって明らかとなった典型的な重傷の発生状況を衝撃応答解析用汎用ソフトであるLS-DYNAを用いて再現すべく、数値解析の適用性について検討を加えた。

得られた結果および今後の課題は以下のようなものである。

- ① 阪神・淡路大震災における死者の典型的な発生状況の一つとして、木造住宅に居住していた被災者が建物の全壊に伴って、胸部を圧迫され短時間内に窒息により死亡に至るといった様相が想定された。
- ② 重傷の発生状況としては、家屋（とくに木造）と家具のいずれかを成傷器として、腹腰部、下肢あるいは胸部に骨折または挫創を負うというケースが典型的なものの一つとして想定された。
- ③ LS-DYNAによる大腿骨骨折シミュレーションの試行は、おおむね良好な結果を与えた。したがって、この数値解析手法を地震時の人体被災度計測シミュレーションに適用するための基本的な確認ができた。
- ④ 今後の課題としては、今回用いた数値解析手法を胸部圧迫による窒息死のような準静的課題に適用する場合の問題点を探ることと、人体の骨格、組織の物性値をより現実的な値として確定することおよび骨折、窒息に至る限界値を明らかにすることなどがあげられる。

参考文献

- 1) 熊谷良雄, 宮野道雄, 糸井川栄一: 阪神・淡路大震災での人的被害データとその分析, 第1回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文集, pp.75-80, 2000.
- 2) 宮野道雄, 生田英輔, 糸井川栄一ほか: 阪神・淡路大震災における重傷者発生と建物被害との関係, 第2回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文集, pp.117-122, 2001.
- 3) 宮野道雄, 生田英輔, 糸井川栄一ほか: 阪神・淡路大震災における重傷者発生世帯に対する調査, 第3回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文集, pp.107-112, 2002.
- 4) 西村明儒, 井尻巖, 上野易弘ほか: <特集> 集団災害救急—死体検案より—, 救急医学別冊, 1995.
- 5) 建設省建築研究所: 平成7年兵庫県南部地震被害調査最終報告書, 303P, 1996.
- 6) 杉本侃 (代表者): 阪神・淡路大震災に係る初期医療実態調査班研究報告書, 106P, 1996.
- 7) (株) 日本総合研究所: LS-DYNA マニュアル, 2001.