

古墳石室構造の歴史的変遷についての技術的考察^{*1}

A consideration on historical change of structure of stone burial chamber in ancient mounds

西形達明^{*2}, 西田一彦^{*3}, 玉野富雄^{*4}

By Tatsuaki NISHIGATA, Kazuhiko NISHIDA, and Tomio TAMANO

要旨:我が国の古墳内部の石室は歴史的情報の宝庫とも言うべきものであり、古墳盛土とともに現在もいたる所で精力的な調査がなされている。その中で石室構造はその歴史的情報の他に、石組み構造としての地盤工学的に重要な情報も数多く有している。とくに、上部の古墳盛土重量を支持する石室の力学的構造とその安定性について考察することは、石室の維持補修に対しても貴重な資料を与えるものと考えられる。そこで、本研究では石室の石組み構造と安定性について、個別要素法を用いて基礎的な解析を行った結果について報告する。

1. はしがき

わが国には30万にも及ぶ遺跡あるいは埋蔵文化財が存在すると言われているが、近年のこれらに対する関心の高まりと保存の問題がますます重要視されるようになっていく。とくに、木造が主流とされる日本の建造物の中において、石造物は系統的な技術的調査がなされないまま今日に至っている。石造物の中でも古墳時代の横穴式石室は、当時の石造文化と技術の高さを物語る貴重な遺構であるが、その構造的解明は戦前に発行された石舞台古墳の調査報告の域を越えていないばかりか、この種の研究自体が停止しているようである。加えて、近年宅地開発や道路造成などに関連した古墳の解体調査の事例が増えてきているようであるが、石造物の工法に関する研究はいまだ手つかずの感があり、その解明は進んでいるとは言いがたい。

そこで、本報告では古墳石室の構造形式と築造手法をモデル化し、これらを個別要素法¹⁾を用いて解析することで、その安定性を検討することを試みた。これにより、古墳石室の築造手法とその合理性について検証を行うことにする。本研究で対象とする石積構造のように、個々の物体の剛体変形が大きく、かつ物体間の相対的な変形が大きいと予想される場合の変形解析に対しては個別要素法が適していることから本解析手法を採用した²⁾。

このような解析によって古墳石室の変形状況を明らか

にすることができれば、将来的には石造物の劣化による変形の進行を把握することも可能となり、その補修工事の重要な資料を提示することができるものと考えられる。

2. 石室構造の変遷

我が国の古墳は3世紀頃から7世紀にかけて築造されたものが多い。図-1および図-2は、そのなかで代表的な古墳石室の見取り図を示したものである。図-1に示す丹田古墳は4世紀に築造されたものといわれており、石室の石は比較的小さく、扁平なものが用いられているようである。また、図-2の海北塚古墳は6世紀後半のものとされており、その石の形状は方形で大きいものが用いられるようになっている。このように、古墳石室に使用された石の大きさや形の変化について見ると、年代を経るにつれて、石の大きさは大きくなると同時に、石の形は板状から方形に変化している。また、石室の断面形状はアーチ状から直立形状に変化していくことがわかる。石の形が板状の場合、石室の安定性確保のためには断面形状をアーチ状にせざるを得ないであろうが、その後、技術が発達して大きな石が方形に整形できるようになると、断面形状を直立にすることで、石室内の空間をより有効に利用できるようになっている。また、石の大きさを大きくすることによって、石室の安定性も図ることができる。このような過程で古墳の設

^{*1} keyword: 古墳石室, 個別要素法, 安定性

^{*2} 正会員 工博 関西大学工学部土木工学科 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35)

^{*3} 正会員 工博 関西大学工学部土木工学科 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35)

^{*4} 正会員 工博 大阪産業大学工学部土木工学科 (〒574-8530 大阪府大東市中垣内 3-1-1)

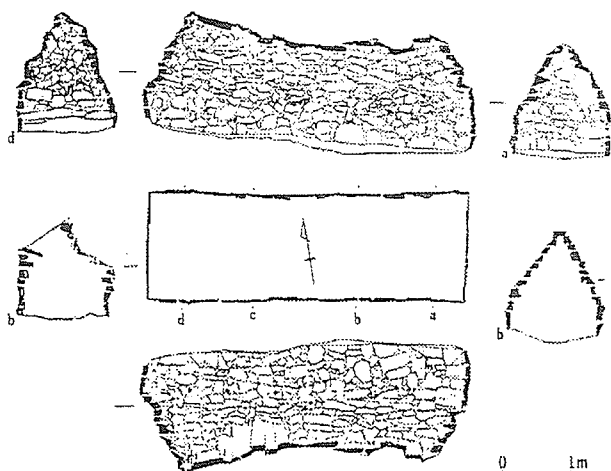


図-1 丹田古墳の石室³⁾

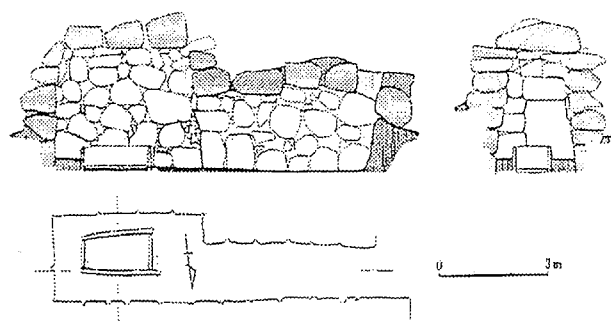


図-2 海北塚古墳の石室³⁾

計技術が変化したものと考えられる。

次に、図-2の海北塚古墳に見られるように、石室上部には大きな天井石が用いられるようになっている。この天井石は古墳の終末期になると高度に加工され、より大きなものへと変化していく。このような変化は石室構造の安定性と密接な関係があるものと推察されるが、この点については個別要素法によって検証を行うことにする。

3. 古墳の築造法

古墳石室の築造方法については石舞台古墳についての高橋の研究に詳しい⁴⁾。これを参考にすると、以下のようである。

一般に、石室には大小数十個の花崗岩が使用されているが、これらは近辺で採掘しうる石を運搬し加工して使用したものと思われる。巨石の運搬については、コロや滑車が使用されたと考えられる。また、巨石を持ち上げる作業には梃子が最も多く使用され、移動させる場合にはコロを用いたと考えられる。この際、石の下面を平らに加工することが必要となるが、加工がなされない場合には修羅と言われる敷板の上に載せてその下にコロを用いて運搬した。

石室の築造手法は、まず広さ1町歩ほどの土地を平坦に

ならし、その中央に玄室を作る。まず、玄室羨道を封じ、土地を掘削し、その周囲部の壁を積むべき場所はとくに深く根掘する。地質が粘土質である場合には、多少の栗石を入れて堅固な基礎を造ったようである。石室内面には加工を施した石をコロを用いて運び据え付ける。側壁の石は天井石に比べて明らかに小さいものが用いられている。

石積みはまず北側の壁から開始し、次に両側の側壁に進んだものとされている。石室側壁の石積みが完成すると、図-3に示すように、玄室羨道の壁を木製の支柱と梁によって支え、石室内部に一旦土を埋戻した後に、その上にコロを使って天井石を両側の石積み壁の上に横たえたものと想像される。そして、古墳盛土が完成した後に石室内の埋戻し土や木材を除去し、内部床の敷石を施工したものと考えられている。

以上のような方法によって古墳石室が築造されたものと推察されているが、これらの石室形状や天井石の機能を初めとして、築造手法についても力学的な立場から解析を行い、その妥当性や問題点を検証することは、現代の石積み構造物の安定を考察する上で非常に有益な資料を提示するものと考えられる。また、古墳石室の変形状況を把握することができれば、文化遺産を適正に保存するための補修作業に対しても有用であると考えられる。

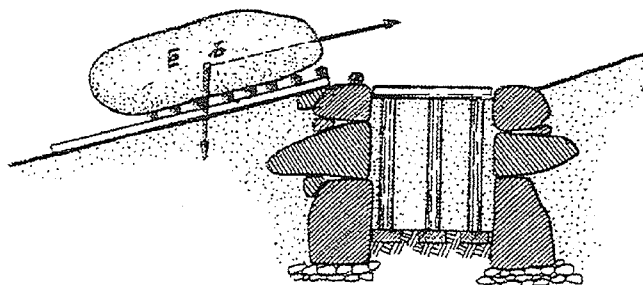


図-3 石室の築造方法⁴⁾

4. 解析対象古墳

本研究で対象とした古墳は山口県下関市に存在する岩谷古墳である。その全景写真と石室内部の写真を写真-1、写真-2に示す。また、図-4には岩谷古墳墳丘の断面図を示す。岩谷古墳は半径14m、高さ4mの円墳であり、古墳としてはそれほど大きいものではない。石室は横穴式石室(複室)で構成されている。石室の側壁部は持ち送りが大きく曲線形状をなしており、その上部には大きい天井石が配置されている。この岩谷古墳は移築復元されたこともあって、石室構造の安定性や盛土の構造が明らかにされており、解析に好都合であるので解析対象とした。

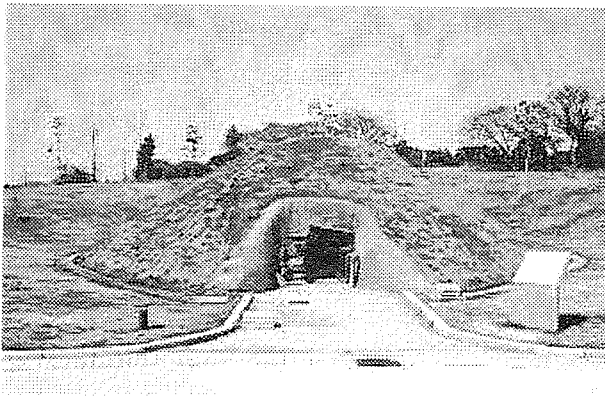


写真-1 岩谷古墳全景⁵⁾

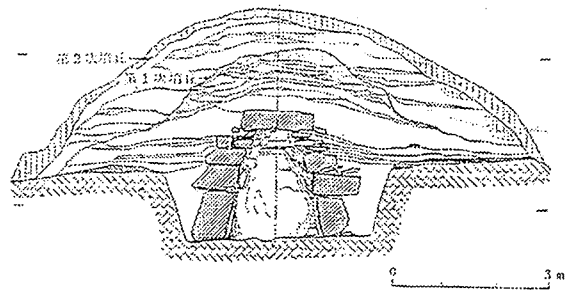


図-4 岩谷古墳墳丘断面図⁶⁾



写真-2 石室内部写真⁵⁾

5. 解析条件と手順

本報告においては、石積形状および天井石の安定性への寄与などについて基礎的な解析を行うことを目的として、石積形状をあらかじめ実物に近いが、単純化したモデルを用いて解析を行った。すなわち、解析モデルでは石室の石の形状はすべて2次元の方形とした。この結果、解析モデルは古墳盛土を含めて2次元モデルとなる。解析手順は図-3に示した高橋による築造法を参考に行っている。すなわち、計算は石室内部に土を埋め戻した状態で古墳盛土が最後まで施工されたものと仮定し、この状態を初期応力状態としている。したがって、古墳盛土が完成した時点における石室の変形は微小であると仮定し、石室内部の埋戻し土を除去することによる応力解放時の変形を考察する。

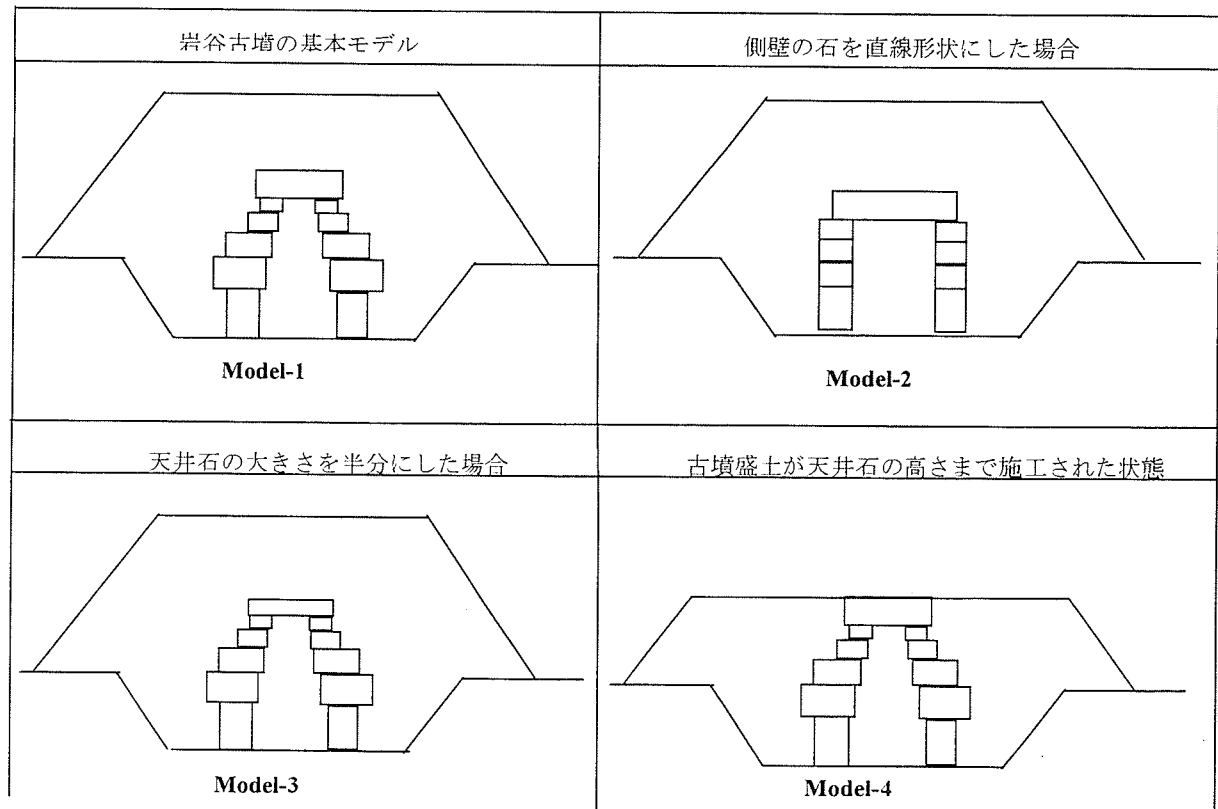


図-5 解析モデル

図-5 は解析を行った 4 種類の解析モデルを示したものであり、その概要は以下のとおりである。

Model-1: 図-4 の岩谷古墳断面図をモデル化したもので本解析の基本モデルである。

Model-2: 岩谷古墳の側壁形状が安定性に及ぼす影響を確かめるために、側壁部の石を直線上に積んだものである。

Model-3: 天井石の重量の影響を調べるために、天井石の大きさ（高さ）を **Model-1** の半分にしたものである。

Model-4: 古墳の施工手順を検討するために、石室内の埋戻し土を除去した後に古墳盛土を天井石の高さまで施工されたと仮定して解析を行ったものである。

応力解放時（石室内の土を除去した後）の個別要素法の解析モデル図を図-6 に示す。個々の石積み石は微小な個別要素よりなるが、これらの要素はすべて剛接されており、石自身は剛体と見なしている。古墳盛土部には約 2000 個の円形要素を配置し、計算に使用した古墳盛土部の定数は表-1 に示すとおりである。また、石積み間の摩擦係数は石室の安定性に大きく影響を及ぼすため、本来は摩擦試験等を行って決定すべきであるが、今回は石室の安定性に及ぼす石室構造の影響を定性的に評価することを主眼としているため、側壁部の石積み間の摩擦係数を 0.5 とし、最下部の石と下床部との間の摩擦係数を 1.0 とした。

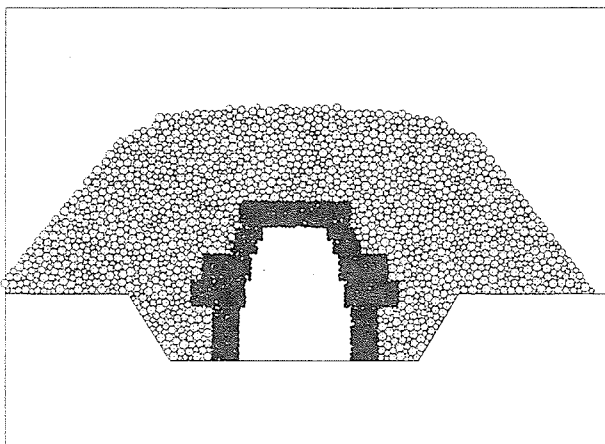


図-6 応力解放時の個別要素モデル

表-1 解析に用いた定数値

kn, ks (kN/m)	摩擦係数	粒子間ボンド (kN)
1×10^4	0.5	2.3

6. 解析結果

Model-1 の解析結果を図-7 (A) に示す。石室内部の埋め戻し土の除去によって、石積みは石室内部に向かってわずかに変形するが、それほど大きいものではなく、安定した状態であるといえる。水平変位が最も大きい部分は石室最下部であるが、その変位量は約 0.1m 程度である。

次に、**Model-2** の解析結果を図-7 (B) に示す。この解析では、側壁部の石積みが直線状になっているため、石積みの中央部から下部の部分にかけて水平変位が大きく（約 0.5m）、石積み盛土の土圧を受けて石室内側に向けて座屈する状況にある。この結果から、現実の岩谷古墳の石室側壁部の石積み形状は曲線状とすることで、古墳盛土からの水平土圧を合理的に支持していることがよくわかる。形状をアーチ状とすることで、アーチに作用する土圧は石積み間の垂直圧縮力に変換されるため、石積み間のせん断抵抗をより大きくすることができる。したがって、石積みの持ち送り構造は石室の築造を容易にするとともに、力学的安定性の立場からも非常に合理的なものであると考えられる。

Model-3 の解析結果を図-7 (C) に示す。この解析では天井石の大きさを半分にしたこと以外はすべて **Model-1** と同じ条件である。にもかかわらず、石室側壁部の石積みは大きく内側に押し出され、明らかに石室は崩壊状態に至っている。これは天井石が石室の安定性に及ぼす影響が非常に大きいことを示している。すなわち、重量の大きい天井石が石室上部に設置されることで、上部盛土の荷重を受け持つとともに、石積み間のせん断抵抗を増加させて石積み自身の安定性を増加させているものと考えられる。

Model-4 の解析結果を図-7 (D) に示す。この解析は図-3 に示した築造方法の妥当性を確認するための解析モデルであり、古墳盛土の完成前に石室内の埋戻し土を除去した場合を想定したものである。これより、石室内に土がない状態で盛土が石室の高さまで施工されると、容易に石室が不安定な状態に至ることがわかる。これは、**Model-3** の場合と同様に、石積みの安定にはある程度の鉛直荷重が石積み上部に作用する必要があることを示している。したがって、高橋が指摘したように、古墳盛土の施工に際しては、十分な盛土荷重が石室の石積み作用するまでの間は、石室内をあらかじめ埋め戻しておくことによって、石積みの安定を確保する必要があったものと推察される。

7. まとめ

本研究では個別要素法を用いた解析を行い、その変形挙動から石室石積みの構造形式がその安定性に及ぼす影響を考察した。その結果をまとめると以下のようになる。

1. 石室石積みの持ち送り構造は古墳盛土からの土圧に対するアーチ支持構造として有効に機能し、古代においては経験に基づいた非常に優れた構造であったと考え

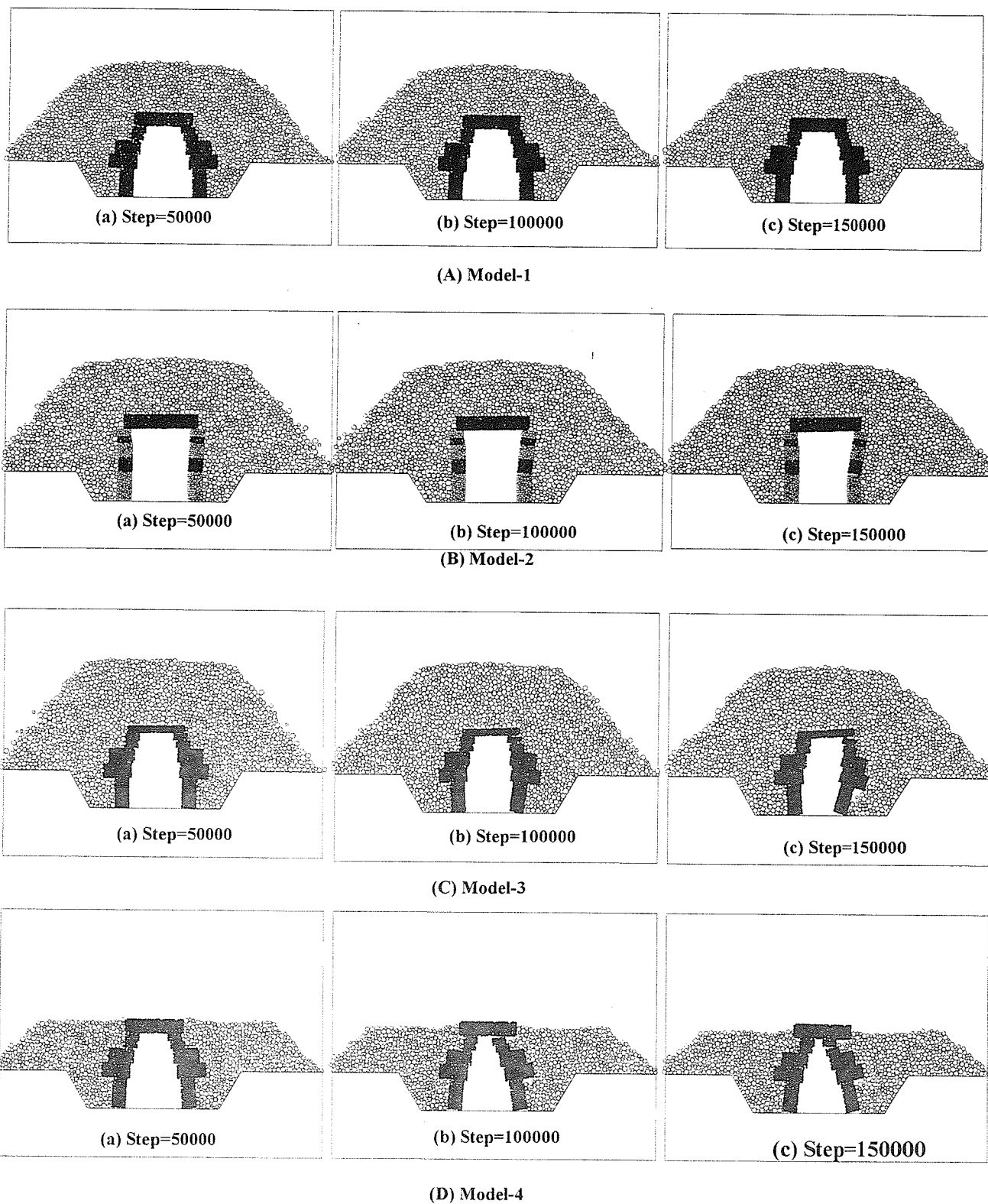


図-7 それぞれの個別要素モデルによる解析結果

られる。

2. 石室の天井石は上部の盛土重量を支持するとともに、その天井石自身の重量により石室の安定性を高める役目を担っている。
3. 古墳盛土施工時の石室の安定性を確保するためには、高橋の指摘通り、石室内を埋め戻しておく必要があったものと推察される。

以上のことから、石室の安定性の確保には、ある程度の垂直荷重あるいは石積み間の垂直応力が必要であり、これによって石積み間のせん断抵抗を維持させることが重要である。また、アーチ支持効果は石材の小さい初期古墳で大きく、後期古墳では小さくなるようである。これらの結果から、今後は古墳石室の保存修復をするために、定量的

な解析検討を行っていく予定である.

謝辞: 本研究は、科学研究費補助金（基盤研究（B）

（1）課題番号 12450208、研究代表者：天野光三）による研究である.

参考文献

- 1) 佐野元彦:破壊のシミュレーションー拡張個別要素法で破壊を追うー, 森北出版, 1997.
- 2) 水本雅夫, 八木清勝ら:粒状要素を用いた個別要素法による城郭石垣の挙動解析, 第36回地盤工学研究発表会, pp.1789~1790, 2001.
- 3) 大塚初重:図説西日本古墳総覧, 新人物往来社, 1991.
- 4) 高橋逸夫:大和島庄石舞台の巨石古墳, 臨川書店刊, pp.70~81, 1937.
- 5) <http://www.interq.or.jp/japan/kofun/tofuken/yamaguti/simonoseki/simonoseki.htm> より.
- 6) 宮原晋一:横穴式石室の構造, 奈良県教育委員会, pp.26~48, 1980.