

ランプトンネルおよびトンネル分岐合流部の地震時挙動 3D EARTHQUAKE RESPONSE OF RAMP WAY TUNNEL AND UNDERGROUND JUNCTION

土橋 浩¹・深山大介²・市村 強³・堀 宗朗⁴・大保直人⁵
・山木洋平⁶・森口敏美⁷・山田岳峰⁸

Hiroshi DOBASHI・Daisuke MIYAMA・Tsuyoshi ICHIMURA・Munco HORI・Naoto OHBO
・Yohei YAMAKI・Masami MORIGUCHI・Takemine YAMADA

Demands for deep underground infrastructure construction including toll ways have been increasing in Tokyo Metropolitan Area, Japan. A conventional seismic design method for the underground structures is to perform two-dimensional FEM. A seismic response of the complicated large-scale structure such as the connection structure between main tunnels and the connected ramp ways, however, has not been grasped. In order to establish a new seismic design procedure, this paper introduces a pre-study of three-dimensional dynamic analysis (3d-FEM) including the process of finite element modeling and the boundary influence conditions by modeling main tunnels and underground ramp ways.

Key Words : ramp way tunnel, underground junction, seismic response analysis, 3d fem

1. はじめに

近年, 都市部では都市空間の高度利用に伴い, 地下空間を有効活用した地下構造物の整備が進められている。例えば, 大都市圏で道路ネットワークをトンネル構造で整備する場合, 地上へアクセスするランプ(出入口)トンネルが必要となる。ランプトンネルは, 深部で本線トンネルと分岐合流し(構造的には本線トンネルと一体化), 地上に至る過程でランプトンネルの深度が変化する。また, その構造はトンネル縦断方向に大きく変化していくため, 地震時には複雑な挙動を示すことが予想される。本線およびランプトンネルがシールドトンネルで構築されたサイドランプ式の場合には, ランプトンネル, 分岐合流部の中壁, 分岐合流部端部および近傍の本線トンネルで応力が集中することが定性的に確認されている^{1), 2), 3)}。本線がシールドトンネル, ランプトンネルがRC躯体のセンターランプ式トンネルの場合にもサイド式と同様な挙動の発生が予想される。そこで, 著者らはセンター式のランプトンネルを対象に大規模三次元動的FEM解析を実施し, ランプトンネルおよびトンネル分岐合流部の地震時挙動を確認する研究を現在進めている。

キーワード: ランプトンネル, 分岐合流部, 地震応答解析, 三次元, 有限要素法

¹正会員 工修 首都高速道路株式会社マネージャー 東京建設局設計第一グループ

²正会員 工修 首都高速道路株式会社メンバー 東京建設局設計第一グループ

³正会員 博(工) 東京工業大学助教授 大学院理工学研究科土木工学専攻

⁴正会員 PhD. 東京大学教授 地震研究所

⁵正会員 工博 鹿島建設(株)上席研究員 技術研究所

⁶学生会員 東京工業大学修士学生 大学院理工学研究科土木工学専攻

⁷正会員 M.S. 鹿島建設(株)所長 東京土木支店松見坂代々木シールドJV

⁸正会員 工修 鹿島建設(株)上席研究員 技術研究所

その際、解析結果を定量評価するためには適切な三次元的解析モデルの作成が必要である。例えば、半無限性を再現でき境界領域の影響を受けない適切な境界条件・境界領域の設定に係わる検討や、解析可能周波数帯および構造物の応力集中程度を勘案した最適なFEM要素分割と要素タイプの選択に関する検討が必要となる。

また、実構造物を対象とした場合、実構造物を完全に再現する数値モデルは作成できないため、検討目的に応じモデルを適切に簡素化することが求められる。したがって、実構造物を対象に大規模な地震応答解析を実施する場合には、モデル作成に至る検討が特に重要となる。

本論文は、センターランプ式トンネルの基本的な地震応答特性の定量評価を目標とした大規模三次元的FEM解析に先立ち、モデル作成の段階で必要となる基礎検討を実施するとともに、実構造物を対象としたランプトンネルのモデル化方法並びにランプトンネルの地震応答解析結果の一部を紹介する。

2. 三次元的FEM解析手法の概要

本研究で採用した三次元的FEM解析手法は、構造物周辺域の有限領域を取り出し、複雑な構造がある領域(NFEM領域)とはほぼ均質な領域(VFEM領域)に区分することにより効率的な解析を行うものである^{2),3)}。構造物を含む周辺地盤のNFEM領域は、非構造の四面体二次要素で離散化している。NFEM領域の外側に位置し側面・底面を含む周囲の地盤領域は、構造格子のボクセル要素で構成するVFEM領域⁴⁾とし六面体アイソパラメトリック一次要素で離散化する。さらに有限領域の周囲に半無限吸収境界条件を適用する。離散化した式の解法として、Element-by-Element法⁵⁾による剛性行列の評価を行うことにより、通常のFEMに比べて計算時間の短縮を図っている。

3. 解析領域の影響検討

(1) 検討方法

地震応答解析では、半無限性を再現でき境界領域の設定範囲の影響を受けない適切な解析領域の設定が必要である。そこで、今回のランプトンネルの大規模三次元地震応答解析においては、適切な解析領域を確保するため、解析領域の寸法がトンネルの地震応答解析結果に及ぼす影響を検討した。検討モデルは、後述するランプトンネル分岐合流部を対象とした三次元解析モデルから、本線トンネル部分をモデル化した図-1に示す解析モデルを用いた。解析定数は同様に三次元解析モデルの定数に準じ設定した(表-3参照)。ただし、本線トンネルは解析の簡便化を図るため、変形性能が同等となることに配慮しながら、本線トンネルと同一の外径を有する中実円筒でモデル化している。その際、中実円筒の解析定数は、実際のトンネル断面とせん断剛性が等価になるように、トンネルと中実円筒とした場合の横断面積の比率換算により決定した。このように決定した解析定数は、トンネル並びに中実円筒の両横断面について双対する単位直荷重を加えた場合の変形が同一になるように設定した場合よりも剛性が大きくなることを確認しており、

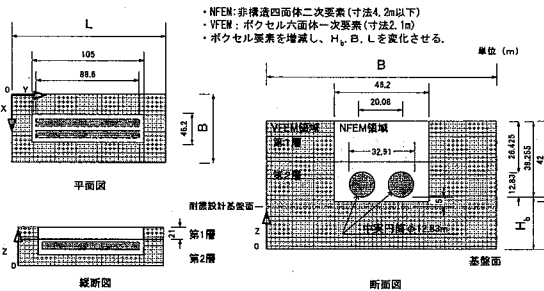


図-1 境界領域検討モデルの概要

表-1 解析ケース

	L				
	147m	180.6m	247.8m		
B	121.8m	88.2m	121.8m	189m	121.8m
Hb	13.245m	ケース7	ケース5	ケース1	ケース6
	25.845m	ケース10	ケース12	ケース4	ケース13
	38.445m	ケース18	ケース16	ケース14	ケース17
				ケース19	

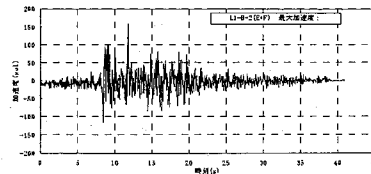


図-2 想定地震波

解析領域の影響検討上安全側の設定になっていると判断している。

表-1に示すケースについて、当該モデルの地震応答解析を2章に示した解析手法で実施した。入力波は、本線トンネル下端-5m位置で図-2に示す地震波を入力した場合と等価となるように、解析モデル下面位置での引き戻し波を求め、設定した。表-1に示されるように、地震波の入力は、トンネル軸方向、トンネル横断方向それぞれにつき解析を実施し、軸方向入力の場合は、トンネル端から解析モデル境界までの距離（図-1 Lに相当）を、横断方向入力の場合は、トンネル横断面外縁からモデル境界までの距離（同様にBに相当）と、トンネル下端から基盤までの深さ（同様にH_bに相当）をパラメータとしている。

(2) 検討結果

解析の結果、得られた応答変位時刻歴のフーリエスペクトルから、振幅が大きくなる0.98Hzの成分に注目しフーリエ変位スペクトルの振幅分布を整理した。NFE領域の地層境界位置でのフーリエ変位スペクトルの振幅分布図（以降振幅分布）を図-3、4に示す。ここで、図-3は横断方向入力の結果で、図-4は軸方向入力の結果である。

図-3から、H_bが大きくなり（基盤面深さが深くなり）、Bが大きくなると（解析横断面の領域幅が広がると）、振幅分布が変化しなくなることが確認できる。一方、H_b、Bが小さい場合には解析領域が十分に確保されていないため振幅分布図は大きく変化している。今回の解析ケースでは、H_b=25.845m、B=121.8mのケース4で振幅分布が一定傾向を示すことから、解析領域の影響を少なくするためには、基盤面深さ、横断面領域幅を少なくとも同程度以上確保する必要がある。同様に、軸方向については、図-4から、H_b=25.845m、B=121.8mの場合、L=147m（ケース10）であれば、境界の影響を低減できることが分かる。

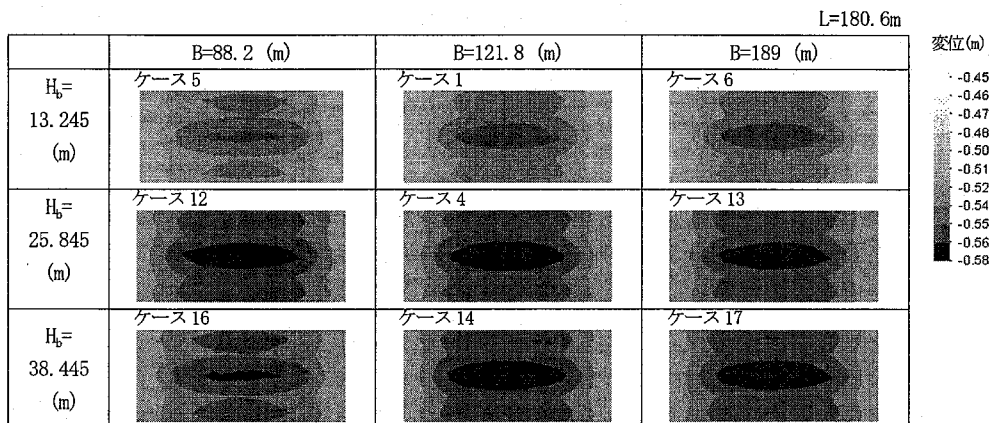


図-3 入力波横断方向の場合の解析領域検討結果
[フーリエ変位振幅分布図(0.98Hz)]

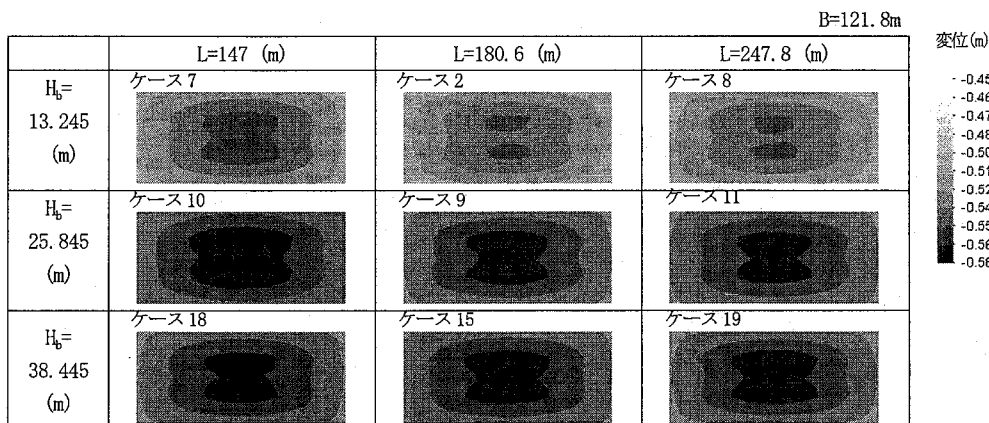


図-4 入力波軸方向の場合の解析領域検討結果
[フーリエ変位振幅分布図(0.98Hz)]

(3) 本解析モデルの解析領域の決定

以上から、解析領域の影響を低減できる最小解析領域の目安として、 $H_b \geq 25.845\text{m}$ 、 $B \geq 121.8\text{m}$ 、 $L \geq 147\text{m}$ （：トンネル端から境界までの離隔29.2m）が確認された。そこで、当該検討結果を参考に、後述する本解析モデルでは、メッシュ寸法との兼ね合いも考慮し、解析領域を $H_b=27.245\text{m}$ 、 $B=119\text{m}$ 、 $L=763\text{m}$ （：トンネル端から境界までの離隔42m）に設定した。

4. センターランプ式トンネルのモデル化

実構造物の地震応答解析結果を定量的に評価利用するためには、前述したように解析領域の影響を受けない十分な解析モデルの領域を確保すること以外に、実構造物を完全に再現する数値モデルは作成できないことから、検討目的に応じてモデルを適切に簡素化することが重要である。さらに、解析可能周波数帯および構造物の応力集中程度を考慮した最適なFEM要素分割と要素タイプの選択などモデル化に至る検討が重要となる。そこで、以降、センターランプ式トンネルのモデル化方法について検討する。

(1) センターランプ式トンネルおよび地盤のモデル化

センターランプ式トンネルの構造断面の例を図-5に示す。本線トンネルは外径12.83m、内径11.77m、セグメント厚さ0.53m、離隔7.248mのトンネルとする。トンネル構造は、併設する本線トンネルに挟まれる分岐合流部では、端部における妻壁構造から、中央に二本壁または単壁を有する構造へと、分合流点となるノーズを起点とするランプトンネルでは、さらに箱型断面に変化した後、本線トンネルと分離し、最終的に地表面付近でU型擁壁へと、トンネル縦断方向に変化する。また、躯体の寸法・深度・勾配も複雑に変化している。このように複雑な構造を忠実にモデル化することは困難で、ランプトンネルと分岐合流部を含む全体系応答を対象とした耐震検討に関する既往研究例も少ない現状にある。そこで、今回のモデル化では、地震時挙動の基本特性の把握を主目的とし、図-6に示すようにトンネル構造を簡略化してモデル化することとした。トンネルモデルの主要寸法を表-2に、解析定数を表-3に示す。本線トンネルの覆工は、実施工では主桁・スキンプレート・縦リブからなる鋼製セグメントが設置されている。そのモデル化は、モデルのトンネル厚さをセグメント高さと同じ寸法とした中実モデルとし、弾性係数はトンネル断面の面内剛性がセグメントの曲げ剛性に一致するように設定している。質量は単位奥行き当りの重量が実物とモデルで同一になるように設定し、ポアソン比は鋼材と同じとした。一方、構造が複雑に変化するランプトンネルおよび分岐合流部は幅12m、高さ8.5m、厚さ1mの箱型断面とし、 $\sigma=40\text{N/mm}^2$ のRC構造を基本に解析定数を決定している。ランプトンネルの縦断勾配は平均勾配が一致するように7.4%とした。

想定する地盤構成は、地表からローム層～洪積堆の堆積粘土層または砂層～東京礫層～新第三紀泥岩層である。ただし、弾性波速度構造が東京礫層上面を境に大きく変化することから、地盤モデルは第1層（ $V_s=150\text{m/s}$ 、 $V_p=497\text{m/s}$ 、 $\rho=1.5\text{t/m}^3$ ）、第2層（ $V_s=450\text{m/s}$ 、 $V_p=1492\text{m/s}$ 、 $\rho=2.0\text{t/m}^3$ ）の2層構造としてモデル化した。

以上の検討を踏まえ決定した解析モデルを図-6に示す。

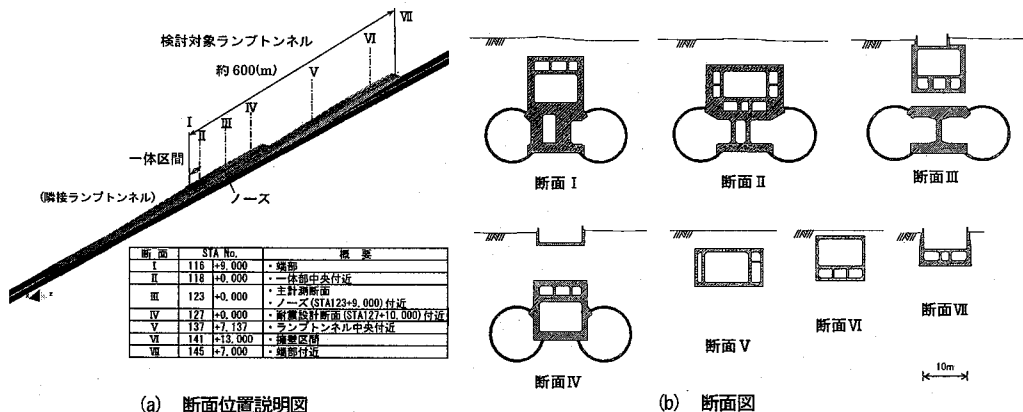


図-5 ランプトンネルの構造例

(2) FEMメッシュ

NFEM領域は、非構造四面体二次要素とし、地盤メッシュ寸法を7m、トンネルは1.5mのメッシュ寸法を標準とした。また、NFEM領域周辺のVFEM領域とする地盤は、1辺3.5mのボクセル要素を配置した。地盤応答の解析精度を保障する周波数帯は、当該地盤の1次固有振動数が1.4Hzであることから、3Hz以内を目標として地盤のメッシュ寸法を決定した。また、メッシュ自動生成の際には、要素が均等に配置されるよう、さらに外観形状が非直線形状の部位については、その形状をモデルで可能な限り再現できるように配慮した。

モデルの規模はNFEM領域が節点数約92万点、要素数約62万個と、大規模なものとなった。

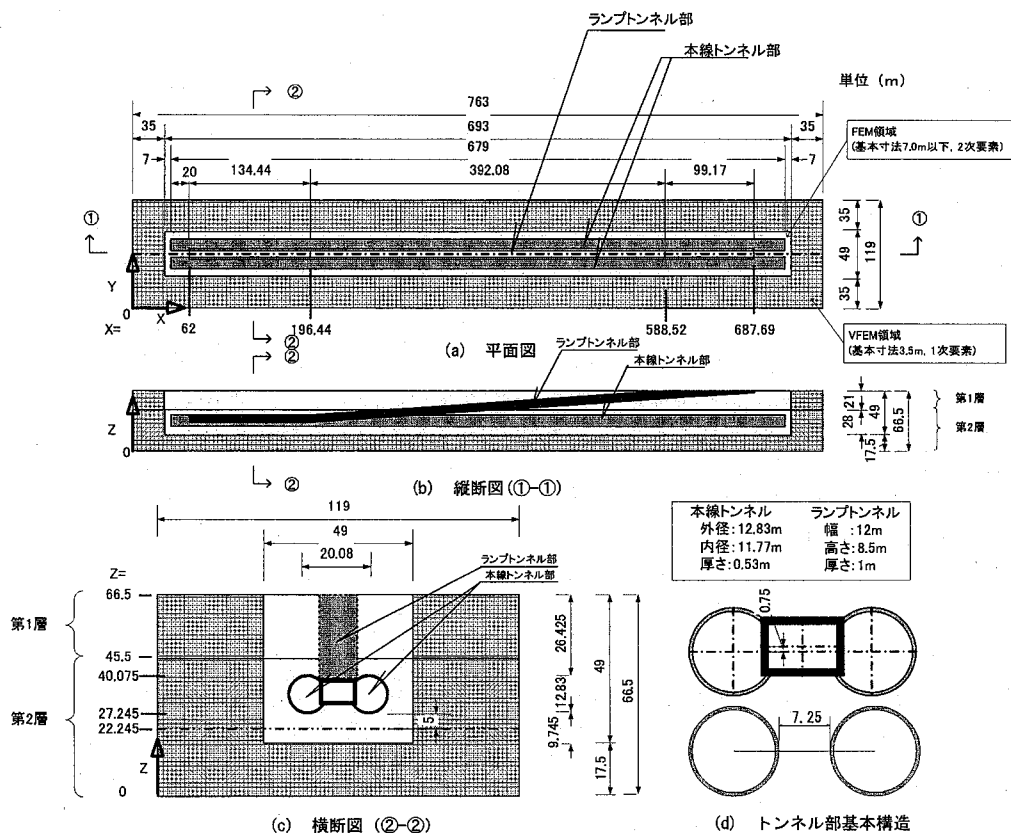


表-2 トンネルモデルの主要寸法

<構造物 概要>		
トンネル本線	基本形状:円形	
	外径	12.83m
	厚さ	0.53m
	土被り	26.425m
	下端深さ (GL)	-39.225m
ランプトンネル	基本形状:箱型	
	トンネル幅	12m
	高さ	8.5m
	厚さ	1m
	延長	628m
地盤	基本形状:水平成層地盤モデル	
	分割数	2層
	一次固有振動数	1.4Hz

表-3 解析定数

	単位体積重量 ρ (t/m ³)	P波速度 V_p (m/s)	S波速度 V_s (m/s)	減衰定数 α^*	備考
トンネル本線	0.609	6308	3372	0.9	鋼製セグメント
ランプトンネル	2.5	3584	2230	0.9	RC構造
地盤第1層	1.5	497	150	0.9	
地盤第2層	2.0	1492	450	0.9	

備考) *:レーリー減衰の質量依存項

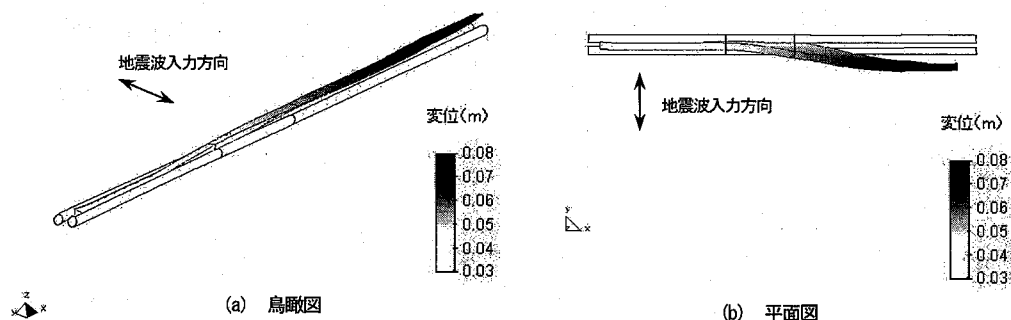


図-7 ランプトンネル・分岐合流部の地震応答変位（地震波入力方向：トンネル断面方向）

5. センターランプ式トンネルの大規模地震応答解析結果の一例

前述したモデルを用いセンターランプ式トンネルの大規模三次元的FEM解析を実施した。入力波は、図-2の地震波を本線トンネル下端5m位置に(E+F)入力したときの、解析モデル底面での引き戻し波のうち主要動部分の10.24秒（時間刻み0.01秒）とし、モデル底面に入力した。トンネル横断方向に地震波を入力したときの、変位応答が大きくなる時点におけるトンネルの応答を図-7に示す。同図から、第1層内のランプトンネルが横に振られて変位が大きくなる傾向が確認される。一方、第2層のランプトンネルは応答変位が小さいため、地層境界付近でトンネルの挙動のずれが大きくなることが予想される。また、ランプトンネルの層間変形が、第1層中間深度付近に比べ、地層境界付近と地表面付近では相対的に小さくなっており、トンネルが横断方向にねじられるような挙動の発生も推察される。

以上の挙動は、第1層、第2層の地盤の変形性能に起因していると考えられ、今後、解析結果を精査し、センターランプ式トンネル並びに同分岐合流部の地震時挙動を分析していく予定である。

6. あとがき

沖積平野では大深度から地表までの地震動増幅の度合いが大きく異なり、当該地盤に大深度から地表面にわたって立地する大型地下構造物では、深さによって大きく増幅される地震動の影響は無視できない可能性が考えられる。今回、センターランプ式トンネルの基本的な地震応答特性を定量評価するため、適切な解析領域の設定方法に関する基礎検討を行うとともに、実構造物を対象としたランプトンネルのモデル化方法並びに地震応答解析結果の一部を紹介した。今後、センターランプ式トンネル並びに同分岐合流部の地震応答特性を明らかにする予定にしている。

参考文献

- 1) Ohbo, N., Horikoshi, K., Yamada, T., Tachibana, K. and Akiba, H., Dynamic Behavior of a Underground Motorway Junction due to Large Earthquake, 13th World Conference on Earthquake Engineering, August 2004.
- 2) 山田岳峰, 市村強, 大保直人, 佐茂隆洋, 池田清宏, 堀宗朗: 大規模三次元FEM解析による地下複雑構造物の地震時挙動, 応用力学論文集, Vol. 7, pp. 909-916, 2004.
- 3) 山田岳峰, 市村強, 大保直人, 佐茂隆洋, 池田清宏, 堀宗朗: トンネルランプ構造部の地震応答特性と耐震対策工, 構造工学論文集, Vol. 51A, pp. 561-568, 2005.
- 4) Hollister, S.J. and Kikuchi, N., Homogenization theory and digital imaging: a basis for studying the mechanics and design principles of bone tissue, Biotechnology and Bioengineering, 43, No.7, pp.586-596, 1994.
- 5) Wenget, J.M. and Hughes, T.J.R., Solution Algorithms for Nonlinear Transient Heat Conduction Analysis Employing Element-by-Element Iterative Strategies, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, pp.711-815, 1985.