

某假想超高層建築地震回應分析及倒塌模擬

Seismic responses and collapse simulation of an imaginary super high-rise building

盧嘯¹ 陸新征² 葉列平³ 張萬開⁴

1 清華大學土木系 研究生 (E-mail:x-lu08@mails.tsinghua.edu.cn)

2 清華大學土木系 副教授

3 清華大學土木系 教授

4 清華大學土木系 研究生

摘要

隨著超高層建築的日益增多，其抗震性能研究已經逐漸成為當前研究的一個熱點。本文以某假想超高層建築為例，建立了其有限元模型，並進行了動力彈塑性時程分析，得到了該超高層建築在大震下的地震回應。為了進一步瞭解該超高層建築在超大震作用下的性能，本文對該超高層建築進行了超大震倒塌模擬，分析了該超高層建築的潛在倒塌部位以及倒塌形式，為超高層結構地震作用下的全階段設計提供參考。

關鍵字 (Keywords)：超高層建築、地震倒塌、彈塑性分析、有限元

X. Lu *, X.Z. Lu **, L.P. Ye ***, W.K. Zhang ****

Graduate Student*, Associate Professor **, Professor***, Graduate Student****

Key Lab. of Civil Eng. Safety & Durability of China Education Ministry, Dept. of Civil Eng., Tsinghua University, Beijing, 100084

ABSTRACT

With the increasing numbers of super high-rise buildings, the seismic performances of super high-rise buildings have become a popular research topic. The nonlinear finite element model for an imaginary super high-rise building is built up. The seismic responses of the super high-rise buildings under the Maximum Considered Earthquake ground motion are obtained via nonlinear dynamic time history analysis. In order to further understand the seismic performance of the super high-rise building under Mega-earthquake, the collapse process of the super high-rise building under the Collapse Level ground motion is simulated. The potential collapse regions and failure modes are predicted, which provides reference for the seismic design.

Key Words : Super high-rise building, Collapse due to earthquake, Elasto-plastic analysis, Finite element analysis

一、前言

隨著結構抗震理論的不斷研究與發展，基於性能的抗震設計已經開始廣泛地應用於工程設計中，而結構的抗倒塌設計是基於性能設計的一個重要方面。汶川、玉樹地震中大量建築物的倒塌引起工程界對抗倒塌問題的廣泛重視，如何實現大震不倒成為一個重要課題。而要想實現大震不倒，首先要瞭解在大震下建築結構是如何倒塌的。由於地震具有時間和空間的突發性，很難記錄下建築結構的倒塌過程。同樣，由於受到試驗條件、安全問題以及尺寸效應等眾多因素的影響，完全依賴倒塌試驗研究倒塌過程難度也很大，鑒於此，基於高性能計算的倒塌模擬技術成為了研究結構倒塌機理的重要手段。

隨著經濟的快速發展，超高層建築大量湧現，而且高度也在不斷刷新，2010年1月竣工的迪拜塔以828米的高度成為世界第一高樓。但是，國內外學者對於超高層建築的抗倒塌研究都還比較少。本研究以某假想超高層為例，進行了動力彈塑性時程分析，得到了該結構在大震下的地震回應，並進一步對該超高層進行了水準單向地震動輸入的超大震倒塌模擬，分析了該超高層建築的潛在倒塌部位以及倒塌形式，為超高層結構地震作用下的全階段設計提供參考。

二、有限元模型

該假想超高層結構高度約為600米，主要抗側力體系為巨柱—核心筒—伸臂桁架，結構體系為混合結構，其中巨柱為鋼骨混凝土，核心筒為鋼筋混凝土，桁架以及外框架採用工字型鋼樑。本研究採用清華大學開發的基於大型通用有限元軟體Msc.Marc的TECS程式，建立了該超高層結構的有限元模型，介紹如下。

2.1 伸臂桁架及外框架

由於該超高層結構的伸臂桁架和外框架均採用工字型截面鋼樑，因此，在有限元模型中，採用比較成熟的鋼纖維梁單元來類比，通過梁單元的局部座標來控制其方向，其有限元模型如圖2.1所示。

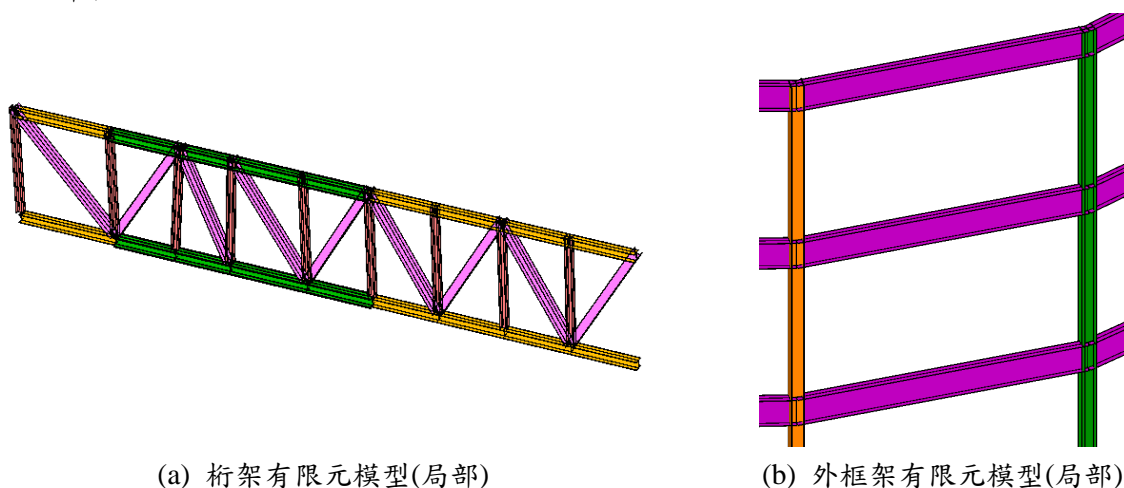


圖 2.1 桁架及外框架有限元模型

2.2 核心筒

由於核心筒由鋼筋混凝土剪力牆和型鋼混凝土剪力牆組成，有限元模型採用分層殼模型進行類比。分層殼是一種類比鋼筋混凝土結構的高效單元類型。分層殼單元基於複合材料力學原理，將一個殼單元劃分成很多層（圖 2.2），各層可以根據需要設置不同的厚度和材料性質（混凝土、鋼筋等）。在有限元計算時，首先得到殼單元中心層的應變和曲率，然後根據各層材料之間滿足平截面假定，由中心層應變和曲率得到各層的應變，進而由各層的材料本構方程得到各層相應的應力，並積分得到整個殼單元的內力。分層殼單元考慮了面內彎曲一面內剪切一面外彎曲之間的耦合作用，比較全面的反映了殼體結構的空間力學性能。對於剪力牆內部的分佈鋼筋和鋼板，將縱向和橫向鋼筋等效成正交異性的鋼筋層分佈在牆體對應的物理位置，用各項同性的鋼板層來模擬剪力牆中的鋼板，其示意圖如圖 2.2 所示，有限元模型如圖 2.3 所示。大量文獻[錯誤! 找不到參照來源。]，[3]]驗證了在彈塑分析和倒塌分析中利用分層殼模型來類比剪力牆的合理性。

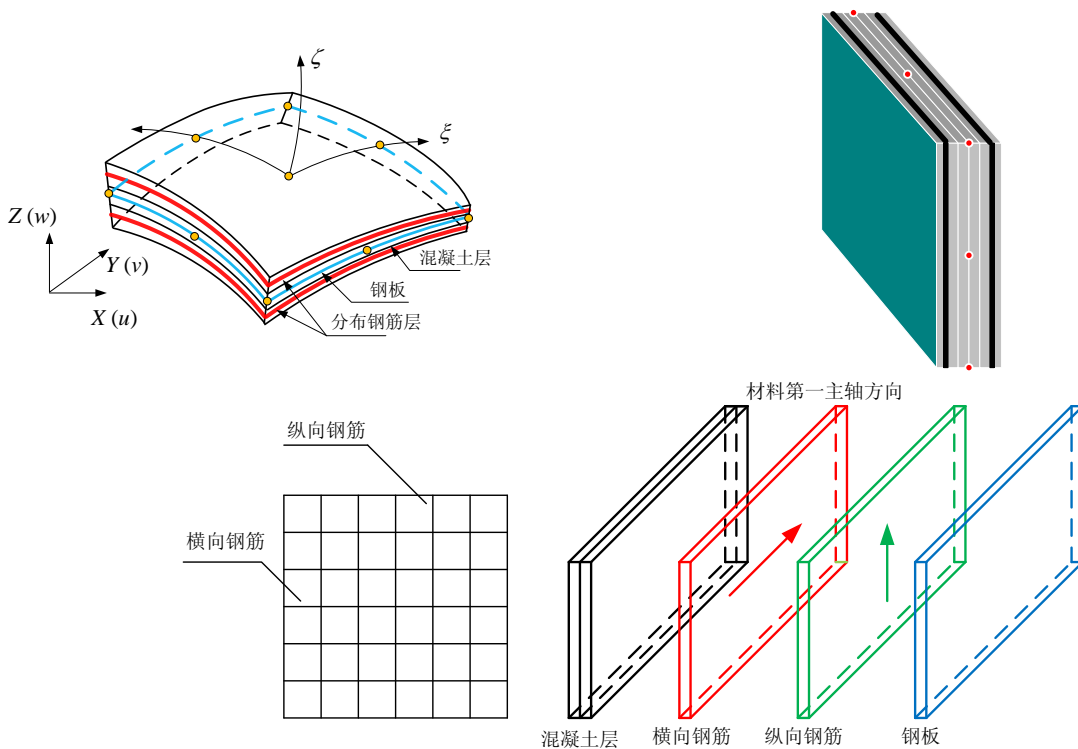


圖 2.2 分層殼示意圖

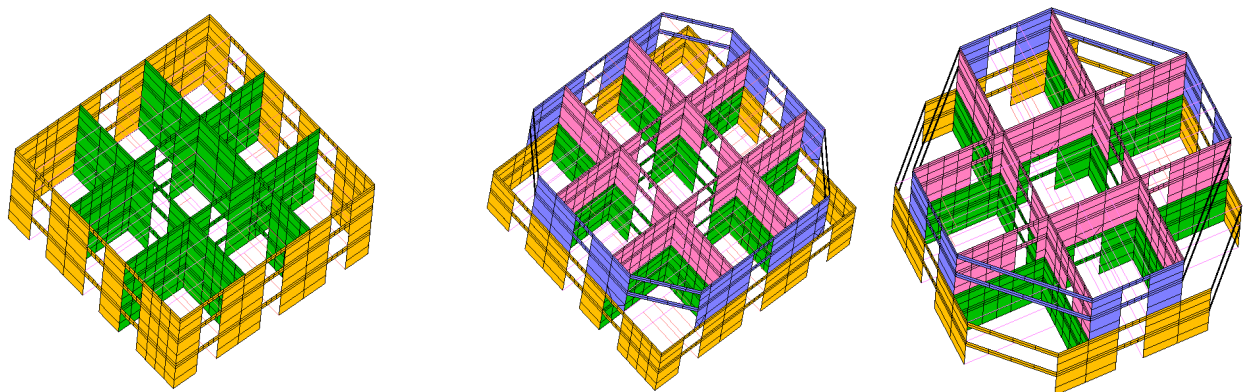


圖 2.3 核心筒的有限元模型

2.3 巨柱

巨柱採用鋼骨混凝土，截面大小沿高度逐漸遞減，最大截面面積約為 20m²，採用常規的梁單元已不合適。同樣，受到計算能力的限制，採用實體單元類比巨柱進行整體結構倒塌計算也非常困難。因此，本研究對巨柱作了專門研究，首先建立巨柱的三維實體精細有限元模型，而後以此為基礎，在考慮計算能力和計算精度的前提下，對巨柱的計算模型進行簡化。利用分層殼模型來類比巨柱沿厚度方向的特性，同時，在分層殼中插入 truss 單元來考慮鋼筋和型鋼沿柱縱向的貢獻，其有限元模型如圖 2.4 所示。

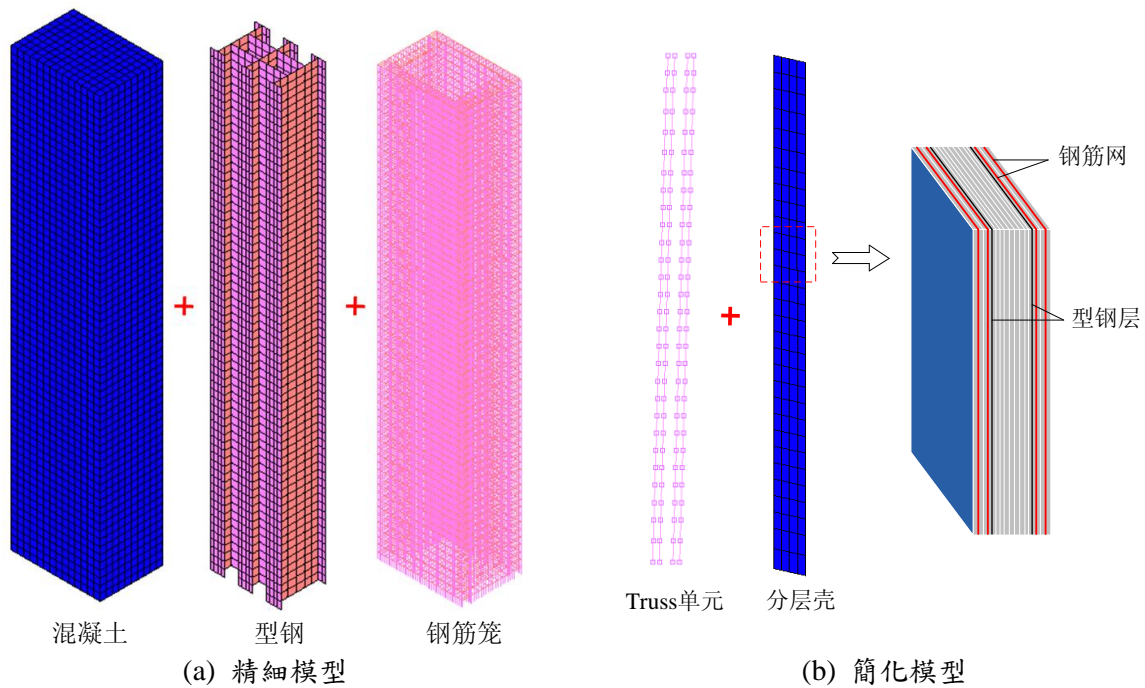
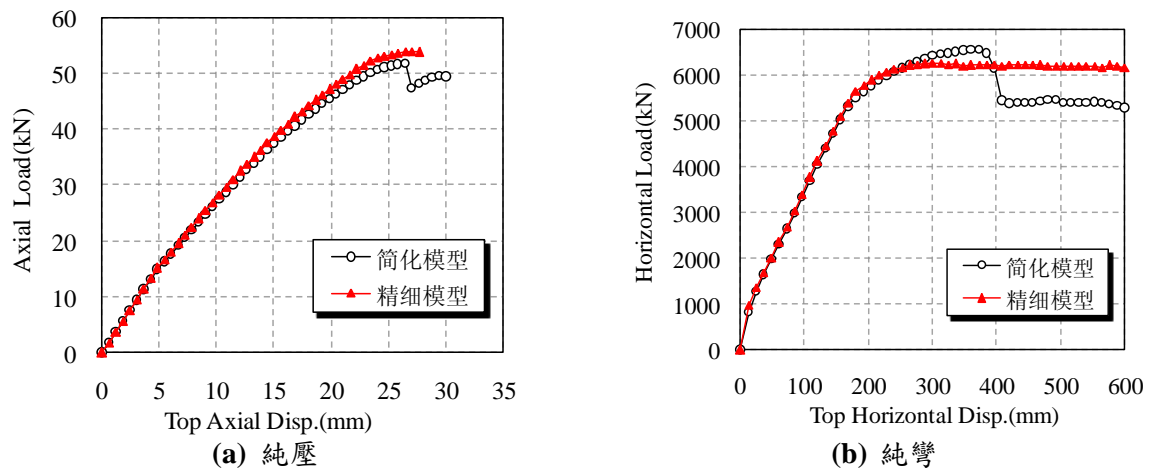
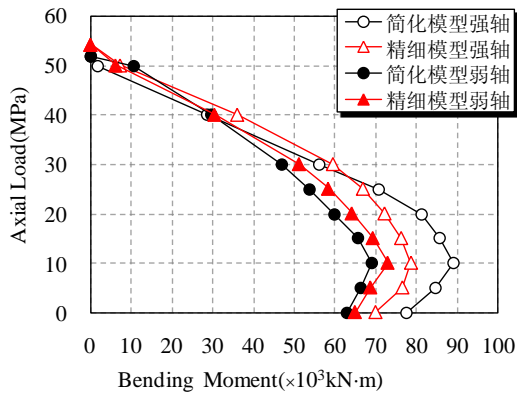


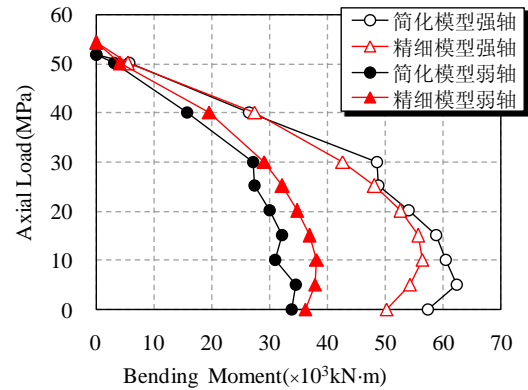
圖 2.4 巨柱精細模型以及簡化模型

以某一節段的巨柱為例，精細模型和簡化模型計算結果對比圖 2.5 所示。顯然，簡化模型的計算結果與精細化模型結果在大部分情況下吻合良好，可以採用簡化的巨柱模型進行結構的整體彈塑性計算和倒塌分析。





(c) 單軸 N—M 相關關係



(d) 雙軸 N—M 相關關係

圖 2.5 精細模型與簡化模型結果比較

2.4 樓板

在該超高層結構中，樓板採用組合樓板。因此，採用膜單元對樓板建模，僅考慮其平面內的剛度貢獻，並傳遞重力荷載。

三、彈塑性時程分析

3.1 模態分析

為了獲得結構的基本動力特性，首先進行了模態分析，該結構的前六階週期如表 3.1 所示。結構的一、四階週期是 X 方向的平動，二、五階週期是 Y 方向的平動，三、六階週期是結構的整體扭轉。顯然，該超高層結構的基本週期比較長，超過了規範反映譜 6s 的範圍，且結構 X，Y 兩個方向的側向剛度基本相等。

表 3.1 結構前六階週期及頻率

	一階	二階	三階	四階	五階	六階
頻率(ω_i)	0.66	0.67	1.48	1.78	1.82	3.04
週期(T_i)/s	9.53	9.45	4.25	3.52	3.45	2.07

3.2 彈塑性時程分析

動力時程分析時，採用經典的 Rayleigh 阻尼，混凝土的阻尼比初步擬定為 4%，鋼材的初始阻尼比初步擬定為 3%。

本研究選擇了科研中常用的 4 條地震動記錄(El-Centro 波、Chichi 波、Kobe 波以及上海人工波)作初步分析,並按照 8 度大震水準(400gal)進行調幅，為了保證結構充分的振動，按照地震動記錄持時為結構基本週期的 4~5 倍的原則，對不滿足要求的地震動記錄進行了修正，補零使其滿足要求，其彈性反應譜如圖 3.2 所示。

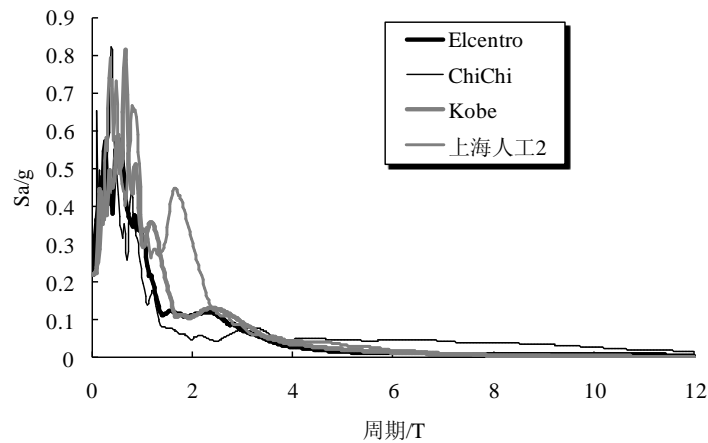


圖 3.2 地震動記錄彈性反應譜

4 條地震動記錄依次按照 X 方向進行輸入，初步分析結果表明，由於該超高層結構的基本週期比較長，其地震回應由高階振型占主導地位，且受地震波頻譜成分影響顯著，結構頂點位移回應(如圖 3.3 所示)具有很大的離散性，受地震記錄頻譜成分的影響很大，因此，超高層結構的頂點位移回應很難直觀反映出結構抗震性能。

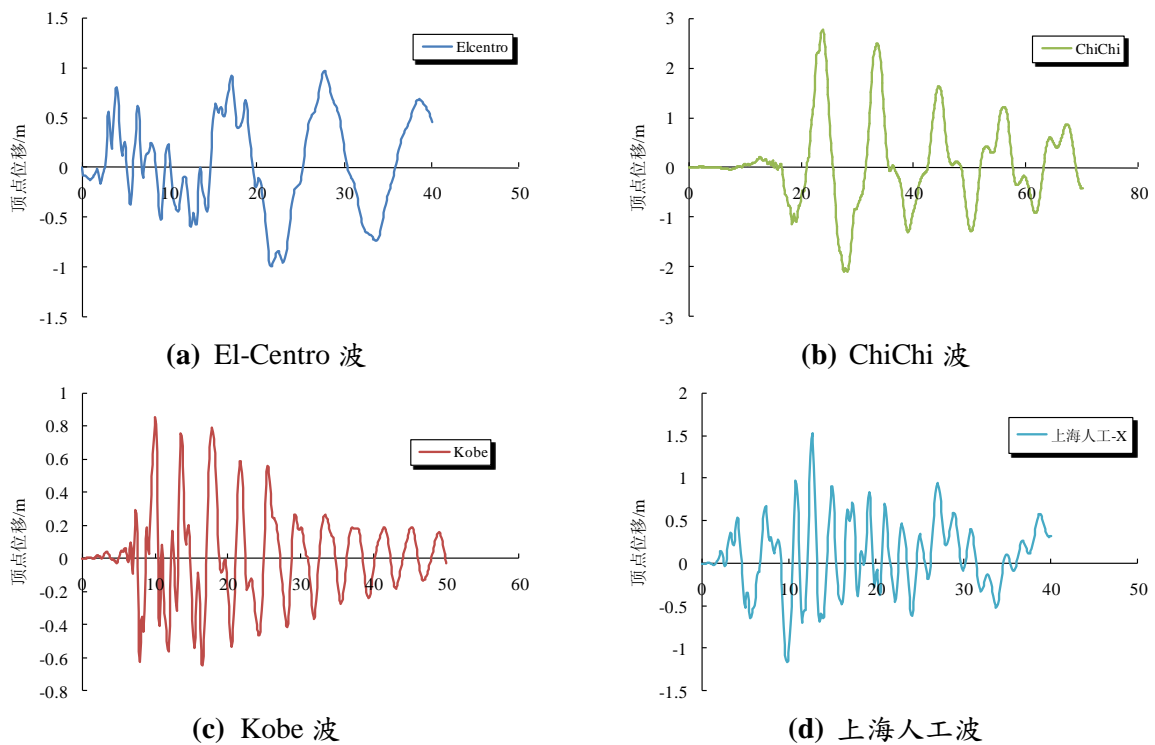


圖 3.3 頂點位移回應

另外，彈塑性時程分析結果表明，該超高層結構在八度大震水準下基本保持彈性，僅有外框架和部分桁架進入塑性，而且受高階振型影響，結構上部進入塑性的程度比結構下部進入塑性的程度要嚴重。

四、倒塌分析

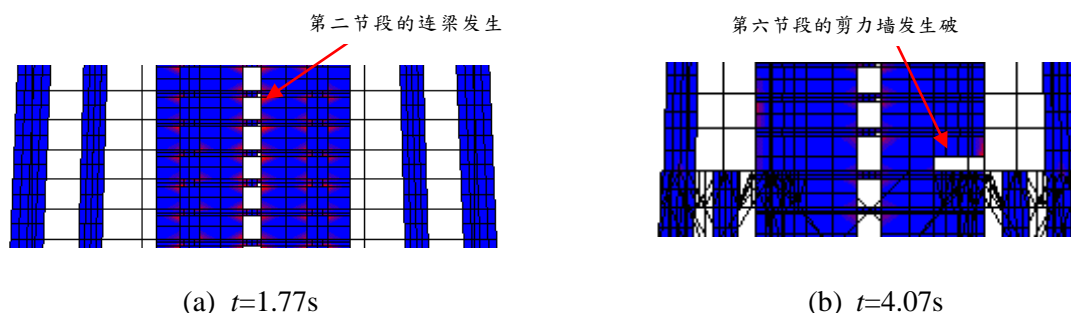
結構的倒塌是一個非常複雜的過程，具有很強的非線性，其中包括了材料非線性，幾何非

線性和接觸非線性等等。本研究利用生死單元的技術來類比倒塌過程中構件的失效斷裂。當構件的損傷達到一定程度後，會尚失承载力，利用生死單元副程式將其殺死，類比構件的失效。在生死單元副程式中，最關鍵的因素是失效準則的選取，為了保證計算的準確性，本研究中針對不同的材料採用不同的失效準則。對於混凝土，當混凝土的總壓應變超過極限壓應變時將該單元殺死；對於鋼筋，當鋼筋的等效塑性應變超過極限拉伸應變時將鋼筋單元殺死；對於鋼樑，考慮截面塑性的發展，截面上一定數量積分點的等效塑性應變超過鋼材的極限拉伸應變是將其殺死。文獻[[4],[5]]驗證了生死單元副程式在結構倒塌分析中的適用性。

4.1 單向地震動下倒塌分析

單向地震動倒塌分析時，以 El-Centro 波為例，將其 PGA 調至 2G，沿 X 方向單向輸入，其倒塌過程如圖 4.1 所示。當 $t=1.77s$ 時(圖 4.1(a))，第二節段中部的連梁開始被剪斷，並逐步向上發展；當 $t=4.07s$ 時(圖 4.1(b))，連梁破壞發展到了第六節段頂部，且由於角部四根巨柱從第六節段開始被截斷，存在一個剛度的突變，第六節段底部的剪力牆被壓潰；當 $t=6.19s$ (圖 4.1(c))時，由於核心筒截面的突變，第五區段底部剪力牆開始被壓潰；當 $t=6.27s$ (圖 4.1(d))時，由於核心筒洞口佈置的改變，第七節段核心筒底部的剪力牆開始破壞；當 $t=6.32s$ (圖 4.1(e))時，由於第五區段部分剪力牆大量破壞，水準力進行了重新分配，巨柱受到的側力逐漸增大，巨柱開始壓彎破壞；當 $t=9.77s$ 時(圖 4.1(f))，第五區段核心筒和剪力牆完全破壞，結構倒塌開始發生。

顯然，該超高層結構在 El-Centro 波作用下，第五區段以上部位破壞比較嚴重，主要集中在第五、六、七區段，而最終在第五區段發生折斷，整個結構斷成兩截，可見第五區段是一個引起結構倒塌的潛在薄弱部位，在設計的過程中應該給與更多關注。在以上的倒塌過程中，連梁最先發生破壞，是結構的第一道防線，耗散部分地震能量，隨後核心筒內的剪力牆和巨柱開始發生破壞，只有在同一區段的剪力牆和巨柱都發生破壞後，結構才可能發生倒塌。顯然，通過常規彈塑性分析得到的初始屈服部位並非是引起結構倒塌的部位，如果設計不當，對初始屈服部位進行加強，可能使得耗能構件不能充分耗散能量，反而使結構變得不安全，這進一步說明了倒塌分析的重要性。



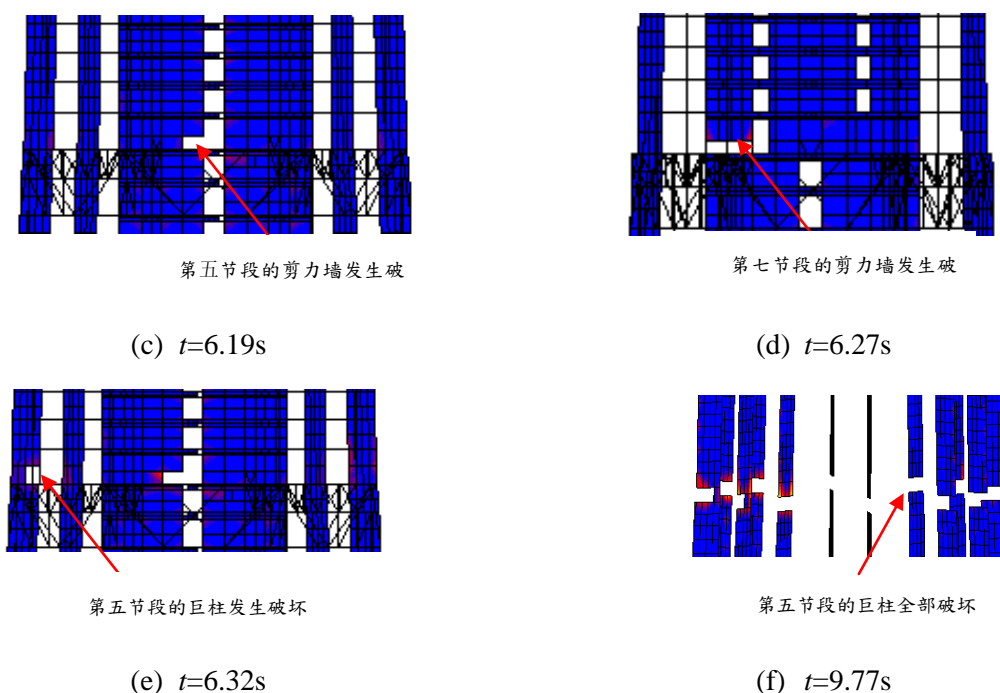


圖 4.1 單向地震動輸入倒塌過程

五、結論

本文建立了某假想超高層建築的非線性有限元模型，討論了不同構件的建模方法，研究了其大震回應和巨震下的倒塌過程，預測了結構中的抗震薄弱環節，其結論可供工程設計參考。

本研究是對超高層結構倒塌類比的一個初步探討，更多細節問題有待進一步的研究。

致謝：

感謝國家自然科學重點基金項目(90815025)，國家科技支撐計畫課題(2009BAJ28B01)，“城市與工程安全減災教育部重點實驗室開放基金專案、北京市重點實驗室開放基金專案”(EESR2010-03)和長江學者和創新團隊發展計畫(IRT00736)的經費支持。

參考文獻

- [1] 葉列平, 陸新征, 馬千里, 汪訓流, 繆志偉, 「混凝土結構抗震非線性分析模型、方法及算例」, 工程力學, 第 23 卷, 第 131~140 頁, 2006。
- [2] 林旭川, 陸新征, 繆志偉, 葉列平, 鬱銀泉, 申林, 「基於分層殼單元的 RC 核心筒結構有限元分析和工程應用」, 土木工程學報, 第 3 期第 42 卷, 第 51~56 頁, 2009。
- [3] 陸新征, 葉列平, 繆志偉等. 「建築抗震彈塑性分析」, 中國建築工業出版社, 北京, 第 271~278 頁, 2009。
- [4] 陸新征, 林旭川, 葉列平, 馬玉虎, 李易. 「地震下高層建築連續倒塌的數值模型研究」, 工程力學,

已錄用.

- [5] Lu X, Lu XZ, Ye LP. “A preliminary study on the application of computer simulation in the progressive collapse of bridges”. *Proc. 13th Int. Conf. on Computing in Civil and Building Engineering*, Jun. 2010, Nottingham, UK, CDROM.