

論文 2003年宮城県北部の地震で被災したRC造学校校舎の被害と耐震性能

四十万 智博^{*1}・前田 匡樹^{*2}・堀 則男^{*3}・赤沼 芙美子^{*4}

要旨：2003年7月26日に宮城県北部で発生した地震で、大破の被害を受けた北村小学校のRC造校舎建物について、被害調査を行い把握した各鉛直部材の被災度と被害状況を報告する。また耐震診断を行い、構造耐震指標 I_s 値と建物被害との関係について検討し、さらに地震応答解析により、建物の地震被害の再現を試みた。

キーワード：2003年宮城県北部の地震, 学校建築, 地震被害, 耐震診断, 応答解析

1. はじめに

2003年7月26日に宮城県北部で震度6を超える地震が1日に3回観測された。筆者等は、この地震により被災した文教施設の建物を対象として被害調査を実施した。多くの建物では無被害や小破にとどまったが、1棟だけ大破の被害を受けた学校校舎が存在した。この校舎は柱断面も大きく十分な強度を有していると考えられるにも関わらず、本地震でもっとも深刻な被害を生じた¹⁾。そこで本研究では、この大破の被害を受けたRC造学校校舎建物(北村小学校校舎)について被害状況を報告し、耐震診断による構造耐震指標 I_s 値と被害の関係について考察する。さらに静的漸増載荷解析と地震応答解析を行い、その地震被害の再現を試みた。

2. 建物概要および被害状況

2.1 建物の概要

北村小学校(所在地：宮城県桃生郡河南町北村字幕ヶ崎17番地)は、**図-1**に示すように、この地震の震源域に位置する旭山撓曲北端の旭山丘陵の東麓に位置しており、敷地は北から南および東へ緩やかに傾斜している。**図-2**に示すように、RC造校舎および屋内運動場(S造, 1973年建設)が配置されている。

校舎は1972年に建設された3階建て、桁行方向はラーメン構造、張間方向が耐震壁付きラーメン構造の典型的な学校校舎である。また、被

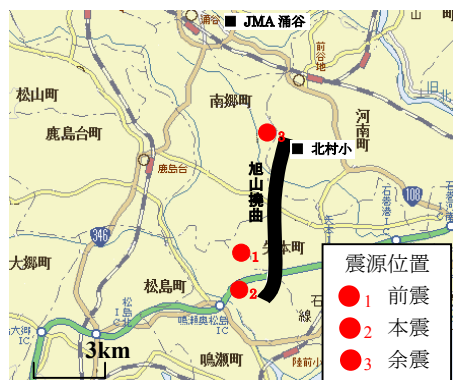


図-1 周辺地図

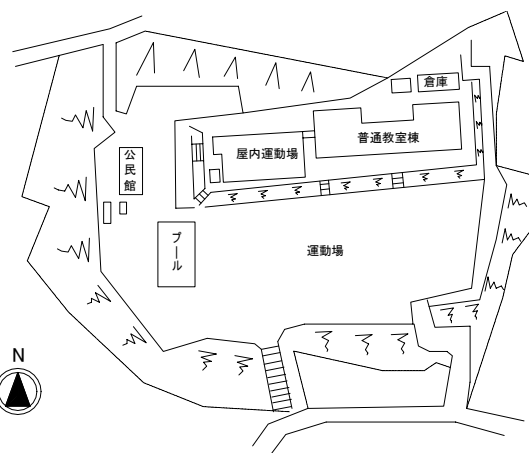


図-2 建物配置図

*1 東北大学大学院 工学研究科 都市・建築学専攻 修士課程 (正会員)

*2 東北大学大学院 工学研究科 都市・建築学専攻 助教授・博士(工学) (正会員)

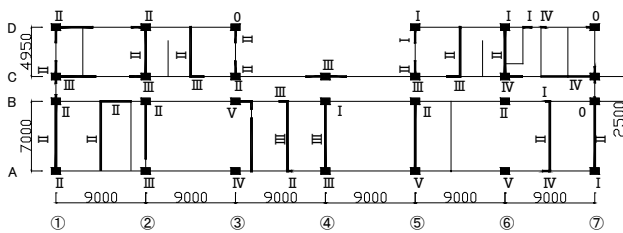
*3 東北大学大学院 工学研究科 都市・建築学専攻 助手・博士(工学) (正会員)

*4 東北大学 工学部 建築学科 (会員外)

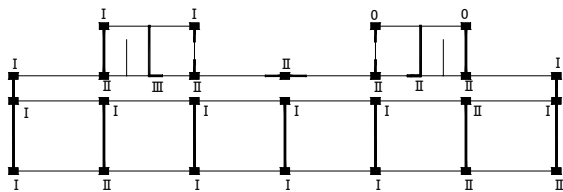
災後に行われたコンクリート圧縮強度の調査（2階梁および1階耐震壁からそれぞれ3本ずつ合計6本のコアを採取）によると、コア圧縮強度の平均値は16.3 N/mm²、標準偏差5.2 N/mm²であり、設計基準強度 $F_c=18\text{N/mm}^2$ をやや下回っていた。柱断面リスト、各階平面図及び桁行方向の軸組図をそれぞれ図-3、図-4及び図-5に示す。

3階	2階	1階
900×500	900×550	900×650
主筋 10-D22 帯筋 9φ@150(柱頭・柱脚は@100)		

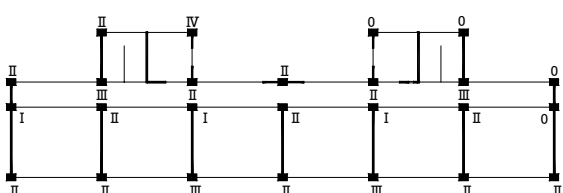
図-3 柱断面リスト



(a) 1階平面

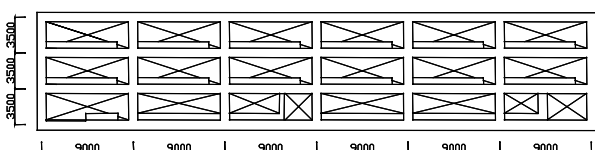


(b) 2階平面

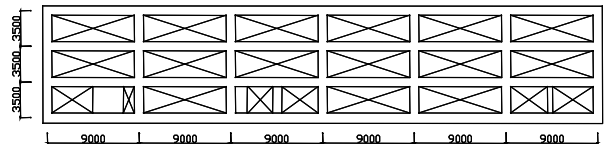


(c) 3階平面

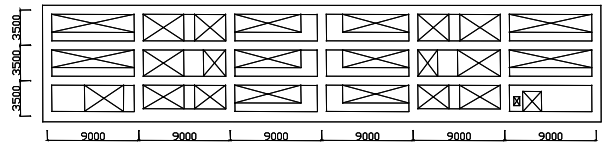
図-4 平面図及び鉛直部材の損傷度(単位:mm)



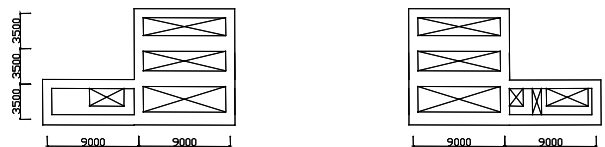
(a) A 通り軸組図



(b) B 通り軸組図



(c) C 通り軸組図



(d) D 通り軸組図

図-5 桁行方向軸組図

2.2 被害状況

日本建築防災協会の「被災度区分判定基準」²⁾による各階の柱及び壁の損傷度を図-4の平面図中に示した。最も深刻な被害は1階の桁行方向に生じており、南構面の柱3本がせん断破壊し（損傷度IV～V、写真-1、写真-2）、その他の構面でも多くの柱や袖壁付き柱にも大きなせん断ひび割れが多数生じた(写真-3)。

1階桁行方向の損傷度別部材数は表-1の通りで、被災度区分判定の結果、略算による耐震性能残存率 $R=46\%$ となり被災度は[大破]に区分される。せん断破壊した柱のうち、直行壁が付いていないA通り⑥柱は、主筋が座屈して2階の床スラブがやや沈下し危険な状態であった。また、1階床スラブには多数の亀裂が生じていた。

2階も、1階よりは軽微ではあるが、柱、壁などの鉛直部材に損傷度III程度のひび割れが生じたものが多数あり、一部の腰壁にも損傷が生じた。両側袖壁付き柱であるC通り④柱に接続する2階の梁には、写真-4のようにせん断ひび割れが発生した。

非構造部材の被害として、階段室の防火扉が外れて転倒しており、学校使用時の発災であれ

ば重大な人的被害をもたらしていた可能性も考えられる危険な状況であった。

この校舎は、2003年5月26日宮城県沖の地震でも壁のひび割れや、今回と同様に防火扉の転倒などの被害が生じたとのことである(被災度は小破程度と思われる)。防火扉の現状復旧などを行った後使用し、夏季休業中にひび割れ補修などの復旧工事を予定していたが、今回の被害により復旧を断念し改築を計画し、使用を停止した。



写真-3 袖壁の損傷(C通り④柱)

表-1 損傷度別部材数(1階桁行方向)

損傷度	せん断柱	柱なし壁	柱型付壁	両側柱付壁
0	2	0	1	0
I	4	2	0	0
II	6	2	2	0
III	3	3	3	0
IV	1	2	2	0
V	2	0	1	0
計	18	9	9	0



写真-4 袖壁付柱に接続する梁の損傷



写真-1 南構面の柱の被害状況



写真-2 せん断破壊した柱(A通り⑤柱)

3. 耐震診断

「2001年改訂版 耐震診断基準³⁾」に基づいて、各階桁行方向について第2次診断を行った。コンクリート強度は前述のコア圧縮強度試験結果から、(平均値-標準偏差/2)=13.7 N/mm²であることから13.5 N/mm²とした。主筋(SD30)は診断基準³⁾に従い、295+49=344 N/mm²、帯筋(SR24)は295 N/mm²とした。建物重量は河南町が行った耐震診断報告書の数値を使用し、各階単位重量は、3階10.3kN/m²、2階14.2kN/m²、1階14.0kN/m²とした。

計算には「SCREEN-1・2 Ver.3.0」を使用した。耐震診断結果の概要を表-2に示す。

診断の結果、独立柱の多くは主筋量が比較的小ないため曲げ柱(実際の破壊状況はせん断破壊型であるが)となるが、形状(h_0/D)やせん断余裕度から靱性指標F=1となり、袖壁付柱もF=1

の柱型付壁と判定された。その結果、建物 1 階の耐震性能は、 $F=1$ での保有耐震性能 $E_0=0.76$ で決定付けられ、建設時の状態を考慮して、経年指標 $T=1$ と仮定すると、 $I_s=0.72$ と比較的高い値を有する。2 階は $I_s=0.71$ とほぼ同程度である。また 5 月 26 日の地震で小破程度の被害を受けた事を考慮すると、被災度区分判定基準²⁾による耐震性能残存率 $R=80\sim95\%$ であることから、 $T=0.9$ とみなすと 1 階は $I_s=0.65$ 、 $T=0.8$ とみなしても $I_s=0.58$ と耐震診断基準で示されている判定指標 $I_{so}=0.6$ とほぼ同程度である。このようにこの建物は比較的高い耐震性能を有していたと考えられるにもかかわらず、今回調査した RC 造校舎の中で 1 棟だけ大破の極めて大きな被害を受けた。

表-2 耐震診断結果（桁行方向）

階	C	F	E_0	S_D	I_s	$C_{RU} \cdot S_D$	E_0 評価式*
1	0.08	0.80	0.47	0.95	0.45	0.56	(5)式
	0.76	1.00	0.76		0.72	0.72	(4)式
2	0.54	1.00	0.74	0.95	0.71	0.71	(5)式
	0.46	1.27	0.63		0.60	0.35	(4)式
3	1.35	1.00	1.20	0.95	1.14	1.14	(5)式
	0.56	2.00	1.17		1.11	0.36	(4)式

※(4)式は靱性型、(5)式は強度型建物の E_0 評価式

(詳細は文献(2)参照)

4. 骨組モデルによる解析

4.1 解析モデルの設定

解析には、弾塑性地震応答解析用プログラム「DANDY」を用いた。解析対象は普通教室棟の桁行方向とし、柱及び梁を剛域を持つ線材に置換した。剛域は腰壁、垂壁、袖壁を考慮して設定し、基礎はピン支持とした。剛床を仮定し、床のねじれ変形は考慮していない。各線材の両端に曲げバネを配し、復元力特性には Takeda モデルを使用した。

各曲げバネの終局強度は耐震診断で得られた結果を用いた。また耐震診断でせん断柱と判定された部材については、曲げ終局強度に Q_{su}/Q_{mu} (Q_{su} : 終局せん断強度, Q_{mu} : 曲げ終局時のせん断力) をかけて低減した値を終局強度とした。

また 1 方向のみに袖壁が付いている部材については、強度と剛性ともに、加力方向の正負で得られる値の平均値とした。梁については曲げひび割れ強度のみ考慮し、降伏強度を無限大に設定した。またひび割れ強度は降伏強度の 1/3、降伏点剛性低下率 α_y は 0.3 と仮定し、全部材共通とした。外力分布には A_i 分布⁴⁾を仮定した。(耐震診断では外力分布による補正係数に $(n+1)/(n+i)$ を用いているが、この建物の場合には A_i 分布とほぼ同じであった。)

4.2 静的漸増载荷解析

A_i 分布を用いた静的漸増载荷解析により得られた層間変形-層せん断力関係を図-6 に示す。これを見ると、まず 2 階部分から層降伏し(層間変形=13mm)、次に 1 階(層間変形=29mm)、最後に 3 階(層間変形=35mm)の順で破壊が進んでいくことがわかる。

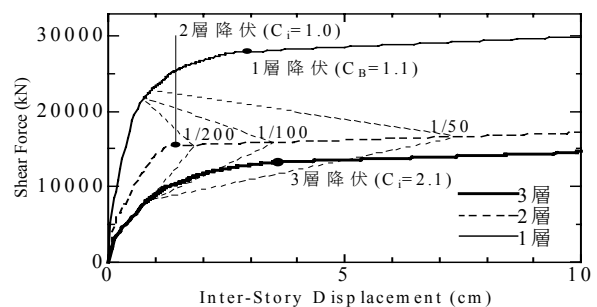


図-6 層間変形-層せん断力関係

4.3 地震応答解析

(1) 入力地震波

地震応答解析に使用した入力地震波は 2003 年 5 月 26 日と 7 月 26 日の本震で、気象庁 95 型震度計により観測された涌谷町新町の強震波形データの EW 成分とした(図-7)。涌谷町新町は図-1 に示すように、学校の建設地から 2.5km 北西であり、必ずしも建設地における振動を正確に表すことはできないが、得られた観測データで最も近い地点の地震波を使用することとした。解析は 7 月の地震波のみ入力した場合(CASE-1)と、5 月と 7 月の地震波を続けて入力した場合(CASE-2)について行った。加速度応答スペクトルを図-8 に示す。

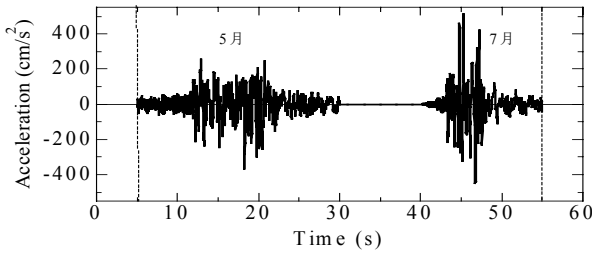


図-7 涌谷町新町の地震記録 EW 成分

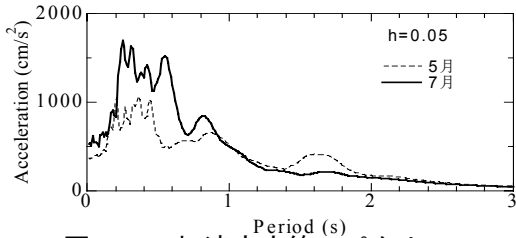


図-8 加速度応答スペクトル

(2) 解析結果の検討

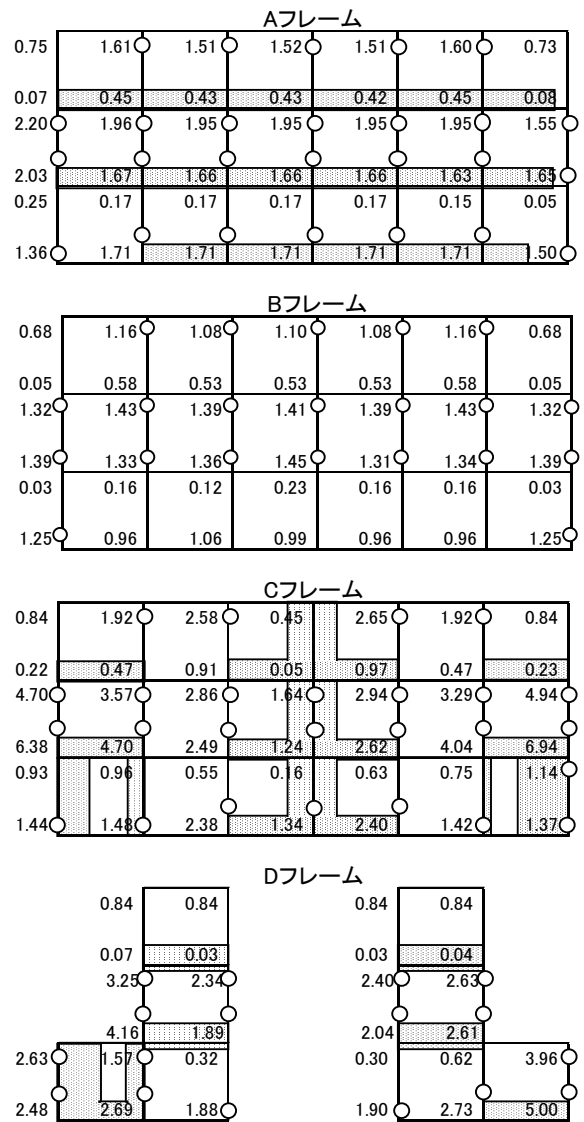
図-9にCASE-1、図-10にCASE-2の解析で得られた各フレームの最大応答塑性率を記入し、曲げ降伏した部分には○を付して示した。また各階の最大層間変形角を図-11に示す。

図-9を見ると、静的解析の結果とも同様に、2層で層降伏メカニズムが生じており、1層に最も大きな被害が見られた実被害と一致しない。

そこでCASE-2について見てみると、2層の塑性率や層間変形が2倍程度になっており、5月の地震の影響が見られるものの、1層で層降伏メカニズムは生じておらず、やはり実被害と一致しない。

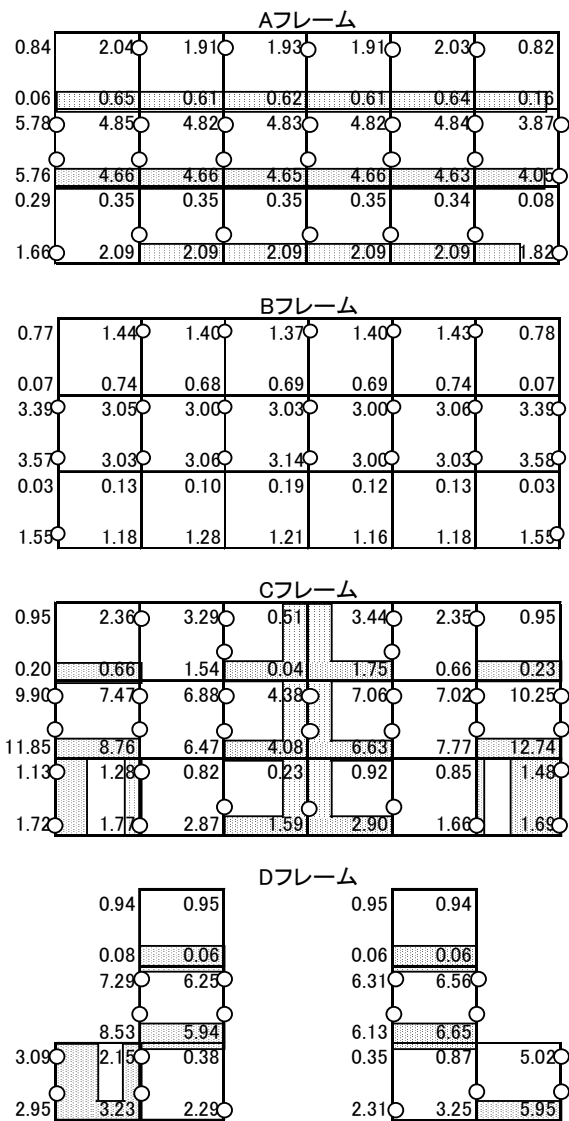
耐震診断と応答解析ともに2層の方が若干強度が低いにも関わらず、実際は1層の方が大きな被害を受けている。この原因について考察するために、フレームごとについての I_s 値を算出した。その際の各フレームの重量は柱の支配面積により分配した。その結果を表-3に示す。これを見ると1階と2階において、壁があり支配面積の小さいC,Dフレームに比べ、純ラーメン架構で支配面積が広いA,Bフレームの I_s 値が比較的小さい値となっている。その結果、層全体では I_s 値が高い値となっているものの、フレームによっては強度が低い部分も見られる。またA,Bフレームのみに着目すると2階と比較して1階の I_s 値の方が低いことがわかる。これは実被害とも一致している。しかし、 I_s 値はすべての層において $A > B$ となっているものの、実際の被害ではAフレームの方が大きな被害を生じており、その点については十分に説明するにはいたっていない。このように南側教室部分のA,Bフレームと北側C,Dフレームの強度には偏心があり、特に1階では耐力偏心が比較的大きく、これらがAフレーム1階に最も大きな被害をもたらした原因のひとつとも考えられる。今回の解析では剛床を仮定し、床のねじれ変形も考慮していないため、実被害と異なる結果となったが、今後、床のせん断変形やねじれ変形を考慮した解析も行い検討する必要があると考えられる。

害とも一致している。しかし、 I_s 値はすべての層において $A > B$ となっているものの、実際の被害ではAフレームの方が大きな被害を生じており、その点については十分に説明するにはいたっていない。このように南側教室部分のA,Bフレームと北側C,Dフレームの強度には偏心があり、特に1階では耐力偏心が比較的大きく、これらがAフレーム1階に最も大きな被害をもたらした原因のひとつとも考えられる。今回の解析では剛床を仮定し、床のねじれ変形も考慮していないため、実被害と異なる結果となったが、今後、床のせん断変形やねじれ変形を考慮した解析も行い検討する必要があると考えられる。



○:曲げバネの降伏位置

図-9 応答塑性率(CASE-1)



○:曲げバネの降伏位置

図-10 応答塑性率(CASE-2)

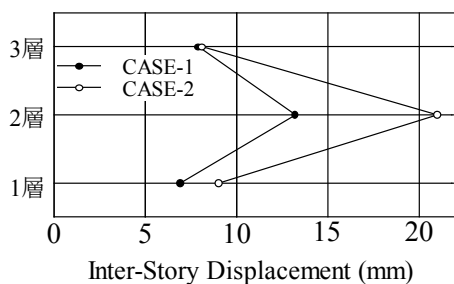


図-11 各層の最大層間変形

表-3 フレームごとの I_s 値

階	A	B	C	D
1	0.65	0.41	1.15	0.90
2	0.81	0.62	1.06	1.52
3	1.95	1.88	1.80	1.42

5. まとめ

2003年7月26日に宮城県北部で発生した地震で、RC造学校校舎の中で唯一大破の被害を受けた北村小学校校舎について、耐震診断と地震応答解析を行った。

耐震診断の結果、判定指標 $I_{S0}=0.6$ を上回る十分な耐震性能を有しているにもかかわらず大破の被害を受けた。これは5月の地震による被害の影響と、またフレームごとの強度に偏りが見られ、フレームによっては I_s 値の低い部分もあったため、深刻な被害が生じたと考えられる。

また地震応答解析を行った結果、2層に被害が大きく見られ、実際の被害とは異なる推定となった。これもフレームごとの強度の偏りにより発生したと思われる、床のねじれを考慮しなかったためと考えられる。今後はこれらの点を考慮した解析を行っていく必要があると考えている。

【謝辞】

被害調査を行う際には河南町教育委員会、北村小学校関係者から調査への協力および図面の提供を受けた。また(株)楠山設計からはコンクリート圧縮試験結果の提供を得た。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 日本建築学会災害委員会・災害調査WG：2003年7月26日宮城県北部の地震災害調査速報、2003.8
- 2) 日本建築防災協会：震災建築物の被災度区分判定基準及び復旧技術指針、2001.9
- 3) 日本建築防災協会：2001年改訂版 既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準・同解説、2001.10
- 4) 日本建築センター：建築物の構造規定 ー建築基準法施行令第3章の解説を運用ー 1997年版