

報告

上面増厚後に再劣化した RC 床版の耐荷力評価に関する報告

河合浩史*, 乾敬彦*, 村上茂之**

*大日コンサルタント株式会社 (〒500-8384 岐阜県岐阜市藪田南 3 丁目 1 番 21)

**博士 (工学) 岐阜大学総合情報メディアセンター 准教授 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1)

本稿は、上面増厚後に再劣化した RC 床版について、現在及び将来の床版耐荷力を把握する目的で実施した調査と、それに基づく数値解析について報告する。対象橋梁は、竣工から約 50 年が経過する鋼橋であり、過去に疲労対策として上面増厚が実施されたが、上面増厚後 10 年で路面の陥没が発生した。調査では、コンクリートの品質および載荷試験による床版挙動を確認した。解析では、建設時、上面増厚後、使用限界を再現した、FEM 解析結果と計測たわみ値を比較した。この結果から現状の耐荷力と将来的な耐荷力低下を評価し、数年間対症療法型の維持管理を行った後に取り替える提案をした。

キーワード：上面増厚，再劣化，耐荷力

1. 対象橋の諸元とこれまでの経緯

RC床版の疲労損傷については、調査・研究が多くの機関で精力的に実施され、一般的なRC床版の損傷は、下面のひび割れとして観測されるなど、劣化損傷機構が明らかにされてきた^{1) 2) 3) 4)}。また、各種研究や実験により有効なRC床版の疲労対策が報告されている⁵⁾。

本稿で対象とした橋梁は、昭和34年に架設された、橋長315.7m、3径間連続トラスと単純合成鋼桁より成る橋梁である。(図1.1)

上部工は、昭和 31 年鋼道路橋設計示方書に基づき設計されている。床版厚は 17cm と薄く、配力筋も主鉄筋の 25% と現行基準の 75% に比べ非常に少ない。そのため、疲労耐久性が低い床版であったと推定でき、これまでに床版補強が繰り返し実施された。補強は、昭和 54 年に床版下面の部分的な鋼板接着、平成 12 年に上面増厚が実施された。平成 16 年には、上面増厚した範囲の一部で再劣化し、再施工されている。

このような状況において、平成23年12月に舗装路面に 5cm もの陥没が発見され、緊急点検を実施した。上面増厚してからこの陥没が発生するまで、10年程度しか経過していない。(図1.2)

緊急点検の結果、床版下面に段差はなく、打音や目視調査により健全であることを確認し、直ちに床版が抜け落ちるといった通行車両への危険はないと判断し、通行止めなどの措置は実施しなかった。

本稿では、このRC床版について、陥没の原因や、現在と将来の耐荷力について評価し、今後のRC床版の維持管



図 1.1 対象橋梁の側面状況

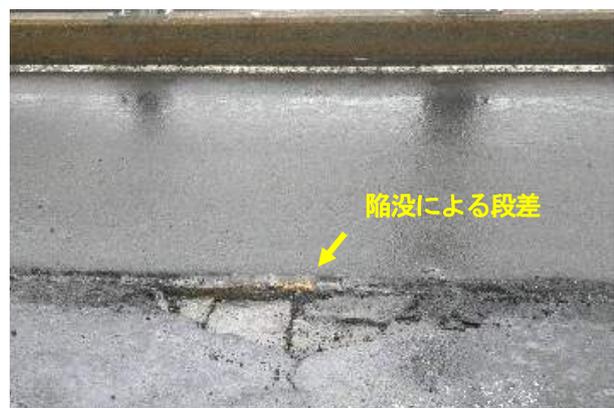


図 1.2 陥没の状況

理計画を立案するために実施した、現地載荷試験の結果およびFEM解析結果を報告するとともに、その結果から診断した現在と将来の耐荷力評価について報告する。

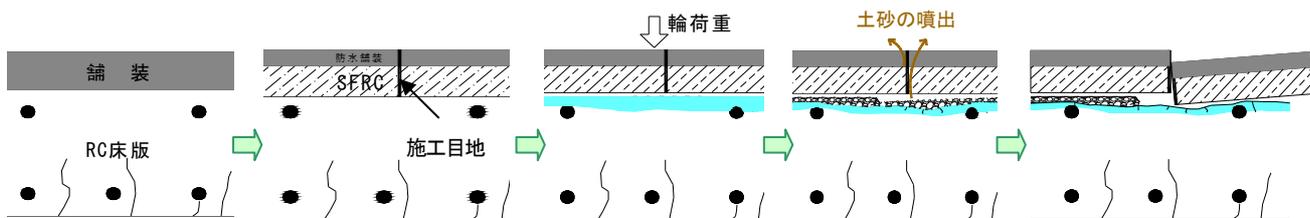


図 2.1 路面陥没のメカニズム (推定)

2. 現状の整理

2.1 原因の推定

路面の陥没が生じた時点の緊急点検により、上面増厚と既設床版の部分的な剥離、床版上面の土砂化および鉄筋露出、床版下面の疲労劣化による格子ひび割れが確認できたが、床版下面に段差はなく、打音や目視調査により、一般的に疲労したRC床版の劣化期に見られる陥没などの状態ではないと判断した。上面増厚された床版は、水の影響により上面増厚と既設床版が分離し、既設床版上面が土砂化した事例がいくつも報告されている。既往の研究^{5) 6) 7)}では、上面増厚と既設床版のはく離損傷が原因のひとつとされており、境界部に接着剤を使用することでこの現象が防止でき、上面増厚と既設床版の一体性確保が重要であることが報告されている。本橋においても、路面陥没の原因は、施工目地（分割施工の目地）から路面水が浸透することで、凍結融解や輪荷重の繰り返し作用により上面増厚と既設床版の分離及び既設床版上面の土砂化を助長し、さらに空隙が拡大したことによるものと推定した。路面の陥没に至ったメカニズムを図2.1に示す。

2.2 調査・解析の必要性

本床版において、上面増厚の部分的な剥離や既設床版のひび割れの状況から、現状で床版耐荷力が確保されているか、今後どれくらいで使用限界に至るかを判断する必要があった。ただし、上面増厚補強後に再劣化が生じた床版の耐荷力を評価するうえで、以下の2点に注意する必要があった。

- ①現状の床版下面の損傷は、補強前に発生したものである可能性が高いこと
- ②再劣化は上面増厚と既設床版の界面で発生しているため、目視確認ができないこと

このため、床版下面のひび割れ密度などにより劣化状態を判断することは困難であり、現状の耐荷力や今後の耐荷力の低下をどのように評価するかが課題であった。

そこで、剛性が低下するとたわみ量が増大する力学的特性に着目し、載荷試験により現状の床版たわみを計測するとともに、FEM解析により算出した解析値と比較することで耐荷力を評価することとした。また、既設コンクリートの品質についても各種試験により確認した。



図 3.1 既設床版上面の土砂化遠景



図 3.2 既設床版上面の土砂化近景



図 3.3 上面鉄筋の健全な状況

3. 現地詳細調査

3.1 床版上面調査

路面の陥没箇所（上面増厚を含む）を撤去し既設床版上面の調査を実施したところ、床版上面は土砂化が進んでいた。（図3.1、図3.2）しかし、鉄筋は、腐食などが見られず健全であった。（図3.3）

土砂化は、上面鉄筋の位置まで進行しており、路面陥没箇所の下は空洞であったことから、土砂化後に路面に滲出したものと推定した。

表 3.1 コンクリートの品質試験結果

試験名	試験結果
中性化試験	上面 : 平均 9.5mm (コア採取) 下面劣化部: 平均24.2mm (ドリル法) 下面健全部: 平均 6.6mm (ドリル法) コア本数: 4本 (φ70×140mm) ドリル法: 健全部6箇所 劣化部6箇所
圧縮強度	35.7N/mm ² (3本平均)
静弾性係数	2.86*10 ⁵ N/mm ² (3本平均)

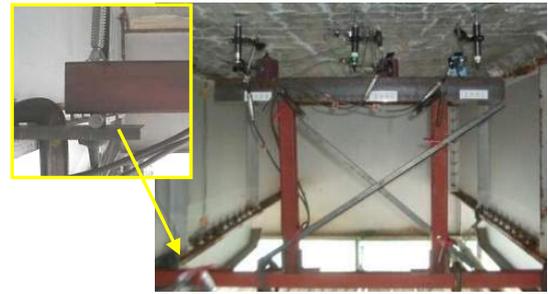


図 3.5 床版たわみ計測設備

表 3.2 静的載荷試験による試験結果

劣化度	大	中	小
床版たわみの最大値[mm]	0.124	0.158	0.086
鉄筋ひずみの最大値[μ]	27	58	25



図 3.4 車両載荷試験に用いた床版パネル

3.2 コンクリート品質試験

床版の耐荷力を評価するうえで必要となるコンクリートの品質を把握する目的で、中性化試験、コアによる圧縮強度、静弾性係数試験を実施した。(表3.1)

この結果、外観では疲労によるひび割れが多く、上面増厚の部分的な剥離を確認しているものの、内部コンクリートの品質に大きな劣化はないと判断した。

3.3 車両載荷試験

車両載荷試験では、20 t ダンプトラックを載荷し、床版たわみ、鉄筋ひずみ、3方向のひび割れ挙動を計測した。計測は、静的載荷と動的載荷により実施した。

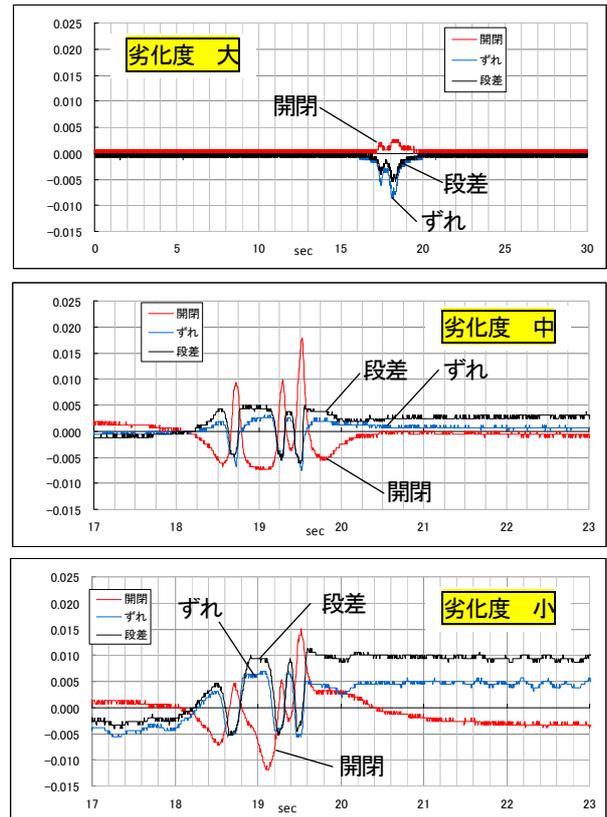


図 3.6 動的載荷試験によるひび割れ挙動

試験の対象箇所は、床版下面のひび割れ密度により判定した劣化度が異なる3箇所の床版パネルとした。(図3.4) ここで、縦桁と横桁に仕切られた範囲を1つのパネルとし床版下面のひび割れ状況により劣化度を大、中、小の3つに分類した。

床版たわみの計測は、桁のたわみが計測値に含まれないように縦桁に支持材を設置し、さらに縦桁どうしの不等沈下による支持材のひずみが計測値に影響しないようにピン構造の支持とした。(図3.5)

静的載荷試験の結果、床版下面のひび割れ状況から劣化度中と判断した床版パネルで最大たわみを観測し、劣化度と関係が異なるものであった。(表3.2)

動的載荷試験の結果、ひび割れ挙動は、開閉のみではなく段差やずれがすべてのひび割れで見られた。(図3.6) また、劣化度大としたパネルのひび割れ挙動より劣化度

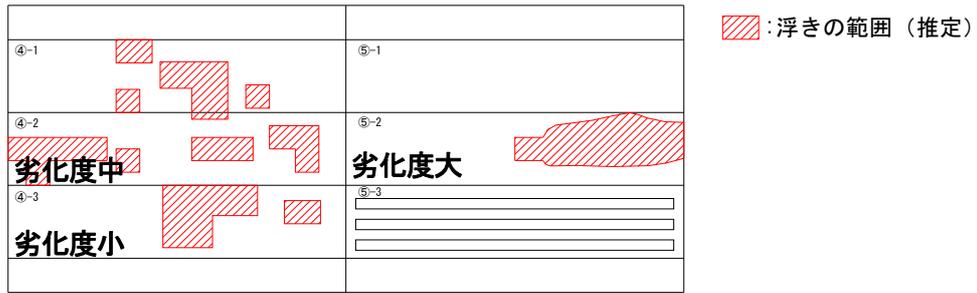


図 3.4 既設床版と上面増厚の推定浮き範囲

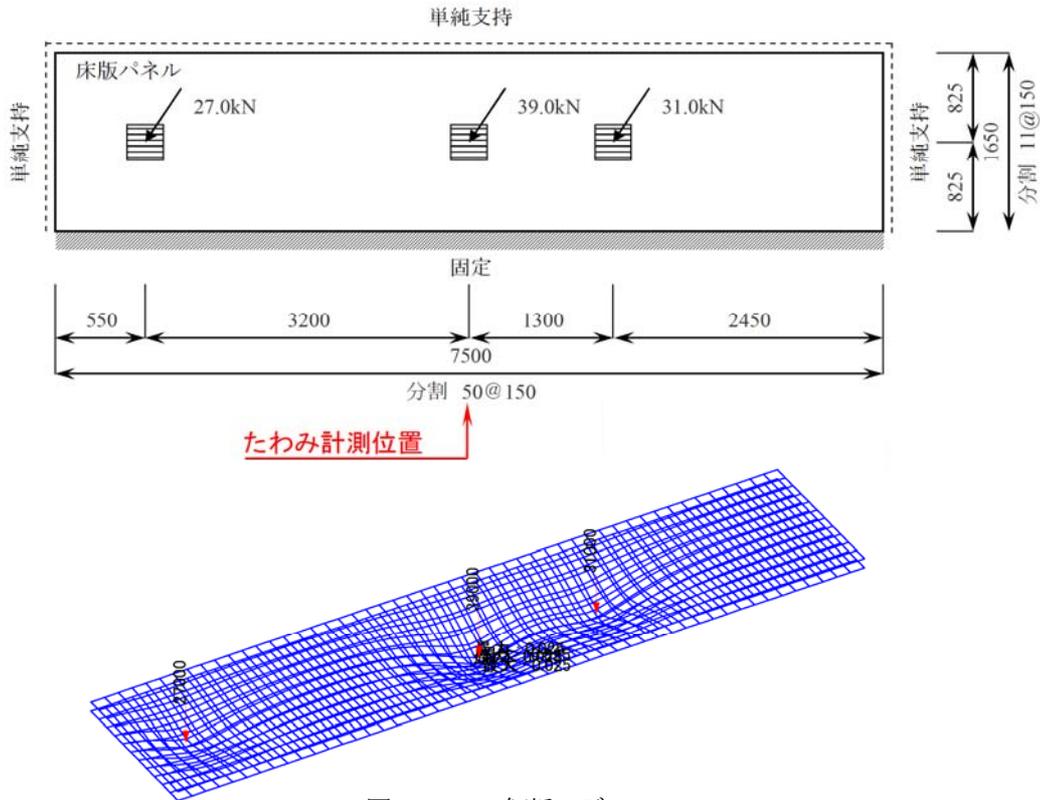


図 4.1 FEM 解析モデル

中や小としたパネルの方がひび割れ挙動が大きい結果となった。これらの載荷試験の結果は、本試験及び調査結果を踏まえ、以下の理由によるものと推定した。

- ①劣化度中や小のパネルの範囲で、上面増厚と既設床版上面の分離が早く進み、上面増厚の効果が早期に薄れた。上面増厚の効果が薄れたことを裏付ける調査として、舗装の打音点検により、既設床版と上面増厚が分離している範囲を推定したところ、劣化度が中や小のパネルに多く確認できた。(図 3.4)
- ②劣化度の床版はひび割れ本数が多いため、活荷重によるひび割れの挙動が分散された可能性がある。
- ③劣化度のパネルは、上面増厚の前に疲労が大きく進展していた可能性があるが、上面増厚後にせん断耐力が向上し、ひび割れが動かなかった時期があったことから、その間に遊離石灰がひび割れ内に充填され、ひび割れの動きを抑制している可能性がある。

4. FEM解析

4.1 解析条件

床版の耐力を評価するために、現状の損傷を正確に FEM解析モデルに反映することは困難である。そこで、静的載荷試験により得られた床版たわみ値を、建設時、上面増厚後、使用限界の3ケースを想定した FEM解析値と比較することで、現状の耐力および今後の耐力の低下を評価することとした。(図4.1)

(1) 既設床版条件

床版厚 $t=170\text{mm}$ コンクリート強度 30 N/mm^2
 鉄筋 (SR24) 主鉄筋 $\phi 16@100$ (上面: $@200$)
 配力筋 $\phi 9@225$ (上面: $@250$)
 ヤング係数 $E=28000\text{ N/mm}^2$
 ヤング係数 $E=42000\text{ N/mm}^2$

(2) 上面増厚条件

SFRC $t=50\text{mm}$ コンクリート強度 30 N/mm^2

表 4.1 静的載荷試験と FEM 解析の結果 (たわみ)

床版たわみ mm	FEM			載荷試験		
	【建設時】 ①既設床版のみ	【上面増厚時】 ②既設 +上面増厚	【使用限界】 ③既設床版のみ	実測 劣化度 小	実測 劣化度 中	実測 劣化度 大
固定点	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1/4点	-0.087	-0.023	-0.135	-0.078	-0.098	-0.094
中央	-0.165	-0.042	-0.258	-0.086	-0.158	-0.124
3/4点	-0.126	-0.023	-0.197	-0.088	-0.148	-0.096
単純支持点	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

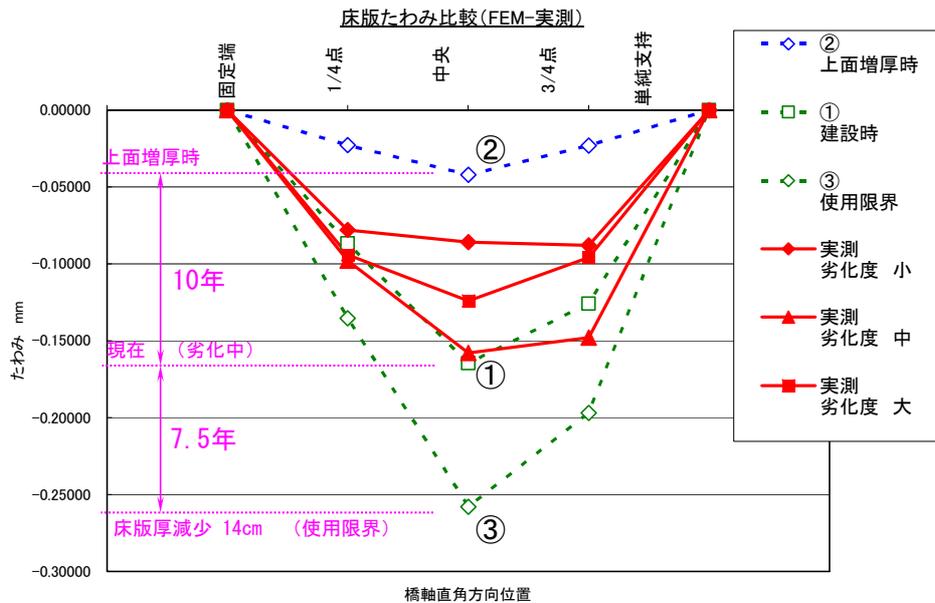


図 4.2 床版たわみ検討結果と劣化予測

(3) 解析モデル

- ①床版パネル端境界条件
 - 隣接パネルに輪荷重が載る場合 固定支持
 - 隣接パネルに輪荷重が載らない場合 単純支持
 - ②解析モデル
 - 板モデル 分割ピッチ 150@150
 - SFRC 等方性版
 - 既設床版 直交異方性版
 - 上下板の合成 節点をバネ結合 (バネ値:MAX)
 - RC 床版の剛性 引張側コンクリートを無視
- ここで、既設床版は主鉄筋方向と配力筋方向で大きく鉄筋量が異なるため直交異方性版とした。

(4) 解析ケース

- ①建設時の再現
- ②上面増厚補強後の再現
- ③使用限界の再現

ここで、使用限界は、既設床版上面のかぶりコンクリートが土砂化し、上面鉄筋が完全に露出した状態 (単鉄筋) とした。これは、今回の事例のように、路面が陥没し交通の安全性を損なう状態、複鉄筋の床版が単鉄筋となり耐荷力が急激に低下すると考えられる状態として設定した。

4.2 静的載荷試験たわみ値とFEM解析値の比較

静的載荷試験のたわみ値とFEM解析値を比較した結果を以下に示す。(表4.1, 図4.2)

- ①計測たわみ値は、上面増厚時の解析たわみ値に比べ大きく、上面増厚時に比べ耐荷力が低下していると考えられる。
- ②計測たわみ値は、建設時の解析たわみ値と比較し、1/4点、3/4点で一部超過がみられるが、中央部ではいずれも解析値内に収まっており、現状でも建設時と同等以上の耐荷力を有していると考えられる。

5. 診断・評価

現地詳細調査および FEM 解析の結果を基に、本橋の劣化状況を総合的に検討し以下の結論を得た。

- ①コンクリートの品質
 - 床版下面の表面は部分的に劣化が進んでいるが、内部コンクリートは大きな劣化はしていないと考えられる。
- ②3方向ひび割れ挙動
 - ひび割れ挙動に開閉のみではなく、段差やずれが見られたことから、すり磨き現象が発生する貫通ひび割れになっていることがわかった。



図 6.1 本橋用床版維持管理マニュアル

③床版たわみ（床版耐荷力）

載荷試験荷重を用いた FEM 解析結果と現地計測値を比較すると、現状の床版は、上面増厚補強後から明らかに劣化が進行し、耐荷力が低下している。これは、上面増厚と既設床版の界面が剥離し一体性が失われつつあることが原因と考えられる。ただし、いずれの計測たわみも、建設時を再現した解析結果のたわみと同等以上の値を示していることから、建設時に期待した耐荷力以上の性能は有しており、上面増厚の効果は期待値から低下しているものの未だ残っていると考えられる。しかし、上面増厚の施工後約 10 年で現在の劣化程度に至っており、同じ劣化速度で進行すると考えても約 7 年後には、床版上面のかぶりコンクリートが無くなった場合（③使用限界）の劣化状態に至る。（図 4.2）

以上の結果から、現状で直ちに床版が抜け落ちる状態になるとは考えにくいですが、床版耐荷力の低下は確実に進行しており、今後に向けた早急な対策立案と継続的な監視が必要と判断した。

6. 維持管理計画の提案

本橋の床版は、既設床版の劣化が進行している上、上面増厚の剥離に対する確実な補修対策がないため、床版取替えによりリフレッシュすることが必要と判断した。ただし、床版取替えまでの間、今回と同じような上面増厚の損傷が発生する可能性は高いため、当面は経過観察と対症療法による部分補修を継続していくのが現実的と考えた。そこで、今後数年間の継続的な監視と、損傷が発生した場合の対処法を、本橋の維持管理マニュアルとしてまとめ、提案した。（図 6.1）

参考文献

- 1) 土木学会関西支部，鉄筋コンクリート床版疲労設計委員会：鉄筋コンクリート床版の損傷と疲労設計へのアプローチ，1977.1.
- 2) 岡田清，岡村宏一，園田恵一郎，島田功：道路橋鉄筋コンクリート床版のひび割れ損傷と疲労性状，土木学会論文報告集，第321号，pp.49-60，1982.5.
- 3) 前田幸雄，松井繁之：輪荷重移動装置による道路橋床版の疲労に関する研究，コンクリート工学年次講演会論文集，pp.221-224，1984.5.
- 4) 阪神高速道路公団，阪神高速道路管理技術センター：道路橋RC床版のひび割れ損傷と耐久性，1991.12.
- 5) 和田圭仙，長谷俊彦，緒方辰男：上面増厚床版における施工目地部の劣化対策効果確認実験，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.2，pp.1351-1356，2010
- 6) 長谷俊彦，和田圭仙，緒方辰男：上面増厚床版における施工目地部の劣化再現実験，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.2，pp.1345-1350，2010
- 7) 横山広，浦修造，堀川都志雄：床版劣化ならびに上面増厚補強工法に関する一考察，土木学会中部支部研究発表会発表概要集，2010.3.
- 8) 道路橋床版 設計・施工と維持管理 松井繁之編著/森北出版株式会社，2007