

丸鋼鉄筋を用いた RC 床版に関する輪荷重走行試験による実験的研究

Experimental study on RC slabs reinforced with round steel bars by means of wheel running test method

室蘭工業大学大学院 博士後期課程
独立行政法人土木研究所寒地土木研究所
北武コンサルタント株式会社
室蘭工業大学大学院

○正 員 赤代恵司 (Keiji Shakushiro)
正 員 三田村浩 (Hiroshi Mitamura)
正 員 渡辺忠朋 (Tadatomo Watanabe)
フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)

1. はじめに

昭和 40 年代中頃までは、道路橋 RC 床版に丸鋼鉄筋が使用されていた実態がある。これらの RC 床版は、供用開始後約 40 年が経過している。また、近年の道路橋床版の健全性調査によると、これらの丸鋼鉄筋を用いた RC 床版は、疲労や凍害劣化により、劣化損傷が顕在化し始めていることが明らかになっている。今後、劣化損傷がさらに急増することが想定されるため、丸鋼鉄筋を用いた RC 床版の疲労特性を明らかにし、これら既設 RC 床版の残存寿命評価や、延命手法を策定することが急務となっている^{1),2)}。

一方で、これまで RC 床版の残存性能評価や延命手法等に関する数多くの検討が行われてきた。しかしながら、これらの多くは、異形鉄筋が配置された RC 床版を対象にしたものである。

一般に、丸鋼鉄筋は、異形鉄筋に比べてコンクリートとの付着強度が低いことが知られている³⁾。そのため、丸鋼鉄筋を用いた RC 部材は、ひび割れ性状、変形、耐力などが異形鉄筋を用いる場合と異なり、場合によっては基本的な力学的性能が低い場合もあることが明らかにされつつある^{4),5)}。

このような背景から、本研究では丸鋼鉄筋が配置された道路橋 RC 床版の疲労特性を把握することを目的に、異形鉄筋を配置する場合と丸鋼鉄筋を配置する場合の RC 床版を製作し、輪荷重走行試験を実施して、丸鋼鉄筋を用いた場合における、RC 床版の破壊性状および疲労特性を実験的に検討を行うこととした。

2. 供試体および実験方法

2.1 供試体

実験供試体は、実在した道路橋をモデルに製作した。モデルとした橋梁は、北海道内に昭和39年に架設された橋長44mの2径間単純RC床版合成鈹桁橋である。本橋は、有効巾員6.0 m、床版支間2.35 mの3主桁橋であり、昭和31年鋼道路橋設計示方書に準拠して設計されたものである。床版は厚さが160 mmであり、補強筋として丸鋼鉄筋が配置されていた。

本研究では、この橋梁のRC床版をモデルとして、表-1 に示す4体の実験用床版を製作し、一定荷重による輪荷重走行試験を行った。供試体諸元は、表-2 に示す通りである。

図-1 には、供試体の配筋図を示している。図のような配筋に対して、丸鋼鉄筋を用いる場合の供試体3体

表-1 供試体一覧

	供試体名称	鉄筋の種類	輪荷重載荷方法
1	RB-CON110	丸鋼	輪荷重 110 kN 一定載荷
2	RB-CON150		輪荷重 150 kN 一定載荷
3	RB-CON190		輪荷重 190 kN 一定載荷
4	DB-CON150	異形鉄筋	輪荷重 150 kN 一定載荷

表-2 供試体諸元

供試体	配筋		床版形状	床版厚
RB-CON110 RB-CON150 RB-CON190	橋軸直角方向	上面 $\phi 16$ ctc 260mm 下面 $\phi 16$ ctc 130mm	橋軸直角方向 2650 mm	一般部 160 mm
	橋軸方向	上下面 $\phi 13$ ctc 230mm	$\times$ 橋軸方向 3300 mm	ハンチ部 230mm
DB-CON150	橋軸直角方向	上面 $\phi 16$ ctc 260mm 下面 $\phi 16$ ctc 130mm		
	橋軸方向	上下面 $\phi 13$ ctc 230mm		

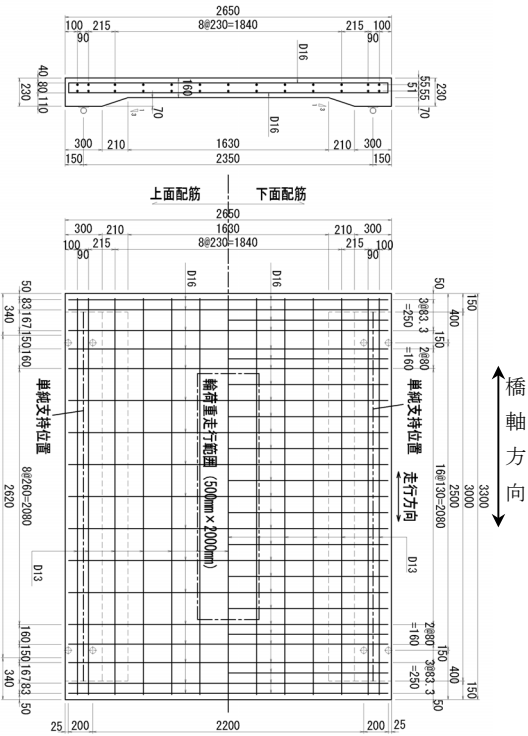


図-1 供試体配筋図

(以下、丸鋼シリーズ)と、異形鉄筋を用いる供試体1体(以下、異形シリーズ)を製作した。ここで、輪荷重走行試験における輪荷重は、丸鋼シリーズでは、供試体RB-CON110、RB-CON150、RB-CON190の順に、それぞれ

れ, 110kN, 150kN, 190kNとした. 一方, 異形シリーズの場合にはDB-CON150で150kNとした.

なお, 輪荷重走行試験終了時における各供試体のコンクリートの圧縮強度は, RB-CON110, RB-CON150, RB-CON190, DB-CON150の順に, それぞれ43.0, 41.7, 36.6, 38.6 N/mm²であった. また, 鉄筋は, 丸鋼シリーズにはSR235, 異形シリーズにはSD345を用いている.

2.2 実験方法

実験には, クランク式の輪荷重走行試験機を用いた. 供試体は, 橋軸方向支持桁上に丸鋼を介して2辺単純支持し, 端部は横梁により2辺弾性支持とした. 輪荷重は, 図-2 に示すように, スパン中央に設置した幅 300mm の載荷板上を, 橋軸方向に 2000mm の範囲で鉄輪を往復させることにより载荷している.

輪荷重は, 前述の供試体毎に設定した一定荷重とし, 床版が破壊するまで走行载荷した. なお, 実験中は, 適時輪荷重走行を停止し, 床版中央位置で輪荷重を静的に载荷して, 床版下面鉛直変位および鉄筋ひずみの計測と, 床版下面のひび割れ状況の記録を行った.

3. 実験結果と考察

3.1 ひび割れおよび破壊状況

輪荷重走行試験においては, 供試体 RB-CON110, RB-CON150, RB-CON190, DB-CON150 の順に, 216 万回, 2 万 9,350 回, 3,400 回, 4 万 8,150 回走行時に, 供試体のスパン中央位置の鉛直変位が急激に増加し, 破壊に至った. 本論文では, この鉛直変位が急激に増加し始めるときの走行回数を疲労寿命と定義する.

図-3 には, 実験終了後の各供試体のひび割れ状況を示している. 各供試体の破壊状況は, ハッチで示した部分が下方に落ち込んでおり, 押抜きせん断破壊の状態であった.

橋軸直角方向の破壊面の範囲は, すべての供試体で供試体中央から両側に約 600mm の範囲までであり, 押抜きせん断破壊の範囲はハッチの内側に収まっていた. 一方, 橋軸方向の破壊領域は, 丸鋼鉄筋を用いた供試体の3体では, RB-CON110, RB-CON150, RB-CON190の順に, 1900, 1700, 2000 mm であり, 輪荷重の大きさや疲労寿命との直接的な相関性は見られなかった. 丸鋼シリーズと異形シリーズを比較すると, 輪荷重が同一のRB-CON150とDB-CON150では, 丸鋼鉄筋を用いた場合の破壊領域は異形鉄筋を用いた場合に比べて小さくなっており, その範囲は異形鉄筋の約81%であった.

3.2 ひび割れ密度およびひび割れ間隔

ひびわれ性状を定量的に評価するために, ひびわれ図からひび割れ密度およびひび割れ間隔を算出した. ひび割れ密度は, 図中に青線で示した橋軸方向に 1.8 m, 橋軸直角方向に 1.5m の範囲内で観察された全てのひび割れを対象に算出した. 一方, ひび割れ間隔についても, ひび割れ密度と同じ範囲内に基準線を設け, この基準線とひび割れとの交差点に基づき, 橋軸方向の平均ひび割れ間隔 (以下, ひび割れ間隔) を算出した. なお, ひび

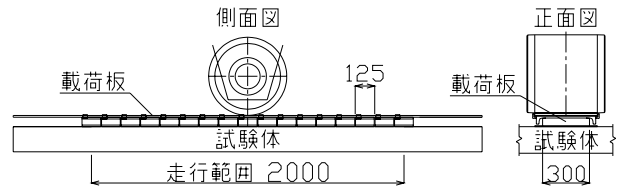


図-2 輪荷重の载荷状況図

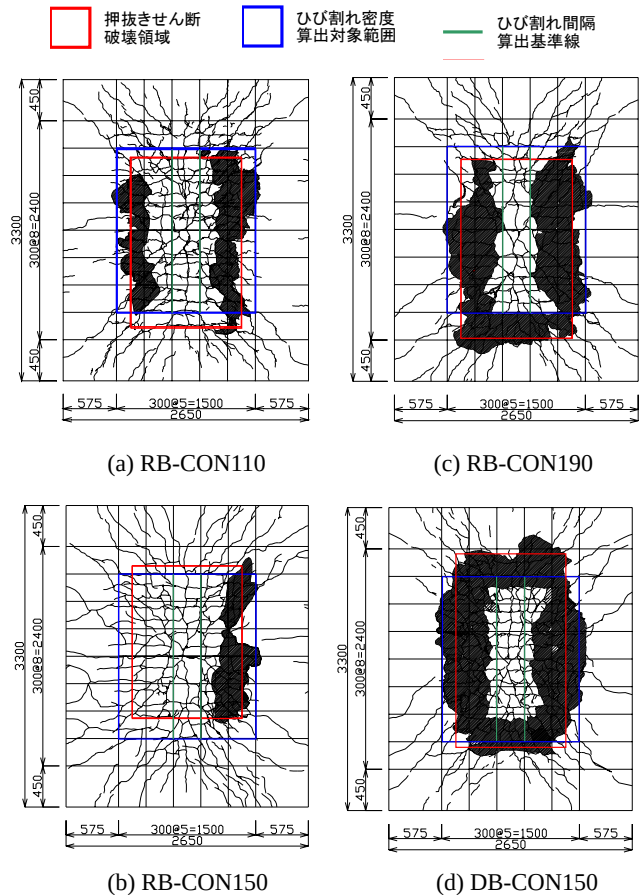


図-3 床版下面のひび割れ状況および破壊状況 (実験終了時)

割れ間隔算出時の基準線は, 図中に緑線で示したように, 橋軸方向に 30 cm 間隔で 2 本を設定した.

図-4 には, ひび割れ密度と, 輪荷重走行の繰返し回数を破壊時の走行回数で除した値 n/n_f (以後, 無次元化繰返し回数と呼ぶ) の関係を示している. 図中, ひび割れ密度は, 無次元化繰返し回数 n/n_f の増分量が 0.2 程度を目安に算出した.

図より, 輪荷重走行開始後, いずれの供試体も破壊時走行回数の 20~40% ($n/n_f = 0.2 \sim 0.4$) の繰返し回数までにひび割れ密度が急増し, その後一定の勾配でひび割れ密度が増加して破壊に至っている. 輪荷重の大きさが異なる丸鋼シリーズの3体間で比較を行うと, 輪荷重が大きいほどひび割れ密度が小さくなる傾向を示していることが分かる. 破壊時のひび割れ密度を見ると, RB-CON110, RB-CON150, RB-CON190 の順に, 14.8, 13.2, 11.5 m/m²であった.

輪荷重が等しく鉄筋の異なる RB-CON150 と DB-

CON150 を比較すると、ひび割れ密度の増加が緩やかになる破壊時走行回数の 40% ($n/n_f = 0.4$) 以降では、異形鉄筋を用いる場合が、丸鋼を用いる場合よりもひび割れ密度が大きい。これは、異形鉄筋は、丸鋼鉄筋に比べて鉄筋とコンクリート間の付着強度が大きいことより、付着作用によって生じるコンクリートの引張応力が大きくなり、ひび割れが分散して生じるためと推察される。

図-5 には、ひび割れ間隔と無次元化繰返し回数の関係を示している。図中、ひび割れ間隔は、図-4 と同様にして算定した。図より、いずれの供試体も、輪荷重走行開始後、破壊時走行回数の 20% の繰返し回数までに殆どのひび割れが発生するため、図に示した範囲では、ひび割れ間隔は輪荷重の走行回数の増加によって大きく変化していないことがわかる。

丸鋼鉄筋を用いた供試体間で比較すると、輪荷重の大きさによって輪荷重走行位置直下の橋軸方向のひび割れ間隔に大きな差は見られなかった。これに対して、輪荷重が等しく鉄筋の種類が異なる RB-CON150 と DB-CON150 の 2 体を比較すると、丸鋼鉄筋を用いた供試体のひび割れ間隔は異形鉄筋を用いる場合より大きいことが分かる。これは、前述の通り、丸鋼鉄筋の場合には、異形鉄筋を用いる場合に比べて鉄筋とコンクリート間の付着強度が低いために、ひび割れの分散性も低くなるためと推察される。破壊時 ($n/n_f = 1.0$) の橋軸方向のひび割れ間隔は、RB-CON150 が 142 mm、DB-CON150 が 103 mm であり、その比は 1.38 : 1 であった。コンクリート標準示方書³⁾によると、丸鋼鉄筋を用いる場合のひび割れ間隔は、異形鉄筋を用いる場合の 1.3 倍としており、本実験の結果と既往の知見が概ね近似する結果であった。

以上のように、丸鋼鉄筋を用いる場合には、鉄筋とコンクリート間の付着強度が異形鉄筋を用いる場合よりも小さいことにより、異形鉄筋を用いる場合に比較してひび割れが分散せずに、その間隔が大きくなることが確認された。このことから、丸鋼鉄筋を用いる場合には、ひび割れ幅が広いことにより、床版のせん断伝達能力が低下し、異形鉄筋を用いる場合に比べて疲労寿命が短くなるものと推察される。

3.3 荷重と変位の関係

図-6 には、各供試体の輪荷重の繰返し回数と変位の関係を示している。図中、縦軸は供試体中央部で計測した鉛直変位、横軸は輪荷重の繰返し回数を対数軸で表している。

いずれの供試体においても、輪荷重の繰返し回数の増加に対応して変位が徐々に大きくなり、やがて急激に増加し破壊に至っている。図中には、赤い矢印で破壊時点を示している。破壊時の輪荷重の繰返し回数は、RB-CON110、RB-CON150、RB-CON190、DB-CON150 の順に、216 万回、2 万 9350 回、3400 回、4 万 8150 回であり、その時の変位は、それぞれ 4.70、7.60、8.97、7.56 mm であった。

丸鋼鉄筋を用いた供試体 3 体を比較すると、輪荷重の大きい供試体ほど変位が大きく、輪荷重の増加に対する

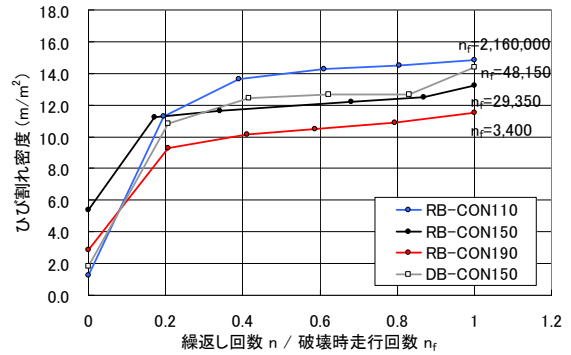


図-4 ひび割れ密度－無次元化繰返し回数関係

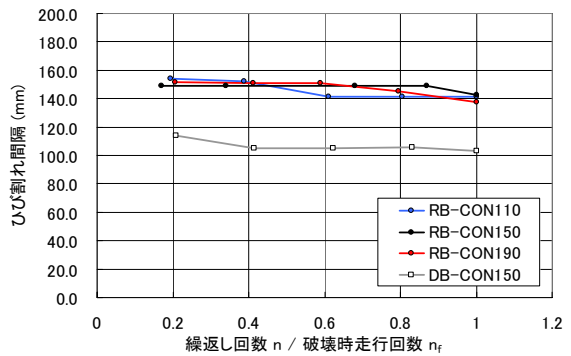


図-5 ひび割れ間隔－無次元化繰返し回数関係 (橋軸方向)

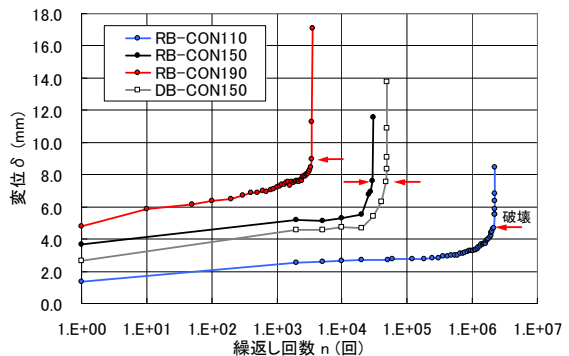


図-6 供試体中央位置の鉛直変位－繰返し回数関係

変位増分も大きくなる傾向にあることが分かる。一方で、ひび割れ間隔に関しては、繰返し回数の増加に対して、ほとんど変化は見られなかったことから、変位の増加はひび割れ幅の増加と関連しているものと考えられる。したがって、輪荷重の繰返し走行により、徐々にひび割れ幅が増加し、これに伴い床版のせん断伝達能力が低下することが推察される。その際、輪荷重の大きな供試体ほど変位増分が大きいことから、輪荷重の大きな供試体ほどせん断伝達能力の低下も大きく、早期に疲労寿命に達したのと考えられる。

丸鋼鉄筋と異形鉄筋を用いる場合の実験結果を比較すると、輪荷重の等しい RB-CON150 と DB-CON150 では、RB-CON150 の破壊時走行回数は DB-CON150 の約 61% であったが、破壊時の変位は概ね一致した。

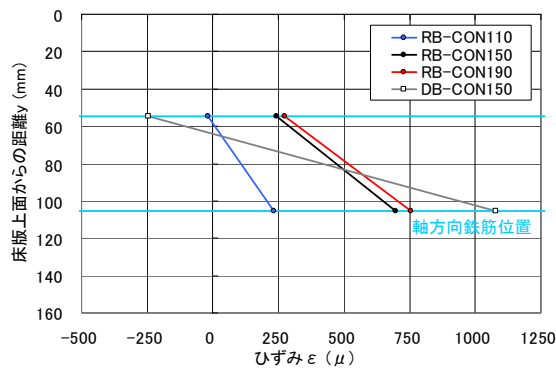


図-7 鉄筋の断面ひずみ分布（橋軸方向）

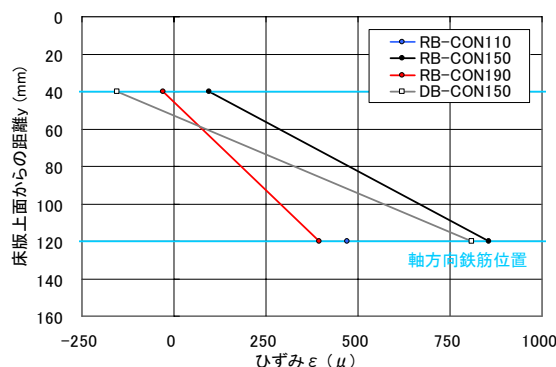


図-8 鉄筋の断面ひずみ分布（橋軸直角方向）

3.4 鉄筋ひずみ

図-7, 8 には, 各供試体の中央断面における橋軸方向および橋軸直角方向の鉄筋ひずみ分布を示している. 図中, 縦軸は床版上面からの距離であり, 横軸は鉄筋ひずみの計測値とし, 引張を正とした. なお, 図-8 の RB-CON110 の場合には, 上面側の鉄筋のひずみが計測不能であったため, 下面側の計測値のみをプロットしている.

図-7 の橋軸方向の断面ひずみ分布を見ると, 異形鉄筋を用いた供試体 DB-CON150 の場合には, 丸鋼鉄筋を用いた供試体 3 体の場合に比べて, ひずみの勾配が大きくなっていることが分かる. すなわち, 異形鉄筋を用いた供試体 DB-CON150 の場合には曲げと軸力が連成して作用しているのに対して, 丸鋼鉄筋を用いた 3 体の供試体場合には曲げ作用が小さく, 引張軸力が卓越する傾向を示していることが分かる. これは, 異形鉄筋の場合には鉄筋の付着性能が優れているのに対して, 丸鋼鉄筋の場合には早期に付着強度に達し, 付着が失われることで, 膜作用が卓越することによるものと推察される.

一方, 橋軸直角方向についても, 橋軸方向に比べるとそれほど顕著ではないが, 異形鉄筋を用いた供試体 DB-CON150 の場合で, ひずみ分布の勾配が最も大きいことが確認できる.

4. まとめ

本研究では, 丸鋼鉄筋が配置された道路橋RC床版の疲労特性を把握することを目的に, 丸鋼鉄筋を配置したRC床版と異形鉄筋を配置したRC床版を製作し, 輪荷重走行試験を実施することで, 丸鋼鉄筋を用いる場合の

RC床版の破壊性状および疲労特性について, 実験的に検討を行った.

本研究によって確認された事項を整理すると, 以下のとおりである.

1. 本研究で行った輪荷重走行試験の場合には, いずれの供試体も押抜きせん断破壊により破壊に至った. 破壊領域の大きさを比較すると, 橋軸直角方向は鉄筋の種類に関わらず同様であった. 一方, 橋軸方向の場合には, 丸鋼鉄筋を用いる場合が異形鉄筋を用いる場合よりも小さくなる傾向にあった.
2. 破壊時のひび割れ密度は, $11 \sim 15 \text{ m/m}^2$ 程度の範囲であった. 丸鋼鉄筋を用いる供試体間で比較すると, 輪荷重の大きい供試体ほど破壊時のひび割れ密度が小さくなる傾向にあった. また, 丸鋼鉄筋を用いた供試体場合には, 異形鉄筋を用いた供試体に比べて, 破壊時のひび割れ密度が小さい傾向にあった.
3. 丸鋼鉄筋を用いる場合には, 異形鉄筋を用いる場合に比べてひび割れは分散せず, かつひび割れ幅が大きくなる傾向にある. このことから, 丸鋼鉄筋を用いる場合には, 異形鉄筋を用いる場合に比較して, せん断伝達能力が低くなり, 疲労寿命が低下するものと考えられる.
4. 丸鋼鉄筋と異形鉄筋を用いるそれぞれの場合において, 輪荷重が等しい供試体で比較すると, 丸鋼鉄筋を用いる場合の供試体の破壊時の走行回数は, 異形鉄筋を用いる場合における供試体の約61%程度であった. ただし, 破壊時のたわみについては, 大きな差は見られない.
5. 鉄筋のひずみの計測値から, 異形鉄筋を用いた供試体場合には, 曲げと軸力が連成して作用しているのに対して, 丸鋼鉄筋を用いる場合には輪荷重に関わらず軸力が卓越する傾向が見られた.

参考文献

- 1) 三田村浩, 石川博之, 赤代恵司, 松井繁之: 積雪寒冷地における既設 RC 床版の延命手法について, 平成 20 年度 土木学会北海道支部 論文報告集, 第 65 号, A-26 (CD-ROM), 2009.
- 2) 三田村浩, 石川博之, 赤代恵司, 松井繁之: 積雪寒冷地における RC 床版の下面 FRP シート補強に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.2, pp.1483-1488, 2009.
- 3) 土木学会: 2007 年制定 コンクリート標準示方書【設計編】, 2008.
- 4) 赤代恵司, 三田村浩, 渡辺忠朋, 岸 徳光: 鉄筋の付着特性が RC 床版の疲労特性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.2, pp.727-732, 2010.
- 5) Mohd Wildan, 中村 光, 国枝 稔, Pamavanh Kongkeo, 河村精一: 丸鋼を用いた低鉄筋比 RC はりの挙動の評価, 平成 20 年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集, pp.453-454, 2009.
- 6) 松井繁之: 道路橋床版 設計・施工と維持管理, 森北出版株式会社, pp.47-61, 2007.