

復旧費用を考慮した構造物の最適耐震設計法に関する基礎的研究

Basic research on optimum seismic design of structure considering restoration cost

北海学園大学工学部社会環境工学科 正会員 杉本博之 (Hiroyuki Sugimoto)
 北海学園大学大学院建設工学専攻修士課程 ○学生員 佐藤直樹 (Naoki Sato)
 北海学園大学大学院建設工学専攻博士課程 学生員 阿部淳一 (Jyun-ichi Abe)
 北武コンサルタント(株) 正会員 渡邊忠朋 (Tadatomo Watanabe)

1. まえがき

道路橋や鉄道橋のためのわが国の耐震設計基準^{1),2)}は、発生する確率が高いが強度の低い地震動と、発生する確率は低いが強度の高い地震動による2段階の地震動を用いて照査を行うこととしている。前者に対しては、一般的に構造物は弾性限にとどまるように限界値が耐震性能として設定される。一方、後者に対しては構造物の損傷を許容し、対象とする構造物の重要度に応じて構造物が崩壊しない、あるいは修復可能な状態となるように限界値が耐震性能としてそれぞれ設定されている。その照査に用いる地震動は、兵庫県南部地震などで得られた強震記録を基とし、地盤種ごとに地震波形が設定され、その地震動強度は日本全国を3種類の地震発生危険度から地域区分し、地域区分ごとに地震動強度を1.0, 0.85, 0.7の地域別補正係数を用いて調整し設定されている。

一方、近年では耐震設計に用いる地震波形を、設計の対象とする地域に固有なものとして算定する研究が行われている^{3),4)}。これらの研究で算定される地震波形は、地震工学や地盤工学の観点から、対象とする地域の過去の地震記録、地盤データ、震源モデルなどを詳細に考慮して決定される。

これらを背景として、筆者ら⁵⁾は地震リスクを考慮した設計地震動強度を決定するための手法の提案をした。そこでは、0~1000ガルまでの設計地震入力強度に対して、初期建設コストを目的関数として最適設計を応用し、得られたそれぞれの構造(RC橋脚)に対しさらに、0~1000ガルの地震を入力して解析し損傷の程度を評価した。初期建設コストにそれぞれの損傷コストを確率的に処理して加えたものを総コストとし、それが最小となる設計地震入力強度を目標設計地震動強度として、地域、構造物固有の値とした。

上記の研究は、初期設計の最適化とその後の地震リスクコストの評価を2段階で行ったが、本研究では、それを一つのプロセスで実行することを試みる。つまり、目的関数を初期建設コストのみでなく、地震動による損傷の復旧コストも含めて考えることにする。その結果、最適設計問題として、制約条件のみならず目的関数にも時刻歴応答解析が含まれることになり、制約条件と目的関数の計算に近似手法が導入されることになる。上記の研究でもRBFネットワークによる近似は導入されているが、ここでは更なる近似の精度が要求されることになる。

本研究では、上記の目的を達成するために、荒川らにより提案されているたたみ込み理論⁶⁾をRBFネットワ

ークによる近似に利用し、初期建設コストと地震動による損傷の復旧コストの和を目的関数とする構造物の最適耐震設計法の提案を試みるものである。

2. RBF ネットワークとたたみ込み理論

ここでは、近似手法に用いるRBFネットワークと、近似精度向上に用いるたたみ込み理論⁶⁾について説明する。

RBFネットワークは、階層型ニューラルネットワークであり入力層、中間層、出力層の3層構造となっている。入力層からのデータは、中間層の放射基底関数によって処理される。この放射基底関数は、式(1)に示すガウス関数を用いる。

$$h_j(x) = \exp \left(- \sum_{p=1}^K \left(\frac{(x_{jp} - c_{jp})^2}{r_{jp}^2} \right) \right) \quad (j=1 \sim m) \quad (1)$$

ここで、 $h_j(x)$ は学習データ j に対する基底関数の出力値、 K は1設計を構成する変数の数、 x_{jp} は入力層素子からの入力データ、 c_{jp} は基底関数の中心位置となる座標点、 r_{jp} は基底関数の半径である。

たたみ込み理論とは、関数に関数を重ね足し合わせるによりRBFネットワークによる近似の精度を上げようとする手法である⁵⁾。

計算の順序は、以下ようになる。まず、図-1のように、学習データに対して近似を行う。図は、変数 x に対する1変数問題の計算例であり、図中の x_1, x_2 に2点の学習データがある。この2つの学習データに対して、図の赤線で示すような曲面がRBFネットワークにより得られる。一般的な近似はここで終了となる。次に、曲面から得られた近似値と学習データの誤差 E_1, E_2 を算定する。そして、この誤差 E_1, E_2 を図-2のように教師値として再度曲面を作成する。これにより、近似の曲面と誤差の曲面の、2つの曲面が作成される。この2つの曲面を図-3の緑色の線で示したように重ね合わせることで、精度の高い近似が可能となる。なお、上述のたたみ込みは、誤差の教師値に対する割合が一定範囲以内(本論文では 10^{-2})に収まるまで繰り返す。

また、本論文ではたたみ込みをする毎に基底関数の半径の値を小さくしている。基底関数の半径の決定は、例えば中山ら⁷⁾は、全学習データを同一の半径とした基底関数の半径式を用いている。一方、荒川ら⁸⁾は、半径を最適化することにより決定している。このように基底関数の半径については種々な方法で検討が行われており、

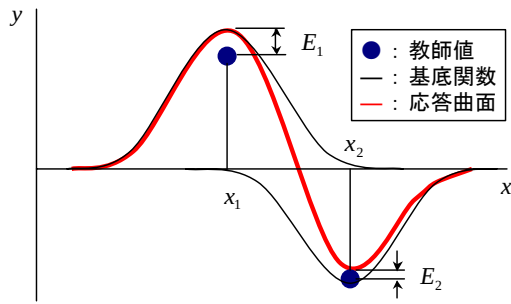


図-1 応答曲面作成

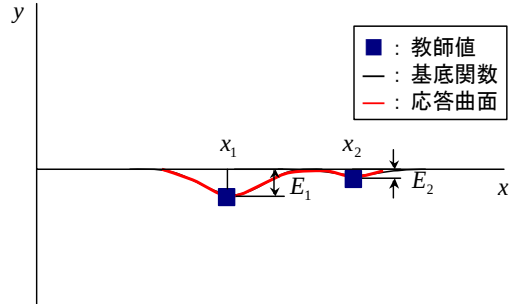


図-2 誤差を教師値とした応答曲面作成

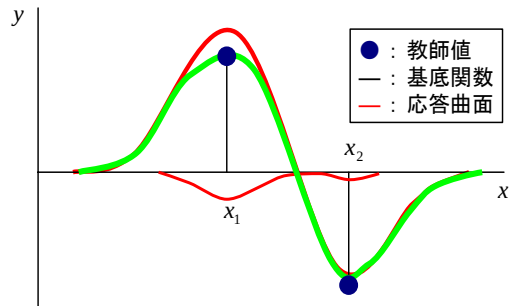


図-3 たたみ込みを行った応答曲面作成

RBF ネットワークを用いるうえで、基底関数の半径の決定は比較的難しい問題である。しかし、上述のようにたたみ込みする毎に半径を小さくしていくことで、近似の精度の向上のみならず、半径の決定も比較的容易となっている。

3. 一層門型ラーメン橋脚における計算例

本論文では、RBF ネットワークを用いた場合の近似精度を視覚的に確認するため、2 変数問題を例として計算を行い検討している。以下に、最適設計問題と数値計算例を示す。

a) 構造モデル

対象構造は、図-4 に示すような一層門型ラーメン橋脚とした。図の左が橋軸直角方向、右が橋軸方向を示す。

b) 目的関数

目的関数は、初期建設費に補修費を加えたトータルコストの最小化問題であり、式(2)に示す。

$$OBJ = C_0 + C_r \rightarrow \min \quad (2)$$

ここで、 C_0 は初期建設費、 C_r は補修費である。初期建設費 C_0 は式(3)より算定される。

$$C_0 = \alpha_c \cdot V_c \cdot K_c + \alpha_s \cdot V_s \cdot K_s \cdot G_s \quad (3)$$

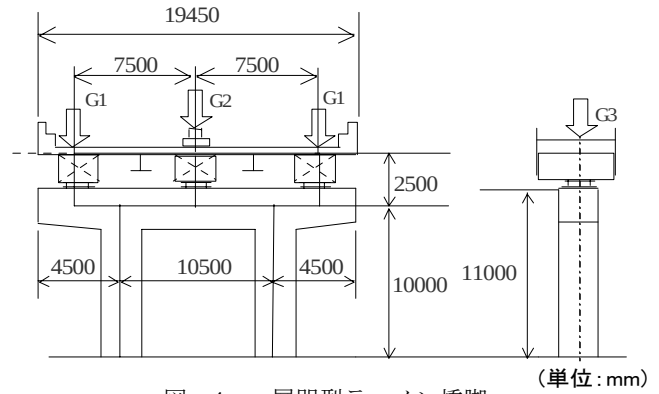


図-4 一層門型ラーメン橋脚

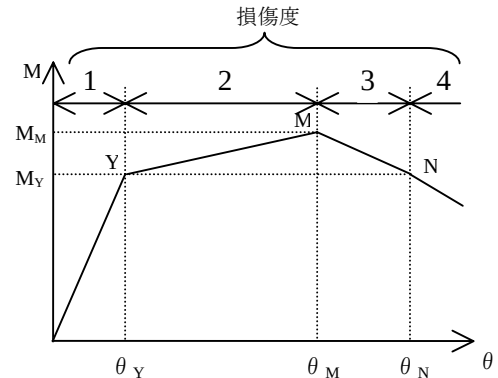


図-5 構造の非線形性能

ここで、 α_c はコンクリートの単価補正係数、 V_c はコンクリート量(m^3)、 K_c はコンクリート単位容積当たりのコスト($=65.1 \text{ unit}/m^3$)、 α_s は鉄筋の単価補正係数、 V_s は鉄筋量(m^3) ($=9.1 \text{ unit}/kN$)、 K_s は鉄筋単位重量当たりのコスト、 G_s は鉄筋の単位重量($=77kN/m^3$)である。 α_c および α_s は本研究では共に 1.0 とした。コンクリート単位容積当たりのコスト、および鉄筋単位重量当たりのコストは、材料費、足場工費、人件費等を含む工事費用から換算した値である⁵⁾。

補修費 C_r は、コンクリート標準示方書¹⁰⁾で示されている図-5 のような $M-\theta$ の骨格曲線から、部材の応答回転角によって損傷度の判定を行い算定される。構造の損傷位置を図-6 の○に示す。図に示した損傷位置に応じた補修工法が損傷度別に算定される⁹⁾。なお、柱の基部が損傷度 4 の場合を崩壊とした。

c) 断面構成

設計の対象とするのは柱部材とし、断面構成は図-7 に示すような正方形断面とした。図中の B は断面幅、 H は断面高さである。また、使用材料は、設計基準強度 $24N/mm^2$ のコンクリートと鉄筋 SD345 とする。

d) 制約条件

制約条件は、曲げ破壊に対する照査とせん断破壊に対する照査とした。回転角に関する照査の式(4)を示す。

$$g_{ij}^{PM} = \gamma \cdot \frac{\theta_{d_{ik}}}{\theta_{a_{ik}}} - 1 \leq 0 \quad (i=1 \sim N_m, k=1 \sim 2) \quad (4)$$

せん断に関する照査の式(5)を示す。

$$g_{ij}^{PS} = \gamma \cdot \frac{V_{d_{ik}}}{V_{a_{ik}}} - 1 \leq 0 \quad (i=1 \sim N_m) \quad (5)$$

ここで、 γ は構造係数($=1.0$)、 N_m は部材数、 $\theta_{d_{ik}}$ は i 番

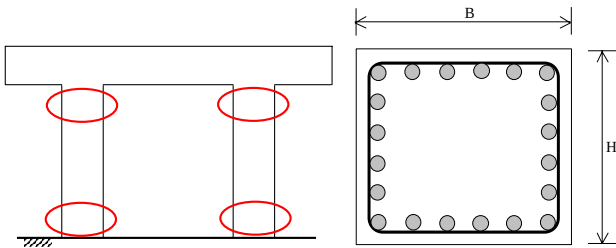


図-6 損傷位置

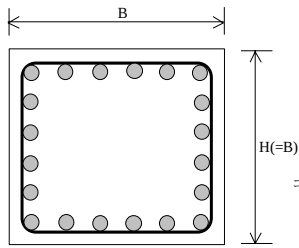


図-7 断面構成

表-1 設計候補値

候補値	B(mm)	N(本)															
1	1000	4	5	6	7	9	10	11	12	8	9	9	10	10	11	11	12
2	1100	4	5	7	8	10	11	13	14	9	10	11	11	12	13	13	14
3	1200	5	6	8	9	11	12	14	15	10	11	12	12	13	14	14	15
4	1300	5	7	8	10	12	14	15	17	11	12	13	14	15	15	16	17
5	1400	6	8	9	11	13	15	16	18	12	13	14	15	16	16	17	18
6	1500	6	8	10	12	14	16	18	20	13	14	15	16	17	18	19	20
7	1600	6	8	11	13	15	17	20	22	15	16	17	18	19	20	21	22
8	1700	7	9	12	14	16	18	21	23	16	17	18	19	20	21	22	23
9	1800	7	10	12	15	17	20	22	25	17	18	19	20	21	23	24	25
10	1900	8	11	13	16	18	21	23	26	18	19	20	21	22	24	25	26
11	2000	8	11	14	17	19	22	25	28	19	20	21	23	24	25	27	28
12	2100	8	11	14	17	20	23	26	29	19	21	22	23	25	26	28	29
13	2200	9	12	15	18	22	25	28	31	21	22	24	25	27	28	30	31
14	2300	9	12	16	19	23	26	30	33	22	23	25	27	28	30	31	33
15	2400	10	13	17	20	24	27	31	34	23	24	26	28	29	31	32	34
16	2500	10	14	17	21	25	29	32	36	24	26	27	29	31	33	34	36

1段配筋 ← | → 2段配筋

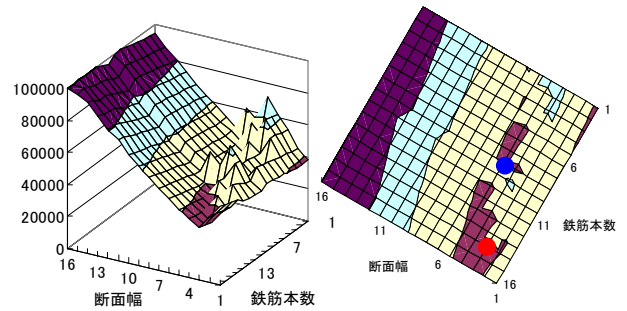


図-8 目的関数の実曲面

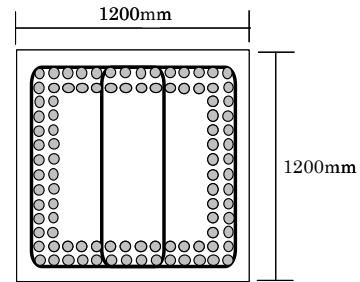


図-9 最適解での断面構成

目の橋脚における部材端部 k の応答部材角(rad), $\theta_{a_{ik}}$ は i 番目の橋脚における部材端部 k の許容部材角(rad), 本研究では θ_N とする. Vd_{ik} は i 番目の橋脚の応答せん断力(kN), Vd_{ik} は i 番目の橋脚の許容せん断力(kN)である.

e) 設計変数

設計変数は, 2 変数問題で断面幅 B と軸方向鉄筋本数 N とした. 設計変数の候補値を表-1 に示す.

f) 目的関数の実曲面

本論文では, 近似の精度を検討するため, まず全設計点で厳密な解析を行い目的関数値となるトータルコストの曲面を作成した. これを図-8 に示す. 本論文ではこれを実曲面と呼び, この実曲面をもとに近似精度の確認を行っている. 図-8 の右の図は平面図であり, ●で示した部分は大域的最適解である. また, この設計問題には局所解もあり, 図の●で示す.

図-8 の右の図で示した最適解における設計変数は, 断面幅の設計変数が 3, 軸方向鉄筋本数の設計変数が 14 である. これは, 断面幅 B が 1200mm, 軸方向鉄筋本数 N が 2 段配筋で 14 本の設計に対応する. 最適設計解の断面構成を図-9 に示す.

g) 計算結果 (たたみ込み理論導入前)

本論文では, 曲面を更新して最適解の探索を行っている⁵⁾. 解析手順はまず, 初期学習データ数を 10 点とし, その後, 曲面の更新毎に 2 点ずつ学習データの追加を行う. なお, 追加学習データの 2 点は, その解析で得られる最適解と, 全学習データのうち最も疎な学習データの追加とする. また, 基底関数の半径は, 全学習データ間の最小距離を初期半径とした.

図-10 に, 曲面の更新回数 10 回, 学習データ数 30 点での結果を示す. 得られた最適解は, 断面幅の設計変数が 4, 軸方向鉄筋本数の設計変数が 14 であり, 最適

解近傍は得られている. しかし, 図-10 では図-8 に示した大域的最適解と局所解周辺の目的関数が局所的に低くなり, 大域的精度は低いことがわかる. この要因の 1 つとして, 学習データが密になっている箇所, 基底関数の半径が極端に小さくなっていることが考えられる.

そこで, 2 つの論理を追加し曲面の改善を試みる.

h) 論理の追加

追加した論理は次の 2 つである. まず, 基底関数の半径が小さすぎたため大域的近似が得られなかったと考え, 半径の制約を行った. 次に, 最適解近傍と局所解近傍に学習データが集中したためと考えられ, 基底関数配置の改善を行った. 以下に詳細を示す.

- ・半径の制約: 全学習データのデータ間距離の最小値を算定し, 全ての最小距離の平均値を算定する. 算定された平均値を基底関数の半径の最小値とする.

- ・基底関数配置の改善: 学習データが密になっている場所のうち, 学習データの目的関数が一番低いデータ以外での学習データには基底関数を配置しない. なお, 基底関数を配置しないだけであって学習データとしては残している.

g) 計算結果 (たたみ込み理論導入前・論理の追加)

上述の論理を追加した結果を図-11 に示す. なお, 初期学習データ数は上述の検討と同じように 10 点から始め, 曲面の更新を 10 回行い学習データ 30 点での結果である. 得られた最適解は断面幅の設計変数が 3, 軸方向鉄筋本数の設計変数が 14 となり大域的最適解が得られた. しかし, 図-10 に比べ大域的な近似精度は向上したが, 図-10 で得られていた局所解は得られていなかった. そこで, たたみ込み理論を用いることにより, さらに近似精度の向上を試みた.

h) 計算結果 (たたみ込み理論導入)

図-12 にたたみ込み理論を用いた場合の応答曲面を

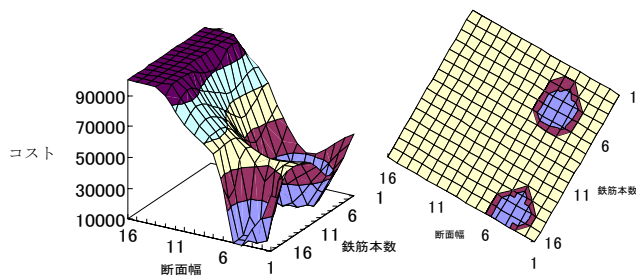


図-10 応答曲面

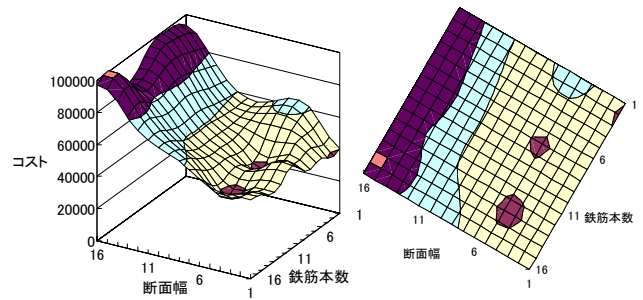


図-12 応答曲面 (たたみ込み理論追加)

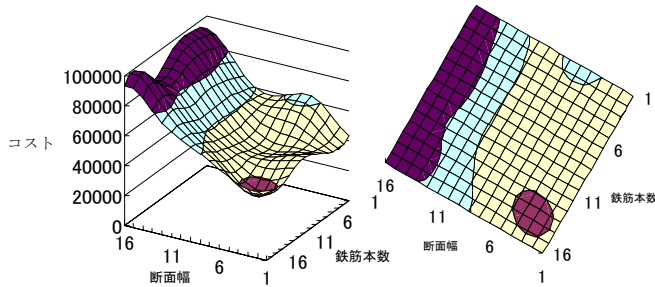


図-11 応答曲面 (論理追加後)

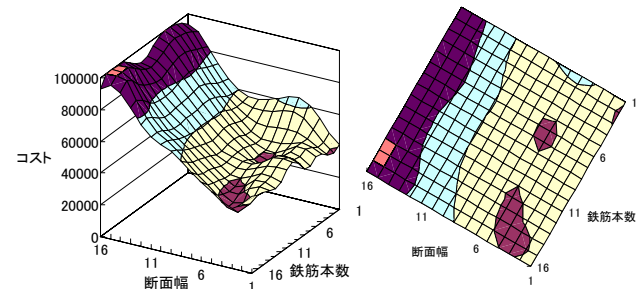


図-13 たたみ込み理論追加データ数 40 点

示す。ここでの検討もたたみ込み導入前と同じ条件であり、初期学習データ 10 点から曲面の更新を 10 回行った学習データ 30 点での結果とした。前述したようにたたみ込みの収束条件は、誤差を教師値の 10^{-2} 以下とした。また、1 回のたたみ込みで半径を 0.9 倍に縮小した。その結果、たたみ込み回数は 5 回となった。

得られた最適解は断面幅の設計変数が 4、軸方向鉄筋本数が 13 となった。得られた最適解は大域的最適解近傍であり、図-12 の右に示した平面図でわかるように、これまで得られていなかった局所解も得られている。また、大域的精度も失われておらず良好な結果が得られた。さらに、曲面更新を 5 回行うと図-13 に示す曲面となり、大域的最適解も得ることができた。

4. あとがき

本研究では、最適耐震設計問題において目的関数の近似を行う基礎的な検討を行った。対象とした設計問題は、近似の精度の確認をするため、視覚化が可能な 2 変数問題とした。

まず、従来の方法による目的関数の近似を行うと、大域的最適解は得られたが近似の大域的精度は低かった。そこで、半径の制約と基底関数配置の改善の論理を追加した。その結果、近似の大域的精度の向上を得ることができたが、局所解を探索することができなかった。そこで、たたみ込み理論を用いてさらに曲面の改善を試みた。その結果、大域的最適解と共に、局所解も探索することができた。以上の計算結果より、2 変数問題においては比較的精度の高い近似が可能となり、またたたみ込み理論の効果も確認することができた。

今後は、2 変数問題を多変数問題へ拡張し、目的関数を初期建設費の最小化問題とした結果と、目的関数をトータルコストの最小化問題とした結果での比較、検討を行いたいと考えている。

5. 参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，2002.
- 2) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，1999.
- 3) 亀田弘行，石川裕，奥村俊彦，中島正人：確率論的想定地震の概念と応用，土木学会論文集，No.577/I-41，pp.75-87，1997.
- 4) 長尾毅，山田雅行，野津厚：フーリエ振幅と群遅延時間に着目した確率論的地震ハザード解析，土木学会論文集，No.801/I-73，pp.141-158，2005.
- 5) 阿部淳一，渡邊忠朋，杉本博之：RBF ネットワークによる設計条件近似と RC 橋脚の最適耐震設計に関する研究，土木学会論文集 A，Vol.62，No.2，pp.405-418，2006.
- 6) Masao Arakawa and Akira Andatsu：Development of Convolute Approximation of Radial Basis Network for Sequential Approximation Optimization，The 7th International Conference on Optimization Techniques and Applications(ICOTA7)，2007.
- 7) 井上幸一，中山弘隆，吉森幸浩：ラディアル基底関数ネットワークによる既設構造物の最適耐震要素決定法に関する研究，土木学会論文集，No.752/I-66，pp.227-237，2004.
- 8) 荒川雅生，中山弘隆，石川浩：RBF ネットワークと領域遺伝型遺伝的アルゴリズムを用いた近似最適化・推奨関数の提示と基礎的な検討，日本機械学会論文集 C 編，Vol.70，No.697，pp.2674-2681，2004.
- 9) 阿部淳一，杉本博之，渡邊忠朋：地震リスクを考慮した設計地震動強度算定に関する研究，土木学会論文集 (掲載予定)。
- 10) 土木学会：コンクリート標準示方書・耐震性能照査編，丸善株式会社，2005.