

論文 2 軸強制練りミキサの容器形状が練混ぜ性能に与える影響

藤戸 幹大^{*1}・吉田 元昭^{*2}・橋本 親典^{*3}・渡辺 健^{*4}

要旨：生コン工場で高機能コンクリートや産業副産物のコンクリート材料への有効利用により、粉体量の多い材料の練混ぜが行われるため、ミキサの高性能化に対する要求が高まってきた。2 軸強制練りミキサの練混ぜ性能を向上するには、容器全体に材料が循環する全体循環流動と、ブレード先端で発生する局部交錯流動を活発にさせることが重要である。本研究では、2 種類の容器形状が練混ぜ性能に与える影響について可視化実験により定量的に評価した。その結果、浅底でブレード枚数が多い容器形状の方が、粉体量の多いコンクリートの練混ぜに適していることが明らかになった。

キーワード：2 軸強制練りミキサ、練混ぜ性能、可視化実験、混合度

1. はじめに

高強度コンクリート、高流動コンクリート、自己充填性コンクリートや高耐久・長寿命コンクリート等の新しいコンクリートの出現は、構造物の設計や施工の概念を大きく変化させるだけでなく、配合設計や練混ぜ等の製造技術に対しても大きな影響を与える結果となった。

比表面積が $10\text{m}^2/\text{g}$ 以上の超微粒子であるシリカフュームや $8,000\text{cm}^2/\text{g}$ 以上の高炉スラグ微粉末やフライアッシュ I 種を混和材として用いる場合、自己充填性を有する高流動コンクリートに用いられる 2 成分系や 3 成分系セメントでかつ混和材や混和剤を多く用いる場合には、従来の練混ぜ時間では、材料が本来有する機能を十分に発揮する状態まで練り混ぜることができない。そのため、練混ぜ時間を長くする場合が多い。これは、実際のレディーミクストコンクリート工場でのコンクリートの供給能力の低下を意味し、高機能コンクリートのコストアップに連動する。高機能コンクリートの普及に大きな障害となっている。

一方、最近の海砂採取の規制から、再生骨材

等の使用や、代替骨材として、ブレン値の小さいフライアッシュや銅スラグ微粉末や風化砂岩等の検討が行われており、これらをコンクリート用骨材として用いる場合、普通骨材を用いたコンクリートよりも練混ぜ時間が長くなる。よって、上述した高機能コンクリートの場合と同様に、従来の練混ぜ時間よりは長くなる傾向にある。

このような現状において、コンクリートの製造過程の中心であるコンクリートミキサの練混ぜ性能の高性能化に対する要求が高まってきた。

橋本¹⁾は、2 軸強制練りミキサのコンクリートの練混ぜ機構の解明を目的とし、フレッシュコンクリートの可視化モデルを用いて、ミキサ内のコンクリート材料の挙動をビデオ画像で記録する試験方法を提案した。この手法を用いて、池田²⁾や橋本^{3), 4)}は、複数のブレードとパドルで構成されるシャフト形状がコンクリートの流動形態や練混ぜ性能に与える影響について検討した。

本研究では、2 軸強制練りミキサの容器形状が練混ぜ性能に与える影響について、フレッシュ

*1 徳島大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (正会員)

*2 日工(株) 開発技術センター 主任 (正会員)

*3 徳島大学教授 工学部建設工学科 工博 (正会員)

*4 徳島大学助手 工学部建設工学科 博士 (工学) (正会員)

ユコンクリートの可視化モデルを用いて、実験的に検討した。実験対象としては、容器の深さが浅くシャフト方向の長さが長いA型ミキサと、容器の深さが深くシャフト方向の長さの短いB型ミキサである。また、A型は、シャフトのパドルがB型の2倍取り付けられている。なお、容器形状のパラメータとして着用した評価項目は、密接に関連しているため、独立に実験評価することは困難である。そのため本研究では容器形状の異なる4種類のミキサを試作して練混ぜ性能を評価した。

2. 2軸強制練ミキサの流動形態

2軸強制練りミキサの流動形態は、大きく2つの形態が存在する²⁾。すなわち、局部交錯流動と全体循環流動の2種類である。図-1は、2種類に流動形態の模式図である。

1 本のシャフト周りには、“らせん流動”が形

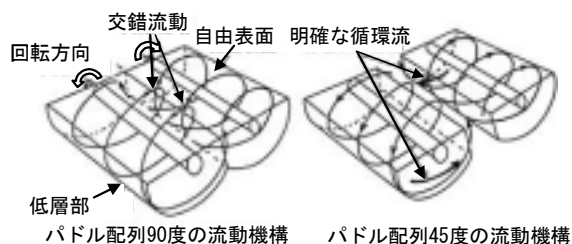


図-1 2軸強制練ミキサの流動形態

成される。2本のシャフト周りの“らせん流動”は逆向きに回転するため、ミキサの中心軸において交互に衝突し合う。これによって、形成する流動を“局部交錯流動”と称する。一方、2つのらせん流動は逆向きであるため、ある位相差でらせん流動が存在することによって、2本シャフトを循環する流れ、すなわちミキサ容器全体を循環する流れが形成される。これを“全体循環流動”と称する。

2種類の流動形態は、練混ぜ過程において独立に存在するのではなく、常に同時に発生し相互に干渉し合う。これまでの橋本の研究

⁴⁾では、シャフトに取り付けられるパドル配列角度によって2つの流動形態の干渉の度合いが異なることが明らかになった。パドル配列角度90度では、局部交錯流動が卓越し、パドル配列角度が45度では、全体循環流動が卓越する。この2つの流動を同時に活発にさせるほど、練混ぜ性能が向上することになる。B型ミキサのパドル配列角度は、もともと90度のものを60度に変更し、全体循環流動も意識したミキサとなっている。A型ミキサは45度で、全体循環流動に卓越したミキサであり、局部交錯流動と全体循環流動をより活発化させることを目的として、B型と比較してブレードの枚数が2倍となっている。

3. 実験に供したミキサの容器形状およびミキサ回転速度について

実験に供したミキサは、全部で4種類である。実物大の練混ぜ容量が 2m^3 のA型とB型のものと、 3m^3 のA型とB型のものである。縮小率は、 $1/83$ とし、忠実なモデルミキサを製作した。図-2に実験に供したミキサの容器形状を示す。同一練混ぜ容量において、A型とB型のミキサを比較した場合、B型のミキサ容器は、幅Wが大きく、長さLが小さく、シャフトと底面までの深さが深い。容器形状、シャフト回りのパドルおよびブレードの設計の違いを表-1に示す。

ミキサの回転速度は、A型とB型のブレードの周速度が同じになるように、A型のモデルが

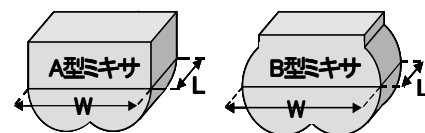


図-2 実験に供したモデルミキサの容器形状

表-1 容器形状、パドルおよびブレードの違い

ミキサの種類	L (mm)	W (mm)	練混ぜ容量 (リットル)	練混ぜ容量/容器全体積	パドル配列角度	ブレード取付角度	コンクリート中のブレード枚数
A型・ 2m^3	407	474	24	50%	45度	45度	12枚
B型・ 2m^3	288	552	24	59%	60度	38度	6枚
A型・ 3m^3	536	474	36	57%	45度	45度	16枚
B型・ 3m^3	464	552	36	55%	60度	38度	9枚

20.0 回転/分、B 型のモデルが 17.4 回転/分とした。なお、実験の比較は、総回転数で比較するため、回転速度の大小はあまり重要ではないと判断した。

4. 全体循環流動に関する練混ぜ性能実験

4.1 実験概要

全体循環流動によって行われる練混ぜの性能は、投入されたコンクリートの構成材料を均一にミキサ容器内に分散させる程度によって評価することができる。コンクリートをモルタルと粗骨材粒子群の 2 相系材料と考え、粗骨材粒子群の分散を粒子径の異なる 3 種類の粒子群の分散の程度によって定量的に評価した¹⁾。

4.2 使用材料および可視化モデルコンクリートの配合

実験に使用した粗骨材モデルの粒径および色を表-2 に示す。モルタル相には密度が 1.0g/cm^3 で、でん粉とアクリル酸ソーダの高分子共重合物である高吸水性高分子樹脂溶液を用いた。モデルモルタルは、無色透明な粘性流体である。本モデルモルタルの粘性は高分子樹脂の添加量によって変化させることが可能である、本実験では 3.0g/l で一定とした。添加量 3.0g/l では、ミニスランプフローで 170~180 程度の降伏値となる。

可視化モデルコンクリートの配合は、粗骨材とモルタルの容積比のみとした。すなわち、粗骨材とモルタルの容積比 (V_g/V_m) を、50%、65%および 80%の 3 種類とした。50%は、高流動コンクリートの粗骨材濃度とほぼ等しく、単位粗骨材量が少ない配合である。一方、80%は、スランプ 8cm 以下の硬練りコンクリートの粗骨材濃度に近く、単位粗骨材量の多い配合である。65%は、スランプ 12cm 程度の一般的なコンク

表-2 粗骨材モデルの物性値

粒径 (mm)	色	密度 (g/cm^3)	材質
3	青	1.70	ユリア樹脂球
6	白	1.85	
10	緑	1.45	

リートの単位粗骨材量の配合を想定した。

4.3 可視化実験方法

写真-1 は、実験風景を示す。フレッシュコンクリートを粗骨材粒子群とモルタルから構成する固液 2 相系混相流体と仮定し、粗骨材粒子の練混ぜ状況を可視化した。

最初、3 種類の粒径別に、所定の粗骨材とモルタルの容積比で同容積に製造した可視化モデルコンクリートを、図-3 に示すように静かに混合しないようにミキサ容器内にセットする。図-3 に示すように、ミキサ底部から領域 I と領域 II にデジタルカメラを設置しシャフト回転開始直後から 3 種類の樹脂球が分散していく様子を撮影する。その後、撮影したビデオ画像を再生し I、II 各領域をさらに 4 分割し、最小ウインド内に存在する最大粒径の緑球と中間粒径の白球の個数をカウントする。ビデオ画像から目視によってその粒径の境界が認識できる粒径は、 $\phi 10\text{mm}$ と $\phi 6\text{mm}$ までである。領域 I と領域 II の合計 8 ウインドでの白球と緑球の出現率

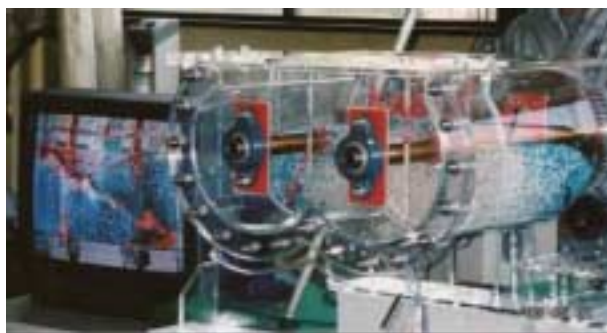


写真-1 可視化実験風景

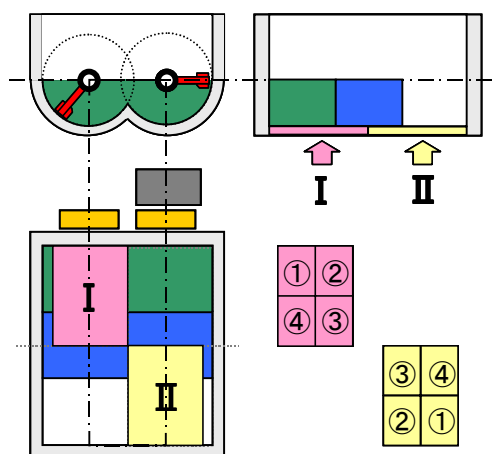


図-3 材料投入位置とビデオ撮影領域

の分散度 M を以下の式による求める。

$$\text{混合度} : M = \frac{\sigma_0^2 - \sigma^2}{\sigma_0^2 - \sigma_r^2} \cdots (1)$$

$$\text{ただし, } \sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2$$

σ は、任意の回転数における 8 つのウインドの出現率 X_i の分散を意味する。

σ_0^2 =before mixing variance,

σ_r^2 =after mixing variance, $N=8$

混合が進行する程、8 つの出現率は平衡状態となし、混合度 M は 100%に漸近する。この漸近する度合いによって、各ミキサの練混ぜ性能を定量的に評価することができる。混合していく

様子を写真-2 に示す。

4.4 実験結果および考察

図-4 は、練混ぜ容量 2m^3 の場合の A 型ミキサと B 型ミキサの練混ぜ性能を粗骨材とモルタルの容積比別に、比較して示す。図-5 は、練混ぜ容量 3m^3 の場合の実験結果を示す。

どの条件においても、B 型のミキサよりも A 型のミキサの方が、少ない回転数で混合度 M が、より平衡状態に漸近する。練混ぜ容量 2m^3 の方が、また、粗骨材とモルタルの容積比が小さい配合の方が、この傾向が顕著である。

単位粗骨材量が少なくなると、シャフトのブレードによる全体循環流動以外に、粗骨材粒子群相互の衝突や回転などによる練混ぜの効果が期待しにくい。したがって、A 型と B 型のミキサ

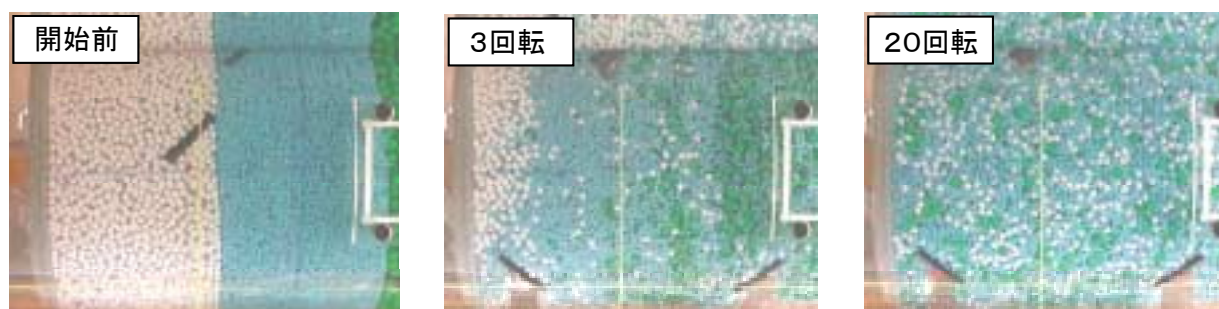


写真-2 混合していく様子

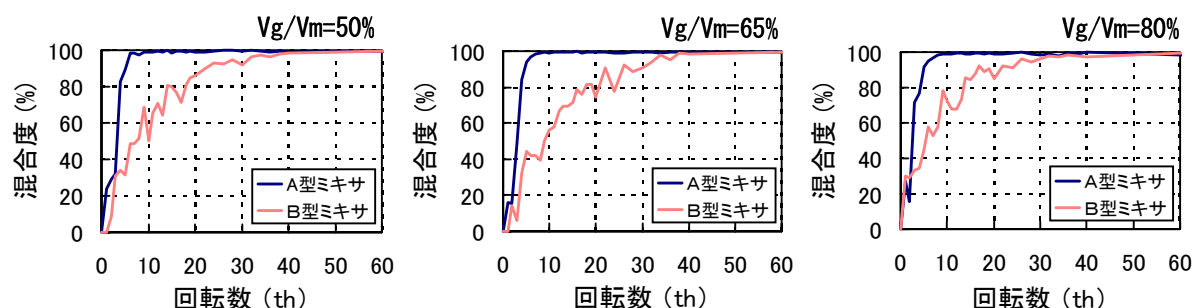


図-4 2m^3 ミキサの回転数における混合度

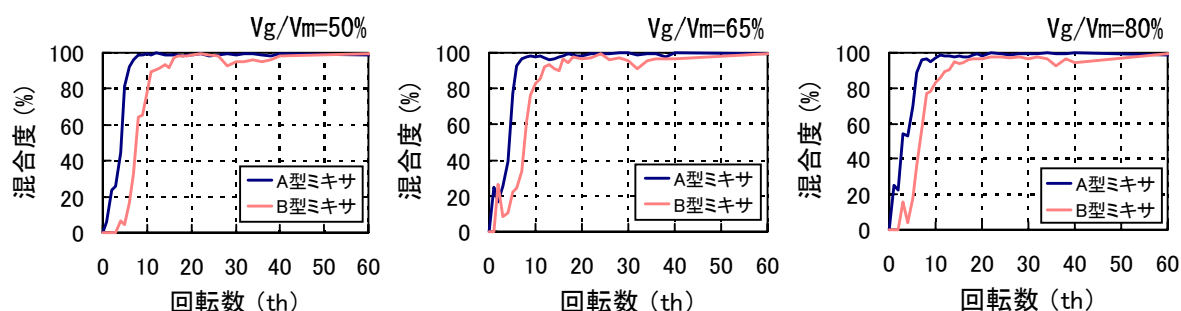


図-5 3m^3 ミキサの回転数における混合度

サで形成される全体循環流動の違いがより明確に現れたと考えられる。

一方、粗骨材とモルタルの容積比が大きい配合では、B 型のミキサの混合度 M は、50 回転を越えた時点まで平衡状態に至っていない。これに対し、A 型の場合、混合度 M は、8 回転時点ですでに平衡状態に至っている。この傾向は、練り混ぜ容量が 3m^3 の方がより顕著である。短い時間で、容器内の粗骨材粒子が均一に混ざることとはコンクリートの製造に対して重要である。B 型より A 型は、ブレード枚数が 2 倍あるが、このブレード枚数以上の違いがある。これは、局部交錯流動による影響と考えられる。

5. 局部交錯流動に関する練混ぜ性能実験

5.1 実験概要

2 軸強制練りミキサに発生する主たる流動形態は、逆方向にある位相差で回転する 2 本のシャフト回りのらせん流動によって形成される全体循環流動の他に、2 本のらせん流動がミキサの中心軸でコンクリート底面から上面に向かって衝突することによって形成される局部交錯流動がある。写真-3 は、A 型 2m^3 のシャフト軸回りの上昇流を特別に設置した糸により可視化したものである。また、写真-4 は、2 本シャフト回りのらせん流動による上昇流が衝突しせん断流動が形成された部分を示す。詳細に観察した結果、交錯部領域においてせん断流動が、交錯部領域外では上昇流が活発に発生することが明らかになった。

局部交錯流動による練混ぜ性能を定量的に評価するために、ミキサの上面からコンクリート表面をデジタルカメラによって撮影し、交錯領

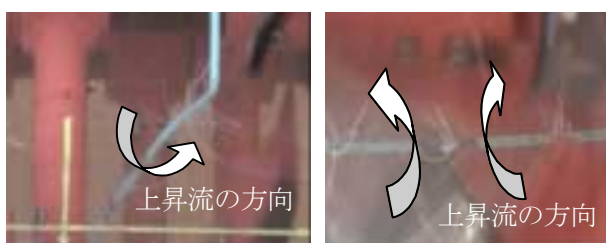


写真-3 上昇流

写真-4 せん断流動

域から出現してくる粗骨材粒子数をカウントし、出現率を求めた。交錯流動が活発であるほど、コンクリート底面から表面に向かって形成する上昇流が衝突し合い、このせん断流動によって運ばれる粗骨材粒子群をトレーサ粒子とし、回転数とせん断流動の発生数との関係を求めた。

5.2 使用材料および可視化モデルコンクリートの配合

実験に用いた可視化モデルコンクリートは、4 章で使用した高分子吸水樹脂水溶液の 1 相系粘性流体とした。交錯流動領域内に発生するせん断流動によってコンクリート自由表面に出現する粗骨材粒子として、可視化モデルコンクリート内にあらかじめ 20 個のみを混入した。投入した粗骨材粒子は、表-2 に示す 3 種類の粗骨材のうち、最も目視観察しやすい直径 10mm の緑色のユリア樹脂球とした。高分子吸収樹脂水溶液のみでコンクリートをモデル化するため、4 章のモデルモルタルの場合よりは粘性を高めることとし、高分子樹脂の添加量を 3.2g/l とした。

5.3 可視化実験方法

モデルミキサは、練混ぜ容量 2m^3 の A 型と B 型のみを使用した。局部交錯流動のみを着目しているため、練混ぜ容量の影響は無視できるとした。

初め、ミキサ内を可視化モデルコンクリートで満たし、粗骨材粒子を 20 個ランダムに投入し、

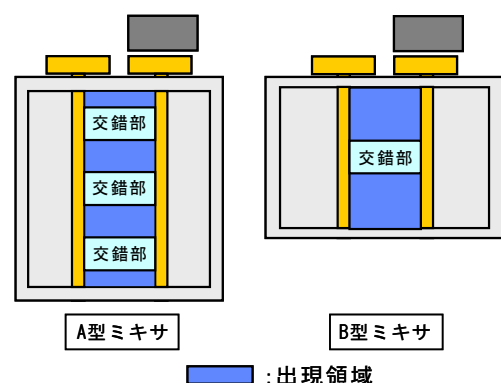


図-6 出現領域と交錯領域部の関係

この状態を試験初期配置（0 回転）とする。ミキサの上面にビデオカメラをセットし、図－6に示す出現領域から上昇流によって出現してくる粗骨材の挙動を撮影する。撮影するミキサ回転数は 20 回転までとする。交錯流動は基本的にシャフト 1 回転で発生するせん断流動であるため、20 回転分の撮影時間で十分とした。交錯領域は、2 本のシャフトのブレードが交錯する領域として設定した。この実験は、同一ミキサに対して 4 回試行した。

出現率は、撮影したビデオ画面上で、図－6に示す出現領域のウインドを設定し、このウインド内から出現する粗骨材の数を数える。着目した粗骨材が交錯領域部から出現したものか、あるいは、交錯領域部外から出現したものかを情報として取り込む。1 回転毎ではばらつきがあるため、20 回転分の総数で出現率を求めた。

5.4 実験結果および考察

表－4 に、出現個数および出現率を示す。4 回の試行でのばらつきはほとんどなく、20 回転数で十分である。出現総数が、B 型は A 型の約半分程度である。これは、ブレードの枚数が半分であるためと考えられる。ブレードの回転によって発生する底部から自由表面部への上昇流は、ブレードの数に比例すると言える。

一方、A 型は、交錯領域内と領域外ではほぼ同

表－4 出現個数および出現率

練混ぜ容量 2m ³ A型ミキサ			
試行回数	交錯領域内	交錯領域外	出現総数
	出現数	出現数	
1	55	46	99
2	56	47	106
3	61	44	105
4	48	50	98
総数	220	187	407
出現率	54.1%	45.9%	

練混ぜ容量 2m ³ B型ミキサ			
試行回数	交錯領域内	交錯領域外	出現総数
	出現数	出現数	
1	17	32	54
2	21	28	46
3	15	37	52
4	13	25	38
総数	66	122	188
出現率	35.1%	64.9%	

じ出現率である。これに対し、B 型は、交錯領域外の方が多い。せん断流動は、交錯領域内での上昇流であると考えられ、この交錯領域内でのせん断流動が水とセメントの界面接触の頻度を活発にさせ、練り工程に重要である^{3), 4)}。よって、B 型に比較して、A 型のミキサは、全体循環流動だけでなく、練りに必要な局部交錯流動も卓越していると言える。

6. 結論

本可視化実験で得られた知見を以下に記す。

- 1) 浅底でブレード枚数が多い容器形状の A 型ミキサは、深底でブレード枚数の少ない B 型ミキサに比較して、全体循環流動および局部交錯流動ともに卓越している。
- 2) A 型の全体循環流動の優越性は、粗骨材濃度が小さく、粉体量の多いコンクリートほど顕著である。
- 3) 局部交錯流動によってミキサ中心軸で形成されるせん断流動の発生頻度は、交錯流動の領域の割合とブレードの数に比例する。

参考文献

- 1) 橋本親典, 平井秀幸, 辻 幸和, 田村 真; 2 軸強制練りミキサ内のコンクリートの練混ぜ機構の可視化, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.15, No.1, pp.1037-1041, 1993
- 2) 池田 修, 橋本親典, 杉山隆文, 辻 幸和; 2 軸強制練りミキサの流動機構と練混ぜ性能に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.17, No.1, pp.557-562, 1995
- 3) 橋本親典, 辻 幸和, 杉山隆文; 可視化実験手法を用いたミキサ内のフレッシュコンクリート練混ぜ性能に関する研究, セメント・コンクリート論文集, No.49, pp.516-521, 1995
- 4) 橋本親典, 辻 幸和, 杉山隆文; 練混ぜ時間が 2 軸強制練りミキサの練混ぜ性能に与える影響, セメント・コンクリート論文集, No.51, pp.582-587, 1997