

論文 高強度遠心成形 PCa 型枠の品質に関する研究

小澤 貴史*1・西田 朗*2・黒瀬 行信*3

要旨:本研究では、高強度コンクリートを使用した遠心成形PCa型枠について、構造体としての品質および強度特性に関する検討を行った。その結果、遠心成形PCa型枠は、振動成形に比較して品質が優れていること、高ビーライト系セメントとシリカフュームを使用することで設計基準強度 100N/mm²程度まで製造可能であること、および構造体として適用するのに十分な品質と均質な強度を有することが確認された。また、養生条件を考慮することで長期の強度発現が認められたため、合理的な品質管理を行うための方法として、設計基準強度の保証材齢を91日以前の範囲で延長することを提案した。

キーワード:高強度コンクリート, 遠心成形, PCa型枠, 品質, 圧縮強度

1. はじめに

RC建築物においては、型枠工事の省力化、鉄筋組立て作業の簡便化など施工の合理化を目的として、柱、梁などの主要構造部材の一部をハーフPCa化する工法が提案され、実用化が進んでいる¹⁾。本報では、高強度コンクリートを使用した遠心成形PCa型枠について、品質および強度特性に関して、実験的検討を行った結果を報告する。

2. 実験概要

実験は、シリーズIとシリーズIIからなる。シリーズIは、設計基準強度60N/mm²を想定し、遠心成形PCa型枠が構造体として必要な品質を有することの確認、および振動成形の場合と比較しその性能と品質を把握することを目的として、PCa型枠から採取したコアを用いて品質に関する実験を行ったものである。シリーズIIは、設計基準強度100N/mm²クラスの超高強度PCa型枠の製造、および遠心成形PCa型枠の合理的な品質管理方法の提案を目的として、強度特性に関する実験を行ったものである。

2.1 使用材料および調合

コンクリートの使用材料を表-1に、調合を表-2に示す。高強度・高流動、かつ、無収縮のコンクリートとするために、混和材として、製品用高強度混和材、フライアッシュ、および膨張材を適宜組み合わせ使用し、設計基準強度100N/mm²のコンクリートには、高ビーライト系セメントとシリカフュームを使用した。コンクリートの調合は、PCa型枠が薄肉であることから、流動性を高めるため、スランプフローを、シ

表-1 使用材料

種類	シリーズI	シリーズII
セメント①	普通ポルトランドセメント (密度3.16g/cm ³)	普通ポルトランドセメント (密度3.16g/cm ³)
セメント②	-	中庸熟ポルトランドセメント (高ビーライト系, 密度3.20g/cm ³)
細骨材	三重県産 川砂 (表乾密度2.57g/cm ³)	埼玉県産 砕砂 (表乾密度2.61g/cm ³)
粗骨材	三重県産 川砂利 (表乾密度2.65g/cm ³ , G _{max} =15mm)	栃木県産 砕石 (表乾密度2.68g/cm ³ , G _{max} =20mm)
混和材①	製品用高強度混和材 (密度2.74g/cm ³)	製品用高強度混和材 (密度2.74g/cm ³)
混和材②	-	シリカフューム (密度2.20g/cm ³)
混和材③	フライアッシュ (密度2.35g/cm ³)	フライアッシュ (密度2.35g/cm ³)
混和材④	膨張材 (密度2.95g/cm ³)	膨張材 (密度2.92g/cm ³)
減水剤①	高性能減水剤 (ポリエーテル系, 密度1.06g/cm ³)	高性能減水剤 (ポリエーテル系, 密度1.06g/cm ³)
減水剤②	-	高性能AE減水剤 (ポリアミン酸系, 密度1.04g/cm ³)

*1 清水建設(株)技術研究所 建築研究開発部 研究員 工修(正会員)

*2 清水建設(株)技術研究所 建築研究開発部 主任研究員 工修(正会員)

*3 清水建設(株)設計本部 構造生産設計部二部 主査 工博(正会員)

リーズⅠでは50±5cm, シリーズⅡでは60±10cmを目標とした。空気量は2.0±1.0%を目標とした。

2.2 PCa型枠の製造

PCa型枠の製造条件を表-3に示す。外型枠は遠心成形に対し十分安全でかつ高剛性で変形の少ない鋼製システム型枠を使用した。打込みは鉛直に配置した型枠内に練り混ぜたコンクリートを投入して行った。PCa型枠の成形方法は、シリーズⅠでは遠心成形と振動成形の2種類、シリーズⅡでは遠心成形のみとした。遠心成形では、コンクリートを打ち込んだ型枠を振動数50Hz, 振幅1.25mmの振動テーブル上で20秒間振動させた後、鉛直軸廻りに回転させて遠心力によって締固めながら成形を行った。表-4に遠心成形の条件、写真-1に遠心成形の状況を示す。一方、振動成形では、上述した振動テーブル上で5分間の振動締固めを行った。

養生は常圧蒸気養生を基本とし、シリーズⅠでは、前養生20℃・3時間、温度上昇勾配20℃/h, 最高温度65℃・4時間、降温は自然冷却とした。シリーズⅡでは、前養生30℃・2時間、温度上昇勾配27.5℃/h, 最高温度85℃・4時間、降温は自然冷却とした。ただし、調合No.3については、蒸気養生を行わなかった。脱型後はすべて気中養生とした。

2.3 実験方法

シリーズⅠでのコア供試体の採取要領を図-1に、試験方法を表-5に示す。鉛直方向に採取したφ55mmのコアを用いて圧縮強度およびヤング係数の測定を行い、部材厚さ方向に採取したコアを用いて含水率、密度、細孔分布、および

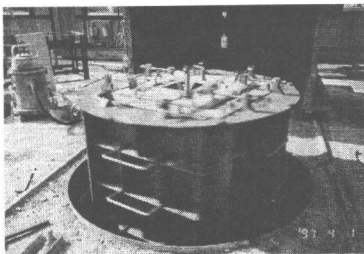


写真-1 遠心成形の状況 (上部)

促進中性化の試験を行った。

シリーズⅡでは、鉛直方向に採取したφ55mmのコアを用いて圧縮強度試験を行った。図-2に

表-2 コンクリートの調合

実験 シリーズ	調合 No.	水結合材比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)										
				水		セメント		粗骨材	混和材				減水剤	
				①	②	①	②		①	②	③	④	①	②
Ⅰ	1	31.0	55.0	175	490	-	892	753	29	-	25	20	6.7	-
Ⅱ	2	30.1	45.2	176	490	-	731	910	49	-	25	20	6.7	-
	3	21.3	45.0	155	-	655	701	881	-	73	-	-	-	14.6

表-3 PCa型枠の製造条件

実験 シリーズ	調合 No.	形状 (mm)			成形方法	蒸気養生
		断面	長さ	厚さ		
Ⅰ	1	□1000	2800	90	遠心	あり
					振動	
Ⅱ	2	□900	2050	75	遠心	あり
	3					なし

表-4 遠心成形の条件

型枠回転数 (r.p.m.)	回転時間 (sec)	作用遠心力 (G)	
		最大	最小
88	180	4	2.2

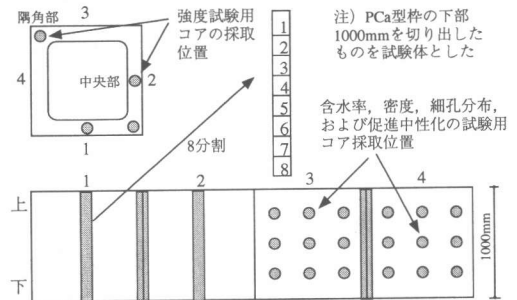


図-1 コア供試体の採取要領 (シリーズⅠ)

表-5 試験方法 (シリーズⅠ)

試験項目	内容	試験材齢*
圧縮強度・ヤング係数	JIS A1107およびJIS原案準拠	同一養生供試体: 14日 コア: 14 (-), 106 (105) 日
含水率	105℃乾燥重量より算出	93 (92) 日
密度	48時間の吸水後、水中重量と気中重量より算出 (コアを厚さ方向に3分割し、外側・中心・内側の3箇所)	93 (92) 日
細孔分布	水銀圧入法により直径0.003~360μmの細孔分布を測定 (コアを厚さ方向に3分割し、外側・中心・内側の3箇所)	141 (140) 日
促進中性化 ²⁾	材齢114, 115日からCO ₂ 濃度5%で型枠表面側 (外側) より中性化促進	4, 8, 13週

*: (-) 内は振動成形PCa型枠の試験材齢を示す。

コア供試体の採取位置および試験材齢を示す。調合No.2では、材齢14日でPCa型枠と同一養生の供試体（ $\phi 10 \times 20\text{cm}$ ），調合No.3では、24、56、91日の3材齢で標準養生供試体の圧縮強度試験を行った。調合No.3では、圧縮強度試験の際に、コアおよび供試体のヤング係数の測定も行った。

コア強度は、供試体の高さ（ h ）と直径（ d ）に基づき補正を行った強度とした。一方、コアの径による補正は行わなかった³⁾。

3. 実験結果および考察

3.1 シリーズI

(1) 圧縮強度

遠心成形PCa型枠のコア強度は、材齢14日で 78.5N/mm^2 となり、同一養生供試体と同程度であった。図-3に、材齢105、106日における鉛直方向のコアの圧縮強度の分布を、材齢14日の同一養生供試体の強度とともに示す。材齢105、106日におけるコア強度は、遠心成形、振動成形ともに材齢14日の供試体強度を $16.4 \sim 26.7\text{N/mm}^2$ 上回り、大きな強度発現を示した。また、想定した設計基準強度 60N/mm^2 を十分に満足した。

振動成形PCa型枠の隅角部では、材料分離に起因すると考えられる鉛直方向の強度差が生じ、上部では強度が小さかった。一方、遠心成形PCa型枠では、鉛直方向に均一な強度分布となった。この結果、遠心成形PCa型枠のコア強度の平均値は 102N/mm^2 で、振動成形PCa型枠と比較して、 5N/mm^2 大きな値となった。

また、遠心成形部材では、回転軸からの距離が大きいほど、コア強度が大きくなるとの既往の報告があるが⁴⁾、本報告のPCa型枠の形状は薄肉中空状であり、回転軸からの距離の差は最高で $\sqrt{2}$ 倍程度、作用遠心力では、 2.2G と 4.0G の差しか生じていないため、遠心成形PCa型枠の中央部と隅角部のコア強度に大きな差は見られなかった。

(2) ヤング係数

図-4に圧縮強度とヤング係数の関係を

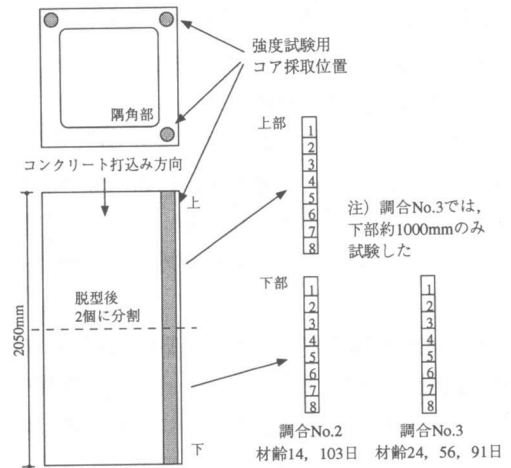


図-2 コア供試体の採取要領（シリーズII）

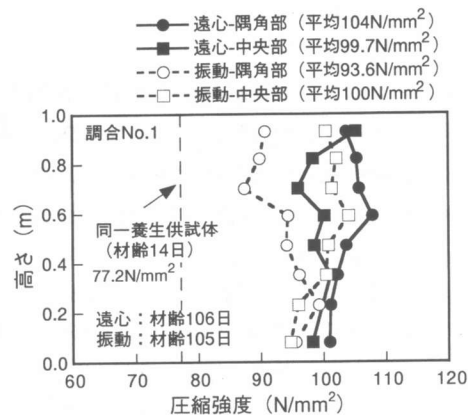


図-3 鉛直方向における圧縮強度分布（No.1）

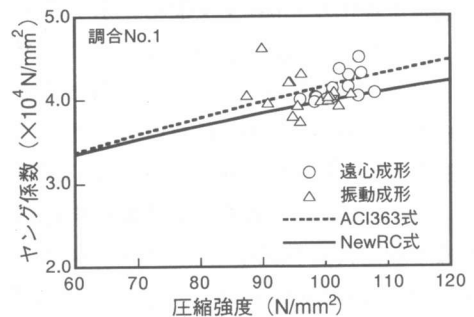


図-4 圧縮強度とヤング係数の関係（No.1）

ACI363式およびNew RC式による推定式とともに示す。振動成形PCa型枠の場合には、ヤング係数に若干のばらつきが生じたものの、遠心成形、振動成形ともに、圧縮強度とヤング係数の関係は、ACI363式およびNewRC式と良く一致

し、PCa型枠を構造体として適用するのに、十分な品質を有することが確認された。

(3) 含水率および密度

含水率および密度の試験結果を表-6に示す。遠心成形PCa型枠の含水率は、振動成形PCa型枠に比較して若干小さくなった。これは、成形時にコンクリート中の余剰水が放出されたためと考えられる。

遠心成形PCa型枠の密度は、振動成形PCa型枠に比較して若干大きくなった。また、部材の外側、すなわち表面側に近づくにつれ、密度が大きくなった。これらは、遠心成形による余剰水の放出、ならびに遠心力締め固めの効果によるものと考えられる。

(4) 細孔分布

細孔分布および累積細孔量の測定結果を図-5に示す。遠心成形PCa型枠、振動成形PCa型枠ともに、総細孔量は同程度であったが、遠心成形PCa型枠では、振動成形PCa型枠に比べ、100 μm 以上の細孔量が若干少なくなっており、気泡除去に遠心成形が有効であることが確認された。また、遠心成形PCa型枠、振動成形PCa型枠ともに、部材の外側、中心、および内側での細孔分布には明確な差は見られなかった。

(5) 促進中性化

促進中性化の試験結果を図-6に示す。遠心成形PCa型枠、振動成形PCa型枠ともに、中性化深さは小さい値となった。両者を比較すると、遠心成形PCa型枠の方が中性化の進行が遅く、中性化に対する抵抗性が優れていることが判明した。これは、上述した含水率、密度および細孔分布の測定結果の傾向と一致するもので、遠心力によって締め固められることにより、部材表面の組織が緻密化したためと考えられる。

3.2 シリーズII

(1) 圧縮強度

図-7に調査No.2のコンクリートの鉛直方向におけるコア強度の分布を、材齢14日の同一養生供試体強度とともに示す。コンクリートの打込み高さが約2mと高いにもかかわらず、材齢14

表-6 含水率および密度の試験結果

成形方法	含水率 %	密度 g/cm ³			
		外側	中心	内側	平均
遠心成形	4.14	外側	2.48	平均	2.47
		中心	2.47		
		内側	2.45		
振動成形	4.29	外側	2.45	平均	2.44
		中心	2.43		
		内側	2.45		

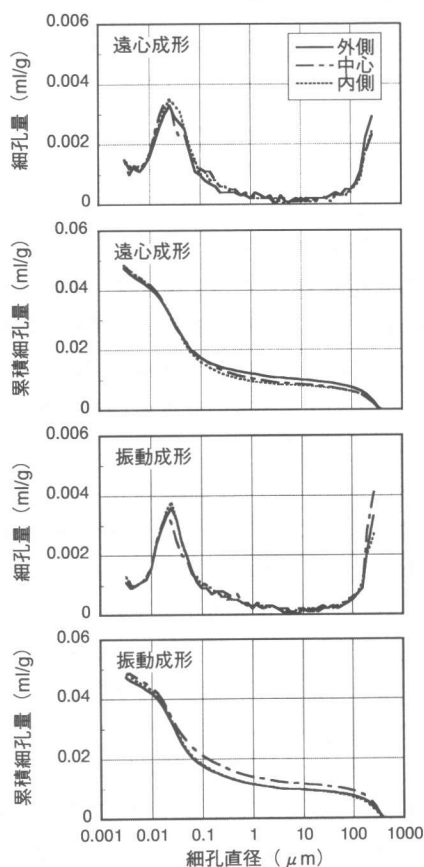


図-5 細孔分布

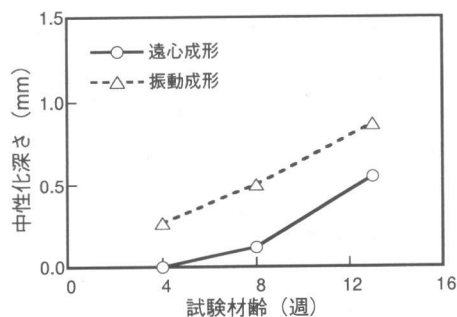


図-6 促進中性化試験結果

日、103日ともに、コア強度は鉛直方向にほぼ均一な強度を示した。材齢14日におけるコア強度は、同一材齢の供試体強度を7.9N/mm²下回った。PCa型枠は、部材厚さが薄く、供試体と部材はほぼ同じ温度履歴を受けたと考えられるため、この強度の差は、試験誤差、コア採取および供試体寸法による影響を包含したものと考えられる。なお、材齢103日でのコア強度は、供試体強度を4.4N/mm²上回った。

調査No.2は、シリーズIの調査No.1と同様に設計基準強度60N/mm²を想定したコンクリートであり、材齢14日におけるコア強度は、調査No.1が78.5N/mm²、調査No.2が75.7N/mm²と同程度であった。しかし、長期材齢では、調査No.1の102N/mm²（材齢106日）に対し、調査No.2では88.0N/mm²（材齢103日）となり14日以降のコア強度の発現が小さかった。これは、調査No.1とNo.2の蒸気養生の条件が異なることが主な原因と考えられる。長期的な強度発現が得られる蒸気養生条件については、最高温度、前養生時間、温度上昇勾配などの影響を受けること、セメント種類によっても差異があることが指摘されているので⁵⁾、さらに検討が必要である。

図-8に調査No.3のコンクリートの鉛直方向におけるコア強度の分布を、材齢24日の標準養生供試体の強度とともに示す。若干ばらつきがあるものの、コア強度は想定した設計基準強度100N/mm²を十分に満足し、高ピーライト系セメントとシリカフュームを使用することで、設計基準強度100N/mm²クラスの超高強度PCa型枠の製造が可能であることが判明した。また、材齢24、91日ともに、コア強度は標準養生供試体の材齢24日の強度を上回り、（標準養生供試体強度－コア強度）の値は⁶⁾、それぞれ-7.9、-17.0N/mm²となった。

(2) ヤング係数

図-9に調査No.3における圧縮強度とヤング係数の関係をACI363式およびNew RC式による推定式とともに示す。設計基準強度100N/mm²を想定した調査No.3のコンクリートにおいても、圧

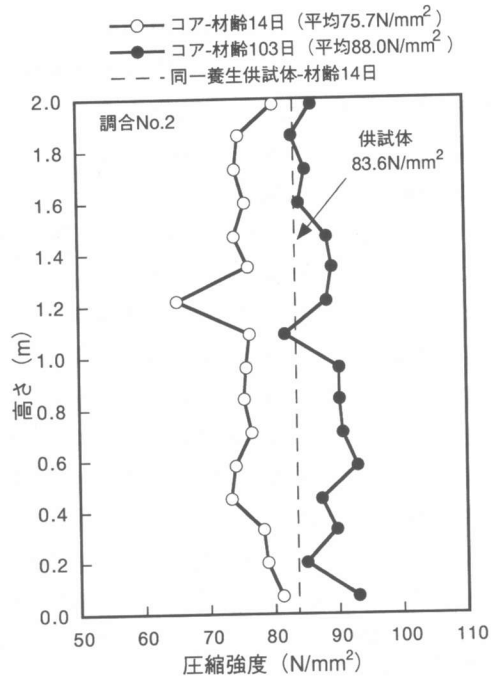


図-7 鉛直方向における圧縮強度分布 (No.2)

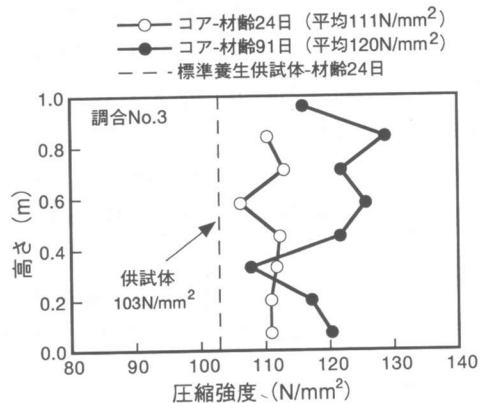


図-8 鉛直方向における圧縮強度分布 (No.3)

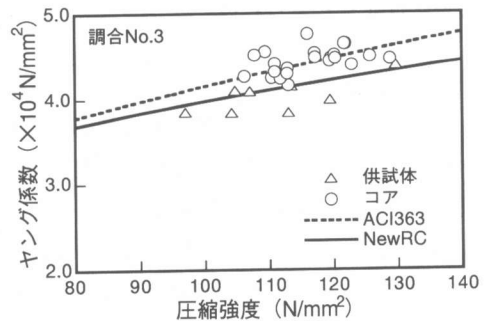


図-9 圧縮強度とヤング係数の関係 (No.3)

縮強度とヤング係数の関係は、ACI363式およびNewRC式と良く一致し、設計基準強度100N/mm²クラスの超高強度PCa型枠は構造体として十分な品質を有することが確認された。

(3) 品質管理方法の提案

PCa部材コンクリートの圧縮強度は、保証材齢において設計基準強度を下回らないこととされており、脱型時および出荷日に所要強度を確保するために強度の割増を行うこと、蒸気養生によって材齢28日以降の強度の増加が少ないことを理由として、保証材齢は28日以内とされている⁷⁾。しかし、この規定は、設計基準強度が18～36N/mm²の通常のPCaコンクリートを対象としたものであるため、設計基準強度60～100N/mm²程度の高強度PCaコンクリートに適用した場合には、単位セメント量が大きくなる点、長期の強度発現が余剰な強度となる点など調査設計上、不経済かつ不合理となる場合がある。

本実験において、設計基準強度60～100N/mm²程度の高強度PCa型枠では、養生条件を考慮することで長期の強度発現が認められたため、現場打ちの高強度コンクリートと同様に⁶⁾、構造体コンクリート強度の保証材齢を91日以前で適切に延ばすのが経済的かつ合理的な品質管理方法であると考えられる。

また、シリーズⅡの設計基準強度100N/mm²クラスのコンクリートで検討したように、標準養生供試体とコア強度の差を明らかにし、これを構造体コンクリートの強度補正值⁶⁾として用いることで、さらに合理的な調査設計および品質管理が可能と考えられる。

4. まとめ

高強度コンクリートを使用した遠心成形PCa型枠の品質および強度特性に関する実験で得られたことは、以下の通りである。

(1) 部材から採取したコアを用いて試験を行った結果、高強度遠心成形PCa型枠は、所要の設計基準強度、およびヤング係数を満足し、構造体として適用するのに十分な品質を有するこ

とが確認された。

(2) 遠心成形PCa型枠は、振動成形PCa型枠と比較すると、強度性状は均質であり、遠心成形によって部材表面の組織が緻密化するため、中性化抵抗性が向上した。

(3) 設計基準強度100N/mm²クラスの超高強度PCa型枠は、高ビーライト系セメントとシリカフュームを使用することで、製造可能であり、また、構造体として十分な品質を有していた。

(4) 養生条件を考慮することで、設計基準強度の保証材齢を91日以前の範囲で延長し、経済的かつ合理的に高強度PCa型枠の品質管理を行うことが出来ると考えられる。なお、最適な養生条件の検討は今後の課題である。

[謝辞] 本実験の実施にあたり、試験体製作でご協力頂きました羽田ヒューム管(株)、花王(株)の皆様には感謝申し上げます。

参考文献

- 1) たとえば、香田伸次、中澤春生：遠心成形PCa外殻を利用したRC柱の開発（その1）、清水建設研究報告、第58号、1993
- 2) 日本建築学会：高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針(案)・同解説、1991
- 3) 国本正恵、湯浅昇、笠井芳夫、松井勇：小径コアを用いたコンクリートの圧縮強度試験方法の検討、コンクリート工学年次論文集、Vol.22, No.1, pp.427-432, 2000
- 4) 瀬口健夫、勝田雅道、小林理市、川端一三：遠心成形プレキャストコンクリート柱のコンクリート強度分布、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.323-324, 1989.10
- 5) 杉山央、梶田佳寛：初期高温履歴を受けたコンクリートの長期強度発現性、日本建築学会構造系論文集、第515号、pp.23-30, 1999.1
- 6) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事、1997
- 7) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS 10 プレキャストコンクリート工事、1991