

モルタルおよびコンクリートの流動性に 影響を及ぼす要因について

FACTOR AFFECTING ON FLUIDITY OF MORTAR AND CONCRETE

麓 隆行
by Takayuki FUMOTO

1. はじめに

十分な耐久性を有するコンクリート構造物を施工するためには、適切な流動性や材料分離抵抗性を持ったコンクリートを、適切な施工法で打設する必要がある。近年、高性能 AE 減水剤の開発により、固練りコンクリートから高流動コンクリートまで、コンクリートの流動性を幅広く調整可能となった。そのほとんどのコンクリートの流動性を評価する方法として、スランプコーンを用いた試験が用いられる。この試験は簡便な試験であるため、これからも重要な役割を担うと考えられる。しかし、スランプコーンを用いた試験値に影響を及ぼす要因は不明確である。このため、目標とするコンクリートのスランプおよびスランプフローが決まっても、コンクリートの種類ごとに経験的に配合設計がなされているのが現状である。今後、性能規定への移行や多くの未利用副産物の利用が期待されている現状を考えると、使用材料の品質や配合からスランプやスランプフローを予測できる技術が必要となる。

そこで、本研究では、コンクリートの流動性に影響を及ぼす要因を明らかにするため、広範囲の流動性を持つコンクリートやモルタルのコーンを用いた試験値と、その中に占めるペーストおよびモルタルの体積割合や流動性との関係を調べた。

2. 余剰ペースト理論を参考としたコンクリート組成のモデル化について

コンクリートの流動性に関する理論の1つに、余剰ペースト理論がある¹⁾。この理論は、図1に示すとおり、コンクリートをペーストと粒子の2相構造と考え、粒子の空隙にペーストを充填し、さらに余剰のペーストを加えた際に、粒子間に隙間ができ、コンクリートが流動するという理論である。その余剰ペーストの体積の増加に比例して、粒子間隙は広がり、コンクリートの流動性は高くなる。建築学会

では、この考え方を一部取り入れ、単位粗骨材かさ容積を調査設計に利用している²⁾。実際にコンクリートに用いられる粒子(=骨材)は、粒度を持っている。その粒度は、直径2.5~5 mmの粒子が少ない不連続となっており、その粒子径を境に細骨材と粗骨材に分けられている。ここで、粒子径 R の球の空隙に収まる内接円半径は約 $0.15R \sim 0.4R$ であることが知られている³⁾。このことから、細骨材のほとんど粒子が粗骨材の粒子空隙に収まると考えられる。すなわち、コンクリートの流動性を考える場合、粗骨材を粒子と考え、モルタルが占める体積やその性状との関係を考察するのが妥当だと考えられる。そこで、本研究では、モルタルおよびコンクリートの流動性を考える際に、ペーストと細骨材、およびモルタルと粗骨材の2相構造として考えた。また、ペースト、モルタルおよびコンクリートの流動性は、従来異なる形状のコーンを用いて表現されるが、それぞれを比較することが目的であるため、形状比を同一としたコーンを使用して、流動性を評価するこ

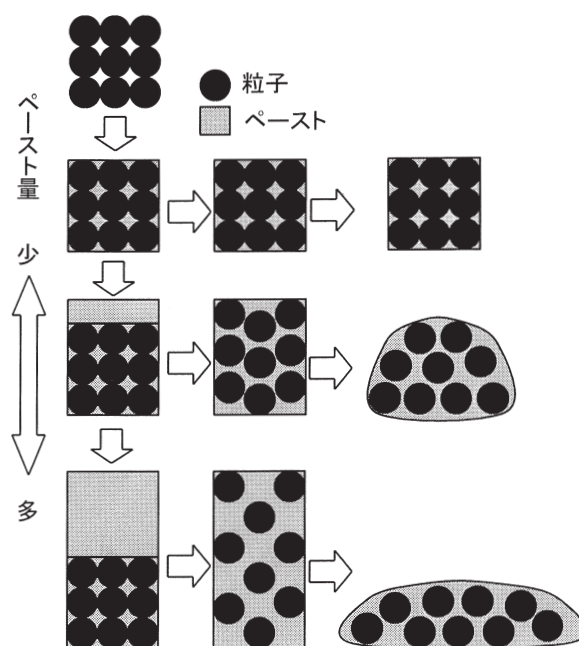


図1 余剰ペースト理論から考えられるコンクリートの流動概念

* 大阪市立大学大学院助手 工学研究科都市系専攻(〒558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138)

ととした。

3. モルタルのスランプおよびスランプフローとペーストの流動性との関係

3. 1 実験概要

使用材料として、水道水、普通ポルトランドセメント（密度 3.15 g/cm^3 、ブレン値 $3370 \text{ cm}^2/\text{g}$ ）、ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤および揖斐川産川砂（絶乾密度 2.53 g/cm^3 、吸水率 2.58% 、粗粒率 2.96 、実積率 66.1% ）を用意した。図 4 に細骨材の粒度を示す。

本研究で用いたペーストの配合を表 1 に示す。はじめに、JIS A 5201 に示されたミキサにてペーストのみを作製し、その流動性を測定した。ミキサに高性能 AE 減水剤を混入した一次水とセメントを投入し、 140 rpm で 60 秒 、 285 rpm で 60 秒 攪拌した後、残りの水を投入し、 140 rpm で 120 秒 間練り混ぜて、ペーストを作製した。練り上がり温度は約 20°C となるように材料の保存温度を調整した。練り上がり後、高性能 AE 減水剤を添加した場合は 5 分 静置後、また無添加の場合は練混ぜ直後にモルタルの流動性

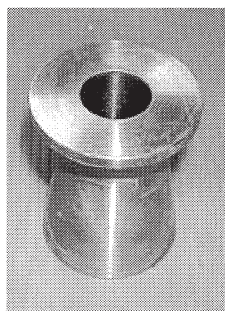


写真1 コンクリート用スランプコーンの寸法を
1/4 とした 1/4 コーン(右)

表 1 モルタル実験で用いたペーストの配合とその性状

W/C	高性能AE 減水剤 (C×%)	フロー値* (mm)	降伏値 (Pa)	塑性粘度 (Pa·s)
0.45	0.0	141	9.5	0.50
0.35	0.4	146	5.6	2.07
0.40	0.5	179	3.6	0.45
0.35	1.0	210	1.8	0.45
0.30	2.0	220	1.2	0.49
0.60	0.0	233	2.1	0.19
0.35	1.3	237	0.2	0.35

* 1/4 コーンを用いて測定した。

を調べた。コーンとして、写真 1 に示すようなコンクリート用スランプコーンの寸法を $1/4$ とした $1/4$ コーンを用いた。そして、 $1/4$ コーン内に 1 層でペーストを静かに流し込み、上面をならし、直ちに $1/4$ コーンを上の方に取り去った後、ペーストの広がり

の平均直径をペーストフローとして測定した。
次に、表 1 に示すペーストの配合を使用し、モルタル中にペーストが占める体積割合を $35\sim 80 \%$ の間で適宜変えたモルタルを作製した。 20 リットル のミキサを用い、水、高性能 AE 減水剤およびセメントを 160 rpm で 45 秒 間攪拌後、細骨材を投入して 160 rpm で 30 秒 、 330 rpm で 60 秒 攪拌する手順でモルタルを 5 リットル 作製した。なお、練り上がり温度は、 20°C 程度に調整した。練混ぜ終了後、無添加の場合は直ちに、また高性能 AE 減水剤を添加した場合は 5 分 静置後、モルタルの流動性を測定した。試験にはコンクリート用スランプコーンの寸法を $1/2$ とした $1/2$ コーンを使用し、モルタルを $1/2$ コーン内に 3 層、各 10 回突き固めて、上面をならし、 $1/2$ コーンを上の方に取り去った後、モルタルの広がり

3. 2 モルタルの実験結果および考察

図 2 にモルタル中に占めるペーストの体積割合とモルタルフローとの関係を示す。ペーストの性状に関わらず、モルタル中にペーストが占める体積割合が約 $40\sim 60 \%$ の間であれば、ペースト量の増加によりモルタルフローは直線的に増加した。しかし、体積割合が約 40% 以下では、ほとんど流動性がなく、また約 60% 以上では、ペースト量の増加による流動性の増加割合は小さくなった。これは、2 章での余剰ペースト理論のとおり、モルタル中に占めるペーストの体積割合が 40% 以下であると骨材粒子同士の接触抵抗が大きいこと、それ以上となると

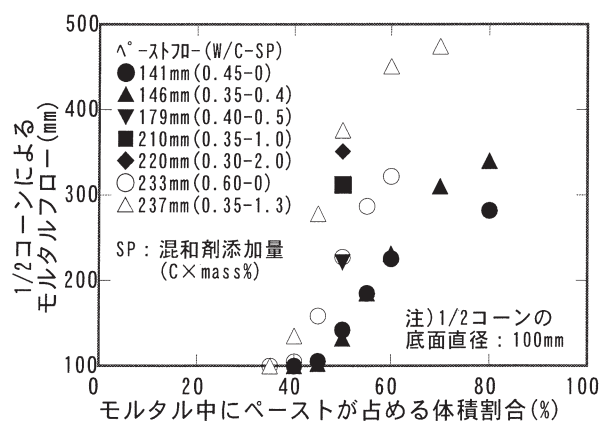


図2 モルタル中にペーストが占める体積割合と1/2コーンによるモルタルフローとの関係

粒子が離れてモルタルとしての流動が可能となること、さらに体積割合が 60 % 以上となると粒子間距離が十分保たれ、粒子同士の影響がかなり小さくなることを示している。よって、モルタルが占める体積割合が影響要因の一つであることがわかる。

また、図 3 に示すとおり、モルタル中のペーストの体積割合を 50 % とした場合、ペーストフローに比例して、モルタルフローが大きくなる傾向があった。ただ、水セメント比 60 % の時に、ペーストフローが 230 mm であるにもかかわらず、モルタルフローが大きく低下した。これは、他に比べて水セメント比が大きいため、自由水が多くなり、レオロジー的性質が異なることが一つの原因と考えられるが、本実験では明確にはできなかった。以上より、1/4 コーンによるペーストフローと水セメント比が影響要因に挙げられる。

次に、得られた要因の影響度を調べるため、モルタルフローを目的変数とし、モルタル中のペースト含有体積割合、1/4 コーンによるペーストフローおよび水セメント比を説明変数として、重回帰分析を行った。なお、モルタルフローの数値が 110 mm 以上で、ペーストの体積割合が 40～60 % の範囲内のモルタル

を対象とした。その結果、表 2 のとおり、説明変数はいずれも影響しており、決定係数 0.88 程度の高い相関があった。ペーストフロー、モルタル中のペーストの占める体積割合の順で影響が大きいことがわかった。

以上より、モルタルフローには、主にペーストフロー、ペーストが占める体積割合および水セメント比が影響しており、その影響の大きさから、川砂を用いる場合、水セメント比とモルタルの流動性を考慮して、モルタルに占めるペーストの体積割合を 45～70 % の範囲内で決定し、1/4 コーンを用いたペーストフロー値を 140～240 mm の範囲で調整すると、1/2 コーンを用いたモルタルフローを 100～500 mm の範囲で的確に調整できることがわかった。ただし、今後、水セメント比、混和材料や細骨材の特性の影響について、検討する必要がある。

4. コンクリートのスランプおよびスランプフローとモルタルの流動性との関係

4. 1 実験概要

3章で用いたモルタル配合のうち、表 3 に示す配合のモルタルを用い、コンクリート中のモルタルが

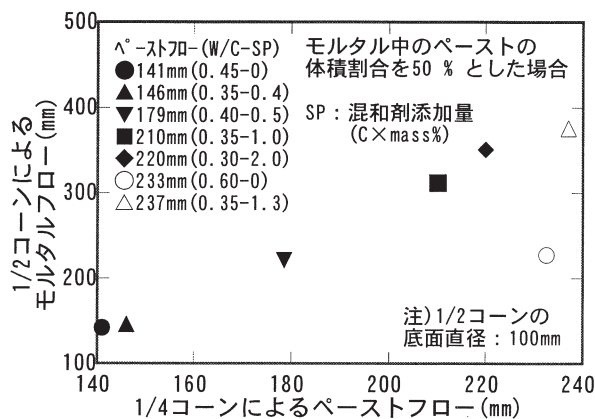


図 3 モルタル中のペーストの体積割合を 50 % とした場合のペーストフローとモルタルフローとの関係

表 3 コンクリート実験で用いたモルタルの配合とその性状

W/C	高性能 AE 減水剤 (C×%)	モルタル フロー (mm)	降伏値 (Pa)	塑性粘度 (Pa·s)
0.45	0.0	143	13.5	3.16
0.35	0.4	146	20.9	2.38
0.40	0.5	222	10.8	1.80
0.35	1.0	313	6.9	2.45
0.30	2.0	351	7.1	3.19

注) モルタル中のペーストの体積割合は 50 % と一定

表 2 モルタルフローを目的変数とし、モルタル中のペーストの占める体積割合、1/4 コーンによるペーストフローおよび水セメント比を説明変数とした場合の重回帰分析結果

説明変数	範囲	偏回帰係数	標準偏回帰係数	判定	偏相関	単相関	決定係数
モルタル中にペーストが占める体積 (%)	40 - 60	-12.20	-0.780	1 % 有意	-0.899	-0.388	0.881
1/4 コーンによるペーストフロー (mm)	141 - 237	1.98	0.928	1 % 有意	0.923	0.543	
水セメント比 (%)	30 - 60	-4.02	-0.471	1 % 有意	-0.791	-0.160	
定数項	—	614.98	—	1 % 有意	—	—	

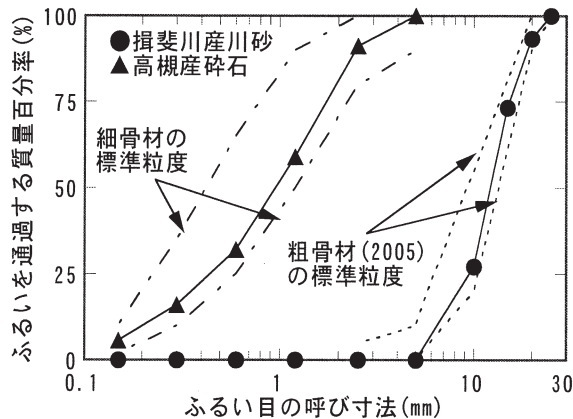


図4 使用した骨材の粒度

占める体積割合を 56～78 % としたコンクリートの流動性を測定し、モルタルの流動性との関係を調べた。使用材料として、水道水、普通ポルトランドセメント（密度 3.15 g/cm^3 、ブレン値 $3370 \text{ cm}^2/\text{g}$ ）、揖斐川産川砂（絶対密度 2.53 g/cm^3 、吸水率 2.58 %、粗粒率 2.96、実積率 66.1 %）、高槻産碎石（密度 2.69 g/cm^3 、吸水率 0.75 %、粗粒率 6.79、実積率 60.2 %）、ポリカルボン酸高性能 AE 減水剤ならびにポリアルキレングリコール系消泡剤を用意した。図4に使用した骨材の粒度を示す。実験では、60 リットルの 2 軸強制練りミキサを用い、セメントおよび細骨材を 15 秒間、水と高性能 AE 減水剤を加えて 30 秒間攪拌し、その後粗骨材を投入して 90 秒練り混ぜる手順で、40 リットルのコンクリートを作製した。なお、練り上がり温度は 15°C 程度、空気量は 2 % 程度となるよう調整した。そして、高性能 AE 減水剤を添加した場合は 5 分静置後、また無添加の場合は練混ぜ直後に、JIS A 1101 および JIS A 1150 に準じてスランプコーンを用いて、各配合でのスランプおよびスランプフローを同時に測定した。

4. 2 実験結果および考察

図5～6に、コンクリート中にモルタルが占める体積割合とスランプまたはスランプフローとの関係を示す。モルタルが占める体積割合がおよそ 60～70 % の範囲では、1/2 コーンによるモルタルフローが 220 mm 以下の場合、モルタル量の増加によりスランプが直線的に変化した。そして、モルタルの体積割合が約 70 % 以上となると、モルタルの体積割合の増加によるコンクリートの流動性の増加割合は小さくなった。1/2 コーンによるモルタルフロー 220 mm 以上の場合に同様の傾向が見られた。さらに、図7および図8に示すとおり、使用する粗骨材が同じ場合、モルタルが占める体積割合を一定とすると、モルタル

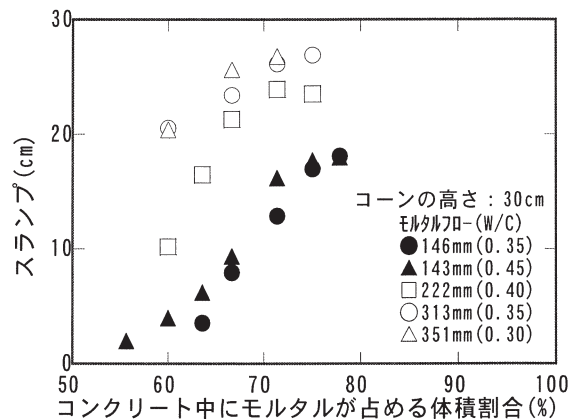


図5 コンクリート中にモルタルが占める体積割合とスランプとの関係

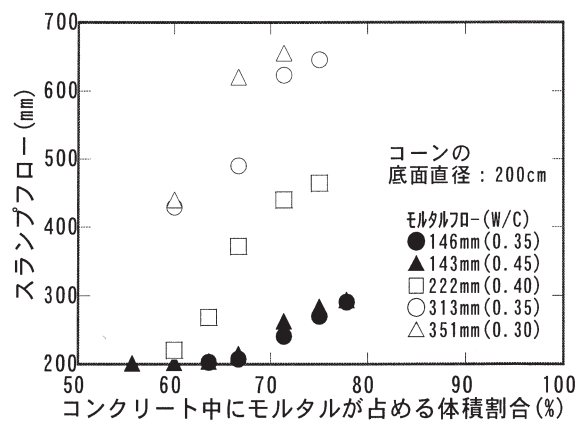


図6 コンクリート中にモルタルが占める体積割合とスランプフローとの関係

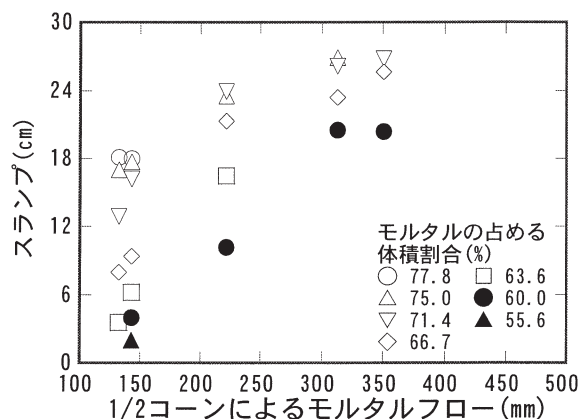


図7 コンクリートのスランプと1/2コーンによるモルタルフローとの関係

ルフローの増加に比例して、スランプやスランプフローが大きくなった。したがって、粗骨材を一定とした場合、モルタルの占める体積割合とモルタルフローが主な影響要因と考えられることがわかった。

これらの要因がコンクリートの流動性に及ぼす影響を確認するため、スランプまたはスランプフロー

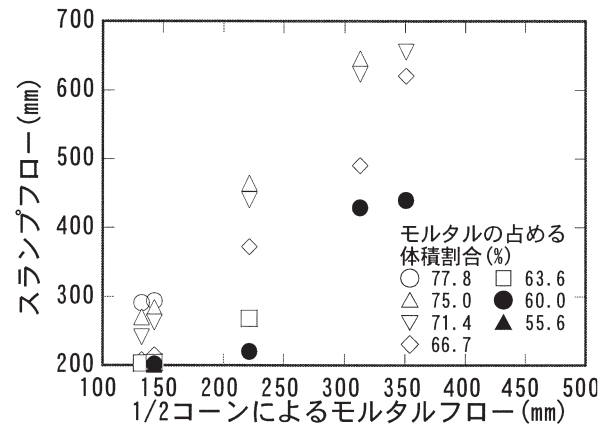


図8 コンクリートのスランプフローと1/2コーンによるモルタルフローとの関係

表4 コンクリートのスランプを目的変数とし、コンクリート中のモルタルの占める体積割合および1/2コーンによるモルタルフローを説明変数とした場合の重回帰分析結果

説明変数	範囲	偏回帰係数	標準偏回帰係数	判定	偏相関	単相関	決定係数
コンクリート中にモルタルが占める体積 (%)	60 - 75	0.664	0.512	1 % 有意	0.845	0.490	0.895
1/2 コーンによるモルタルフロー (mm)	142 - 351	0.068	0.809	1 % 有意	0.928	0.796	
定数項	—	-42.8	—	1 % 有意	—	—	

表5 コンクリートのスランプフローを目的変数とし、コンクリート中のモルタルの占める体積割合および1/2コーンによるモルタルフローを説明変数とした場合の重回帰分析結果

説明変数	範囲	偏回帰係数	標準偏回帰係数	判定	偏相関	単相関	決定係数
コンクリート中にモルタルが占める体積 (%)	60 - 75	12.36	0.401	1 % 有意	0.880	0.377	0.953
1/2 コーンによるモルタルフロー (mm)	142 - 351	1.796	0.901	1 % 有意	0.972	0.890	
定数項	—	-872.4	—	1 % 有意	—	—	

を目的変数とし、コンクリート中のモルタルの占める体積割合および1/2コーンによるモルタルフローを説明変数として、重回帰分析を行った。なお、モルタルの占める体積割合が60～75%、スランプが5 cm以上のコンクリートを対象とした。その結果、表4および表5に示すとおり、決定係数0.9程度の高い相関があった。また、モルタルフローの影響が顕著であり、コンクリートを目標のスランプまたはスランプフローに調整するためにモルタルフローを調整することが有効であることがわかった。

以上より、コンクリートのスランプおよびスランプフローには、主に1/2コーンによるモルタルフローおよびコンクリート中にモルタルが占める体積割合が影響している。特に1/2によるモルタルフロー

の及ぼす影響が大きいことから、碎石を使用する場合、コンクリートの流動性を考慮して、モルタルの占める割合を60～70%の範囲で決定し、1/2コーンを用いたモルタルフローを220 mm以下で調整すればスランプを5～25 cmの範囲で、またモルタルフローを220 mm以上で調整すればスランプフローを200～650 mmの範囲で的確に調整できることがわかった。ただし、上記の結果は、同一材料の場合に限られており、今後、水セメント比、材料特性の変化、混和材・混和剤の種類の影響等の観点からの検討が必要である。

5. 結論

使用骨材を川砂・碎石、水セメント比を30～45%

とした広範囲の流動性を持つコンクリートやモルタルのコーンを用いた試験値と、その中に占めるペーストおよびモルタルの体積割合や流動性との関係から、以下のことがわかった。

- ① モルタルフローに影響を及ぼす主な要因は、モルタル中に占めるペーストの体積割合、1/4 を用いたペーストフローおよび水セメント比である。特にペーストフロー、次いでペーストが占める体積割合が及ぼす影響が大きい。
- ② 川砂を用いる場合、水セメント比とモルタルの流動性を考慮して、モルタルに占めるペーストの体積割合 45～70 % の範囲で決定し、1/4 コーンを用いたペーストフローを 140～240 mm に調整すると、1/2 コーンを用いたモルタルフローを 100～500 mm の範囲で的確に調整できる。
- ③ コンクリートのスランプおよびスランプフローに影響を及ぼす主な要因は、コンクリート中にモルタルが占める体積割合および 1/2 コーンによるモルタルフローである。特に 1/2 によるモルタルフローの及ぼす影響が大きい。
- ④ 碎石を使用する場合、コンクリートの流動性を考慮して、モルタルの占める割合を 60～70 % の

範囲で決定し、1/2 コーンを用いたモルタルフローを 220 mm 以下で調整すればスランプを 5～25 cm の範囲で、またモルタルフローを 220 mm 以上で調整すればスランプフローを 200～650 mm の範囲で的確に調整できる。

以上より、上記の要因とその影響の大きさを考慮した手順により、使用材料が明確になっている場合、目標とするモルタルおよびコンクリートの流動性を合理的に調整できることがわかった。ただし、上記の結果は、普通ポルトランドセメント、川砂、碎石等限定された材料および条件の場合に限られており、実際の配合設計手法を検討するうえで、今後、材料特性の変化、混和材・混和剤の種類の影響等の観点からの検討が必要である。

参考文献

- 1) Powers, T. C. : Properties of Fresh Concrete, John Wiley & Sons, New York, pp. 282-288 (1968)
- 2) 日本建築学会：コンクリートの調合設計指針・同解説、pp. 10-11 (1999)
- 3) 三輪茂雄：粉体工学通論、日刊工業新聞社、pp. 48-49 (1981)

(2006年1月19日受付 2006年3月9日受理)