

論文 若材齢コンクリートの適用可能な応力測定方法の開発

赤井 洋満^{*1}・下村 匠^{*2}

要旨：コンクリート有効応力計が理想的に機能するための理論の再確認を行った結果、ケースの剛性および摩擦を低減することにより若材齢時の精度が向上する可能性があることがわかった。そこで理論どおりに精度が向上するように、低剛性のポリエチレンフォームと低摩擦のテフロンシートを用いてケースを作製し、これと軽量化ロードセルを組み合わせたコンクリート有効応力計（以下：低剛性型有効応力計）を試作した。低剛性型有効応力計の若材齢における測定精度の向上効果を調べるために、低剛性型有効応力計および現有効応力計を用いた比較実験を行った。

キーワード：コンクリート有効応力計，若材齢，低剛性，低摩擦，比較実験

1. はじめに

有効応力計は構造物中のコンクリートの応力を計測する機器であり、1980年代半ばに実用化され、永らく使われてきた。有効応力計は荷重検出器（ロードセル）と柱状部コンクリートが直列に配置されており、柱状部コンクリートはフェルト、ポラスシート、金網、フェルトを重ね合わせた板でできたケースに収められている。このような構造を持つ有効応力計は、理論的には、弾性係数が打ち込み後時々刻々と変化ある一定の精度を持ってコンクリートの応力を測定することができる。しかし、実際の測定精度に関しては、硬化後のコンクリートに対しては確認されているが、マスコンクリートの温度ひび割れに関連して使用実績の多い硬化途中のコンクリートに対しては十分な検証がなされていない。

このような背景から本研究では、有効応力計の測定原理の再検討を行い、有効応力計の柱状部コンクリートのケースの軸方向剛性による拘束作用およびケースと外部との摩擦に関する影響に関する実験を行った。その結果を、理論どおりに精度が向上するように、低剛性のポリエ

チレンフォームと低摩擦のテフロンシートを用いてケースを作製し、これと軽量化ロードセルを組み合わせた低剛性型有効応力計を試作し、その精度を検証した。

2. 基礎理論

2.1 有効応力計の構造

現在使用されている有効応力計のサイズはいくつもあるが、現場で多く使用されているタイプを例として図-1に示す。有効応力計はロードセルおよび柱状部から構成され、柱状部を形成するケースの材料は外側からフェルト、金網、ポラスシート、ろ紙となっている。フェルトは細かい綿状の素材であり、周辺部コンクリートとの摩擦の低減を目的として使用されている。金網はコンクリート打設作業や吹き付けコンクリートにも耐えて形状を維持する目的で使用され、有効応力計のケースの剛性を高める要因となっている。ポラスシートおよびろ紙は有効応力計内部と周辺部コンクリートとの水分移動を可能とするために使用されている。アンカーは端部において周辺コンクリートと一体させるために取り付けられている。

*1 長岡技術科学大学 建設工学専攻 修士 (正会員)

*2 長岡技術科学大学 環境・建設系助教授 工博 (正会員)

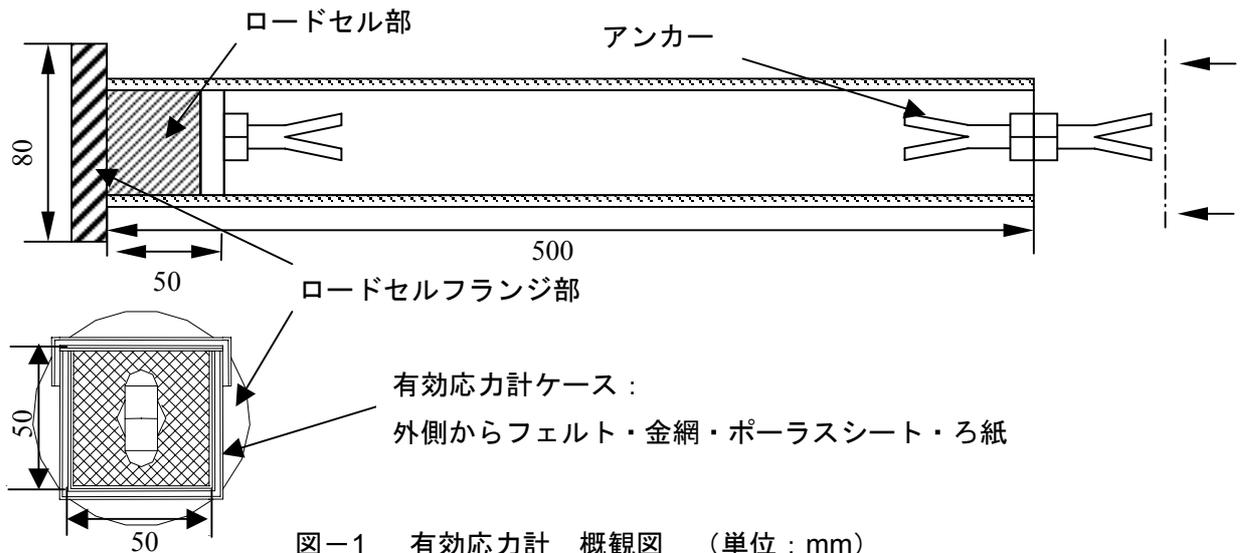


図-1 有効応力計 概観図 (単位: mm)

2.2 有効応力計が機能するための仮定

有効応力計が理想的に機能するためには以下の4つの仮定を満たす必要がある。

- 1) 有効応力計の両端は周辺部コンクリートと一体化している
- 2) 有効応力計ケースの軸方向剛性による拘束が無い
- 3) 有効応力計の設置される領域では有効応力計の空間スケール内での一様性が実現されている
- 4) 有効応力計の側面は周辺コンクリートとの縁切りが完全である

上記の仮定が全て満たされた時、有効応力計は、コンクリートの弾性係数の変化の影響、体積変化の影響を排除し、一定の精度をもって応力を測定することができる。一定の精度とは、たとえば、ロードセル部と柱状部の寸法比が1:10の有効応力計では、コンクリートの一様な体積変化の10%を有効ひずみ(すわなち応力)として誤検出する程度である。

2.3 ケースの剛性が精度に与える影響

図-2 にケースの剛性およびコンクリートの弾性係数が、体積変化が生じている時の有効応力計の応力測定精度に与える影響を示す。縦軸はコンクリートの体積変化を有効ひずみとして

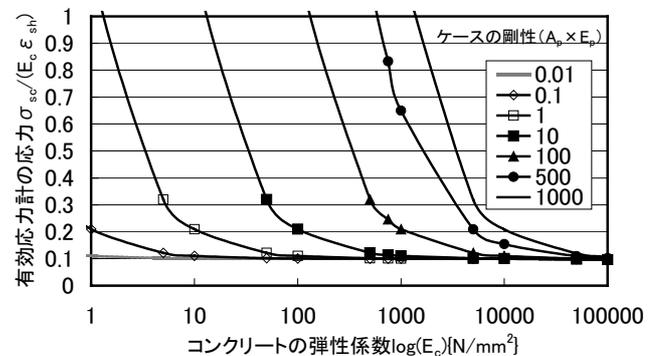


図-2 ケースの剛性が精度に与える影響

誤検出する割合を示しており、ゼロに近いほど正しい測定である。なお、ここにおけるケースの剛性とは相対剛性 $A_p \times E_p$ (A_p : ケースの断面積と有効応力計柱状部コンクリート断面積との比, E_p : ケースの軸方向弾性係数) である。縦軸のケースの剛性の大きさによらずコンクリートの弾性係数が高くなるに連れて有効応力計に導入される応力は小さくなる。現実的に取りえるコンクリートの弾性係数は若材齢時を含めると $500 \sim 30000 \text{ N/mm}^2$ 程度であるので、ケースの剛性が 1 N/mm^2 程度であれば影響はほぼ無いが、それ以上であると誤差を生じてしまう。

有効応力計のケースの剛性の影響はこれまで検討されていない。よって、実際にケースの剛性を測定し 1 N/mm^2 よりも大きい値ならば、ケースによる拘束が精度低下を招いている可能性があることになる。

3. 有効応力計ケースに関する検討

3.1 剛性に関する検討

有効応力計のケースの軸剛性は今まで報告されていない。そこで、大まかな軸剛性を推定するためにまず曲げ载荷による変位から曲げ剛性を求め（写真-1）、弾性ひりを仮定して軸方向剛性を求めた。次に、引張载荷によってもケースの軸剛性を求めた（写真-2）。測定はサイズ 20×20×200mm のケースと 50×50×500mm のケースを対象に行った。

表-1 にケースの弾性係数の測定結果および剛性 ($A_p \times E$) の計算結果を示す。

曲げ試験、引張試験による測定結果はほぼ一致した。測定の結果、ケースの剛性は 100~500 (N/mm^2) 近辺の値だと考えられる。一般的なコンクリートの弾性係数の値は、500~30000 N/mm^2 程度である。図-2 の検討結果より、ケースの剛性を 100 N/mm^2 と少なく見積もってもコンクリートの弾性係数が 1000 N/mm^2 の時点で誤差は 2 割程度である。ケースの剛性を 500 N/mm^2 と高く見積もるとコンクリートの弾性係数が 1000 N/mm^2 時点で誤差は 6 割以上となる。

以上の検討結果より、コンクリートの若材齢時の応力測定において現有効応力計のケースによる柱状部コンクリートの拘束は誤差の原因となっており、ケースの剛性を小さくすればコンクリートの若材齢時の精度が向上する可能性があるといえる。

3.2 摩擦に関する検討

有効応力計が理想的に機能するためにはケースの剛性だけでなく、ケースと外部のコンクリートとの摩擦も十分小さい必要がある。現行の有効応力計ケースの構成材料がコンクリートの

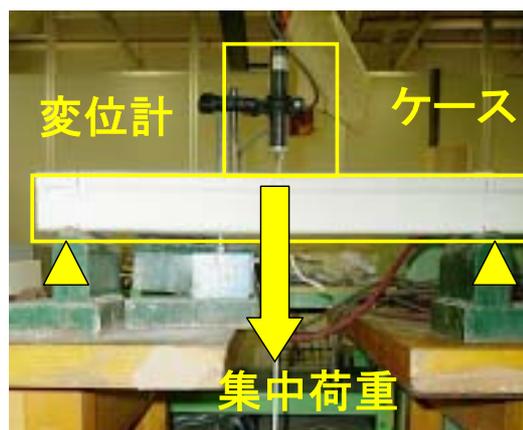


写真-1 ケース曲げ試験概要

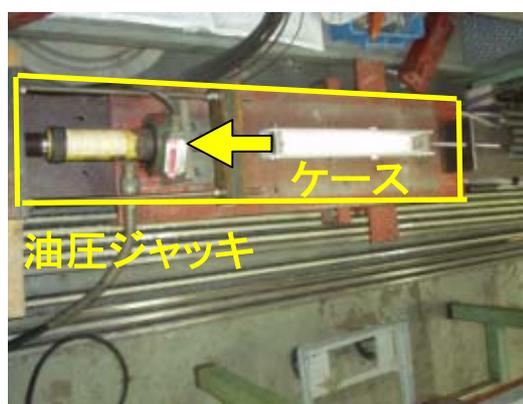


写真-2 引張試験

摩擦に与える影響を調べるために図-3 に示すような試験装置を作製し、自己収縮試験を行った。

試験は型枠の内側に現有効応力計ケース材料である、ろ紙、フェルト、金網を設置後、セメントペーストを型枠に打設、アルミテープにて密封し、両端部の変位を非接触変位計にて計測し、供試体の長さ変化率をひずみで表した。また、摩擦のきわめて小さい材料としてテフロンシートも試験した。表-2 に試験パターン、表-3 に試験に用いたセメントペーストの配合、図-4 に試験結果（打設後 1 時間を基点）を示す。現

表-1 弾性係数測定結果

		弾性係数E (N/mm^2)	有効応力計 ケース部断面積 (mm^2)	有効応力計 コンクリート部断面積 (mm^2)	相対断面積 A_p	$A_p \times E$ (N/mm^2)
20×20× 200mm	曲げ試験	478	334	400	0.84	399
	引張試験	671				560
50×50× 500mm	曲げ試験	1501	949	2500	0.38	570
	引張試験	1522				578

有効応力計材料である、ろ紙、フェルト、金網を用いた場合と比較して、テフロンシートを用いた場合の方が自己収縮が大きい結果となった。これは、テフロンシートが最も自己収縮を拘束していないことを示していると考えられる。したがって、ケースの表面をテフロンシートで覆うことにより、摩擦を低減し測定精度が向上する可能性がある。

4. 低剛性型有効応力計の試作

以上の検討より、有効応力計のケースに軸方向剛性の小さい材料を用い、摩擦の低減のために表面にテフロンを使用すれば、若材齢時における測定精度が高い有効応力計を作製できる可能性があることがわかった。そこでそのような要件に適う低剛性型有効応力計を試作した。サイズは実際の現場で最も多く使用されている 50×50×500mmのタイプと同じものを作製した。

新有効応力計のケース素材としてポリエチレンフォームを使用した。ポリエチレンフォームの剛性は非常に低く、かつ変形量が大きいため破

断しにくい。また、摩擦を低減するためにポリエチレンフォーム表面には厚さ 0.05mm のテフロンシートを貼り付けた。

作製した有効応力計ケースは柔らかいため、重いロードセルを支えることが難しい。そこで、現在使用されているロードセルに加えて、軽量型のロードセルを用いた場合（写真-3）の2種類の有効応力計を作製した。写真-4 に試作した有効応力計の写真を、図-5 に構造を示す。

5. 試作有効応力計を用いた比較実験

5.1 はじめに

試作した低剛性型有効応力計の精度を現有効応力計との比較実験によって検証する。

5.2 実験概要

表-4 に試験パターン、表-5 に実験に用いたコンクリートの配合表を示す。供試体は 5 体作製し、それぞれに現有効応力計、低剛性型有効応力計（現行のロードセル）、低剛性型有効応力計

表-2 自己収縮試験パターン

case	供試体寸法	設置材料	備考
case.1	40×40×100mm	テフロン	設置材料の厚さは各1mm
case.2		ろ紙	
case.3		フェルト	
case.4		金網	

表-3 セメントペースト

W/C	単位量(kg/m ³)			
	W	C	Ag	SP
25%	429	1765	0	12.4

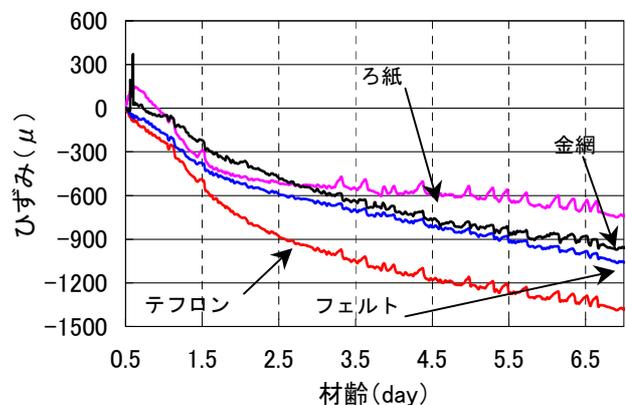


図-4 自己収縮試験結果

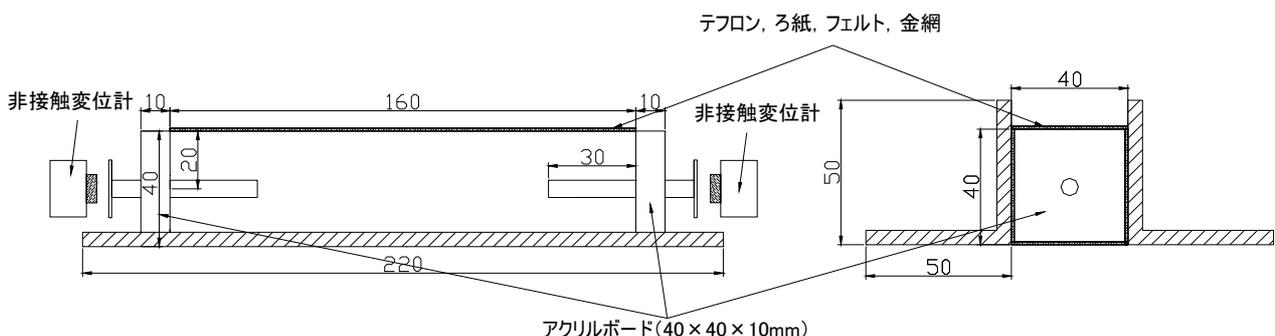


図-3 自己収縮試験型枠寸法（単位：mm）

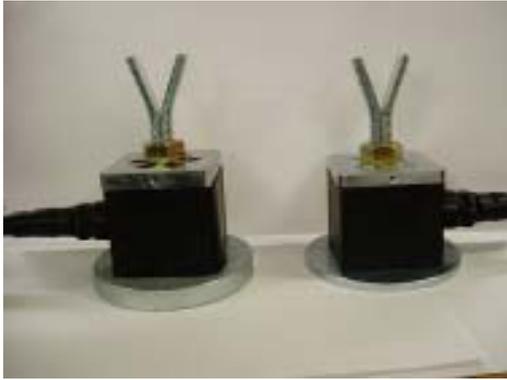


写真-3 現ロードセル（左）
軽量ロードセル（右）



写真-4 低剛性型コンクリート有効応力計

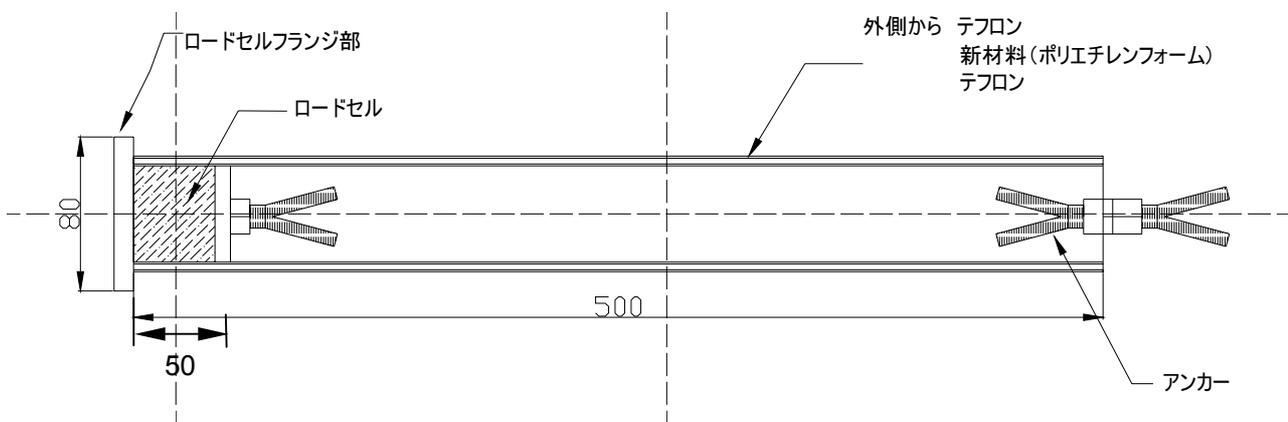


図-5 低剛性型コンクリート有効応力計概要（単位：mm）

計（軽量ロードセル）、ロードセル、埋め込みひずみ計を供試体中心部に埋設した。養生条件は全て同一とした。供試体内の温度勾配によって生じる内部拘束を無くすために厚さ 10cm の発泡スチロールを型枠に使用した。また、発泡スチロールと供試体の間には水分の出入りを防ぐためにラップを設置した。供試体内部の温度勾配の有無を確認するために、それぞれの供試体の中心部および型枠内側付近に熱電対を設置した。

5.3 実験結果

(1) 供試体温度

供試体中心部の最大温度は低剛性型有効応力計である供試体 No.2 および No.3 が他の供試体と比較して若干高い値となった。これは有効応力計のケースに用いたポリエチレンフォームの熱伝導率 (0.064W/(m・k)) が現有効応力計ケースの熱伝導率 (0.140~0.190 W/(m・k)) よりも

低いことによる断熱効果の影響と考えられる。また全ての供試体において同様な傾向の温度変化が生じ、発泡スチロールによる断熱効果が確認された (図-6)。

供試体毎の内部の温度差は供試体中心部と型枠内側付近の間で最大 0.6℃程度であった。このことにより供試体内部の温度差による内部拘束の影響は少なく、供試体にはほぼ一様な温度による体積変化が生じたと考えられる (図-7)。

(2) 応力測定結果

図-8 に応力の測定結果を示す。今回の試験は型枠として発泡スチロールを用いたため型枠の拘束および温度勾配による内部拘束、乾燥収縮の影響が少なく、供試体にはほぼ一様な温度変化による体積変化が生じたと考えられる。有効応力計は一様な体積変化を応力として検出しないことが理想なため、検出応力が 0 に近いほど精度が良いことを示している。今回試作した

表-4 試験パターン

供試体No.	計測対象	寸法(cm)	型枠および養生条件	備考
1	現有効応力計	20×20×100	発泡スチロール(10cm)による簡易断熱	発泡スチロールと供試体間にはラップを設置 供試体内部に温度測定用の熱伝対を供試体および型枠付近に設置
2	低剛性型有効応力計			
3	低剛性型有効応力計(軽量ロードセル)			
4	現ロードセルのみ			
5	埋め込みひずみ計			

表-5 コンクリート配合表

粗骨材の最大寸法 mm	スランブの範囲 cm	空気量の範囲 %	水セメント比 W/C %	細骨材率 s/a %	単位量[kg/m ³]						
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	AE剤	AE減水剤	SP
20	10	6	41	42.3	169	412	710	1029	0.0124	1.03	0

低剛性型有効応力計は、温度上昇時における誤検出応力が小さく、温度降下後に検出応力が0近辺に戻る傾向が得られている。

よって、試作した有効応力計の精度向上が確認できた。

6 結論

有効応力計の理論の再確認の結果、有効応力計ケースの軸剛性および摩擦の低減によって若材齢時の精度が向上することがわかった。また、ケースの剛性および摩擦を減少した低剛性型の有効応力計を製作し、現在の有効応力計との比較実験を行った結果、低剛性型有効応力計の精度向上を確認できた。

【謝辞】

本研究を行うにあたり、ご指示、協力して頂いた大学の先生方、コンクリート有効応力委員会のメンバーの皆様方に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書施工編(2002年度制定)，2002
- 2) 平川信之：RC巻き立て補強工法における膨張材のひび割れ抑制効果，長岡技術科学大学修士論文，2005

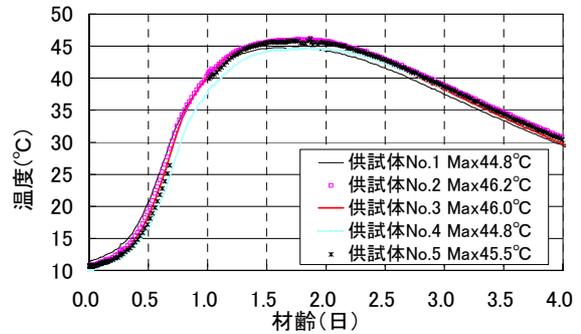


図-6 供試体中心部温度

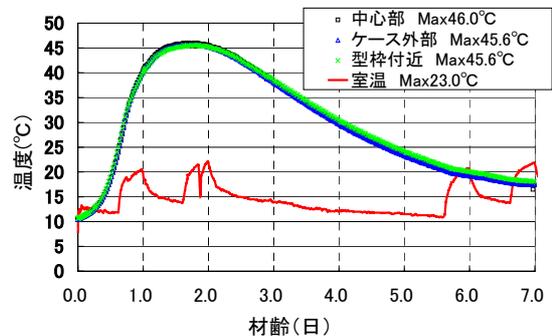


図-7 供試体 No.3 温度

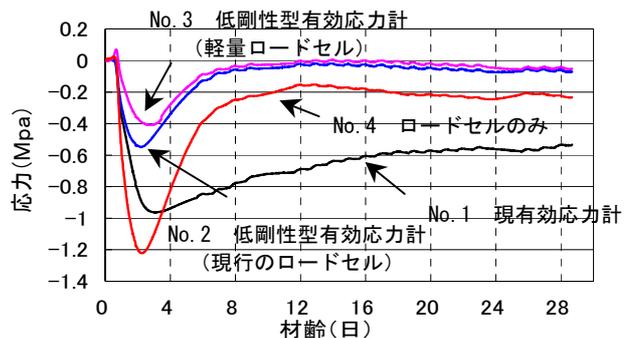


図-8 応力測定結果