

小径コアによるコンクリート部材の 現有応力測定法に関する試験研究

野永健二¹・伊藤 始²・佐原晴也³・清水秀樹⁴・関塚 真⁵

¹正会員 株式会社銭高組土木本部技術部（〒163-1024 東京都新宿区西新宿3-7-1新宿パークタワー24F）

²正会員 前田建設工業株式会社技術本部技術研究所（〒179-8914 東京都練馬区旭町1-39-16）

³正会員 日本国土開発株式会社技術研究所（〒243-0303 神奈川県愛甲郡愛川町中津4036-1）

⁴正会員 株式会社コミヤマ工業企画室（〒400-0067 山梨県甲府市長松寺町6-2）

⁵株式会社福田組技術部（〒951-8061 新潟県新潟市西堀通2番町778）

社会資本への投資余力の減少にともない、老朽化した施設の性能評価、維持管理ならびに再生に関する技術のニーズが増大している。供用中の既設コンクリート構造物の耐荷性能を評価する際、現在作用している応力（現有応力）を測定し把握する必要性が生じる場合も多々ある。この現有応力の測定法として、構造物の損傷を極力少なくするように配慮した小径コアを用いる方法を開発し測定を試みた。この方法は、長さ6mmの3軸ひずみゲージをコンクリート表面に貼付し、直径30mmの小径コアを抜き取る際のひずみ変化を連続的に測定し、コア抜取りに伴う開放ひずみから応力を求めるものである。測定に関する試験を行った結果、本方法による現有応力の測定が可能であることを確認し、実証データを蓄積している。

キーワード：小径コア、応力開放、3軸ひずみゲージ、応力計測、現有応力、ヤング係数

1. はじめに

社会資本への投資余力の減少にともない、老朽化した施設の性能評価、維持管理、再生に関する技術のニーズが増大している。たとえば、供用中の既設コンクリート構造物の耐荷性能を評価する際、現在作用している応力（現有応力）を測定する必要性が生じる場合がある。これに対して、応力が作用しているコンクリート構造物の表面にひずみゲージを貼付し、周辺を溝切り切断することによって解放応力を測定する方法が提案されている。しかし、温度差や乾湿差などによってコンクリート表面に通常存在する局所的なひずみの影響に対する方法などで、技術的に解明されていない部分もある。

コンクリート用には一般に長さ60mmのひずみゲージが使われるが、この場合、ゲージ周辺をコアリング切削するためにはφ100mm程度の径が必要となり構造物の損傷が大きい。そこで、構造物の損傷を極力少なくするために直径30mm以下の小径コア¹⁾で測定できるシステムの開発を試みた。

本方法は、長さ6mmの3軸ひずみゲージを貼付し、その周囲をφ30mmの小径コアビットでコアリングすることにより開放されるひずみを連続的に測定し、ひずみの測定結果から応力を求める方法である。本測定法のモルタル供試体への適用についてはすでに報告されているが²⁾、コンクリートに対する適用性はまだ確認されていない。

そこで、コンクリートに対する適用性に関する基

礎実験を行った結果、本方法により現有応力の測定が可能であることが確認できた。

本報告では、基礎実験の一部の内容を報告する。

2. 試験概要

(1) 試験体の作製

図-1に、コンクリート試験体を示す。試験体は450×250×1,000mmの直方体である。φ32mmのPC鋼棒の緊張により、軸方向の応力を導入した。

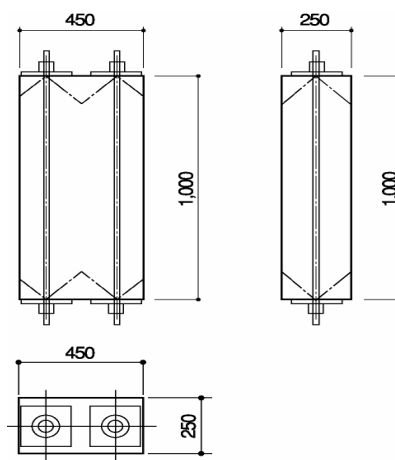


図-1 試験体全体図



写真-1 型枠および配筋の状況

写真-1 に、型枠および配筋の状況を示す。PC鋼棒の定着部は鉄筋補強を行い、PC鋼棒の位置にシースを配置した構造とした。

表-1 に、コンクリートの配合条件を示す。早強ポルトランドセメント、粗骨材の最大寸法20mmの碎石を使用し、配合強度24N/mm²、スランプ値12cmの配合とした。

(2) ひずみゲージの配置および試験体への载荷

写真-2 に、ひずみゲージの貼付状況を示す。試験体への载荷時のひずみを測定するために30mmゲージ10枚と60mmゲージ2枚を、部材長手方向中央部4面に無载荷状態で貼付した。

試験体中央にはコアリングによる解放ひずみを測定する3軸ひずみゲージユニットを貼付した。写真-3 に示すような垂直方向、水平方向および45°方向のひずみを測定できる長さ6mmの3軸ゲージと温度ゲージをユニット化したもので、市販の3軸ゲージと温度ゲージをコネクターに取り付くよう加工試作したものである。

ひずみゲージを貼付した試験体を、試験装置に固定した後、双方の鋼棒に緊張用油圧ジャッキにより500kNの緊張力を導入した。なお、緊張力（圧縮力）は試験体と固定ナットの間に設置したロードセルにより測定した。

(3) コアリングによる開放ひずみの測定

図-2 に示したコアリング装置は実験用に用いたもので、作業の全過程におけるひずみを連続的に測定できる特殊なものであり、山梨大学平嶋研究室等で試作改良されたものである。

各ゲージの初期値を測定した後、3軸ひずみゲージユニットの外周をコアリングした。写真-4 および写真-5 に、コアリングの状況を示す。コアリングは刃口の切削熱を水冷しながら行い、切削1mm毎にコア表面部のひずみおよび温度の変化を連続的に測定した。

写真-6 に、採取したコアを示す。コアリングの深さは、採取後のコアで弾性係数を測定するために、直径の2倍の60mm以上とした。

写真-7 に、圧縮強度および弾性係数の測定状況を示す。採取したコアは圧縮強度試験用供試体として成形し、圧縮強度および弾性係数の測定を行った。

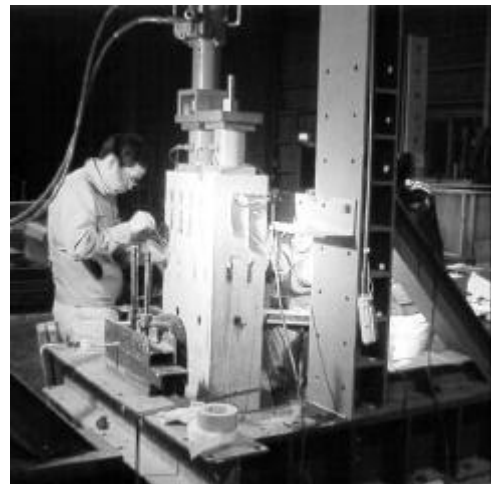


写真-2 ひずみゲージの貼付状況

表-1 コンクリートの配合条件

早強セメント使用	
配合強度	24 N/mm ²
Gmax	20mm
スランプ	12 cm
空気量	4.5%



写真-3 3軸ひずみゲージユニット

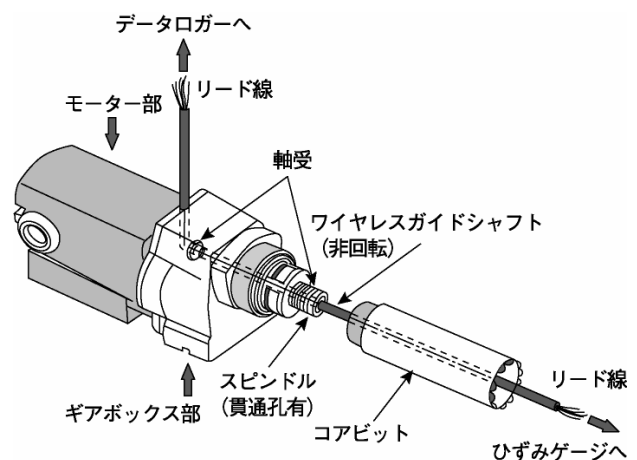


図-2 実験用コアリング装置



写真-4 コアリングの状況



写真-5 コアリングの状況 (完了時)



写真-6 取り出したコア

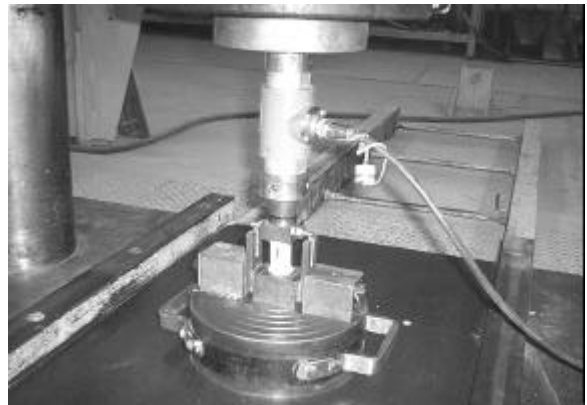


写真-7 コアの弾性係数測定状況

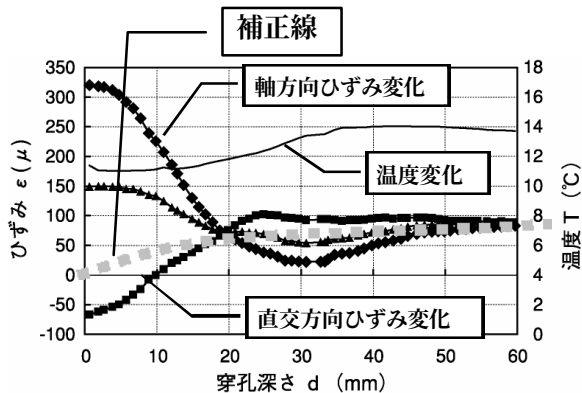


図-3 ひずみ測定結果の一例

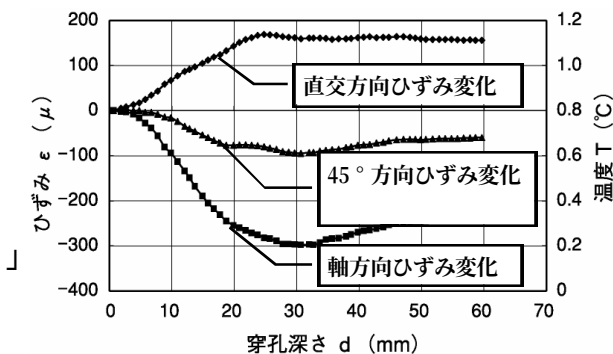


図-4 実構造物でのひずみ測定のパターン

3. 試験結果例とその考察

(1) 測定ひずみ

図-3に、ひずみの測定結果の一例を示す。

穿孔開始時の鉛直方向（载荷方向）が 320μ 、水平方向（载荷方向の直交方向）が -67μ 、 45° 方向が 149μ である。周辺に配置したひずみゲージで測定した平均ひずみは約 300μ であり、穿孔開始時の鉛直方向ひずみの測定値は、周辺のひずみ測定値により約7%大きい値を示した。

穿孔深さ18mm付近で3軸のひずみが約 70μ で交差し、その後変動しながら穿孔深さ60mm付近で3軸の各ひずみとも 85μ 付近で収束した。鉛直方向に解放されたひずみだけに着目すると 235μ で载荷による平均ひずみの78%となり、0値に戻っていない。そこで、载荷による水平方向の応力成分が無いものとして、収束値である約 85μ の収縮ひずみ成分を鉛直方向の開放ひずみに加算して補正すれば 320μ となり、穿孔開始時のひずみと同じになる。このことは、開放ひずみを求めるには、測定値に何らかの補正が必要であることを示唆しているとも考えられる。

その他の測定においてもばらつきはあるものの3軸の各ひずみがある値に収束するという同様の傾向が認められた。

図-4に、実構造物での測定ひずみのパターンを示す。測実構造物での測定は、既に応力の存在する

状態で測定ゲージを貼付するので、穿孔開始時のひずみは、3軸方向すべて0 μ となり、測定ひずみは図-4のような変化をすることから、応力開放によるひずみを求めるためには、図-3に示されるひずみの収束点が生じるメカニズムを解明する必要がある。

(2) 測定ひずみの補正

図-4でみると、荷重の作用していない水平方向の解放ひずみは165 μ 、载荷している鉛直方向の解放ひずみが230 μ である。

一軸応力状態を仮定して、応力開放によりひずみを求めるために測定ひずみの補正を試みる。

a) 補正方法

まず、平面応力状態においては以下の関係が成り立つ。

$$\Delta s_x = \frac{E}{1-n^2} (\Delta e_{xe} + n \cdot \Delta e_{ye}) \quad (1)$$

$$\Delta s_y = \frac{E}{1-n^2} (n \cdot \Delta e_{ye} + \Delta e_{ye}) \quad (2)$$

$$\Delta t_{xy} = \frac{1}{2} \cdot \frac{E}{1+n} \cdot \Delta g_{xy} \quad (3)$$

ここに、

- σ_x : X軸方向応力度
- σ_y : Y軸方向応力度
- τ : せん断応力度
- ε : ひずみ
- γ : せん断ひずみ
- Δ : 増分量
- E : ヤング係数
- ν : ポアソン比
- e : 添え字、弾性（有効）ひずみ
- o : 添え字、全（測定）ひずみ

ここで、削孔されるコアは、等方性をもつと仮定すると以下の式が成り立つ。

$$\Delta e_{xe} = \Delta e_{x0} - e_{sh} \quad (4)$$

$$\Delta e_{ye} = \Delta e_{y0} - e_{sh} \quad (5)$$

ここに、

ε_{sh} : 载荷による弾性ひずみ以外のひずみ（収縮ひずみ）

一軸応力状態を仮定すれば、下式が成立する。

$$\Delta s_y = 0 \quad (6)$$

$$\Delta t_{xy} = 0 \quad (7)$$

式(4)および式(5)を式(2)に代入し、式(6)の仮定を用いると ε_{sh} は式(8)から求められる。

$$e_{sh} = \frac{1}{1-n} \cdot (n \cdot \Delta e_{x0} + \Delta e_{y0}) \quad (8)$$

また、式(4)および式(5)を式(1)に代入すると、式(9)が得られる。

$$\Delta s_x = \frac{1}{1-n^2} \cdot \{ \Delta e_{x0} - e_{sh} + n \cdot (\Delta e_{y0} - e_{sh}) \} \quad (9)$$

b) 補正結果

表-2に、実験より得られた測定ひずみを示す。

表-3に、上述の方法による補正後のひずみを示す。ポアソン比は、0.18とした。

载荷による弾性ひずみ以外のひずみ ε_{sh} は-105 μ である。補正後の载荷方向の解放ひずみ ε_{xe} は335 μ となり、60mmゲージで測定した穿孔前の平均ひずみ325 μ とほぼ同じ値となった。载荷方向に直交する方向のひずみは、ポアソン比分のひずみ解放量として-60 μ となった。

表-2 測定ひずみ

载荷方向		直交方向	
開始時	収束時	開始時	収束時
ε_{x1}	ε_{x2}	ε_{y1}	ε_{y2}
-245	-15	60	-105

表-3 補正後のひずみ

载荷方向	直交方向		载荷方向	直交方向
全ひずみ	全ひずみ	収縮	弾性	弾性
増分量	増分量	ひずみ	ひずみ	ひずみ
ε_{x0}	ε_{y0}	ε_{sh}	ε_{xe}	ε_{ye}
230	-165	-105	335	-60

(3) FEM数値解析によるシミュレーション

試験により開放したひずみの挙動を数値解析で確認するシミュレーションを行った。試験モデルに合わせたFEMモデルを作成し、コアリングの穿孔深度毎のステップモデル解析である。

理想的には試験体全体をモデル化できれば良いのであるが、解析を簡素化するためにいろいろ試みて、最終的にもっとも簡素化すると、コア1/4モデルで解析できることがわかった。全体モデルに近いモデル解析も比較できるよう、全体を対称半分割りした形状の半断面のモデル解析も行った。

比較した意味は、簡素化したコア1/4モデルでも充分検討できることを確認したということである。

a) 計算条件

FEM解析の条件は下記の通りである。

- 1) 使用プログラム FEMLEEG
- 2) 部材弾性係数 $E=2.8E+4N/mm^2$
- 3) ポアソン比 $\nu=0.1667$
- 4) 線膨張係数 $1.0E-5/^\circ C$
- 5) ゲージモデル 5mm
- 6) 载荷荷重 9.8 N/mm²

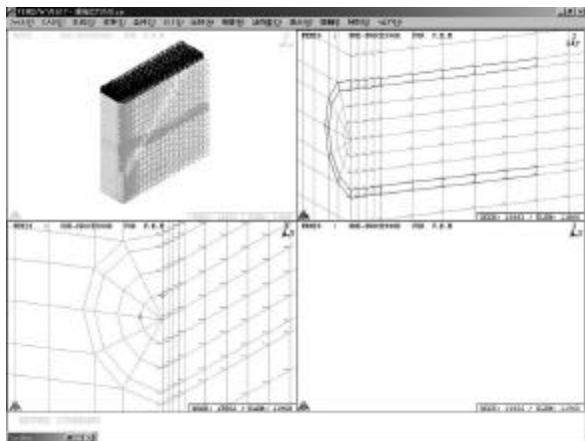


図-5 試験体半断面モデル

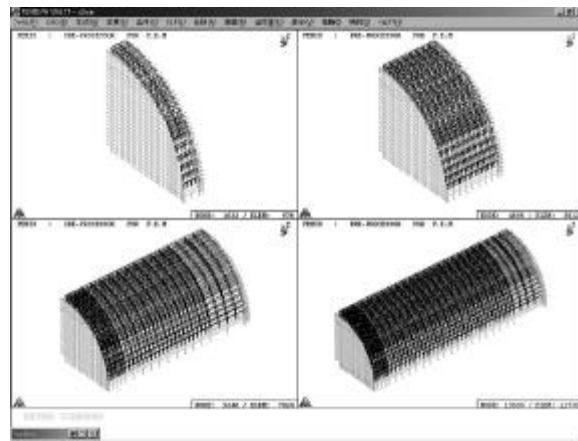


図-6 コア1/4モデル

b) モデル化

1) 試験体半断面モデル

図-5に試験体半断面モデルを示す。

このモデルはコア周辺構造も含めたもので、コア中心部を通る縦の面で2分割し、分割面の左右が対称に変形するものとしてモデル化した。

下端接点が固定の条件で、上端面に圧縮方向の荷重 9.8 N/mm^2 を载荷した。

計算ステップを穿孔深度で 0.0mm , 2.5mm , 5.0mm , 7.5mm , 10mm , 20mm , 30mm , 40mm , 50mm , 60mm の10ステップとし、ステップごとに順次コアと試験体の境界に対応する要素を取り外しながら計算を行い、コア表面中心付近における長さ 5mm の要素のひずみを、各ステップのひずみとして求めた。

2) コア1/4断面モデル

図-6に、コア1/4断面モデルを示す。モデルを簡素化するために、切り出される各ステップのコア中心部で交差する縦横で4分の1に分割したモデルである。縦分割面はX方向拘束、水平分割面はY方向拘束、中心線部はXY拘束、コアモデル背面はXYZ方向拘束として、コア切断面である曲面の上方からの投影方向に 9.8N/mm^2 荷重を载荷した。半断面モデルと同様に、穿孔深度が 0.0mm , 2.5mm , 5.0mm , 7.5mm , 10mm , 20mm , 30mm , 40mm , 50mm , 60mm の10ステップで計算し、中心付近表面における長さ 5mm の要素のひずみを、各ステップのひずみとして求めた。

c) ひずみ計算結果

図-7に、試験体半断面モデルでのひずみ計算結果を示す。図-8に、コア断面1/4モデルでのひずみ計算結果を示す。载荷方向(Y方向)の解放ひずみは、試験体半断面モデルで 350μ 、コア1/4断面モデルで 320μ である。ひずみ変化の状況も両モデルでほぼ同様であり、コアリング時のひずみの変化状況をコア1/4断面モデルでも十分にシミュレーションできることがわかる。

シミュレーションした意味は、試験測定で連続的に変化した曲線形状がFEM数値解析で説明できるか確認したもので、測定の都度のFEM数値解析が必要としたものではない。

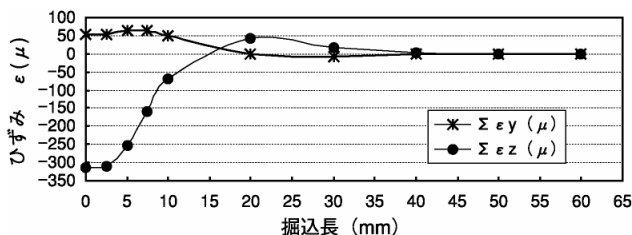


図-7 試験体半断面モデルでのひずみ計算結果

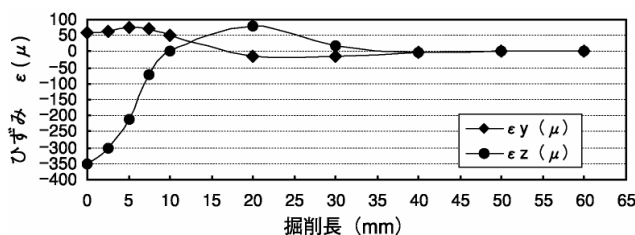


図-8 コア1/4モデルでのひずみ計算結果

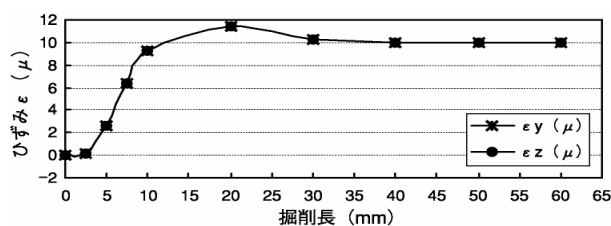


図-9 コア部分が+1°C変化したときの
コア断面1/4モデルでのひずみ曲線

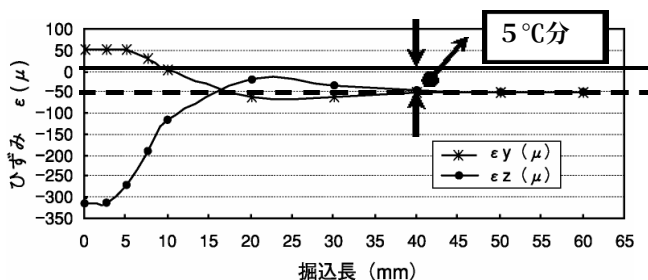


図-10 コア部分が+5°C変化したときの
コア断面1/4モデルでのひずみ曲線

d) 温度ひずみ合成計算結果

図-9に、コアの切削深さに応じて突出する部分が $+1^{\circ}\text{C}$ 変化した時のひずみ変化をコア断面1/4モデルでのひずみ変化曲線で示す。図-10では、コア切り出し時の冷却水によりコア突出部分が冷えたとき、その温度降下量として -5°C の温度差が生じ場合のひずみ変化図を示す。ひずみ曲線が正負逆に表示されているが、前掲の図-3に示した実測結果と類似したひずみ変化となっている。このことから、応力解放に伴うひずみは、測定されたひずみから、収束値を用いて補正して求めることができることがわかった。コア軸に対して収縮するか膨張するひずみ変形は、局所的な温度変化や乾湿差などによって発生すると思われる、

4. 試験および解析結果のまとめ

一軸応力状態のコンクリート角柱試験体を用いた小径コアによる現有応力測定法に関する基礎実験の結果は、以下のとおりである。

- (a) 3軸方向のひずみは、コアリング終了時に一定値に収束する傾向がある。
- (b) ひずみの収束値を用いて測定値を補正することにより、応力解放によるひずみを求めることが可能である。

以上のように、コアリング時のひずみ変化を3軸ひずみゲージにより連続測定することにより、応力開放によるひずみを求められることが確認できた。

表面に発生するひずみのうち、温度変化、冷却水浸水、内外湿乾差、内外温度差などのそれぞれの成分は、明確に特定できないが、収束ひずみ成分として補正する方法で精度をあげることが出来ることがわかった。

5. 試験等より実用化を進めている技術の概要

試験研究結果を踏まえて、さらにゲージ貼付方法やコアリング装置の改良(写真-8)などを進め現在は実用普及に向けて取り組みを行っている。ゲージも市販のリード線付き6mm 3軸ゲージを使えるようにしている。データを蓄積して精度をさらに高める必要があるが、現在は、通常2割程度の範囲で誤差を伴う計測データについて、誤差の影響を少なくするために3~4本の測定値を平均することで、実用上問題のない精度をあげるようにしている。

これまで測定が難しかった老朽化したPC桁の残存プレストレス応力測定や、トンネル覆工コンクリート応力測定、背面作用土圧が不明な擁壁の応力測定などのニーズに適用のできるものである。現在の技術の特徴を列記すると、以下のようになる。

- (a) 直径25mm・30mm、深さ50mm~60mmの小径コアを採用し、構造物の損傷が極めて少ない。
- (b) 3軸ひずみゲージ(6mm)と熱電対をコンクリート表面に貼付し、オーバーコアリングしながらひずみ変化を連続的に測定し、その解放ひずみから応力を求める。測定中のリード線脱着の必要がないため、測定時の異常発生も測定可能である。

(専用コアリング装置使用)

- (c) 測定後にコアを採取し、ヤング率を測定することも可能である。
- (d) コンクリート部材内部との温度差や乾湿差などから部材表面に存在する残留ひずみを補正し、精度を向上させている。

本測定法では、コンクリート表面に貼付けしたゲージおよび熱電対からのリード線をコアビット内を貫通させる形式を採用しているため、特別に製作したドリルが必要となるが、穿孔作業は通常と同様の方法で行うことができる。

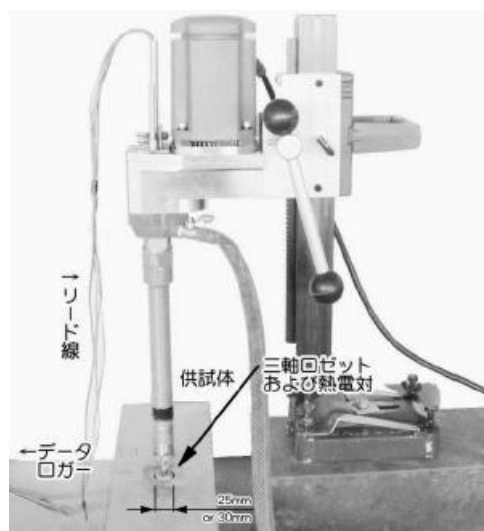


写真-8 改良コアリング装置

6. おわりに

なお、本研究は、錢高組・前田建設工業・日本国土開発・コミヤマ工業・福田組の5社共同で実施したものである。

本研究の最初の実施にあたっては、山梨大学平嶋教授をはじめ平嶋研究室の皆さんにもご指導、ご協力を頂いた。付記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 寺田謙一、谷川恭雄、中込 昭、佐原晴也：小径コアによる構造体コンクリート強度の推定法、コンクリート工学、Vol.39, No.4, 2001
- 2) 種 健 他3名、構造物表面及びその近傍の現有応力の継続的測定法、土木学会関東支部講演概要集III-58, 2
- 3) 野永、深沢、伊藤、佐原、関塚、平嶋、小径コアによるコンクリート部材の現有応力測定法に関する試験研究、土木学会第57回年次学術講演会(VI-216)
- 4) 磯、寺田、中込、千野、吉田、久保倉、小径コア供試体のひずみ計測に関する一考察、建築学会大会概要集、2002.9