

コンクリート構造物の現有応力の連続的計測法

種 健¹・鈴木拓雄²・深沢且典³・清水秀樹⁴

¹学生会員 工修 山梨大学大学院学生 工学研究科社会・情報システム工学専攻
(〒400-8511 山梨県甲府市武田4-3-11)

E-mail:tane@ccn.yamanashi.ac.jp

²正会員 教修 山梨大学助手 工学研究科自然機能開発専攻 (〒400-8511 山梨県甲府市武田4-3-11)

³株式会社コミヤマ工業 企画室構造技術課 (〒400-0067 山梨県甲府市長松寺町6-2)

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

現在、構造物の劣化状況や健全度を診断するために目視による検査や打音検査等が行なわれている。構造物の維持・管理にあたっては、その劣化要因および状態を把握するために、種々の検査結果を総合して判断を下す必要があるが、この中で力学的な状態を現位置で把握して対策をとるケースは稀である。とりわけ現有応力・ひずみを計測することは検査項目としては認知されていないが、これらの値は構造物の力学的な状態を把握する場合の基礎資料の一つに位置付けられるものである。

本論文では、既往の現有応力計測法の概要について言及しているほか、これらの方法の問題点を解決した新しい現有ひずみ計測法を提案している。

Key Words : *overcoring method, residual stress, solid materials, concrete structure*

1. 緒言

近年、トンネル覆工剥落事故を契機にコンクリート構造物の劣化が社会的問題として注目されるようになり、あらためてコンクリート構造物等の維持管理への配慮が極めて重要な問題であると認識されるようになった。

土木学会コンクリート標準示方書¹⁾においても、それまで指針であった維持管理について、性能照査型の示方書体系の整備を目標として新たに「維持管理編」が制定された。この中では、コンクリート構造物の性能の維持を目的とした管理計画を遂行するために、診断のための点検が不可欠とされている。

そのための検査法として非破壊検査法への関心が高まりつつあり、日本コンクリート工学協会からは「コンクリート構造物の診断のための非破壊試験方法研究委員会報告書」²⁾が発表された。また、大津はこの報告書の内容を参考に、コンクリート構造物

の非破壊検査法について、最新の動向をとりまとめて解説している³⁾。

一方、コンクリート構造物の補修や補強の必要性を検討するために、部材に実際に発生している応力を把握することも重要な問題であり、構造物等の応力計測の研究が盛んに行なわれている。あらかじめ内在する応力は残留応力と呼ばれるが、本研究では供用下の構造物などで実際に発生している応力を対象とすることから、残留応力と区別する意味で「現有応力」と呼ぶ。応力計測の方法としては、岩盤計測の分野で歴史のある応力解放法⁴⁾に基づくものが多く、例えば、コンクリート構造物を対象とした樋口らの研究⁵⁾や加藤らの研究⁶⁾、大深度地下の岩盤を対象とした石島らの研究⁷⁾を挙げることができる。

ただし、以上の方法では、計測結果に対する誤差評価の問題が必ずしも十分には取り扱われていない。また、計測対象が構造物の場合にはできるだけ損傷を与えないように、小口径のコアリングを行なうこ

とが望ましいと思われるが、加藤らの方法ではコアリングの直径が100mmと大口径であった。

本論文では、小径コアリングによって、表面を有する固体材料や構造物等に与える損傷を必要最小限に抑え、かつ、穿孔中の不慮の誤差発生を即座に把握できる現有ひずみ計測法を提案する。

2. 使用機材

(1) 応力解放用ドリルカッター

本論文では、穿孔作業とひずみの計測作業を同時に、かつ、連続的に行なうことができる特殊な応力解放用ドリルカッターを提案しており、その概念図を図-1に示す。この装置は、既製品のコアドリルのスピンドルに対して貫通孔を設け、コアビット内部に設置されたひずみゲージのリード線をこの貫通孔を介してコアドリルの外部に引き出せる構造としたものである。

したがって、穿孔中の任意の時点で現有しているひずみの計測が可能であり、解放ひずみの挙動を確認しながら穿孔できる特徴がある。このことから、提案した手法を連続的応力解放法と呼び、既往のものとは区別する。

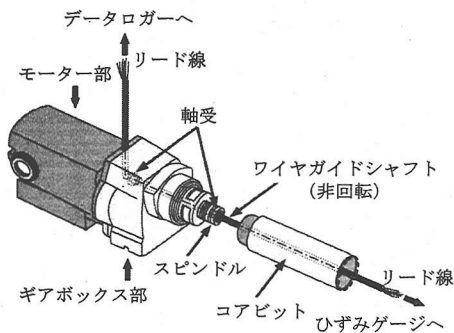


図-1 応力解放用ドリルカッター

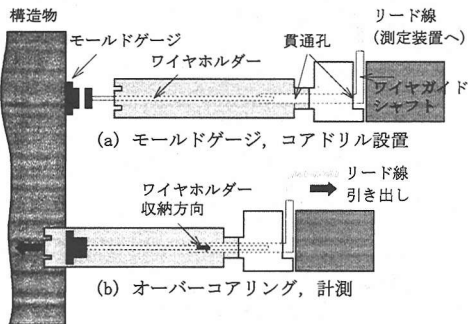


図-2 現有ひずみの計測方法

図-2には、計測手順を示す。(a)図はひずみゲージとドリルの貫通孔との位置関係を示したものであり、(b)図はオーバーコアリングに伴ってワイヤホルダーがワイヤガイドシャフト内に収納され、リード線が引き出される様子を示している。

(2) モールドゲージ

コンクリート構造物やトンネル等、計測対象物に対して連続的応力解放法を適用する場合には、一連の作業の効率化を図ることが極めて重要になる。この目的を達成するためには、まず、設置したひずみゲージや温度ゲージの防水作業等を簡素化する必要がある。図-3に示すモールドゲージを製作した。

モールドゲージを利用することによって、一箇所あたりのリード線の結線作業やゲージの防水作業を数秒程度に短縮できるようになった。なお、モールド

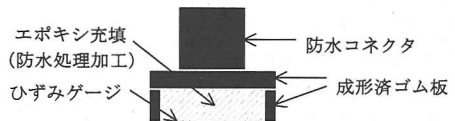


図-3 モールドゲージの概念図 (断面図)

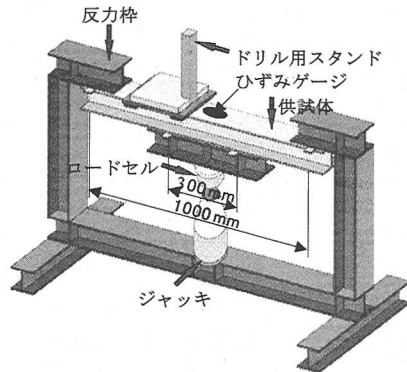


図-4 鋼材の載荷試験用反力枠

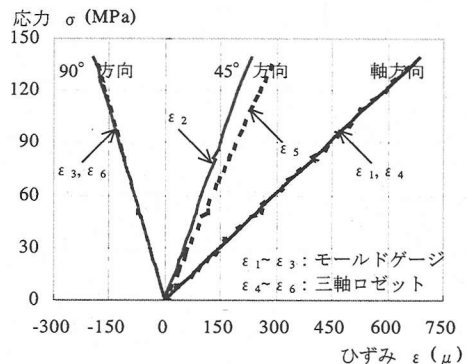


図-5 モールドゲージの機能確認試験結果

ドゲージの性能確認を行なう必要があるため、H型鋼材を対象に荷重試験を実施した。H型鋼材は図-4に示す4点曲げ構造となっており、荷重により曲げモーメントが一定の支間中央部にモールドゲージと通常の三軸ロゼットゲージが設置されている。

性能確認の結果を図-5に示した。同図から軸方向と90°方向の挙動はモールドゲージとロゼットゲージでよく一致していることが分かる。一方、45°方向においては両者で約20%異なっているが、解析的には軸方向と90°方向との二分点に位置すべきであるから、今回はむしろモールドゲージが正しい値を示しているものと考えられる。したがって、モールドゲージの使用は可能と判断した。

3. モルタル供試体での計測例

応力解放法をコンクリート構造物に適用する場合の問題は、コンクリート内部の鉄筋や粗骨材がひずみ場に影響をもたらすことにある。樋口らの研究⁵⁾は、ひずみ場の擾乱のほとんどがコンクリート内部の粗骨材の影響によるものであり、最大で約20%の計測誤差が発生するとしている。

ここでは、このような計測誤差を回避するために図-6に示したモルタル供試体を対象として現有ひずみの計測を行なった。

モルタルは均質性では鋼材よりも劣るが、ここで使用するゲージ長からすれば、ほぼ均質性のある材料であると思われ、かつ、応力解放時の温度上昇を抑えることができるため、計測結果に温度補正を加える必要がない点で優れていると考えられる。供試体には、W/C=36%、C/S=1.0のプレミックスタイプの材料を使用した。材齢28日での圧縮強度は約60N/mm²である。

また、モルタル材料の細骨材の最大寸法が3mm未満であったことから、細骨材寸法の三倍程度を有するゲージ長10mmの三軸ロゼットゲージと温度ゲージにより図-3のモールドゲージを作製し、設置は図-6のとおりとした。モールドゲージのチャンネル配置は、三軸ロゼットゲージの鉛直軸、水平軸および45°方向をそれぞれCH.1,2,3、温度ゲージをCH.4とした。これとは別に、荷重状態を確認するための一軸ゲージ(CH.5~8)も供試体の4点に設置した。表-1に設置したひずみゲージあるいは温度ゲージの詳細を示す。

供試体に一様荷重がなされていることを確認し、φ52の小口径コアにて現有ひずみの計測を行なった

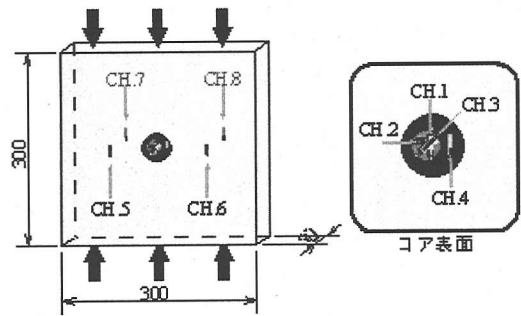


図-6 モルタル供試体 (1:10, 単位:mm)

表-1 モルタル供試体に設置したゲージ

用途	設置面	CH.	種類	計測方向
現有ひずみ計測	前面	1	三軸 (10mm)	鉛直軸
		2		水平軸
		3		45°
		4	温度	—
一様荷重確認	前面	5	一軸 (10mm)	鉛直軸
		6		
	背面	7		
		8		

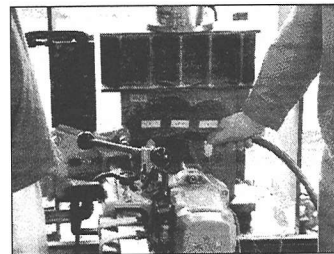


図-7 モルタル供試体での現有ひずみの計測状況

ときの写真を図-7に、計測結果を図-8に示す。なお、図-8以降は圧縮を正としている。図-8から、一様荷重時には鉛直軸、水平軸および45°方向にそれぞれ470μ、-160μおよび170μのひずみが発生していたのに対して、現有ひずみ計測を行なった場合の結果はそれぞれ500μ、-150μ、210μであった。すなわち、モルタル供試体を対象とした場合には計測結果が圧縮側に過大評価される傾向にあり、オーダーとして鉛直軸、水平軸方向に約6%増、45°方向に約20%増となっている。同様の計測を数回試みたが、このような傾向に変化は見られなかったことから、何らかの特定の要因が計測値として現れているものと考えられる。

そこで、前述したモルタル供試体の力学荷重を取

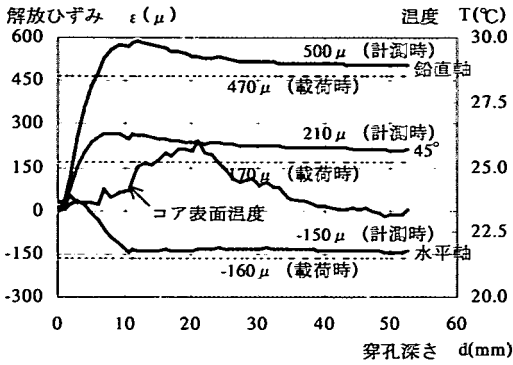


図-8 モルタル供試体での計測結果 (載荷状態)

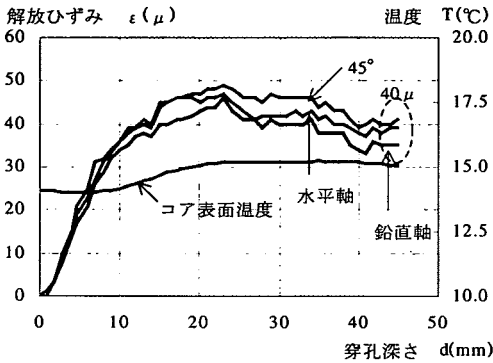


図-9 モルタル供試体での計測結果 (無載荷状態)

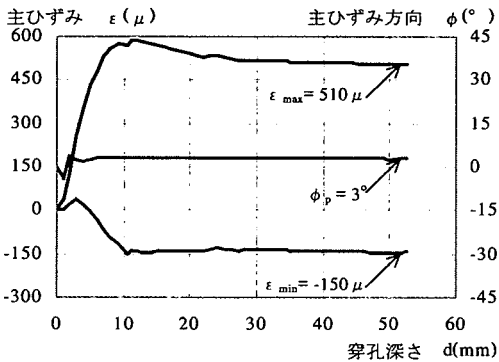


図-10 モルタル供試体での主ひずみ等算定結果

除いた状態 (すなわち無載荷状態) で現有ひずみの計測を行なった場合の結果の一例を図-9 に示す。

この場合、無載荷状態のモルタル供試体には、計測方向に関係なく平均して約 40 μ の圧縮ひずみが現有する結果が得られたほか、同様の数回の計測によっても数十 μ の圧縮ひずみの現有が確認された。

これは、先に述べた一樣載荷状態にあるモルタル供試体に対して、計測を試みた場合に発生するひずみの過大評価分と同程度であった。したがって、力学荷重以外の何らかの特定の要因で供試体表面に現

有していたひずみを、無載荷状態での計測を通して除去することができると考えられるが、詳細な検討は今後の課題としたい。

最大主ひずみ ϵ_{max} 、最小主ひずみ ϵ_{min} および最大主ひずみの方向角 ϕ_p は次式によって計算される。

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_{max} &= \frac{1}{2}[(\epsilon_1 + \epsilon_2) + \sqrt{2\{(\epsilon_1 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2\}}], \\ \epsilon_{min} &= \frac{1}{2}[(\epsilon_1 + \epsilon_2) - \sqrt{2\{(\epsilon_1 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2\}}], \\ \phi_p &= \frac{1}{2} \tan^{-1} \{2\epsilon_3 - (\epsilon_1 + \epsilon_2) / (\epsilon_1 - \epsilon_2)\}. \end{aligned} \right\} (1)$$

ここに、 ϵ_1 、 ϵ_2 および ϵ_3 はそれぞれ鉛直軸、水平軸および 45° 方向のひずみ成分である。そして、 ϕ_p は図-6 の CH.1 のひずみゲージ (鉛直軸) から反時計回りを正として求められており、 $\epsilon_1 < \epsilon_2$ の場合には式(1)の計算結果に 90° を加えればよい。

図-10 は、一樣載荷状態にあるモルタル供試体の計測結果 (図-7) から、計測点における ϵ_{max} 、 ϵ_{min} および ϕ_p を式(1)により計算し、穿孔深さを横軸にとって図示したものである。同図から、 ϕ_p がほぼ鉛直軸 (載荷軸) 方向となっていることが分かる。

また、穿孔深さと応力解放率との関係を見るために、有限要素解析ソフト Lusas を使用して数値計算も行なった。メッシュ分割の一例として、図-11には穿孔深さ $d=24\text{mm}$ の場合の、対称性を考慮した 1/4 のモデルを示す (要素数は 7872)。境界条件としては図-11の底面に対して縦方向の拘束を、左側面に

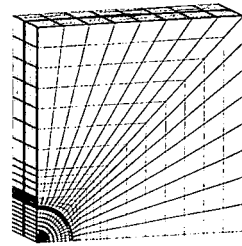


図-11 メッシュ分割の一例 (穿孔深さ $d=24\text{mm}$)

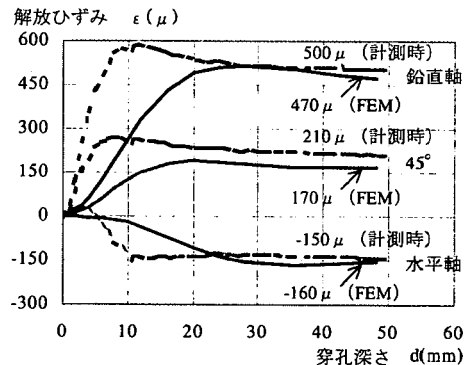


図-12 FEM による解析結果

対して横方向の拘束を与えることになる。モルタルの材料物性は、一軸圧縮試験より求めた値として弾性係数 $E=23.2\text{GPa}$ 、ポアソン比 $\nu=0.175$ を用いた。

同条件の下で、穿孔深さが $d=0,2,4,6,8,10,12,16,20,30,36,42,48\text{mm}$ の場合についても三次元解析を行なった。モールドゲージの位置における解析結果を実線で、実験結果を破線で示すと図-12のようになる。図-12から、実験結果においては穿孔の開始とともにひずみの解放が急激に始まっているのに対して、FEMでの解析結果では穿孔開始後のひずみの解放が緩やかである。また、FEM解析時には、加藤らの研究報告⁵⁾と同様、穿孔深さが穿孔径($D=50\text{mm}$)の約1/3の $d=17\text{mm}$ に達した時点で、まず作用ひずみに相当するひずみの解放が見られ、その後解放ひずみの絶対値が漸増し、穿孔深さが約40mmで再び一樣載荷時の作用ひずみに漸近している。

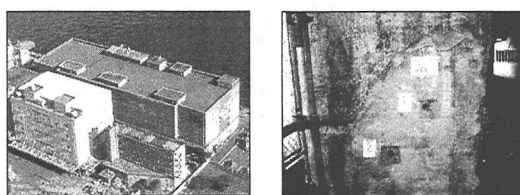
4. コンクリート構造物での計測例

コンクリート構造物に対して連続的応力解放法がどの程度適用可能であるのか、検討を加えることが重要な問題である。そこで、取り壊し直前のコンクリート構造物の柱の表面に対して連続的応力解放法を適用し、計測結果に対して種々の検討を試みた。

最初に本計測で対象としたコンクリート構造物を図-13に示す。コンクリート構造物は築30年、5階建てのRC冷凍倉庫で本計測終了後に取り壊された。この冷凍倉庫を支える柱のうちの5本を対象として計測を行なっており、ここではそのうちの1本(図-13(b))に注目する。計測面の幅は約1.1mであったが、断面形状や内部の配筋状況は、当日の現場工程や周辺状況との関係で把握できていない。

計測結果を図-14に示す。同図から、穿孔深さが約 $d=15\text{mm}$ でひずみの解放がほぼ終了し、その後はモルタル供試体を対象とした場合と同様にひずみの値が漸減している。そして、柱の鉛直軸、水平軸および 45° 方向にはそれぞれ 126μ 、 76μ および 88μ の圧縮ひずみが有していたことが分かる。本計測ではコンクリートの物性試験を行っていないが、対象としたコンクリートのヤング率を $E=20\text{GPa}$ と仮定すると、計測点には弾性応力成分として鉛直軸方向に約 2.5MPa の圧縮応力が作用していたことになる。

一般にコンクリートの設計強度が設計基準強度の1/3の値で定められ、この範囲でほぼ弾性的な挙動を示すことを考慮すれば、ここで求めた鉛直方向の



(a) 外観 (b) 柱の計測点

図-13 計測対象としたコンクリート構造物

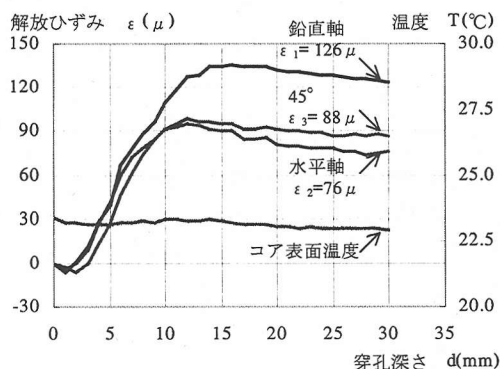


図-14 コンクリート構造物での計測結果

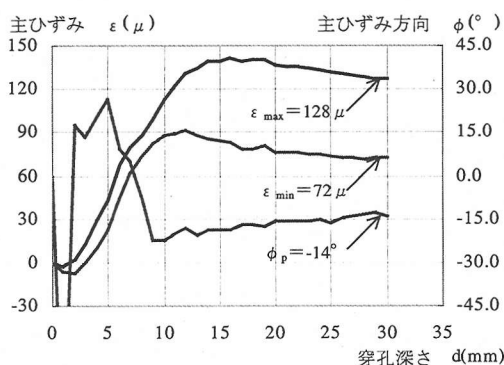


図-15 コンクリート構造物での主ひずみ等算定結果

圧縮応力はオーダーとして小さいものとなっているが、その原因としては、以下の2点が考えられる。

- 1) 建設後30年経過したことによるコンクリートの中中性化
- 2) 使用したひずみゲージの問題

このうち、1)による要因は、図-13(b)の柱の表面の中中性化部分を除去せずにひずみゲージを貼り付けたことにある。中中性化試験を行っていない以上、定性的な表現に留めるべきであろうが、コンクリート表面からの中中性化の進行に伴って、表面に近い領域の分担すべき応力が徐々に緩和してきた可能性が考えられる。

また、2)による要因は本計測で使用した三軸ロゼットゲージのゲージ長の問題である。コンクリート

を対象としてひずみの計測を行なう場合には、最大骨材寸法の三倍程度の長さのひずみゲージを使用することが推奨されているが、ここでは構造物に与えるダメージを最小限に抑えることを優先し、ゲージ長 10mm と最大骨材寸法に比して短い三軸ロゼットゲージを採用したため、場所によってはコンクリート中の粗骨材の影響を受けた可能性が考えられる。

このことを検討するためには、既往の樋口らの研究⁵⁾のように、コンクリートコア中の粗骨材の配置やゲージ長と最大骨材寸法との関係等が、計測結果にどのような影響を及ぼすのかについて、詳細な議論をする必要があるが、この点は今後の課題である。

つぎに、図-14 に示されている計測結果から式(1)を用いて ε_{\max} , ε_{\min} および ϕ_p を算定した結果を図-15 に示した。 ε_{\max} は柱の鉛直軸から時計回りに 14° 傾いた方向に作用していることが分かる。

5. 結 言

本論文では、表面を有する固体材料や構造物等に与える損傷を必要最小限に抑えるため、小径コアリングを基本とした連続的応力解放法の提案を行なうとともに、モルタル供試体およびコンクリート構造物への本法の適用を通じて幾つかの検討を試みた。

モルタル供試体を対象とした現有ひずみ計測では、供試体への一様圧縮载荷により発生したひずみよりも圧縮側に数十 μ 程度過大評価される傾向にあることが分かった。このことの検証のため、無载荷状態の供試体に対して同様の計測を行なったところ、一様载荷状態の場合に発生するひずみの過大評価分と同程度のひずみが計測された。

一方、コンクリート構造物を対象とした計測結果より、対象とした柱の部分には鉛直軸方向に約 2.5

MPa の圧縮応力が作用していたことを示した。これは、一般に用いられるコンクリート構造物の設計強度に比べると 1/3 程度と小さいものであったが、コンクリートコア中の粗骨材の配置やゲージ長と最大骨材寸法の関係等が計測結果に与える影響についての検討を十分には行なっておらず、この点は今後の課題としたい。

紙面の都合上、十分な計測データを提示するまでにはいたらなかったが、本論文で提案した連続的応力解放法によって、構造物の維持管理を適切に行なうための力学的判断指標の一つとなる現有応力の計測が可能となった。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書〔維持管理編〕，2001.
- 2) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の診断のための非破壊試験方法研究委員会報告書，2001.
- 3) 大津政康：コンクリート構造物の診断と非破壊検査，材料，Vol.51, No.4, pp.405-411, 2002.
- 4) 土木学会：初期地圧測定法の現状と課題，1992.
- 5) 樋口嘉剛，神田亨，三木千壽：コンクリート部材中の応力推定法，土木学会論文集，No.585/V-38, pp.11-18, 1998.
- 6) 加藤暢彦，金田昌治，園田恵一郎：コンクリート構造物の現存応力の測定法に関する研究，構造工学論文集，Vol.42A, pp.333-340, 1996.
- 7) 菅原隆之，石島洋二，玉置誠：孔壁変形法により軟岩中の初期地圧を測定するための技術的改良，資源・素材学会春季大会講演集，No.1, pp.199-200, 2001.

(2002. 5. 9 受付)

CONTINUOUS MEASUREMENT OF RESIDUAL STRESS FOR CONCRETE STRUCTURE

Takeshi TANE, Takuo SUZUKI, Katsunori FUKASAWA and Hideki SHIMIZU

Factor and level of a degradation must be grasped appropriately in order to maintain concrete structure. Therefore, various inspections such as visual observation and hammering test are carried out. On the other hand, the maintenance based on dynamic information (stress, displacement, etc.) will be also important. Then, some in situ stresses measurement techniques are proposed, and those methods are gradually applied in fields.

In this paper, more simply and accurately residual stresses measuring method is proposed.