

弾性波法を用いたコンクリート構造物の内部欠陥探査手法の適用性に関する検討

EXAMINATION ON THE APPLICABILITY OF MEASURING METHOD FOR INTERNAL DEFECTS OF CONCRETE STRUCTURES

(株)東洋計測リサーチ 山下 健太郎
アプライドリサーチ(株) 境 友昭
一般社団法人 iTECS 技術協会 極壇 邦夫

現在、弾性波法による検査手法が多数存在するが、とりわけ、時間領域で判定を行う試験法や、周波数領域での判定法、弾性波速度に着目した方法が特徴的である。

周波数あるいは観測される弾性波速度の変化に着目した測定手法について、数値解析および模型供試体を使用した実験を行い、内部欠陥探査への適用性を検討した。

特に、欠陥の寸法や位置（深さ）が測定結果に及ぼす影響を検討し、整理した結果を示す。

キーワード：衝撃弾性波、内部欠陥探査、iTECS 技術、インパクトエコー法

1. はじめに

弾性波を用いた構造物の内部欠陥の測定技術には、パイルインテグリティ試験法、高周波衝撃弾性波法（オーリス技術）¹⁾や超音波法のように波動が欠陥位置あるいは部材端部から反射してくる時間から欠陥の位置を推定する方法や、波動応答の周波数分析結果から内部欠陥の深さあるいは部材厚さを計測するインパクトエコー法²⁾、測定面と対向面の間での多重反射での見掛けの弾性波速度の分布から内部欠陥などを探査する iTECS 技術³⁾などがある。また、インパクトエコー法による解析手法の1つとして、波動の反射回数に依存せず、周波数スペクトルを応答関数とみなして欠陥位置を推定する手法⁴⁾も存在する。

本論では、衝撃弾性波法として分類されるオーリス技術、インパクトエコー法、iTECS 技術について、前者2手法は弾性波速度が同一部材では変化しないことを前提としているが、後者は見掛けの弾性波速度の変化を手掛かりにして内部欠陥探査を行うという違いに着目し、それぞれの測定手法に関する検証を、数値解析及び模型供試体を用いた実験により検証を行った結果を報告するものである。

なお、実構造物において波動は3次元的に伝搬するが、波動の多重反射の現象においては1次元の挙動とみなせるため、数値計算は単純化するために1次元のモデルを仮定して行った。

2. 内部欠陥の検出

2.1 検討手法

本研究では、内部欠陥をPC橋シースの未充填、あるいは充填率が十分ではないような場合とし、波動方程式の数値計算およびPCシース充填率を変化させた供試体を用いた実験によって、内部欠陥検出方法の検討を行った。

2.2 数値計算

数値計算では、図1に示すような、1次元の棒（長さ100ユニット、共振周波数5050Hz）を仮定し、各要素の弾性波速度を一定とし、インピーダンス値を変化させる方法で欠陥を模擬する手法を用いた。

なお、1ユニットの長さおよび、弾性波速度は一定であり、波動が $1\mu s$ で進行する距離を1ユニットの長さとしている。なお、この長さはコンクリートであれば、約4mmに相当する。内部欠陥は、図1に示すように、波動の伝搬途中での機械インピーダンス値が波動入

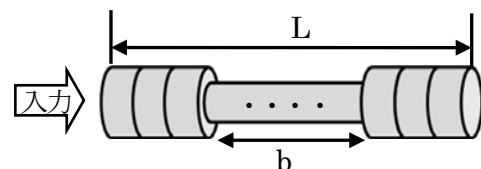


図1 数値計算モデル

力端部ユニットの 1/4 となる部位に置き換えた。これは、コンクリート構造物の内部欠陥部では波動が伝搬する部分の断面積が減少することを模擬したものである。また、各ユニットの弾性波速度を同一とすることによって、部材の弾性波速度が変化することによって、周波数の変化が生じるという仮説を排除している。計算では、機械インピーダンス減少区間の開始位置および長さを変化させ、打撃力入力位置での多重反射波形を求め、これをフーリエ解析することによって周波数の変化を求めた。

入力波形および、応答波形の例を図 2, 3 に示す。

入力波形は、iTECS 法での測定を前提とし、打撃によってコンクリート表面に発生する打撃信号の速度成分を模擬している。入力信号の波長は、棒の長さのおおよそ 2 倍とし、多重反射によって出来るだけ「単一」周波数が生成されるように考慮している。数値計算条件については参考文献⁵⁾を参照し、波動の入力側の条件はそれぞれ参考文献の式(64)、先端の条件は式(34)、境界条件を式(40)により計算した。図 3 の応答波形は、このような波動方程式の数値計算によって得られたものである。計算によって得られた見かけの弾性波速度は、式(1)によって計算した。ここで、 f, L は、それぞれ計算された応答波形の卓越周波数、棒の長さ、である。

$$V = 2fL \quad (1)$$

図 4 は、計算結果の一例であるが、横軸が欠陥の開始位置、縦軸が欠陥のサイズ(機械インピーダンス減少区間の長さ)であり、いずれも、棒の長さに対する比率で示している。図は、弾性波速度の変化を機械インピーダンス値に変化がない場合の見かけの速度を 1 とし、計算値の比をコンター表示している。図から、欠陥の大きさが大きい程、また欠陥が棒の中央付近にある程、見かけの弾性波速度の低下が大きくなっていることがわかる。なお、図では欠陥が大きく、その欠陥位置が棒の反対側端部に近い場合、見かけの周波数が大きくなる現象が見られるが、これは入力端

と欠陥の開始面間で多重反射する波動が主となり、結果的に棒が短くなることによって、見かけの速度が大きくなったように見える現象である。このような事例は、波動が測定面と内部欠陥の間で多重反射する現象であり、インパクトエコー法による内部欠陥探査技術に相当する。

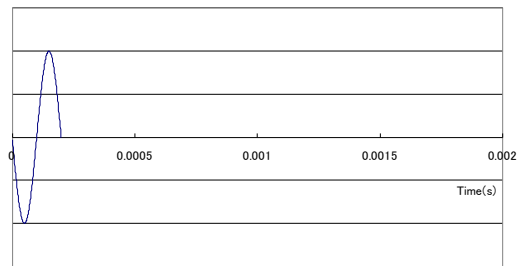


図 2 入力波形

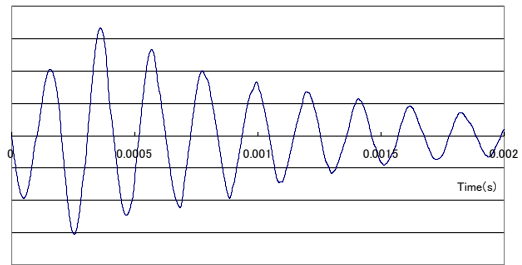


図 3 応答波形

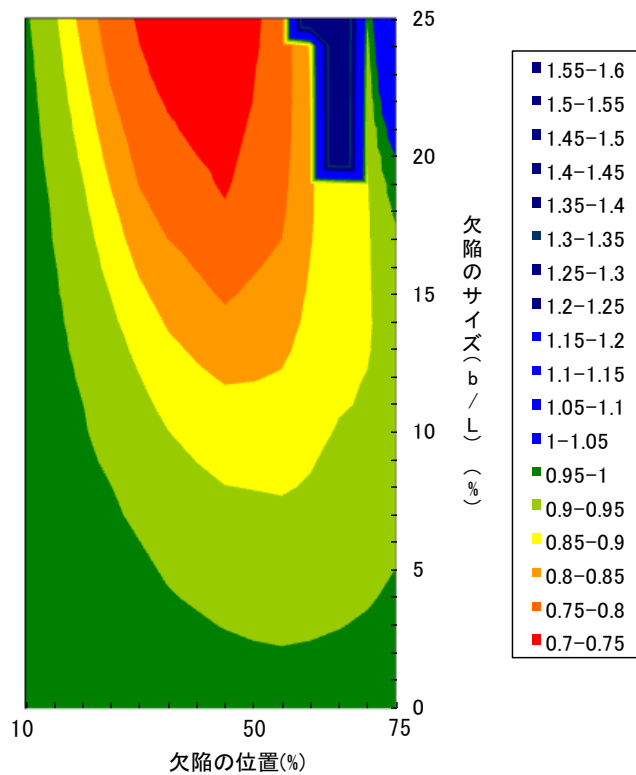


図 4 計算結果

2.3 供試体を用いた実験

2.3.1 供試体

供試体は、厚さ 0.35m、幅 1.0m、長さ 2.5m で、測定面から 0.2m の深さに、0~100%まで段階的に充填度を変えた φ93mm のポリエチレンシースが埋められている。図 5 に測定を行った供試体を示す。なお、コンクリートは PC 構造用の高強度コンクリートを使用し、無筋である。

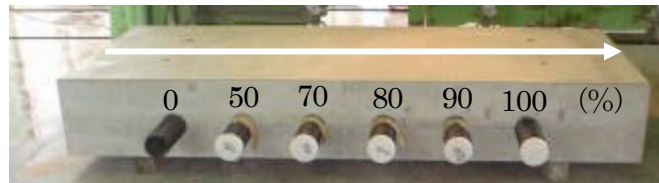


図 5 供試体

2.3.2 測定・打撃方法

測定には、衝撃弾性波法の測定装置 (iTECS) を用い、図 5 の白線に示すように供試体の中央部に測定線を設け、50mm 間隔で測定を行った。波動の入力には鋼球 30mm (約 100g) を使用し、サンプリング速度 10 μs で 10ms 間測定を行った。また、受振センサには 100mv/G の高感度加速度センサを使用した。

2.3.3 実験結果

衝撃弾性波法による測定結果 (最大エントロピー法 [MEM] によるランニングスペクトルを測定時間 8ms 間で平均したもの、「MEM 詳細法」と呼称) を図 6 に示す。図は、測定された周波数から式 (2) に従って、「深さ」に変換したものである。図中の色相は、スペクトルの強度を示し、赤色が最も強いスペクトル、紺色はスペクトルが非常に弱いことを示している。シースの位置は図中白○印で示している。また、その上の数字はシースの充填率 (%) である。図より、シースの位置では、実際の深さ (厚さ 0.35m、図中白実線で表示) よりも厚い値として観測されていることがわかる。

解析ではあらかじめ測定した弾性波速度 4,500m/s を一定値としていることから、シースの位置では見掛けの弾性波速度が低下しているといえる。

さらに、図中破線部のように、シースの充填度に応じて見掛けの弾性波速度の低下率が変化する傾向が見られたため、それらの関係をまとめたものを、図 7 に示す。

$$D = V/2f \tag{2}$$

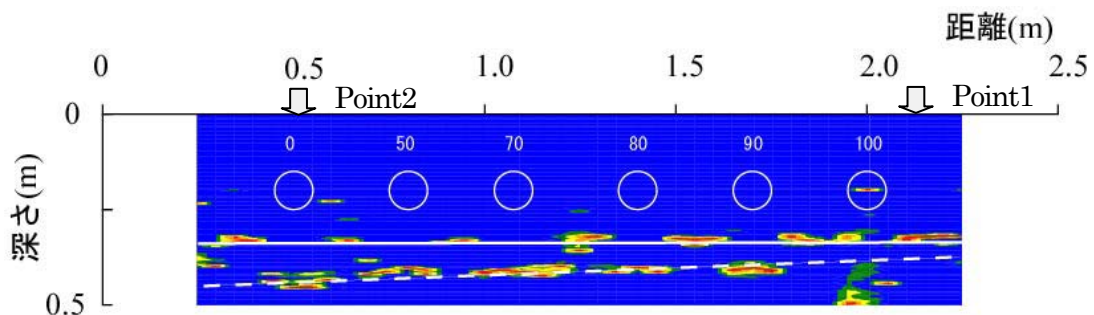


図 6 供試体スペクトル強度分布 (MEM 詳細法, 鋼球 30mm)

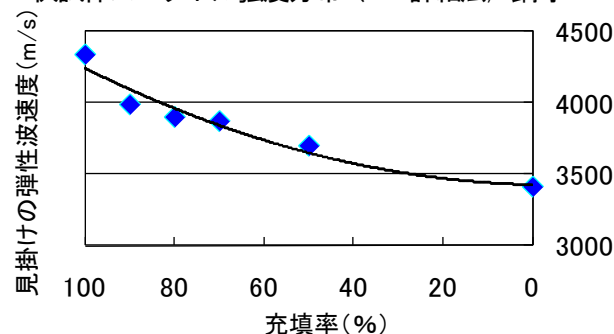


図 7 充填率と見掛けの弾性波速度の関係

2.4 内部欠陥と見かけの弾性波速度の低下率

図 8 に 1 次元棒を用いた計算結果とシーす供試体による実験結果の比較を行った結果を示す。実験での欠陥サイズは、シーすの充填率、数値計算は、機械インピーダンスの減少率と区間率の積である。供試体実験と数値計算の見掛けの弾性波速度の低下は、同様の傾向的を示し、内部欠陥の大きさによって見かけの弾性波速度が低下すること、逆に、見かけの弾性波速度の低下によって内部欠陥の位置(平面位置)の検出が可能であることが伺える。

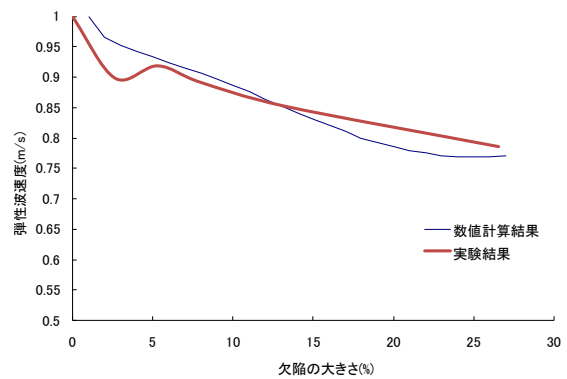


図 8 欠陥の大きさと弾性波速度の低下率

2.5 波動の伝搬と幾何減衰に関する検証

図 6 の実験結果に示されるように、未充填のシーすがあったとしても、実際的には、測定面と未充填シーす直上間での多重反射によるとみられる周波数スペクトルは観測されていない。シーす位置周面の測定点で、高周波成分のスペクトルが多少見られるが、周波数から推定した「深さ」は、シーす上端位置とは一致していない。

このような現象に対する考察として、ここでは、波動の幾何的な伝搬をもとに、内部欠陥を持つ構造体での縦弾性波の反射と減衰について幾何音響的視点からの検討を行った。弾性波は測定表面の点に発生すると考える。この時、固体内の縦弾性波は半球空間上に伝搬することによって幾何減衰する。コンクリート内部の粘性抵抗による波動の減衰もあるが、ここではこれを考慮しない。波動の強さ I は発生した波動のエネルギーを W 、伝搬距離を R とすると、

$$I = \frac{W}{2\pi R^2} \quad (3)$$

として示される。実際的な測定では、波動の強さではなく測定表面上の点での振動速度あるいは変位を計測する。測定を振動速度 v で行うものとする、波動の強さ I は、波動を平面波とみなした場合、

$$I = \rho c v^2 \quad (4)$$

である。ここで、 ρc は材料の密度及び縦弾性波速度であり、その積は音響インピーダンスと呼ばれる。式 (4) を式 (3) に代入して整理すると、

$$v = v_0 \frac{1}{R} \quad (5)$$

となる。即ち、実際に測定される振動速度は波動が伝搬した距離に反比例して小さくなる事が分かる。

なお、ここで v_0 は、

$$v_0 \equiv \sqrt{\frac{W}{2\pi\rho c}} \quad (6)$$

であり、ここでは基準点 (1m) での振動速度に相当する。

内部欠陥を持つ板状構造物の場合、測定点の位置によって図 9 に示すような 3 種の反射経路を考える。CaseA は、測定面と対向反射面の間で波動が多重反射するケースであり、波動が内部欠陥を迂回して底面との間で多重反射する経路も含むと考えてよい。CaseB は内部欠陥と測定表面の間で波動が多重反射するケー

スである。これに対し、CaseCは対向反射面からの反射波動が測定表面で再度反射し、さらに内部欠陥で反射して測定面に達する経路であり、この経路では波動が2回測定表面で観測される。即ち測定面と対向反射面間の多重反射による基本周波数の2倍の周波数となる。本論では、測定点が内部欠陥を測定面に投影した場合の周縁部にあるときにCaseCの状態になると考える。

ここで、RADAR 方程式の考え方を援用すると、それぞれの振動速度は、(7) ~ (9) 式で表される。

$$v_{N(\text{CaseA})} = v_0 \frac{1}{2ND} \quad (7)$$

$$v_{N(\text{CaseB})} = v_0 \left(\frac{A}{2\pi L^2} \right)^{\frac{N}{2}} \frac{1}{2NL} \quad (8)$$

$$v_{N(\text{CaseC})} = v_0 \frac{1}{2ND + 2L} \sqrt{\frac{A}{2\pi L^2}} \quad (9)$$

ここで N は反射回数である。

板の厚さ 300mm, 内部欠陥は深さ 150mm に位置する直径 100mm の円形空洞として計算した, それぞれのケースでの振動速度の減衰を図 10 に示す. CaseA, C に比べ CaseB 即ち内部欠陥との間の多重反射では幾何減衰が大きく数回の反射によって振幅は 1/100 以下に減衰しており, 内部欠陥からの反射波のみを抽出することは難しくなると推察される. 計算に使用している内部欠陥は, 非常に大きな寸法(波動伝搬面積の 25%) であるにも関わらず, 振幅が 1/100 になるまでの反射回数は 3 回程度であり, この反射回数によって, 「深さ」に相当する周波数が生成されるかについては疑問があり, この点については, 次節で検討する。

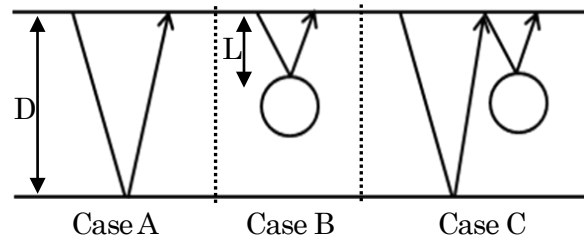


図9 反射経路の仮定

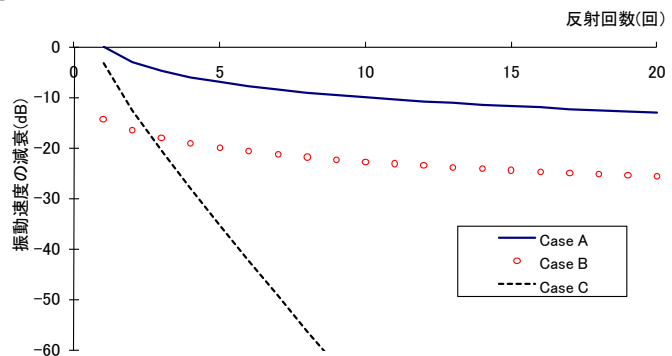


図10 反射回数と振動速度の減衰

3. 多重反射回数と周波数パワースペクトルの関係の検討

3.1 検討方法

インパクトエコー法などでは, フーリエ変換による周波数分析結果を周波数応答関数とみなし, 内部欠陥の位置推定を行う手法を用いている. しかし, 前節の解析結果が示すように, 内部欠陥が小さい場合, 測定可能な反射回数が制限されることになる. フーリエ解析を基本とする周波数分析方法では, 個別の周波数成分の1周期間での振幅パワーを分析する方法である. この場合, 反射回数が少ないと1周期(測定時間)中での幅パワーが小さくなること, 周期の分解能が悪いこと, などの影響によって, 内部欠陥の検知が困難になるものと考えられる. ここでは, 多重反射回数をパラメータとした数値計算, および供試体実験で得られた測定波形から内部欠陥に対応するスペクトルが得られているかどうかの検討を行った。

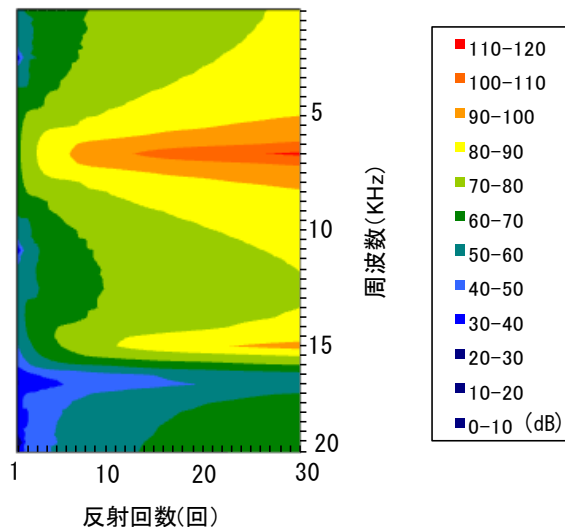


図11 計算結果

3.2 数値計算

反射回数と周波数スペクトルの分解能の関係の計算結果を図 11 に示す。図は、横軸を反射回数、縦軸を周波数とし、パワースペクトル強度をコンターとして示したものである。スペクトルの強さは、対数(dB)で示している。計算上仮定したコンクリート板の厚さは 300mm、縦弾性波速度を 4000m/s としている。反射回数 30 回は、測定時間長約 4.5ms に相当する。図から、反射回数が 3 回程度の場合、30 回反射の場合と比較して、厚さ方向の共振周波数でのスペクトルパワーは 40dB 低下しており、振幅は 1/100 位に相当する。また、反射回数 1 回では、どの周波数帯域においてもスペクトルがほとんど生成されない。つまり、測定可能な反射波の回数が 1 回では、厚さや内部欠陥の位置に相当するスペクトルは観測されないと考えよう。

3.3 供試体実験

図 12 に、図 6 における Point 1 (シーすなし部) , 及び、Point2 (未充填シーす部) での観測波形を高速フーリエ変換により周波数解析した結果を示す。

ここで、シーす頂部の位置は周波数に換算すると、約 15kHz であるが、Point2 の測定位置での周波数解析結果からは、とりわけ卓越しているようには見受けられず、数値計算あるいは前項での検証結果が裏付けられた。

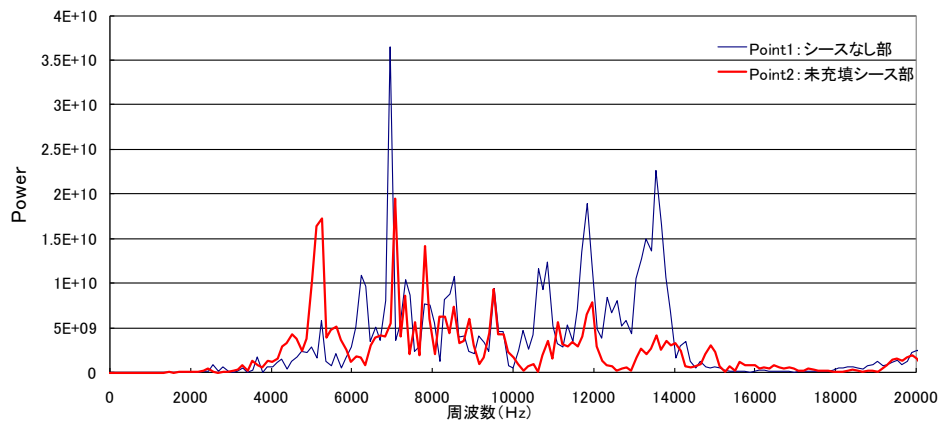


図 12 フーリエパワースペクトル

4. まとめと考察

内部欠陥の探査方法について実験的、および数値計算による検討を行った。この結果、内部欠陥が存在する場合には、多重反射方向の見かけの弾性波速度が低下することが、数値計算および実験経過からも明らかにされた。これに対し、内部欠陥と測定面の間での多重反射あるいは、測定波形の周波数分析を周波数応答とする方法では、内部欠陥が相対的に小さい場合、その検出が難しいこと、また測定時間の中で反射回数が十分でない場合には、共振周波数の生成すら難しいことがわかった。実際、供試体を用いた実験においても、未充填シーすと測定面の間での多重反射に相当する周波数成分が観測されているとは言い難い結果であった。

[参考文献]

- 1) 坂本浩之, 吉川正浩ら: 高周波衝撃弾性波法(オーリス)を用いた調査事例, 電力土木, No. 343, P112-114 (2009.09.05) 電力土木技術協会
- 2) Mary J. Sansalone William B. Streett ;IMPACT-ECHO Nondestructive Evaluation of Concrete and Masonry 1997
- 3) 境友昭, 極檀邦夫ら: 衝撃弾性波による PC 橋梁シーすの位置・充填度の推定方法, 第 60 回年次学術講演会講演概要集 P1203-1204 土木学会
- 4) 渡辺健, 橋本親典, 大津政康ら: インパクトエコー法に基づいたイメージング手法によるコンクリート内部空隙の検出, コンクリート工学年次論文集 Vol. 24 No. 1, 2002
- 5) 境友昭: 杭打ち解析のための波動方程式の数値解法, 土木学会論文集第 424 号 III-14 P75-P83 (1990) 土木学会