

論文 アクティブ赤外線法における照射条件に関する解析的研究

田中 寿志^{*1}・鳥取 誠一^{*2}・仁平 達也^{*3}

要旨：アクティブ赤外線法の照射条件を検討するために、模擬空隙を有する供試体の3次元非定常熱伝導解析を行った。解析結果とこれまで実施された室内試験および高架橋での現地試験の結果と比較することにより照射条件を検討した。その結果、一定時間間隔において繰り返し照射することにより、繰り返し照射後の赤外線画像による温度分布から、はく離深さを推定することが可能であることが分かった。

キーワード：アクティブ赤外線法、はく離検知、キセノンアークランプ、照射条件

1. はじめに

コンクリート構造物の維持管理において、コンクリートのはく離、はく落による公衆災害を予防するために、コンクリート表面付近のはく離を検知して適切な補修を行うことが重要である。コンクリートのはく離を効率的に検知する方法として、コンクリート表面の健全部分とはく離部分の温度差を赤外線カメラで撮影することによって、周囲より高温の部分をはく離として検知する赤外線サーモグラフィ法（赤外線法）がある。

赤外線法において、温度差を生じさせる方法として、日射による自然条件を利用する方法（パッシブ赤外線法）^{1),2)}と人工的に加熱する方法（アクティブ赤外線法）^{3),4),5)}がある。パッシブ赤外線法は、照射設備が不要であるため測定が容易である反面、気象条件によってははく離検知に必要な温度差が生じず、精度良く測定できない可能性がある。そこで、著者らはこれまで、気象条件に左右されずに測定が可能なアクティブ赤外線法についての検討を行ってきた。

本研究ではキセノンアークランプを用いた遠隔からのコンクリートのはく離検知を対象として、照射方法の検討を行うために、室内試験を模擬した三次元非定常熱伝導解析を行った。また、これまで行われた高架橋での現地試験の照

射条件と比較、検討を行った。

2. 模擬はく離検知試験の概要と解析条件

2.1 試験の概要と照射条件

(1) 模擬空隙供試体

スラブ下面のコンクリートの浮き、はく離を想定して図-1に示す模擬空隙供試体に対する照射試験を行った⁴⁾。表面から模擬空隙までの深さはそれぞれ10mm, 20mm, 30mmの3ケースとし、空隙は100mm角、厚さ1mmの発泡スチロールにより模擬した。

(2) 照射光源

照射光源として、高架橋のスラブ下面などを

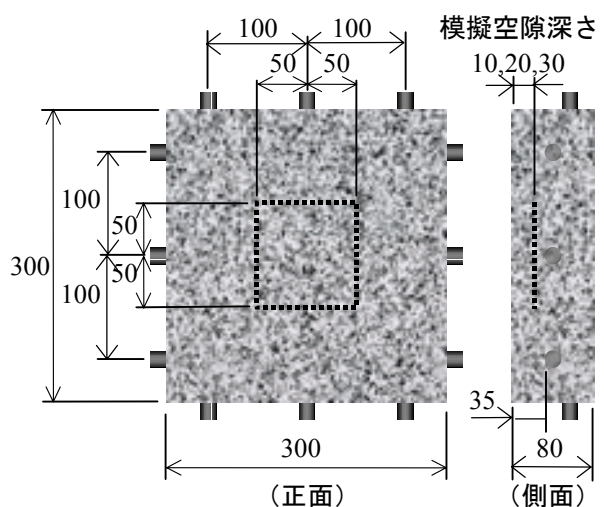


図-1 模擬空隙供試体（単位：mm）

*1 （財）鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部コンクリート構造副主任研究員 工修（正会員）

*2 （財）鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部コンクリート構造研究室長 工博（正会員）

*3 （財）鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部コンクリート構造研究員 工修（正会員）

遠隔から加熱することを想定してキセノンアークランプを用いた⁴⁾。ランプの出力は6kWおよび2kW，ランプから供試体までの距離は10mとした。

(3) 照射条件

空隙深さをパラメータとした既往の試験⁴⁾を再現するために，室内試験の赤外線画像に記録されていた累積時間を参考にして，表－1のように照射条件1を設定した。また，一定時間間隔で照射を繰り返した場合の空隙深さ20mmの室内試験と比較するために表－2のように照射条件2を設定した。さらに，照射条件2の合計の照射エネルギーを1回で照射した場合として照射条件3を設定した。

表－1 照射条件1

STEP	照射エネルギー 密度(kW/m ²)	時間(s)	累積時間(s)
1	5.5	10	10
2	0	1300	1310
3	5.5	10	1320
4	0	1360	2680
5	5.5	30	2710
6	0	500	3210
7	15	10	3220
8	0	60	3280

表－2 照射条件2

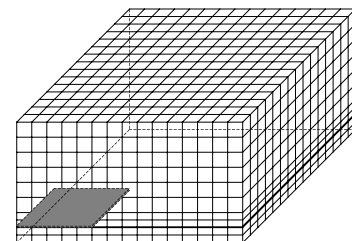
STEP	照射エネルギー 密度(kW/m ²)	時間(s)	累積時間(s)
1	5.0	3	3
2	0	140	143
3	5.0	3	146
4	0	140	286
5	5.0	3	289
6	0	140	429
7	5.0	3	432
8	0	140	572
9	5.0	3	575
10	0	140	715
11	5.0	3	718
12	0	140	858
13	5.0	3	861
14	0	140	1001
15	5.0	3	1004
16	0	140	1144
17	5.0	3	1147
18	0	140	1287
19	5.0	3	1290

表－3 照射条件3

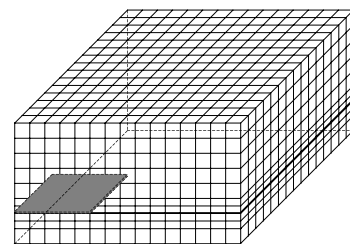
STEP	照射エネルギー 密度(kW/m ²)	時間(s)	累積時間(s)
1	5.5	30	30
2	0	1260	1290

表－4 材料の物性値

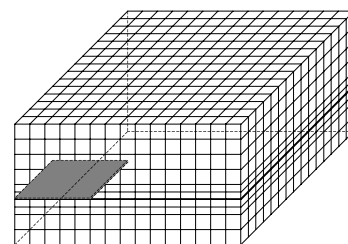
	コンクリート	空気
熱伝導率 (W/mK)	2.55	0.0257
密度 (kg/m ³)	2.2×10^3	1.166
比熱 (J/gK)	1.05	1.005



(a) 空隙深さ 10mm



(b) 空隙深さ 20mm



(c) 空隙深さ 30mm

図－2 3次元解析モデル

2.2 解析条件

(1) 解析モデル

解析モデルは，対称性を考慮して図－1の供試体の1/4モデルとした。

(2) 材料特性

コンクリートの物性値は，土木学会コンクリート標準示方書⁷⁾を参考に，表－4に示す値とし

た。空隙部の材料特性は、表－４に示す空気
の物性値を用いた。

(3) 境界条件

境界条件において、照射条件１では、供試体
の露出面が断熱でないことを考慮して、対称面
のみ断熱境界とした。また、照射条件２および
照射条件３では、高架橋スラブの一部を取り出
していることを想定し、照射する面以外は断熱
境界とした。

断熱境界以外の部分は、対流熱伝達境界とし
て、既往の検討結果⁶⁾を参考にして、熱伝達係数
を $h = 10\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ とした。

(4) 解析および出力時間間隔

解析および出力時間間隔は、表－１～表－３
に示した各 STEP の時間の 50 等分とした。

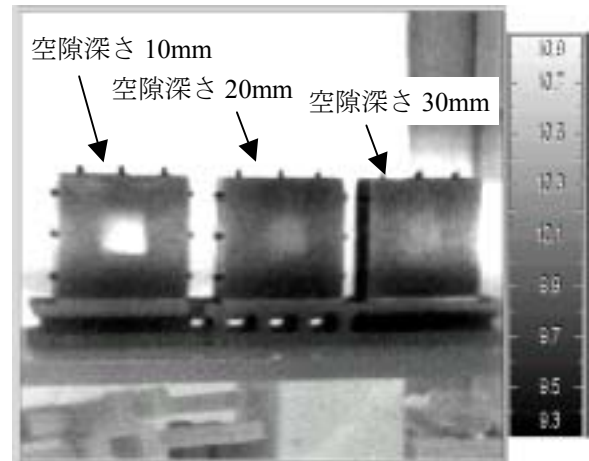
3. 解析結果と室内試験の比較

3.1 はく離深さの影響

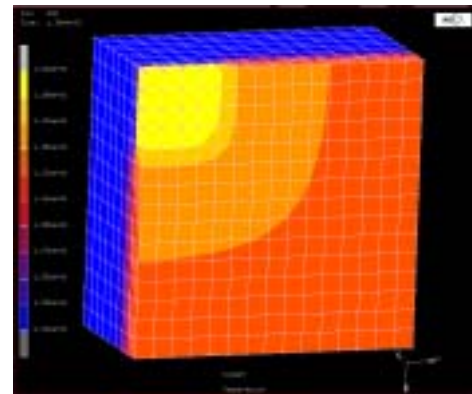
前章の照射条件１の解析結果と室内試験結果
を比較する。図－３に $5.5\text{kW}/\text{m}^2$ の照射エネルギ
ー密度で 10s 照射した後、20s 経過した時点（累
積時間 1340s に相当）の赤外線画像を示す。図－
４に解析結果の一例として 1380s 時点（ $5.5\text{kW}/\text{m}^2$ 、
10s 照射後 60s）の温度分布を示す。完全に同じ
時点での比較ではないものの、温度分布の傾向
が一致していることが分かる。

図－５に健全部と空隙部の温度差の経時変化
および実験結果との比較を示す。健全部の温度
は照射面中心から 100mm 離れた位置の温度とし、
空隙部の温度は、照射面中心の位置の温度とし
た。解析値の経時変化に着目すると、照射開始
から空隙部と健全部の温度差が最大値に達する
までの時間は、空隙深さが大きいほど長くなる
が、照射エネルギーが異なっても同じ空隙深さ
に対しては、照射後、ほぼ同じ時間でピークに
達することが分かる。また、 $5.5\text{kW}/\text{m}^2$ の 10s 照
射と 30s 照射を比較すると、温度差が最大値は照
射時間の差にほぼ比例していることが分かる。

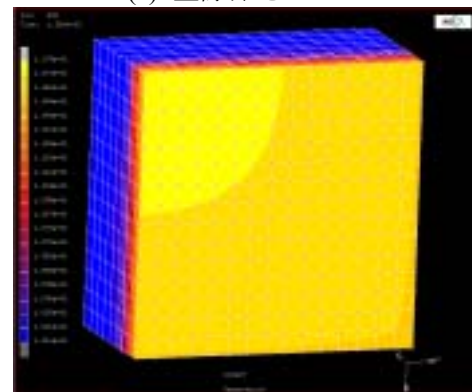
図－５において解析値と実験値を比較すると、
それぞれの照射後の最大値について、ある程度



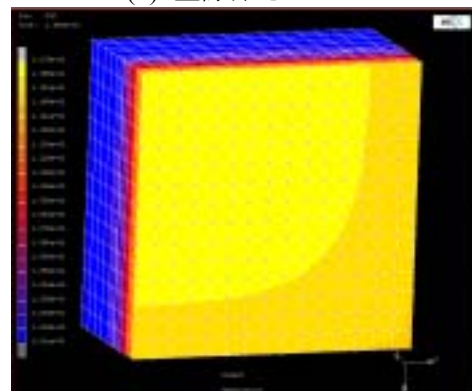
図－３ 赤外線画像



(a) 空隙深さ 10mm

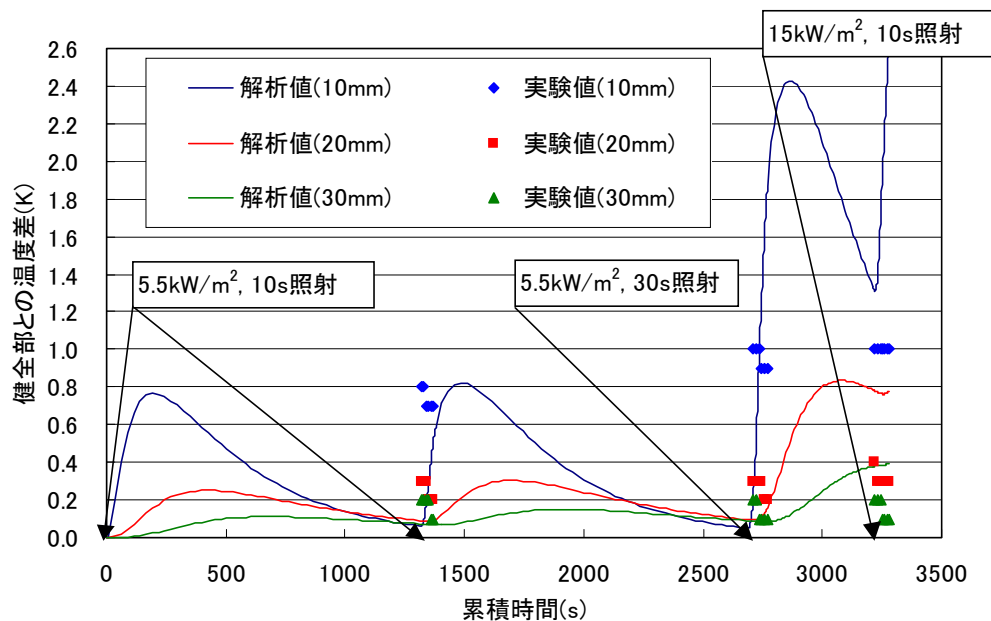


(b) 空隙深さ 20mm

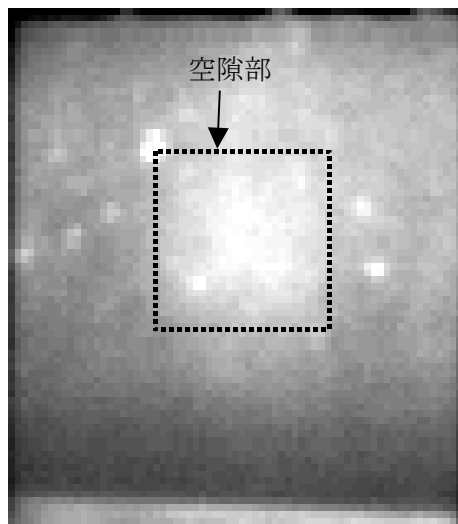


(c) 空隙深さ 30mm

図－４ 温度分布の解析結果 (1380s)



図－５ 照射条件１の健全部との温度差の経時変化

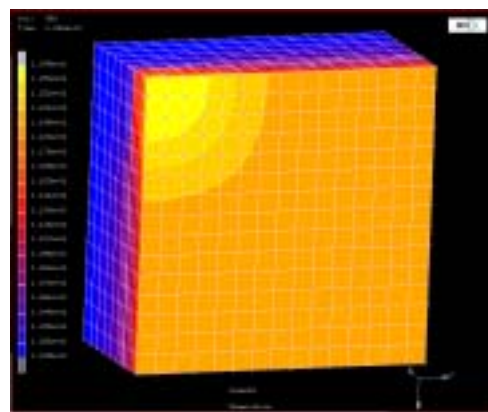


図－６ 繰返し照射後の赤外線画像

の一致が見られる。ただし、実験値については、照射直後が最大でその後、若干下がる傾向にあるが、解析値ではそのような傾向は見られない。また、 15kW/m^2 を10s照射した後については、前回までの照射による温度差の影響が残っている影響が解析値に大きく現われている。

3.2 繰返し照射による影響

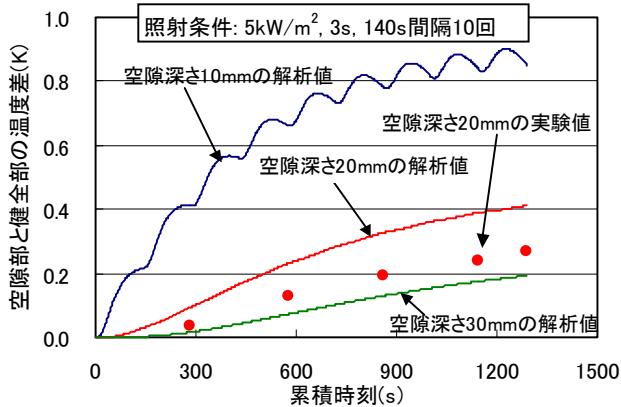
照射条件２により、繰返し照射による健全部と空隙部の温度差を検討するために、空隙深さ10mm, 20mm, 30mmの模擬空隙供試体の解析を行った。なお、比較する照射試験は20mmのみ



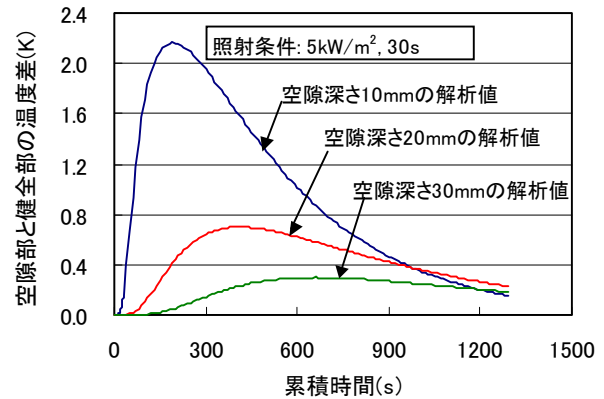
図－７ 繰返し照射後の温度分布の解析結果

実施されている。空隙深さ20mmの供試体に140s間隔でエネルギー密度 5.0kW/m^2 の照射を10回繰り返した直後の赤外線画像を図－６に、解析結果を図－７に示す。両者とも空隙部の中心の温度が周囲より高い状態になっており、解析により試験の赤外線画像による温度分布の状態が模擬できていることが分かる。

図－８に照射条件２による解析結果とはく離深さ20mmの供試体の実験結果を示す。解析値は実験値よりも大きな値になっているが、繰返し照射による温度上昇の傾向はほぼ一致している。解析値をはく離深さにより比較すると、深さ10mmの場合、4回目の繰返し以降は、次の照射までに健全部と空隙部の温度差が下がり、繰返しによる温度差の伸びが小さくなってきてい



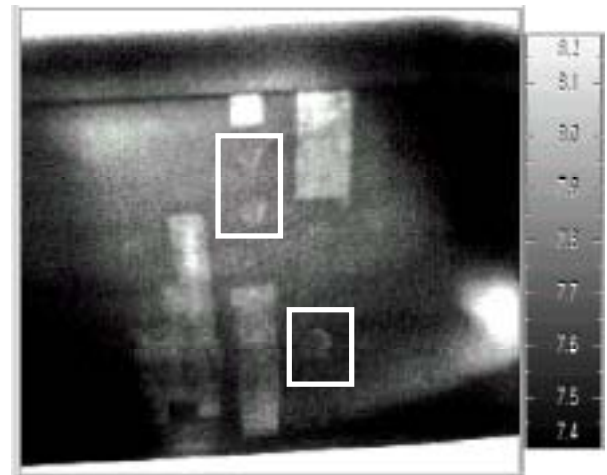
図－8 照射条件2の解析結果



図－9 照射条件3の解析結果

る。

図－9に照射条件2と同じ合計のエネルギーを一度に加えた照射条件3の解析結果を示す。温度差の最大値は、空隙深さに関わらず照射条件3の方が大きいですが、同じ累積時間で比べると照射条件3の場合は、空隙深さと温度差の関係が逆転する場合がある。このことから、一度に赤外線画像を撮影してその画像から空隙深さを判断するためには、照射条件2のように、一定の間隔で照射を繰り返すことが有効であることが分かった。



図－10 現地試験における赤外線画像

4. 解析結果による現地試験での照射条件の検討

4.1 現地試験の概要

キセノンアークランプを用いたアクティブ赤外線法の実構造物における適用性を検証するため、高さ約7mの鉄道ラーメン高架橋のスラブ下面を対象とした現地試験を行った⁴⁾。対象構造物は、事前に実施された打音法による調査結果から浮きまたははく離の存在が既知である高架橋から選定した。試験時(12月10日15:30~16:00)の天候は晴れ、最高気温は8℃、風速2~3m/sで日没時の気温は3℃まで低下した。使用した赤外線カメラの温度分解能は30℃で0.05K、測定温度範囲は0~40℃、表示画素数は横512×縦480である。

4.2 試験方法

キセノンアークランプを搭載した車両を高架

橋の下に移動させ、あらかじめ照射軌跡をインプットした後、キセノンアークランプの光を移動させながら試験対象範囲を約1m/sの速度で一様に照射した。これを10回繰り返して1試験面あたり約400秒間照射し、照射直後から10秒間隔で1分間、赤外線画像を撮影した。

4.3 現地試験結果と模擬空隙試験の比較

現地試験結果の一例を図－10に示す。四角で囲んだ部分は、照射後のアクティブ赤外線画像では、補修跡および四角で囲んだはく離部分が、健全部より0.2~0.5K程度高くなっている。

以上の現地試験結果と3.2に示した繰り返し照射による模擬空隙試験の結果を比較する。現地試験においては、コンクリート表面に実際に照射されたエネルギー密度は不明であるが、高架橋の高さが7mであり、室内試験での照射距離

10m より近い場合、最大 15kW/m^2 と比較すると、若干大きなエネルギー密度で照射されていると考えられる。走査速度が約 1m/s 、均等に照射される部分が直径 280mm であるので、1 回当たり 1 カ所の照射時間は約 0.35s となる。このことから、1 カ所 1 回当たりに照射される単位面積当たりエネルギーは、エネルギー密度と照射時間の積であるので、 5kJ/m^2 以上となる。照射を 10 回繰り返すことにより、得られた温度差は図 10 より $0.2\text{K}\sim 0.5\text{K}$ 程度である。

一方、模擬空隙を有する供試体においては、空隙深さ 20mm 、エネルギー密度 5kW/m^2 で 1 回当たり 3.0s の照射を 8 回程度繰り返すことにより、解析、実験とも 0.2K 程度以上の温度差が得られている（図 8）。1 回で照射される単位面積当たりエネルギーは 15kJ/m^2 であり、現地試験の 3 倍程度になっている。

実際の高架橋スラブ下面のはく離深さは、かぶりを考慮すると $10\text{mm}\sim 30\text{mm}$ 程度であり、模擬空隙を有する供試体の空隙深さ 20mm より浅い空隙を含んでいるため、現地試験では、このような浅い空隙に対してより大きな温度差が生じたと考えられる。以上のように、実構造物においても、模擬空隙を有する供試体の熱伝導解析と照射試験の結果と関連付けることにより、繰り返し照射後の赤外線画像による温度分布から、はく離深さを推定することが可能である。

5. まとめ

本研究では、アクティブ赤外線法の照射条件を検討するために、模擬空隙供試体の室内試験と 3 次元非定常熱伝導解析の結果を比較した。また、解析結果に基づき、高架橋において行われた現地試験の照射条件を検討した。これらの結果を以下にまとめる。

- (1) 一定時間間隔の繰り返し照射により、照射回数が増加するほど、健全部と空隙部の温度差は増加するが、空隙の深さが浅い場合には、

照射回数による温度差の伸びが小さくなる場合がある。

- (2) 同じ量のエネルギーを照射する場合、一度に照射する方が、繰り返して少量ずつ照射するよりも健全部と空隙部の温度差の最大値が大きくなるが、空隙深さにより温度差の最大値が生じるまでの累積時間が異なる。
- (3) 模擬空隙を有する供試体の熱伝導解析と、照射試験の結果と関連付けることにより、繰り返し照射後の赤外線画像による温度分布から、はく離深さを推定することが可能である。

参考文献

- 1) 長田文博ほか：赤外線カメラによる高架橋コンクリートの剥離診断法，土木学会第 56 回年次学術講演会概要集，V-418，pp.836-837，2001.10
- 2) 松沼政明ほか：赤外線カメラを活用した高架橋の剥離検査，SED，No.18，pp.102-109，2002.5
- 3) 宮田信裕：トンネル検査車の開発，JREA，Vol.42，No.7，pp.36-39，1999
- 4) 鎌田卓司ほか：遠隔加熱によるアクティブ赤外線法を用いたコンクリート高架橋の検査，コンクリート工学年次論文集，vol. 25，No.1，pp.1763-1768，2003
- 5) 田中寿志ほか：アクティブ赤外線法における照射光源の影響に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 27，No.1，pp.1753-1758，2005
- 6) 田中寿志ほか：アクティブ赤外線法における光源照射によるコンクリートの熱伝導挙動，土木学会第 60 回年次学術講演会概要集 (CD-ROM)，V -614，2005.9
- 7) 土木学会：コンクリート標準示方書〔構造的能照査編〕，p.29，2002