

報告 各種補修条件が補修後の再劣化に及ぼす影響に関する研究

松浦 誠司*1・森本丈太郎*2・元売 正美*3・魚本 健人*4

要旨：本研究は、塩害で劣化した鉄筋コンクリート構造物を補修した後、再劣化が生じる原因究明と対策提案を目的として曝露実験を5カ年計画で実施している。本稿は、コンクリート中の塩分量、断面修復範囲、表面被覆の有無などの補修条件を設定し、海洋環境下に曝露した試験体の鉄筋の腐食状況、塩分の分布などの調査報告である。その結果、補修条件によって3年間の曝露期間における鉄筋の発錆状況に差異が生じることが明らかとなった。

キーワード：補修、海洋環境下、塩害、再劣化、鉄筋腐食

1. はじめに

近年、補修した鉄筋コンクリート構造物が早期に再劣化する事例が報告されるようになってきている。特に、塩害による再劣化事例の報告が増えてきている。これは、補修の効果および補修の後に鉄筋コンクリート構造物中に発生する諸現象が十分に把握されていないため、劣化に対して補修工法および施工方法が適切に選定されていないことが一因であると考えられる。

これらのことを解決することで耐用年数に応じ、費用対効果に優れる合理的な補修方法の選定が可能となることが期待される。

このような状況を踏まえ、筆者らは、塩害による補修後の再劣化メカニズムの解明と適正な対策の選定方法の提案を目的とした研究を行っている。対象として道路橋床版の塩害による再劣化を想定し、コンクリート中の塩分量、補修範囲と深さ、表面被覆の有無等を要因として補修条件の異なる鉄筋コンクリート試験体を作製し、実際の海洋環境下や内陸環境下に長期間曝露し、各種測定を行っている¹⁾²⁾³⁾。

本報は、これらの曝露試験の中から海洋曝露試験体を対象とし、曝露開始から3年後に試験体から取り出した鉄筋の腐食状況を調査し、補

修の条件を変えた場合の補修後の鉄筋腐食に影響する要因について検討した結果を報告するものである。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

(1) コンクリートの配合

表-1にコンクリートの使用材料および供試体の配合条件を示す。

(2) 鉄筋

鉄筋はJIS G 3112「鉄筋コンクリート用棒鋼」に規定するSD345, D19を使用し、加工時の影響を考慮して折曲げ部両端にエポキシ樹脂を塗布した。エポキシ樹脂塗装後の翌日に各鉄筋の質量を測定して基準質量とした。

表-1 コンクリートの使用材料および供試体の配合条件

| | |
|---------|---|
| 水セメント比 | W/C65% |
| セメント | 普通ポルトランドセメント(3.16g/cm ³) |
| 細骨材 | 大井川産陸砂(2.58g/cm ³) |
| 粗骨材 | 青梅産硬質砂岩砕石(Gmax20mm, 2.64g/cm ³) |
| 混和剤 | AE減水剤標準型、AE剤 |
| 塩化物イオン量 | 0、2.4、4.8kg/m ³ |
| スラブ | 12.0cm |
| 空気量 | 4.50% |
| 圧縮強度 | 材齢28日:34.3N/mm ² 、材齢1年:47.5N/mm ² |

*1 西松建設(株) 技術研究所土木技術研究課 工修 (正会員)

*2 電気化学工業(株) 知的財産部 工博 (正会員)

*3 (株)エヌエムビー 中央研究所CS開発グループ 主任研究員 (正会員)

*4 東京大学生産技術研究所 教授 工博 (正会員)

(3) 対象とした試験体

図-1に試験体の形状と寸法を示す。試験体は150×150×530mm、鉄筋のかぶり厚は30mmとし、模擬はつり部(補修部)の範囲および深さにより6タイプ(A~F)のものを作製した。

模擬はつり部は型枠内に発泡スチロールを配置し、コンクリート打設後取り除くことで設置した。

(4) 補修方法および補修材料

模擬はつり部のコンクリート下地は、ワイヤーブラシ等を用い表面の汚れやレイタンスを取り除き、圧搾空気です埃を除去した。

その後、ポリマーセメントペースト(ベオバ系粉体ポリマー)をコンクリート部分にのみプライマーとして塗布し、断面修復材は同種のポリマーを主成分とするポリマーセメントモルタルを吹付け施工し、所定期間養生した。

表面被覆工は、全面に被覆を行ったものは6面、上面被覆を行わない試験体は、上面(コンクリート打設面)を除く5面に実施した。被覆面は、表面の目粗しを行い、エポキシ樹脂系プライマーを塗布して、エポキシ樹脂パテ材でパテ処理を行った。引き続き、柔軟型エポキシ樹脂中塗り材を2層塗布し(乾燥膜厚320 μ m)、柔軟型ウレタン樹脂上塗り材を1層(乾燥膜厚30 μ m)塗装した。

表-2に断面修復材の主な基本物性値を示す。

2.2 補修条件

表-3に設定した補修条件を示す。本実験では、補修条件の違いが補修後の再劣化に及ぼす影響を明らかにすることを目的としており、主な要因ははつり深さと範囲、母材コンクリートに練混ぜ時に混入した塩化物イオン量である。

補修条件としたはつりの範囲は、部分的に断面修復を行った場合を想定しており、マクロセル腐食の発生を想定したものである。鉄筋に対するはつり深さの要因は、塩化物イオンの再拡散の影響、ならびに鉄筋周囲の塩分の存在状態が再劣化に及ぼす影響を検討することを目的としたものである。また、上面の被覆材の有無は、

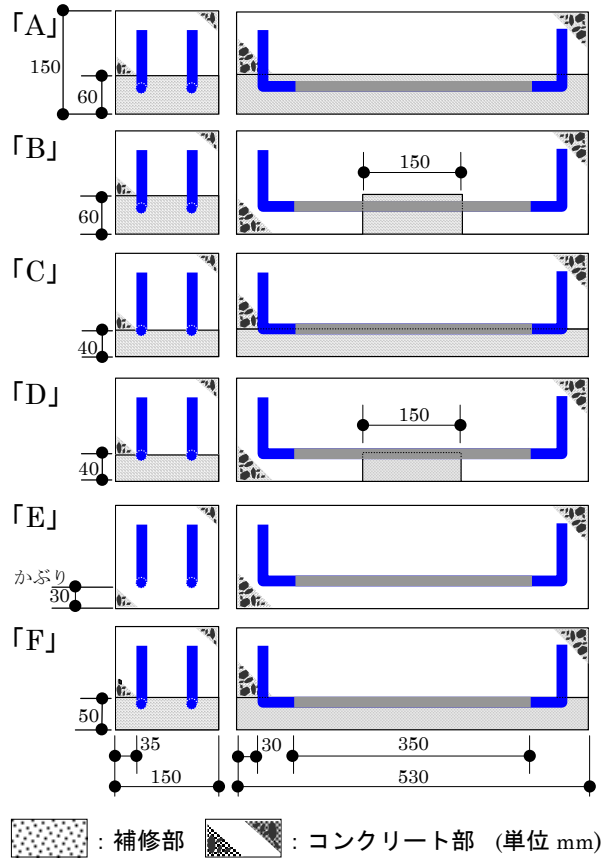


図-1 試験体の形状と寸法

表-2 断面修復材の基本物性

| 項目 | 材齢 | 試験結果 |
|-------|-----|------------------------|
| 曲げ強度 | 7日 | 8.78N/mm ² |
| | 28日 | 9.75N/mm ² |
| 圧縮強度 | 7日 | 48.3N/mm ² |
| | 28日 | 59.3N/mm ² |
| 静弾性係数 | 28日 | 22.8kN/mm ² |

床版上面の防水層の有無を想定したものである。

従来補修では、床版下面の劣化部分に対して直接施工されるのが一般的であるが、既存床版の防水層の健全性を考慮に入れて設計が行われることは少ない。しかしながら、床版の防水工が適切に行われていない場合には、塩分、酸素等の腐食因子が床版上面から侵入することが考えられる。

なお、試験体の記号は、混入塩分量の水準(1 : 0kg/m³, 2 : 2.4kg/m³, 3 : 4.8kg/m³)—試験体のタイプ(A~F)—上面被覆の有無を示す。

2.3 曝露条件

海洋曝露は、静岡県伊豆半島東海岸(伊豆海洋公園内:静岡県伊東市富戸841-1)の曝露場に

において実施した。この海洋曝露場は波打ち際に設置されており、ここで曝露される試験体は、満潮時には波で洗われ、干潮時にも前面に岩礁があるために常時海水飛沫を受ける極めて厳しい環境である(写真-1)。なお、この環境条件を把握するため、曝露場より約10m内陸寄りの岩場に設置した飛来塩分測定器(土研式)により1993年9月～1996年8月まで測定した年間飛来塩分量は400～800Clmg/dm²であった⁴⁾。近接の網代測候所の2001年12月～2004年11月までの月平均気温の変動は、6～27℃であり、年間の平均気温は16.3℃であった。

また、試験体の曝露は、実際の床版を想定してかぶり側が下になるように設置した。

2.4 試験項目および方法

(1) 鉄筋の腐食面積率の測定

鉄筋腐食状況と腐食面積率測定は、曝露試験体から取り出した鉄筋に透明フィルムを巻き付けて、発錆部分を写し取り(中央350mm分)、腐食の状況を観察し、画像解析装置を用いて腐食面積率を測定した。

(2) 鉄筋の腐食量の測定

コンクリートに埋設する前の鉄筋の質量を予め測定しておき、解体時に取り出した鉄筋の質量減少から、腐食量を求めた。錆の除去は、60℃のクエン酸二アンモニウム10%水溶液に鉄筋を24時間浸漬し、ワイヤーブラシを用いて行った。

なお、曝露しなかった鉄筋についても同様の作業を行ない黒皮分を補正した。

3. 結果および考察

3.1 鉄筋の腐食状況

図-2に全面的に補修したA, C, F試験体および補修を行っていないE試験体の鉄筋腐食状況を示す。ここでは取り出した2本の鉄筋のうち1本の状況を示し、一点鎖線より上半分が反かぶり側、下半分がかぶり側を表している。A, C, F試験体では、いずれもかぶり側に比べ、反かぶり側の方が腐食が卓越していた。これは、曝露1年後の観察結果と同様の傾向である。

表-3 設定した試験体の補修条件

| 記号* | 補修 | | Cl ⁻ 量 (kg/m ³) | 表面被覆 | |
|-------|------|------|---|------|--|
| | 範囲 | 深さ | | | |
| 1-A-無 | 全面 | 鉄筋裏 | 0 | 上面無し | |
| 1-B-無 | 部分 | | | | |
| 1-E-無 | 補修無し | | | 全面塗布 | |
| 1-E-有 | | | | | |
| 2-A-無 | 全面 | 鉄筋裏 | 2.4 | 上面無し | |
| 2-B-無 | 部分 | | | | |
| 2-C-無 | 全面 | 鉄筋半分 | | | |
| 2-D-無 | 部分 | | | | |
| 2-A-有 | 全面 | 鉄筋裏 | | 全面塗布 | |
| 2-B-有 | 部分 | | | | |
| 2-C-有 | 全面 | 鉄筋半分 | | | |
| 2-D-有 | 部分 | | | | |
| 2-F-有 | 全面 | 鉄筋表面 | | | |
| 3-A-有 | 全面 | 鉄筋裏 | 4.8 | | |
| 3-B-有 | 部分 | | | | |
| 3-C-有 | 全面 | 鉄筋半分 | | | |
| 3-D-有 | 部分 | | | | |

*:塩分量の水準・試験体タイプ・上面被覆の有無



写真-1 海洋曝露試験場の状況

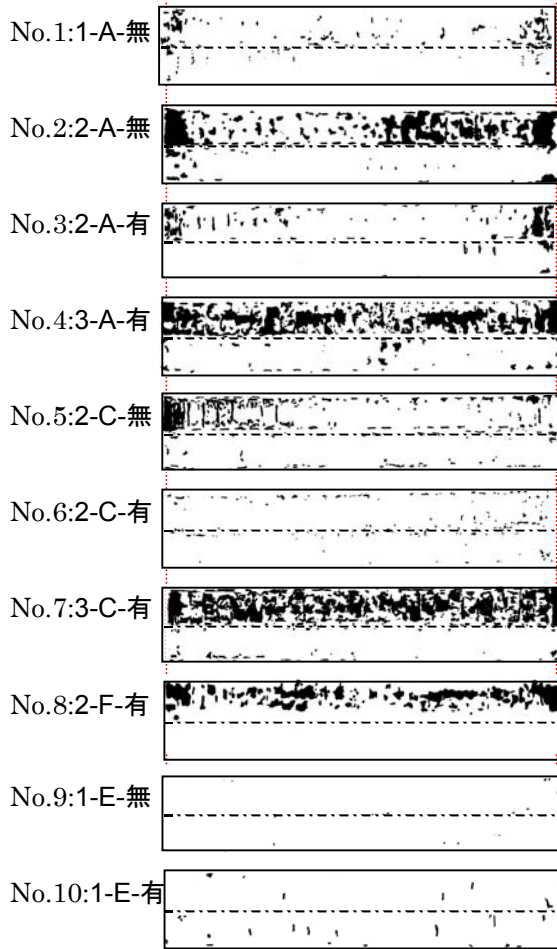
図-3に供試体の中央部を部分的に補修したB, D試験体の鉄筋の腐食状況を示す。

すべての試験体について、補修部との境界面にマクロセルによると思われる腐食が発生していた。特にB試験体では曝露1年時の観察結果と同様に、鉄筋の全周に腐食の発生が見られた。

このように、一般的に言われているとおり、部分補修がマクロセル腐食の原因となることが確認された。

また、曝露材齢1年時の観察結果では、補修部の鉄筋にはほとんど腐食が見られなかったが、今回の結果では、A, C試験体と同様に反かぶり側に腐食が進行していた。

なお、いずれの鉄筋も表面部に錆が発生して



図－2 鉄筋腐食の状況(全面補修，補修無し)

いるものの、鉄筋内部への腐食の進行はほとんど見られなかった。腐食面積率と腐食減少率の相関が確認されたため、本報では腐食面積率についてのみ取り扱うこととする。

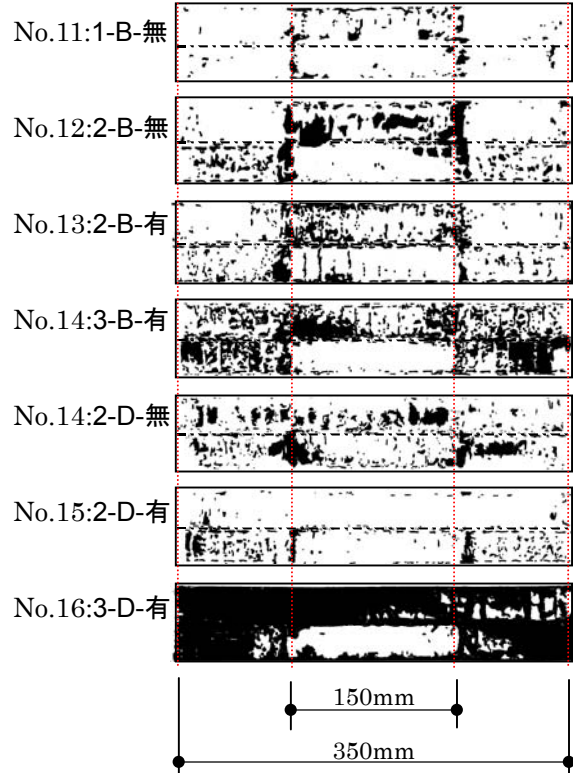
3.2 初期塩分の影響

供試体に混入した塩化物イオン量と腐食面積率の関係を図－4に示す。初期の塩化物イオン量が多いほど腐食面積率が大きくなった。

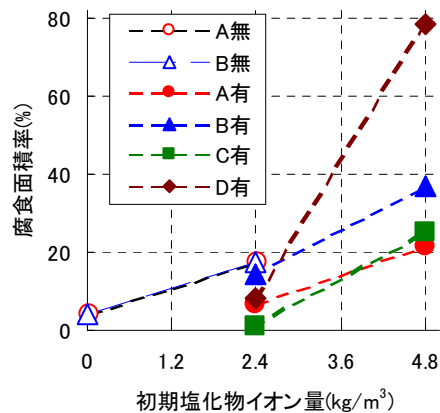
このことは鉄筋の裏まではつりとの適切な補修方法を行った供試体においても同様であり、補修を行った供試体は、いずれも内在する塩分が多いほど再劣化が起きやすくなることを示している。

3.3 腐食面積率

図－5～6に各供試体の腐食面積率を示す。この図ではかぶり側と反かぶり側の腐食面積率の値をそれぞれ累計している。したがって両側がすべて腐食している場合、グラフの腐食面積



図－3 鉄筋腐食の状況(部分補修)



図－4 初期塩分量と腐食面積率

率は200%となる。

(1)初期塩分 0kg/m³の場合

初期塩分を混入していない供試体の腐食面積率を図－5に示す。いずれも10%以下と少ないが腐食が生じている。特に断面補修を行わない供試体はほとんど腐食していないのと比較して、断面補修を行った供試体は腐食面積が大きかった。このことは、塩分を含有していない健全なコンクリートをはつって断面修復材により補修した場合、補修しない場合と比べてかえって劣

化を進行させる可能性を示していると考えられる。

また、マクロセルを想定した下面中央部のみ補修した供試体と下面全部を補修した供試体の腐食面積率の差は小さいものの、**図-2** (No.1) および**図-3** (No.11) に示すように両者の腐食の発生位置は異なっていた。

(2)かぶり側と反かぶり側の比較

3.1 節に記したように、下面全部を補修したすべての A,C,F 供試体は、反かぶり側の腐食が卓越していた。

一方、供試体の中央部を補修した B,D 供試体は、かぶり側と反かぶり側の腐食面積率がほぼ等しくなっており、A,C,F 供試体とは異なる傾向を示した。しかし、補修部では A,C,F 供試体と同様に反かぶり側の腐食面積が大きいことから、補修をしていない部分では補修部とは逆に、かぶり側の方が腐食が卓越していると言える。

(3)上面被覆の影響

図-6において、はつりの深さおよび位置の条件が等しい供試体間で比較すると、補修方法に関わらず、上下面被覆されたものは上面の被覆がないものと比べて腐食面積率が小さくなった。

これは、上面被覆がない場合、水分や酸素等の腐食因子の浸入により腐食が促進されたことによるものと考えられる

(4)はつり深さの影響

初期の塩化物イオン量が 2.4kg/m^3 の場合、塩分を含んだコンクリートを鉄筋裏まではつた供試体は、鉄筋の半分位置までしかはつらなかつた供試体に対して腐食面積率が大きくなった。この傾向は曝露1年目に部分補修をした B,D 試験体で観察されているが、今回は全面を補修した A,C 試験体についても同様であった。

一般に補修の際、塩分を含むコンクリートは十分に除去することが必要とされているが、今回の結果でははつり深さが深いほど腐食が進行

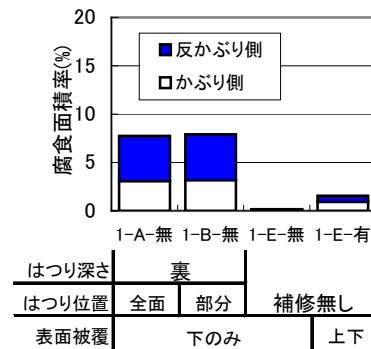


図-5 補修条件と腐食面積率 ($\text{Cl}^-0\text{kg/m}^3$)

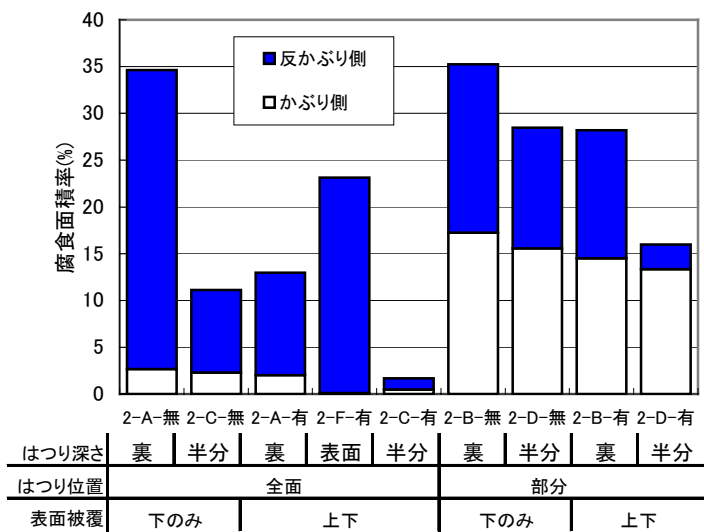


図-6 補修条件と腐食面積率 ($\text{Cl}^-2.4\text{kg/m}^3$)

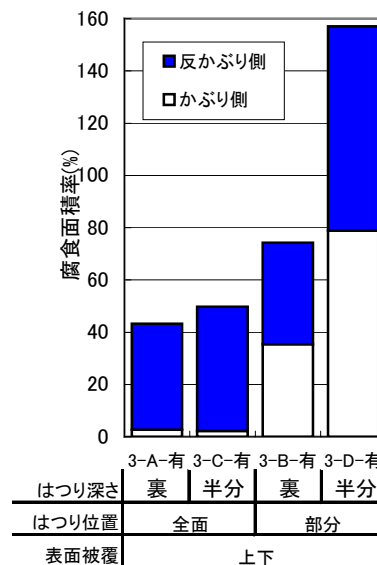


図-7 補修条件と腐食面積率 ($\text{Cl}^-4.8\text{kg/m}^3$)

するという従来の知見とは異なる結果が得られた。

これらの原因については今後、内陸曝露や曝露 5 年の供試体の解体調査の結果を踏まえて検討を行う予定である。

はつり深さが A, C 試験体のほぼ中間値である F 試験体は、はつり深さ以外の条件が等しい A, C 試験体と比較して腐食面積率が大きくなった。このことは曝露 1 年目の結果と同様である。

この一因として、F 試験体は図-1 に示すように鉄筋背面部で鉄筋と模擬はつり面が接していることから、鉄筋とコンクリートの接する隅角部に補修材料の未充填部が生じていることが考えられる。実際の補修工事においても F 試験体のような隅角部への吹付けとなるような条件での施工は避けるべきであると考えられる。

一方、初期塩化物イオン量が比較的大きい 4.8kg/m^3 の場合は、はつり深さが大きい方が腐食面積率が小さくなり、初期塩化物イオン量 2.4kg/m^3 の場合と異なる結果となった。

4. まとめ

各種条件により補修を行った鉄筋コンクリート供試体を海洋環境下に曝露し、3 年目の解体調査を行ない、補修条件と鉄筋の腐食の関係について検討した結果をまとめると、以下のようになる。

- (1) 全面補修および部分補修の試験体では、補修部では反かぶり側で腐食が卓越した。また、部分補修の試験体の未補修部ではかぶり側の腐食が卓越した。
- (2) 補修の条件に関わらず、初期塩分量が多い試験体ほど腐食面積率が大きくなった。
- (3) 塩分を含有していないコンクリートをはつって断面修復材により補修した場合、補修しない場合と比べて劣化を進行させる可能性がある。
- (4) 表面被覆をした試験体は腐食面積率が小さかった。
- (5) 塩分を含んだコンクリートのはつり深さが

深いほど腐食の進行していた供試体があった。

5. おわりに

本報は曝露 3 年目の結果であり、現象の説明にとどまり、理論的解釈を十分に行うことはできなかった。研究は現在も継続しており、今後の調査の結果から今回報告した現象の解明および新たな知見の提案ができることが期待される。

なお、本研究は、東京大学生産技術研究所 魚本研究室と以下に示す産学 17 団体との共同研究「劣化したコンクリート構造物の補修工法に関する共同研究」として行っているものである。

東急建設(株)、日本化成(株)、ショーボンド建設(株)、オリエンタル建設(株)、芝浦工業大学、太平洋マテリアル(株)、住友大阪セメント(株)、大日本塗料(株)、西松建設(株)、石川島播磨重工業(株)、飛島建設(株)、佐藤工業(株)、ブリヂストン(株)、熊谷組(株)、(株)エヌエムビー、電気化学工業(株)、前田建設工業(株)

参考文献

- 1)宇野祐一ほか:各種要因が補修後の再劣化に及ぼす影響,コンクリート工学年次論文報告集, Vol.25, No.1, pp.1559-1564, 2003
- 2)森本文太郎ほか:曝露条件の違いによる補修後の再劣化に関する研究,コンクリート工学年次論文報告集, Vol.26, No.1, pp.1707-1712, 2004
- 3)伊藤正憲ほか:補修条件の違いによる補修後の再劣化に関する研究,コンクリート工学年次論文報告集, Vol.26, No.1, pp.1701-1706, 2004
- 4)星野富夫ほか:海洋曝露環境の評価に関する検討,土木学会年次学術講演概要集, V-336, pp.732-733, 1997