

ASR劣化したPC梁試験体における耐荷性能推定技術に関する研究

(株) IHI インフラ建設	正会員	○廣井 幸夫
JIPテクノサイエンス(株)	工修	戸田 圭彦
京都大学大学院	博(工) 正会員	山本 貴士
(株) IHI インフラ建設	工修 正会員	高木 祐介

Abstract : A real-scale large prestressed concrete beam specimen (1.20m in width, 1.25m in depth, and 7.50m in length) deteriorated by ASR was constructed and the flexural loading test was carried out following the long-term exposure test for 7.5 years. After the loading test, the mechanical properties of concrete were obtained by cores drilled from the specimen. With the obtained information by the experimental study, an analytical study to represent the loading test was conducted. This paper describes the impact of the mechanical properties on the flexural capacity of the specimen, the comparison of the flexural capacities obtained by different analytical methods, and the relationship between the degree of the surface deterioration and the expansion to date.

Key words : Alkali-Silica-Reaction, Fiber model, ultrasonic pulse velocity, crack density

1. はじめに

アルカリシリカ反応 (以下 ASR) による構造物あるいは部材・部位ごとの劣化の程度は、温湿度などの環境条件、形状、配筋などの構造的拘束条件により、空間的に大きくばらつくことが多い。一方、コンクリート構造物の耐荷性能は、コンクリート、鉄筋、およびこれらの付着に関する力学特性に依存している。したがって、コンクリートの力学特性の低下をとまなう ASR 劣化では、ASR により劣化した構造物の安全性を確保する上で、構造物の劣化程度を的確に把握し、その情報を活用し耐荷性能を適切かつ定量的に評価することが望まれる。しかし、前述の劣化のばらつきの把握が困難なこともあり、ASR 劣化構造物の耐荷性能推定技術は、未だ確立されているとは言えない状況にある。国内における ASR に関する研究は、岩石、鉱物等、骨材面による材料的研究¹⁾、膨張挙動とコンクリートの力学性能の研究^{2), 3)}、鉄筋破断のメカニズムに関する研究¹⁾等、精力的に行われ、いずれも重要な知見が得られている。ASR 劣化構造物の耐荷性能に関する研究は多くあるものの、主に供試体レベルの実験であり、実構造物レベルの研究は少ない。

本研究では、ASR 劣化を受けたプレストレストコンクリート (以下 PC) 構造物を念頭に、図-1 に示す実物大を模した大型 PC 梁試験体 (1.2m×1.25m×7.5m) を製作し、約 7.5 年間長期暴露計測を行った後、載荷試験⁴⁾を行った。その後、ASR 試験体から採取したコアにより ASR 劣化コンクリートの物性値 (圧縮強度、引張強度、静弾性係数等) を確認し、それらの情報を活用し載荷試験結果を再現可能とする解析手法を検討した⁵⁾。本稿では、コアの物性値が ASR 劣化試験体の耐荷性能に与える影響、解析手法による耐荷性能の比較、さらに表面の劣化指標と膨張量の関係について記載する。

2. コアの物性値が耐荷性能に与える影響

2.1 再現解析の概要

筆者らは、ASR劣化したPC梁部材の耐荷性能の解析的評価法として、部材表面のひび割れ状態、膨

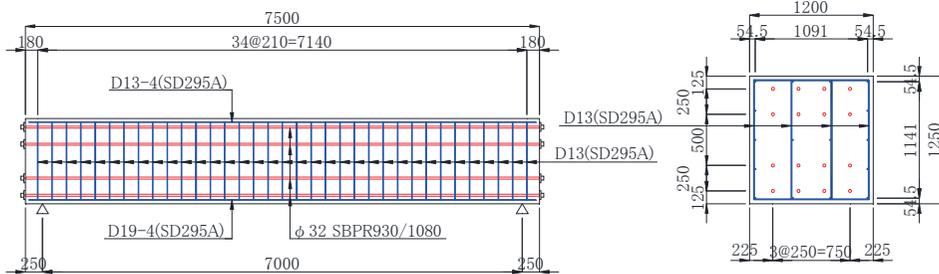


図-1 大型試験体寸法

張量,あるいは,試験体より採取したコアから推察するコンクリートの物性値を汎用3次元非線形FEM解析(ソリッドモデル)の入力値とし,耐荷力を算定する手法を提案している⁵⁾。以下にその概要を記す。

図-1に示す試験体は曲げ挙動が卓越する点,および解析の簡便性を考慮しコンクリートの物性値(圧縮強度,引張強度,静弾性係数)は橋軸方向値を採用した。健全試験体にて荷重試験結果を再現できる構成則等を設定し,初期剛性,最大荷重等の結果が一致することを確認した。ASR試験体の物性値は,劣化程度より断面の表面,内部にて相違させた。解析に用いた物性値を表-1に記す。表面部は,劣化が顕著な部位とし,軸方向鉄筋かぶりの約2倍(100mm)の領域にて採取コア(以下TP)値を採用した。内部は,プレストレス等による拘束により,拘束解放されたTPに比べ高い値と推察し,事前に表-2の橋軸TP内部値を基本とした感度解析を行い,最大荷重等が荷重試験結果に合致する値を検討し決定(表-1)した。表面と内部の物性値の分割を図-2に記す。最大荷重は荷重試験結果に対し94%と概ね実験結果を再現(表-1,図-9)できた。なお,荷重試験時,機材損傷の懸念等により,約15mmの変位後,変位計等を取り外し計測した。

2.2 コアの物性値が耐荷性能に与える影響

筆者らが提案した再現解析結果は既に報告⁵⁾しているが,その結果に至る経緯にて,コアの物性値が耐荷性能に与える影響について検討した内容を記載する。

ASR劣化したPC構造物において,橋軸方向のコア採取は困難であり,一般的に鉛直方向,橋軸直角方向からの採取となる。そこで,上記手法にて鉛直方向コア(以下鉛直TP)を用いた解析を行った。橋軸方向コアは内部からも採取しており,表面,内部とも橋軸方向コアを用いた解析(以下橋軸TP)も行った。コア採取位置,寸法を図-3,鉛直TP,橋軸TP解析時の物性値を表-2,およびTPの圧縮強度 f_c と静弾性係数/圧縮強度(E_c/f_c)の比⁶⁾を図-4に記す。ASR試験体の橋軸TPは, f_c が低下しても(E_c/f_c)は健全と同程度なのに対し,鉛直TPでは著しく低下した。こ

表-1 ASR試験体の解析に用いる物性値

	健全	ASR(健全比)	
		表面	内部
圧縮強度(%)	100	59	90
弾性係数(%)	100	53	80
引張強度(%)	100	43	90

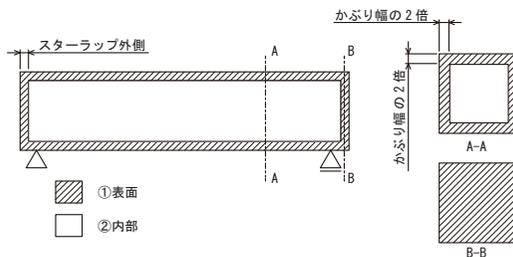


図-2 表面と内部領域の物性値の分割

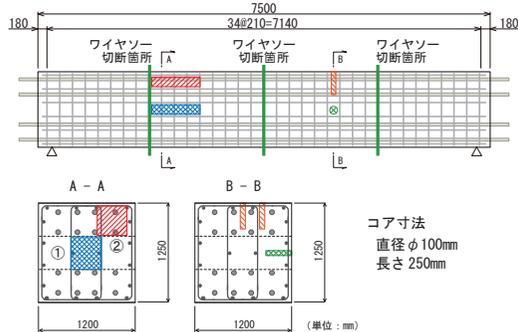


図-3 TP採取位置

表-2 鉛直TP,橋軸TPの物性値(健全試験体比)

	鉛直TP	橋軸TP	
		表面	内部
圧縮強度(%)	44	59	68
弾性係数(%)	18	53	61
引張強度(%)	48	43	50

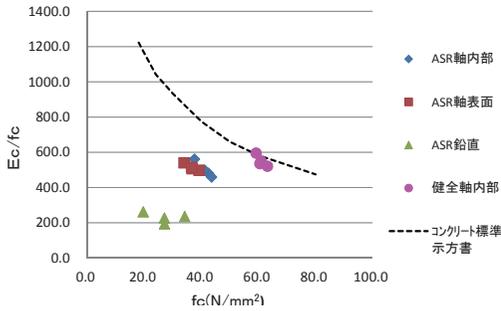


図-4 TPの f_c と $E_c/f_c^{(6)}$

れは、プレストレス等の拘束の影響がないことに加え、鉛直TPでは、圧縮荷重方向に直角なASRひび割れ(梁軸方向ひび割れ)が顕著となり(図-5)、圧縮試験時、このひび割れが閉合することにより圧縮変形が増大し、物性値、特に E_c の低下に繋がったと推察される。

鉛直TP、橋軸TP解析結果(図-6)より、初期剛性、最大荷重とも載荷試験値と乖離する結果となった。最大荷重の載荷試験比は、鉛直TP、78%、橋軸TP、90%であった。特にプレストレス拘束方向と異なる鉛直TPでは、ASR劣化したPC構造物の耐荷性能を正しく評価することは困難であることを確認した。

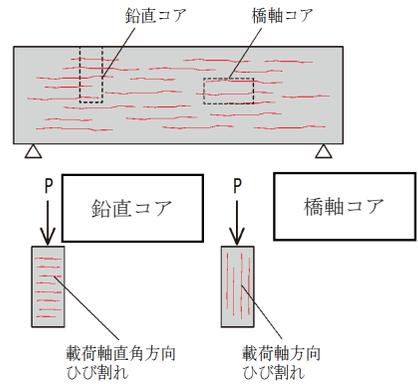


図-5 コアと水平ひび割れの関係

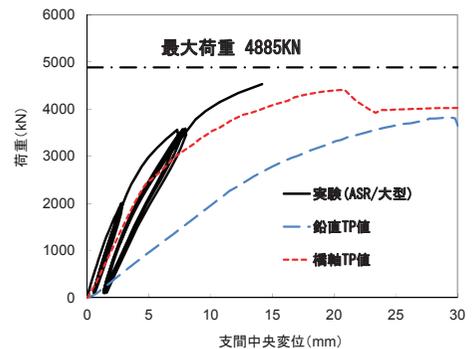


図-6 鉛直TP、橋軸TPによる解析結果荷重変位曲線

3. 解析方法による耐荷性能の比較

3.1 ファイバーモデルによる解析

ASR劣化構造物の耐荷性能の算定において、汎用3次元非線形FEM解析モデル(以下ソリッドモデル)での対応は煩雑、かつ高価である。そこで、ソリッドモデルよりも簡便にてコストパフォーマンスに優れ、ソリッドモデル同様、ASR劣化によるコンクリートの物性値低下を表面、内部にて相違させる手法が可能なファイバーモデルでの対応を試みた。ファイバーモデルとは、梁要素断面を微小面積に分割し、コンクリートおよび鋼材(鉄筋、PC鋼材)の応力-ひずみ関係を与え、断面内の力のつり合いと平面保持の仮定をもとに算定する手法である。要素支持点、載荷点寸法を図-7に記す。PC鋼材、軸方向鉄筋は埋め込み鉄筋要素でモデル化した。コンクリートの応力-ひずみ関係は、筆者らが報告したソリッドモデル同様に、圧縮側は二次曲線と線形圧縮軟化を組み合わせたモデルとし⁷⁾、引張側は、引張強度までは線形弾性にてひび割れ後は線形軟化するモデルとした(図-8)⁵⁾。また、圧縮破壊エネルギー G_{fc} (N/mm)は、(1)式⁸⁾にて、引張破壊エネルギー G_{ft} (N/mm)は、(2)式⁹⁾にてそれぞれ算

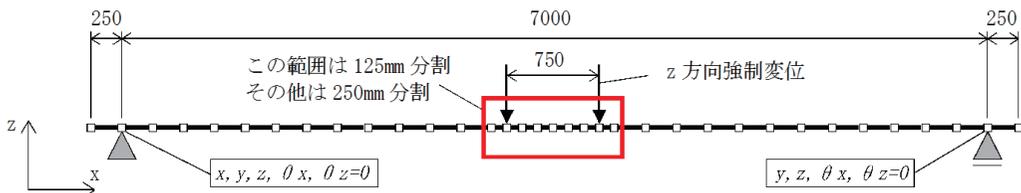


図-7 大型試験体のファイバーモデル

出した。

ここで、 d_{max} は、粗骨材の最大寸法20mm、 h は等価長さにて、部材軸方向の要素長 (125, 250mm) とした。コンクリートの物性値は表-1の値とし、ソリッドモデル同様、表面、内部にて相違させた (図-2)。なお、鉄筋の応力-ひずみ関係はバイリニアモデル、PC鋼材の応力-ひずみ関係はトリニアモデルとした。

$$G_{fc} = 8.77 \sqrt{f_c} \quad (1)$$

$$G_{ft} = d_{max} \frac{1}{3} f_c \frac{1}{3} / 100 \quad (2)$$

3.2 解析方法による耐荷性能の比較

解析結果を図-9～図-11、最大荷重の比較を表-3に記す。解析結果より、ファイバーモデルによる初期剛性、最大荷重および各ひずみの結果は、実験値、ソリッドモデルと概ね合致している。ファイバーモデルでは、急激な荷重低下は生じなかったため、圧縮縁のひずみが終局ひずみ 3500μ に達したステップを終局荷重と定義し解析を打ち切った。ソリッドモデルでは圧縮縁コンクリートが圧縮軟化域に入ると平面保持は成立せず圧縮縁の要素にひずみが集中するのに対し、ファイバーモデルでは圧縮縁が軟化域に入った後も、平面保持が保たれるためではないかと推察される。

一方、曲げひび割れ発生後の剛性は両解析結果とも実験値との差異が確認された。ASR 試験体の載荷試験時、ASR による水平ひび割れに抑制され、曲げひび割れの上方向への進展挙動が緩慢となり、ひび割れ発生後の剛性低下が緩やかであったと報告されている⁴⁾。両解析モデルとも、このような特有の曲げひび割れ挙動は考慮していないため、ひび割れ発生後の剛性に差異が生じたと推察される。

以上より、本試験体のような曲げ挙動が卓越する構造においては、筆者らが提案した試験体から採取したコアの特性から ASR 劣化コンクリートの物性値を推定し、その物性値を断面の表面、内部にて相違させ、ファイバーモデルに適用することにより、ASR 劣化した PC 梁部材の初期剛性、最大荷重、各種ひずみ等を概ね算定することは可能であることを確認した。

表-3 大型試験体の最大荷重の比較

大型健全 (KN)			大型ASR (KN)		
実験	ソリッドモデル	ファイバーモデル	実験	ソリッドモデル	ファイバーモデル
4908	4901	5090	4885	4611	4616
実験比	100%	104%	実験比	94%	94%

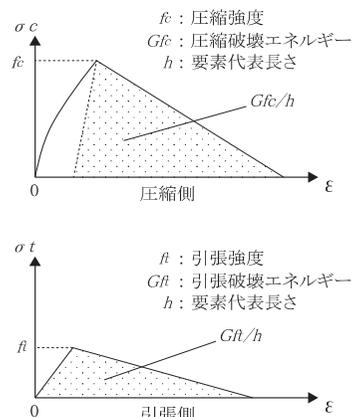


図-8 コンクリートの応力-ひずみ曲線

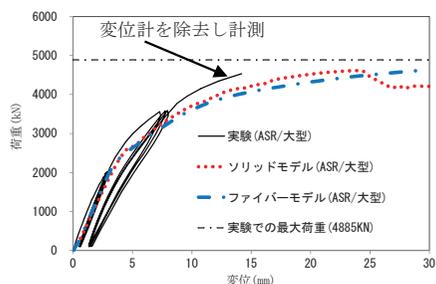


図-9 ASR 試験体の荷重-変位曲線

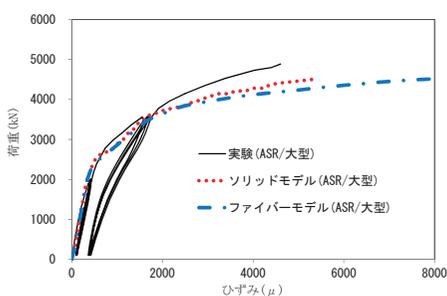


図-10 最下段 PC 鋼材の荷重ひずみ曲線

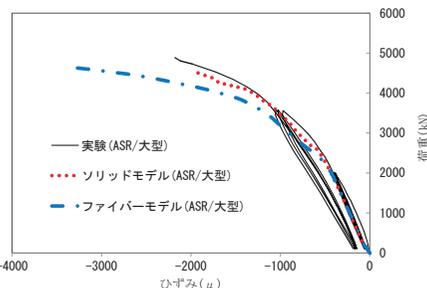


図-11 上縁コンクリートの荷重ひずみ曲線

4. 表面の劣化指標と膨張量の関係

4.1 膨張量についての推定

筆者らが提案した手法では、膨張量と材料特性残存率の関係 (図-12) より、ASR劣化したコンクリートの物性値を推定している⁵⁾。ASR劣化の程度を表現する指標として膨張量は有効である。しかし、実構造物にて新設時からの膨張量を測定することは困難である。そこで、約7.5年間長期暴露計測した結果を用い、表面の劣化指標と膨張量の関連性についての検討を行った。

4.2 膨張量とひび割れ密度

橋軸直角方向の膨張量とひび割れ密度の関係を図-13、図-14に記す。ここでひび割れ密度は、実構造物への適用を勘案しひび割れ幅0.2mm以上にて算定した。また、ひび割れ密度は、単位面積あたりのひび割れ長さの合計にて示す方法 (以下A法) のみでなく、筆者らが提案した単位面積あたりの「ひび割れ長さ×ひび割れ幅」にて示す方法 (以下B法) の2タイプにて算定した¹⁰⁾。以上より、橋軸直角方向の膨張量とひび割れ密度は、最小二乗法による線形回帰分析により高い相関性を確認した。また、その相関性はB法の方が高いことを確認した。ASRによるひび割れは、ある一定時期より新しいひび割れの発生よりもひび割れ幅が増大する傾向を示す。そのため、ひび割れ幅を考慮できるB法の方が膨張量との相関性が高くなったと推察される。

4.3 膨張量と超音波伝播速度

橋軸直角方向の膨張量と超音波伝播速度の関係を図-15に記す。ASR試験体の超音波伝播速度は、既往の研究¹¹⁾にて膨張量と負の相関関係 (0.77) が報告されている。本研究における橋軸直角方向膨張量と超音波伝播速度の関係は、最小二乗法を用いた二次関数による回帰分析にて、より高い相関性 (0.957) を確認した。これは膨張量が一定値 (3000 μ) 以上になると、超音波伝播速度の低下傾向が鈍化することを示している。本研究にて測定した膨張量の範囲 (6500 μ 程度) であれば、この関係式を用いることにより、超音波伝播速度の測定値にて膨張量を推定することが可能である。

今後、上記データの蓄積により関連性を向上させることができれば、ひび割れ密度や超音波伝播速度を計測することにより、ASR劣化構造物の膨張量を算定することができる。さらに、この膨張量と材料特性残存率の関係によりASR劣化したコンクリートの物性値 (圧縮強度、静弾性係数、引張強度) を推定することが可能となる。

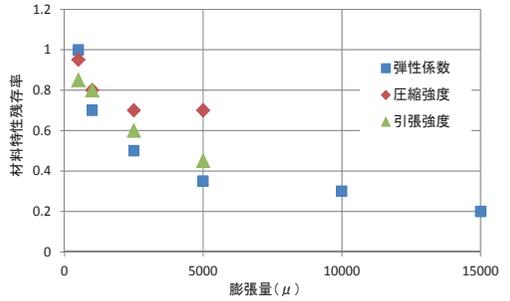


図-12 膨張量と材料特性残存率¹⁾

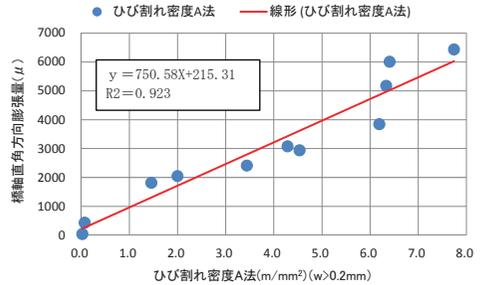


図-13 方法Aによるひび割れ密度と膨張量

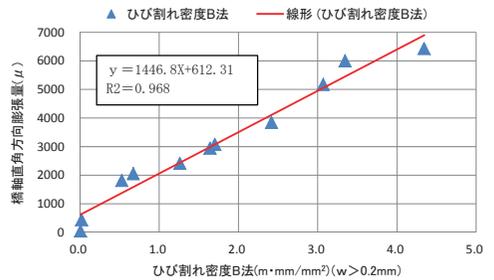


図-14 方法Bによるひび割れ密度と膨張量

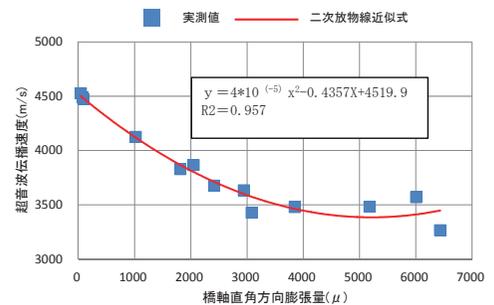


図-15 超音波伝播速度と膨張量

5. まとめ

本研究では、コアの物性値が ASR 劣化試験体の耐荷性能に与える影響、解析手法による耐荷性能の比較、さらに表面の劣化指標と膨張量の関係についての検討を行った。得られた知見を以下に示す。

- (1) 鉛直方向コアを用いた鉛直 TP、表面、内部とも橋軸方向コアを用いた橋軸 TP における解析の結果、載荷試験値と乖離した結果となった。特にプレストレス拘束方向と異なる物性値（鉛直 TP）では、ASR 劣化した PC 構造物の耐荷性能を正しく評価することは困難であることを確認した。
- (2) 本試験体のように曲げ挙動が卓越する構造においては、ファイバーモデルに筆者らが提案したソリッドモデル同様の入力値を適用することにより、ASR 劣化した PC 梁の初期剛性、最大荷重、各種ひずみ等を算定することが可能であることを確認した。
- (3) ひび割れ密度 B 法と橋軸直角方向膨張量、超音波伝播速度と橋軸直角方向膨張量に高い相関性があることを確認した。

以上より、目視点検や非破壊検査の結果を、ひび割れ密度と膨張量、超音波伝播速度と膨張量の関係式に用いることにより、ASR 劣化構造物の膨張量を推定でき、この膨張量より ASR 劣化したコンクリートの物性値を算定できる。曲げ挙動が卓越する PC 梁構造であれば、この物性値をファイバーモデルに適用することにより、ASR 劣化構造物の最大耐力等を評価することが可能となる。

謝辞

本研究は、国土交通省建設技術研究開発費助成事業「ASR 劣化構造物の力学性能推定技術の確立（研究代表者：京都大学 宮川豊章）」の一部として行ったものであることを記し、謝意を表する。

参考文献

- 1) 土木学会：アルカリ骨材反応対策小委員会報告書—鉄筋破断と新たな対応—, 2005.
- 2) 久保, 上田, 黒田, 野村：アルカリ骨材反応による膨張がコンクリートの力学性能に与える影響, コンクリート工学年次論文集, vol.28, No.1, pp.1691-1696, 2006.
- 3) 久保, 渡邊, 森, 小川：ASR 膨張が内部コンクリートの強度特性に与える影響, コンクリート工学年次論文集, vol.30, No.1, pp.1071-1076, 2008.
- 4) 廣井, 大久保, 桐川, 宮川：ASR 劣化した PC 大型試験体の載荷試験報告, プレストレストコンクリート工学会 第 22 回シンポジウム論文集, pp.195-198, 2013.
- 5) 戸田, 佐藤, 山本, 廣井：ASR を生じた PC 梁試験体の耐荷性能評価に用いる FEM 解析モデルの検討, プレストレストコンクリート工学会 第 23 回シンポジウム論文集, pp.95-100, 2014.
- 6) 小林, 森, 野村：圧縮載荷試験によるアルカリ骨材反応の診断方法, 土木学会論文集, No.460/V-18, pp.151-154, 1993.
- 7) 日本コンクリート工学協会：構造技術者のための非線形有限要素法の基礎と応用と実例, 2008.
- 8) 山谷, 中村, 檜貝：回転ひび割れモデルによる RC 梁のせん断挙動解析, 土木学会論文集, No.620/V-43, pp.187-199, 1999.
- 9) 土木学会コンクリート委員会：コンクリート標準示方書[設計編], 2013.3
- 10) プレストレスト・コンクリート建設業協会：ASR 対策検討委員会報告書, 2009.
- 11) 岩波, 横田, 奥山, 鳥居：ASR 損傷を受けたコンクリート柱の力学挙動と補強方法に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.704/v-55, pp.129-142, 2002.