

論文 鉄筋の腐食した RC 柱の炭素繊維シートによるせん断補強効果

鹿毛忠継^{*1}・友澤史紀^{*2}・野口貴文^{*3}・李翰承^{*4}

要旨：鉄筋の腐食した RC 柱の構造性能及び炭素繊維シートによるせん断補強効果を帯筋の腐食程度と炭素繊維シートによる補強の有無を因子として正負交番繰返し水平加力実験によって行った。その結果、構造性能の低下の原因は、鉄筋の力学性能低下と鉄筋の破断、鉄筋とコンクリートの付着破壊及びかぶりコンクリートの剥落による拘束力の低下であることが明らかになった。また、炭素繊維シートによるせん断補強は、付着割裂ひびわれ及びせん断ひびわれ拡大の防止及び炭素繊維シートによる拘束効果のため鉄筋の腐食した RC 柱の靱性を向上させるのに有効な工法であることが実験的に確認された。

キーワード：RC 柱、鉄筋腐食、炭素繊維シート、せん断補強、補修

1. はじめに

鉄筋コンクリート造建物の主要構造部材である柱は、主に固定荷重や積載荷重による軸力を受けているが、地震時には、水平力による曲げモーメントやせん断力が繰返し作用し、耐震性能に乏しい RC 柱では、せん断破壊や付着破壊のような脆性的な破壊を示す。特に、阪神大地震の以後は耐震性能が低い場合の RC 柱の補強に関する研究が盛んに行われ、新素材及び新工法による RC 柱の補強が現場で活発に行われている。しかし、RC 柱の鉄筋が著しく腐食した場合は、かぶりコンクリートのひびわれによりコンクリートの有効断面積が減少したり、帯筋や主筋の断面欠損やコンクリートと鉄筋の付着破壊によって地震時には脆性的なせん断破壊が生じる恐れがある。従って、RC 柱部材の耐震安全性を確保させるためには、鉄筋腐食が RC 柱の耐力性能に及ぼす影響を明らかにする必要がある。現在、鉄筋が腐食した RC 構造部材の耐力性能に関する研究は、主に曲げを受ける梁部材の研究がいくつかあるものの、軸方向力の卓越する柱部材に関する研究は数少ない。

本研究では、鉄筋の腐食が RC 柱の耐力性能に及ぼす影響を把握するために、帯筋の腐食を 3 段階に変化させた腐食試験体を用いて、正負交番繰返し水平加力実験を行い、RC 柱の破壊モード及び耐力性能の変化について検討した。また、軽量・高強度・高耐食性・非磁性といった材料特性を持つ炭素繊維シートを用いた補強工法により鉄筋が腐食した RC 柱のせん断補強を行い、その補強効果について検討した。

2. 実験概要

2. 1 試験体の種類

試験体は全部で 6 体であり、変動因子は、鉄筋の腐食程度と炭素繊維シートによる補強の有無である。表-1 に試験体の種類を示す。

*1 建設省建築研究所 第 2 研究部, 学術博士 (正会員)

*2 東京大学教授 工学系研究科建築学専攻, 工博 (正会員)

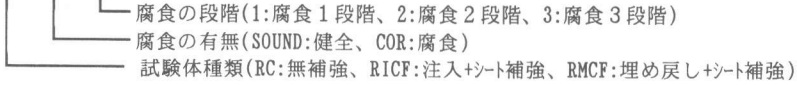
*3 東京大学助手 工学系研究科建築学専攻, 博士 (工学) (正会員)

*4 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻, 博士 (工学) (正会員)

表-1 試験体の種類

試験体記号	積算電流量 (A・hours)	横補筋比 Pw(%)	軸力比 N/No	備考
RC-SOUND	0	D10@80 0.6(%)	0.2	健全試験体
RC-COR-1	4A・2週 (1344)			補強なし(腐食1段階)
RICF-COR-1	4A・2週 (1344)			エポキシ樹脂注入による補修+シート補強
RC-COR-2	4A・4週 (2688)			補強なし(腐食2段階)
RMCF-COR-2	4A・4週 (2688)			エポキシ軽量珪砂による埋め戻し+シート補強
RC-COR-3	4A・8週 (5376)			補強なし(腐食3段階)

記号:RC-COR-1



2.2 試験体の製作および炭素繊維シートの貼付方法

試験体の形状とシートの貼付方法を図-1、材料の特性を表-2～表-5に示す。共通要因は、シア率比(M/QD=1.83)、引張鉄筋比(Pt=0.88%)、軸力(N=Fc/5)である。RC柱の帯筋の腐食促進は図-2の電食法によって行った。また、腐食段階は、積算電流量によって表-1に示すように調節した。

表-2 コンクリートの調合表

W/C (%)	s/a (%)	スラブ厚 (cm)	単位容積質量(kg/m ³)			
			水	セメント	縦骨材	粗骨材
65	45	18	185	285	776	1007

表-3 コンクリートの力学特性

圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	ポアソン比
39.2	29400	0.19

表-4 鉄筋の力学特性

種類	降伏点強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)
D16	362.8	537.4	191000
D10	347.2	540.3	174000

表-5 炭素繊維シートの材料特性

CF重量 (g/m ²)	CF断面積 (cm ² /m幅)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)
175	0.97	3432.3	284000

2.3 荷重方法及び測定項目

図-3に荷重方法を示す。建研式加力装置を用い、一定軸力下で図-4に示す荷重履歴にしたがって変位制御による正負交番繰り返し加力を行った。測定項目は、水平力及び軸力、水平変位、鉛直変位、端部の回転角、鉄筋及びシートのひずみであり、試験後に鉄筋の腐食程度を調べた。

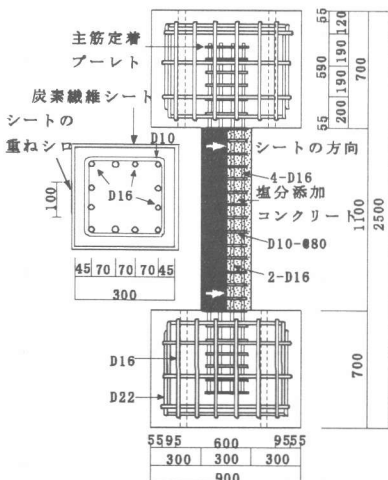


図-1 試験体の形状及びシートの貼付方法

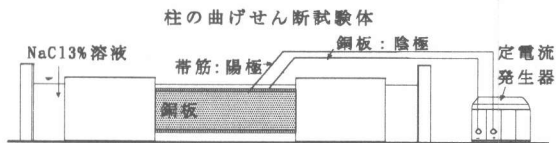


図-2 電食法によるRC柱の帯筋の腐食促進方法

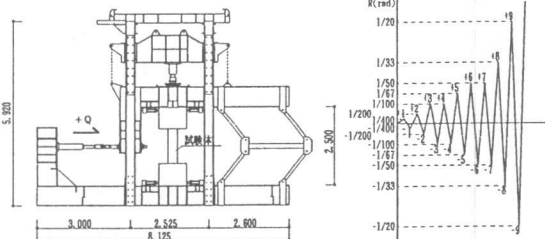


図-3 荷重装置

図-4 荷重履歴

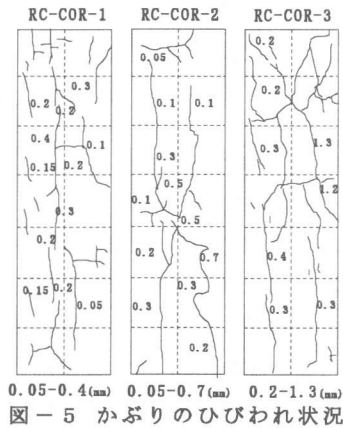
3. 実験結果および考察

3.1 鉄筋腐食によるかぶりコンクリートのひびわれ状況及び鉄筋の腐食程度

図-5は、腐食試験体のひびわれ状況である。主に主筋に沿った軸方向のひびわれやコーナー部分でのひびわれが帯筋方向のひびわれより目立つ。これは、主筋の径が帯筋より太いことと、帯筋の腐食膨張圧によってかぶりコンクリートが全体的に膨らんだことも影響していると考えられる。ひびわれ発生後、ひびわれを通じて水が浸透するために先にひびわれが生じた部分のひびわれが生じた部分の鉄筋がさらに腐食し、ひびわれが拡大した。載荷試験後の主筋及び帯筋の腐食程度を観察すると、黒錆が鉄筋の全面に広がっており、鉄筋の表面には浮き錆と一部鉄筋の断面欠損があった。腐食1段階の腐食グレードはⅢ、腐食2と3段階はⅣ程度であり[5]、腐食3段階であるRC-COR-3は鉄筋の断面積が半分以下に減少したところもあった。また、腐食の特徴は、腐食ひびわれ部分及び折り曲げ部分の帯筋に局部腐食があり、この現象は、腐食ひびわれ部分に水が浸透しやすくなることと、帯筋の折り曲げ部分は鉄筋加工による高応力がかかっているためであると考えられる。

3.2 試験体の破壊状況及び実験結果の一覧

表-6に試験結果を、図-6に試験体の破壊状況を示す。RC-SOUNDは、部材角1/100で主筋の降伏（計算降伏荷重：278.5kN-建築学会式）によるコンクリートの圧壊が生じた後、部材角1/67でX状の付着ひびわれが多数生じており付着割裂破壊した。一方、RC-COR-1及びRC-COR-2は、載荷によって腐食ひびわれが拡大する特徴があり、部材角1/67でも加力による新たな付着ひびわれは少なかった。これは、鉄筋腐食によってコンクリートと主筋の付着性能が低下したため、主筋にかかる応力をコンクリートに伝達できないためである。また、部材角1/20で試験体のかぶりコンクリートが完全に剥落する付着割裂破壊を示した。破壊後は、

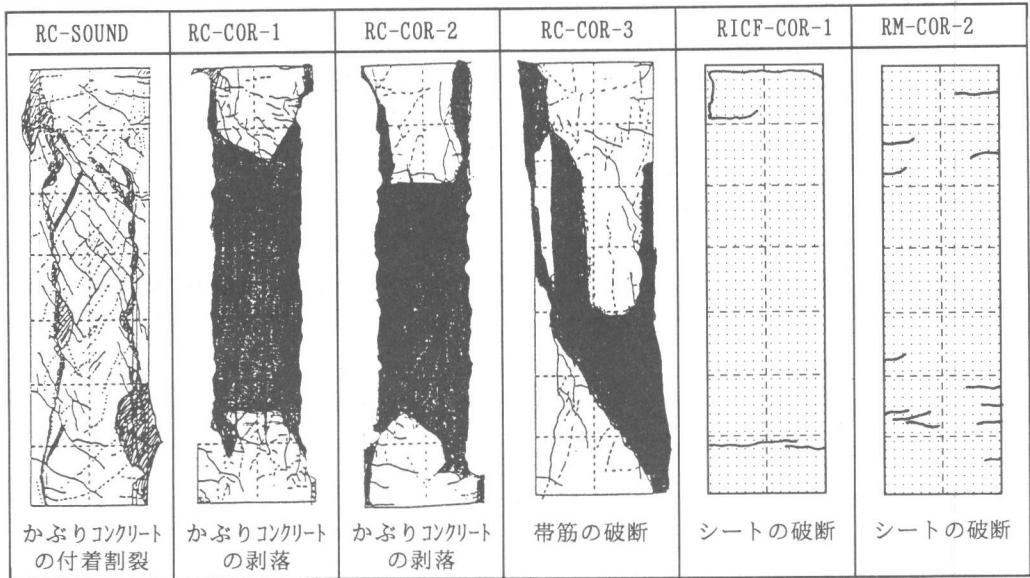


鉄筋が露出しており、試験体のコア部分だけが残ったことから、鉄筋腐食による腐食ひびわれは試験体内部でかぶりコンクリートとコア部分の境界部（鉄筋位置）全面に発生し、これがかぶりコンクリートの剥落の原因であると考えられる。また、RC-COR-3試験体は1/100で帯筋の破断が生じた後すぐ主筋が座屈するせん断破を示した。補強試験体であるRICF-COR-1は部材角1/50でシート方向に沿って曲げひびわれが発生し、-1/20で試験区間上部の角部分のシートが破断しながらせん断破壊した。RMCF-COR-2は1/100でシート方向に沿って曲げひびわれが生じ1/20でも破壊しなかったの、さらに加力した結果、部材角1/15で上部の角部分のシートが破断しながらせん断破壊した。

表-6 実験結果の一覧

試験体記号	初期剛性 (kN/cm)	降伏耐力時		最大耐力時		限界変形 (rad)	塑性率	破壊モード
		(kN)	(rad)	(kN)	(rad)			
RC-SOUND	561.9	282.4	1/110	288.3	1/100	1/52	2.10	MC→B0
RC-COR-1	616.8	255.6	1/129	258.3	1/104	1/68	1.62	B0
RICF-COR-1	635.5	283.8	1/118	292.2	1/101	1/23	4.72	MC→SC
RC-COR-2	600.2	232.4	1/157	234.8	1/115	1/67	1.64	B0
RMCF-COR-2	490.3	247.1	1/129	259.8	1/100	1/22	5.01	MC→SC
RC-COR-3	628.6	246.6	1/159	251.6	1/146	1/100	1.10	B0→SC

初期剛性：部材角1/400まで、限界変形部材角：最大耐力後、最大耐力の80%に耐力が低下した時点の部材角
塑性率：限界変形部材角/健全試験体の降伏部材角、破壊モード：SC→せん断、MC→曲げ、B0→付着割裂



* 黒いのはかぶりコンクリートが剥落した部分である。

図-7 試験体の破壊状況

3.3 変形性状

(1) 帯筋の腐食の影響

図-7及び図-8に鉄筋腐食が荷重-変形関係に及ぼす影響を示す。RC-SOUNDは、部材角1/100で鉄筋降伏による剛性低下が生じ、部材角1/67で鉄筋とコンクリートの付着割裂ひびわれ発生によって耐力が急激に低下した。また、その後の繰り返し载荷により耐力が低下し、付着割裂破壊した。一方、RC-COR-1及びRC-COR-2は、部材角1/100で腐食ひびわれが広がって鉄筋とコンクリートの付着破壊による剛性が低下しながら、最大耐力に至った後、繰り返し载荷により耐力が低下した。RC-COR-3は部材角1/100で付着破壊による耐力低下が起き、部材角1/67で帯筋の破断によって軸力を保持できなく主筋の座屈が起り耐力が急に低下する脆性的なせん断破壊を示した。試験後、鉄筋の腐食程度を調べると鉄筋が局部的に半分ぐらいになった部分があり、鉄筋もその部分で破断していた。従って、鉄筋が腐食したRC柱の耐力性能及び変形性能の低下は、鉄筋腐食による鉄筋そのものの力学的性能低下、鉄筋の局部腐食による鉄筋の破断、繰り返し加力によるかぶりコンクリートの剥落からコンクリートによる拘束力がなくなったのがその原因であることが明らかになった。

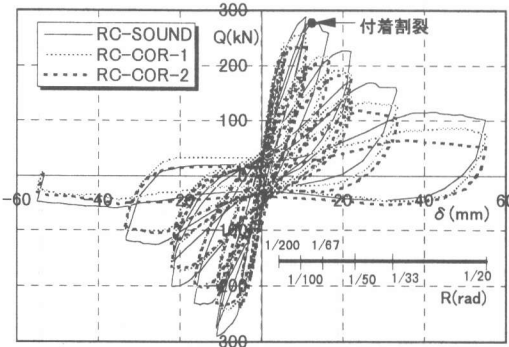


図-7 荷重-変形関係 (鉄筋腐食の影響)

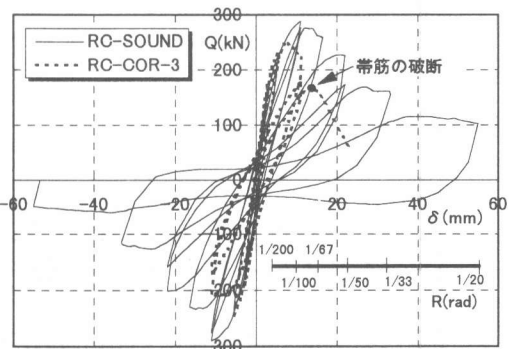


図-8 荷重-変形関係 (鉄筋腐食の影響)

(2)炭素繊維シートによる補強効果

図-9及び図-10は、炭素繊維シートによってせん断補強した試験体の荷重-変形関係である。部材角1/100~1/50で炭素繊維シートの繊維方向に沿って曲げひびわれが発生しており、繰り返し荷重によって耐力が低下するものの、せん断ひびわれや腐食ひびわれの拡大を補修材料及び炭素繊維シートが防止すること、炭素繊維シートによる拘束効果のため、耐力低下は小さく、腐食試験体に比べ著しく靱性が改善された。RICF-COR-1は部材角1/20で炭素繊維シートの破断によって急に耐力が低下したが、RMCF-COR-2は部材角1/20でも破壊しなかったため、さらに加力を行った結果、部材角1/15で角部分の炭素繊維シートの破断によって耐力が急激に低下した後せん断破壊した。

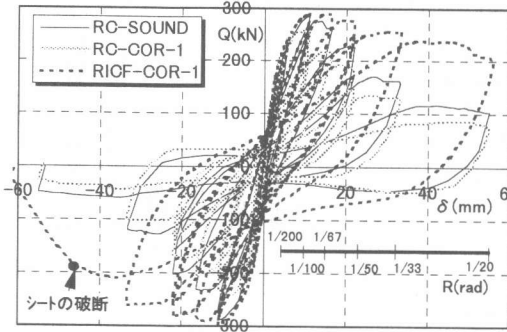


図-9 荷重-変形関係 (注入+シート補強)

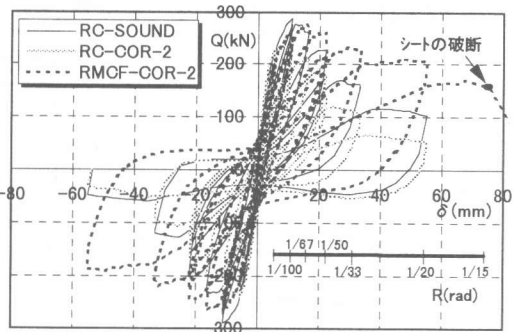


図-10 荷重-変形関係 (埋め戻し+シート補強)

3.4 初期剛性及び限界変形

図-11は、部材角1/400までの初期剛性である。腐食試験体の初期剛性は、健全試験体に比べ大きく、これは、鉄筋腐食膨張圧によるコアコンクリート部分へのコンファインド効果や錆の噛み合い効果によるものと考えられる。一方、RICF-COR-1の剛性はRC-COR-1とあまり変わらないが、RMCF-COR-2の剛性はエポキシ軽量モルタルの弾性係数がコンクリートより小さいためRC-COR-2より小さかった。従って、シートでせん断補強した試験体の剛性は補修工法や補修材料の力学的性能（弾性係数）により影響を受けることがわかった。図-12は最大耐力後、最大耐力の80%に耐力が低下した時点の部材角を限界変形として求めた限界変形部材角であるが、腐食程度が大きくなると鉄筋とコンクリートの付着破壊によって限界変形部材角は小さくなった。しかし、RICF-COR-1及びRMCF-COR-2の限界変形部材角は補修による付着割裂の防止及び炭素繊維シートによる拘束効果のため腐食試験体より著しく大きくなった。図-13はコーナー部のシートのひずみ変化であるが、載荷によるせん断力をシートが負担し、シートの歪みは増加しながら、約5000 μ で剥離を生じた。

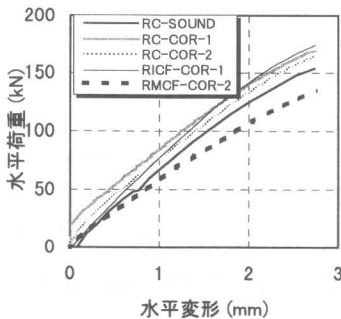


図-11 初期剛性

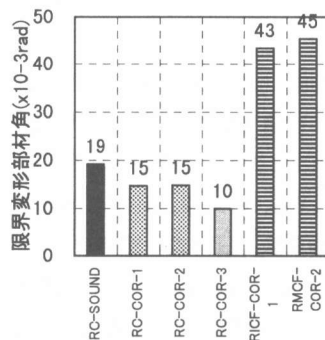


図-12 限界変形

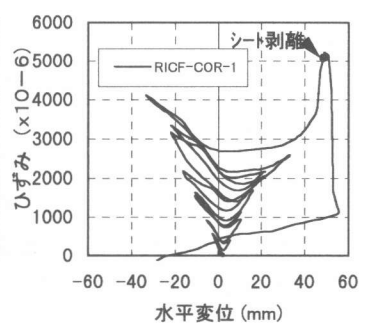


図-13 シートのひずみ変化

3. 5 累積エネルギー吸収量及び塑性率

図-14は、水平荷重と水平変形量の積で計算した累積ひずみエネルギー吸収量である。部材角1/100までは健全試験体と腐食試験体の差はないが、腐食程度が大きくなると部材角の増大によってエネルギー吸収量は低下し、その差は部材角が大きくなるほど広がった。しかし、炭素繊維シート補強によって累積エネルギー吸収量は著しく大きくなった。図-15はRC-SOUNDの降伏耐力時の部材角と限界変形部材角の比から算出した塑性率であるが、腐食程度が大きくなると塑性率は低下するが、シートによって補強することによって約2倍になる。従って、炭素繊維シートによるせん断補強は鉄筋腐食によって靱性が低下したRC柱の補強工法として有効であることがわかった。

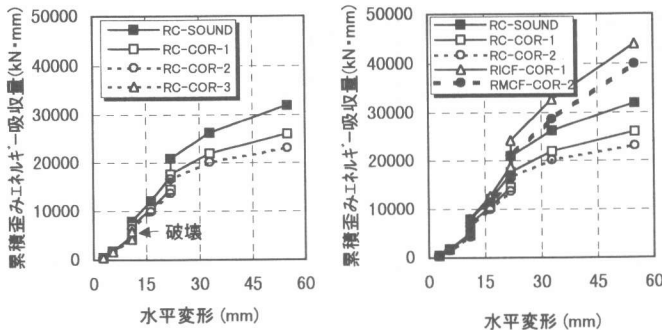


図-14 累積エネルギー吸収量

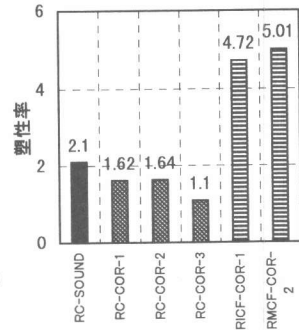


図-15 塑性率

4. まとめ

(1) 軸力が卓越するRC柱の帯筋の局部腐食は、地震のような正負繰り返しせん断力を受ける場合、帯筋の破断と主筋座屈による脆性的なせん断破壊を助長させることが実験から確認された。

(2) 鉄筋の腐食したRC柱の耐力性能及び変形性能低下の原因は、鉄筋腐食による鉄筋の力学的性能低下、鉄筋の局部腐食による鉄筋の破断、繰り返し加力による鉄筋とコンクリートの付着破壊及びかぶりコンクリートの剥落による拘束力の低下であることが明らかになった。

(3) 炭素繊維シートによるせん断補強は、付着割裂ひびわれ及びせん断ひびわれ拡大の防止及び炭素繊維シートによる拘束効果のため鉄筋の腐食したRC柱の靱性を向上させるのに非常に有効な工法であることが実験的に確認された。

謝辞：本研究は建築研究振興協会に設置された「鉄筋腐食劣化構造物の炭素繊維による補修・補強技術研究委員会（委員長：友澤史紀東京大学教授）」よりご協力を得ました。実験には建設省建築研究所第2研究部の藤田氏及び東大友澤研究室の方々に御協力を、材料は三菱化学(株)から提供頂いた。ここに感謝致します。

参考文献

- [1] 中山耕一、山川哲雄、伊良波繁雄、枇杷田篤：電食試験により腐食したRC柱の弾塑性挙動に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.17, No.1, PP883-888、1995
- [2] 松崎育弘他：シート状連続繊維によりせん断補強されたRC柱の構造性能に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.18, No.2, pp1463-1468、1996
- [3] 益尾潔：RC及びSRC柱の耐震補強実験と設計式の検証、コンクリート工学、Vol.34, No.10, pp.21-30、1996
- [4] 日本建築学会：鉄筋コンクリート終局強度設計に関する試料17、RC柱の強度と靱性、pp62-85、1987
- [5] (財) 国土開発技術研究センター：建築物の耐久性向上技術シリーズ 建築構造編(I) 鉄筋コンクリート造建築物の耐久性向上技術、pp337、枝報堂出版、1989