論文　繰り返し大規模地震動を受け複数回補修する RC 梁の補修効果

鈴木　隆成[*1]・菅原　颯太[*2]・中村　彌月[*2]・高瀬　裕也[*3]

要旨：日本では，同一地方で繰り返し大規模地震動が発生するケースがあり，複数回の損傷と補修を経験するコンクリート構造物も懸念されるが，2 回以上補修を繰り返した部材に関する研究は少ない。そこで本研究では，鉄筋コンクリート片持ち梁試験体を対象に，せん断加力を 3 回繰り返す実験を行い，補修回数とあばら筋間隔が与える影響を検証した。その結果，補修回数が多い試験体ほど 3 回目載荷時の最大荷重が増加しエネルギー吸収の低下量が軽減されること，あばら筋間隔が広い方が，補修効果が大きいことがわかった。

キーワード：RC 梁，損傷，ひび割れ補修，補修回数

1.　はじめに

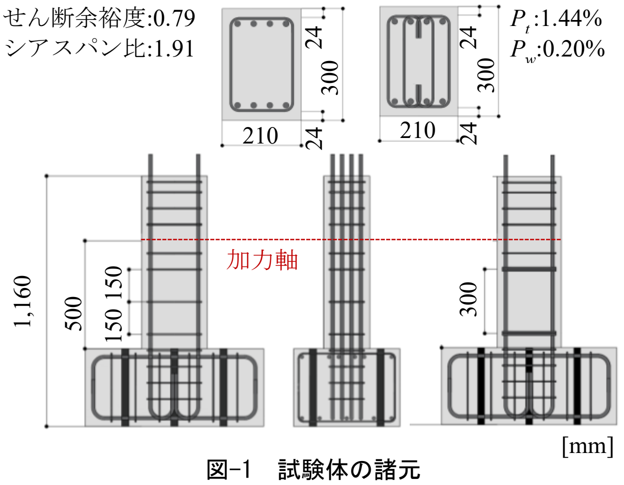
周知のように，我が国では，大規模な地震動が多数発生し，同一地域で繰り返し発生することも珍しくない。**写真−1**，**写真−2** はそれぞれ 2021 年，2022 年の福島県沖地震による鉄筋コンクリート（以下，RC）造梁の被害事例である。これらの写真から理解されるよう，大規模な地震で損傷した後に補修され，また大規模地震を経験して補修するケースも散見[1)]される。

現行の耐震基準を満たしていれば，構造物が倒壊する事例はほとんどみられず，ひび割れなどの損傷が多く見られる。このようなケースでは，ひび割れ補修されるが，ひび割れ補修の主たる目的は，ひび割れを塞ぐことで水などの劣化因子の浸入を防ぎ，鉄筋腐食を抑止することである。しかし，注入工法を採用することでひび割れ内部まで補修材を充填できることから，部材の強度回復も期待される。例えば古内らの研究[2)]では，曲げ・せん断ひび割れを樹脂による注入補修した RC 梁について疲労載荷試験が行われた。貞末らの研究[3)]では，極低強度コンクリートの RC 梁の初期載荷を行った後，エポキシ樹脂注入により補修を行って再載荷されている。仁平ら[4)]は RC ラーメン高架橋の柱をモデル化した試験体に降伏変位から軸方向の鉄筋が座屈する変位までの正負交番載荷を行い，ひび割れ注入と断面修復によって修復した。

また著者ら[5)]は，RC 片持ち梁を 3 回加力する実験を行い，ひび割れ補修せずに加力を 3 回繰り返す場合，1 回目と 2 回目の加力のあとにひび割れ補修する場合の 2 ケースを検証し，ひび割れ補修することで荷重は回復するが，エネルギー吸収性能は 1 回目の加力まで回復できないことを明らかにした。さらに松林ら[6)]は，同じ鉄筋比でも鉄筋間隔が広がることで耐力が低下することを報告した。そこで本論文では，著者らの既報の実験に加え，

写真−1　福島県沖地震の被害事例(2021 年)

写真−2　福島県沖地震の被害事例(2022 年)



図−1　試験体の諸元

1 回目の加力のあとのみ補修する試験体と，鉄筋比が同一のまま鉄筋間隔を 2 倍に広げた試験体の 2 タイプを増やし，これらの影響が補修効果に及ぼす影響を検証した。

2.　実験概要

2.1　試験体概要

図−1 に試験体の諸元を示す。本実験では全長 1,160mm，スタブ上面から加力軸までの長さ 500mm,梁せい 300mm,梁幅 210mm の実構造物のおよそ 1/2 スケールの断面の

*1　室蘭工業大学　環境創生工学系専攻　(学生会員)
*2　室蘭工業大学　環境創生工学系専攻
*3　室蘭工業大学　もの創造系領域　教授　(正会員)

RC 片持ち梁を対象とした。また，試験領域の鉄筋間隔(以下，x)は 150mm と 300mm の 2 種類とする。せん断破壊が先行するよう設計し，終局曲げモーメント M_u，荒川 mean 式による終局せん断強度 Q_{su} をそれぞれ式(1)，(2)に示し，それぞれ 76 kN･m，106 kN となる。また，式(3)で求められるせん断余裕度 α が 0.70 となる。

$$M_u = 0.9 \times a_t \times \sigma_y \times d \tag{1}$$

$$Q_{su} = \left(\frac{0.068p_t^{0.23}(F_c+18)}{M/(Qd)+0.12} + 0.85\sqrt{P_w \sigma_{wy}}\right) bj \tag{2}$$

$$\alpha = \frac{Q_{su}}{Q_{mu}} \tag{3}$$

ここに，a_t は引張鉄筋量(mm²)，σ_y は主筋の降伏強度(N/mm²)，dは有効せい(mm)，p_tは引張鉄筋比(%)，F_cはコンクリートの圧縮強度(N/mm²)，$M/(Qd)$はシアスパン比，P_w はあばら筋比，σ_{wy}はあばら筋の降伏強度(N/mm²)，b は梁幅(mm)，jは応力中心間距離(mm)であり $7d/8$ とする。Q_{mu}はM_u時のせん断力である。また，シアスパン比 1.91，引張鉄筋比 1.44％，あばら筋比 0.20％とした。なお，**表-1** にコンクリートの材料特性を，**表-2** に鉄筋の材料特性をそれぞれ示す。

2.2 実験パラメータ

表-3 に実験パラメータを示す。本実験では，補修回数，損傷度，鉄筋間隔の 3 つをパラメータとし，試験体名は，補修ケース，損傷度，鉄筋間隔(mm)で構成される。補修回数による影響を検証するため，3 回載荷するうち，一度も補修せず載荷(NN)，1 回目，2 回目載荷後に補修(RR)，さらに本論文で追加する 1 回目載荷後のみ補修(RN) の 3 条件を比較した。また，試験体に与える損傷の程度による影響を検証するため 3 種類の損傷度を比較する。損傷度の指標として，**表-4** に示す日本建築学会の耐震性能評価指針(案)[9]より，小規模な補修が必要とされる損傷度IIと，大規模な補修が必要とされる損傷度IIIに加えて，補修困難とされる損傷度Ⅳを本論文で追加し，これらの損傷度と判断される残留ひび割れ幅が観察されるまで変形させた。また，x による影響を検証するため，x＝150mm の試験体と，あばら筋比が同一のまま x＝300mm とした試験体の 2 種類を比較した。

2.3 実験方法

(1) 実験手順

図-2 に載荷サイクルを示す。1 つの試験体に対して目標の変形角 R まで載荷した後，残留変位を 0 に戻し，補修試験体の場合はひび割れを補修する。硬化に要する時間を十分に確保し，再び目標の変形角まで載荷する。その後，再度補修し，最後は最大荷重等を確認するため押し切る。未補修試験体の場合は，残留変位を 0 に戻した後，補修せずにそのまま再載荷する。

(2) 加力方法

表-1 コンクリートの材料特性

		σ_B	R_m	E_c	材齢（日）
RR-II-150[5]	1st-Load	23.7	1.95	20.1	47
RR-III-150[5]	2nd-Load	22.9	1.31	25.1	60
	3rd-Load				
NN-II-150[5]	1st-Load~	23.3	1.55	19.7	69
NN-III-150[5]	3rd-Load				
RR-III-300	1st-Load	19.5	1.87	24.0	37
RN-II-150	1st-Load				
RN-III-150	2nd-Load~	22.2	2.08	23.0	49
RN-III-300	3rd-Load				
RR-III-300	3rd-Load				
	2nd-Load	20.4	1.99	21.0	42
NN-III-300	1st-Load~				
NN-IV-150	3rd-Load				

σ_B : 圧縮強度(N/mm²)， R_m : 引張強度(N/mm²)，
E_c : ヤング係数(kN/mm²)

表-2 鉄筋の材料特性

		f_y	f_u	E_s	伸び(%)
NN-II-150	D6	488	584	250	15.2
NN-III-150	D16	399	551	176	12.5
RR-II-150 RR-III-150	D16 (ねじ節)	393	568	187	22.9
上記以外	D6	456	540	192	12.5
	D16	390	512	197	22.1
	D16 (ねじ節)	407	563	199	19.1

f_y : 降伏強度(N/mm²)， f_u : 最大強度(N/mm²)
E_s : ヤング係数(kN/mm²)

表-3 実験パラメータ

試験体名	1st-Load (rad.)	補修材注入量 (g)	2nd-Load (rad.)	補修材注入量 (g)	3rd-Load
NN-II-150[5]	1/100	-	1/100	-	押切
NN-III-150[5]	1/75	-	1/75	-	押切
NN-IV-150	1/50	-	1/50	-	押切
NN-III-300	1/75	-	1/75	-	押切
RN-II-150	1/75※	210	1/75	-	押切
RN-III-150	1/75	290	1/75	-	押切
RN-III-300	1/75	306	1/75	-	押切
RR-II-150[5]	1/100	163	1/50	150	押切
RR-III-150[5]	1/75	234	1/75	150	押切
RR-III-300	1/75	369	1/75	290	押切

※1/100rad.では損傷度IIのひび割れ幅に達しなかった。

表-4 耐震性能評価指針（案）[9]

損傷度	ひび割れ幅	補修
I	～0.2mm	補修不要
II	0.2～ 1 mm	小規模な補修
III	1～2mm	大規模な補修
IV	2mm～	補修困難
V		補修対象外

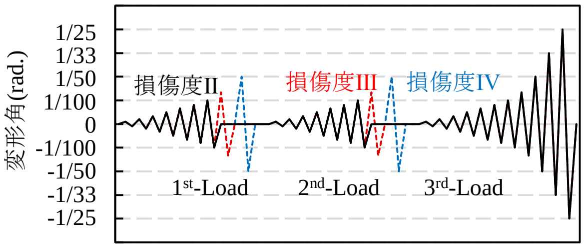


図-2 載荷サイクル

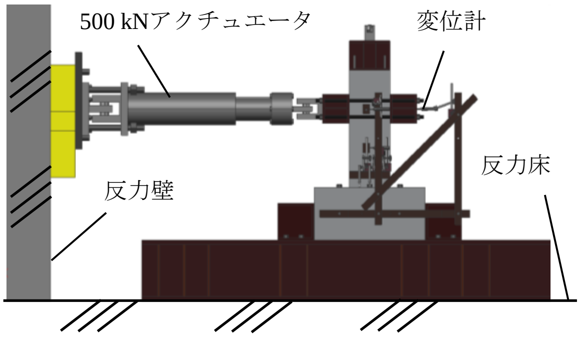


図-3　加力装置

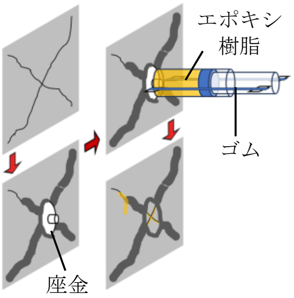


図-4　補修手順

図-5　補修の様子

図-3 に加力装置を示す。載荷には 500 kN のアクチュエータを用いて，静的に正負交番繰り返し載荷を与えた。部材変形角は，加力軸で計測した水平変位を，加力高さ 500 mm で除した値とした。試験体は，スタブ部分にボルトを通して固定し，さらに両側面も鋼板とボルトで固定した。加力部分は正負交番で加力できるよう，H 型鋼とボルトで挟み込み，アクチュエータに固定した。また，試験体上部にはブレ止めを設置し奥行方向への変形を抑えた。

(3) 補修方法

ひび割れ補修工法は，内部のひび割れまで補修材が充填可能なひび割れ注入工法を用いた。補修材には構造部材の耐力や変形性能の回復が期待でき，実際に広く使用されている 7)エポキシ樹脂を用いる。 表-5 に，エポキシ樹脂の材料特性 8)を示す。また，補修手順のイメージを図-4，実際の補修の様子を図-5 に示す。補修対象となる 0.2 mm 以上のひび割れ表面を清掃後，座金を取り付け，ひび割れ表面をシーリング材で塞ぐ。

この際ひび割れの端部に空気孔を設ける。シーリング材硬化後，注入器具を用いてエポキシ樹脂を注入し，空気孔からエポキシ樹脂があふれてくることを確認し，硬化するまで十分な時間を確保する。硬化後，注入器具，座金を取り外し，補修完了とする。

3. 実験結果

3.1 ひび割れ発生状況

図-6 に NN 試験体（未補修），RN 試験体（1 回目載荷後のみ補修），RR 試験体（2 回とも補修）のひび割れ発生状況と最大残留ひび割れ幅の推移を示す。NN 試験体を見ると，2 回目，3 回目載荷時に新たなひび割れはほとんど発生せず，1 回目載荷で発生したひび割れが，さらに拡幅した。RN 試験体と RR 試験体では，1 回目載荷で補修したひび割れは拡幅せず，その周囲に新たなひび割れが発生した。新たに発生したひび割れの残留ひび割れ幅は，補修前より小さかった。また，両者の 3 回目載荷の挙動に注目すると，RR 試験体の方がひび割れ幅が小さく，この結果から，加力の度にひび割れ補修すること

表-5　エポキシ樹脂の材料特性

f_{ce}	f_{te}	τ_e
76.4	43.4	20.4

f_{ce} : 圧縮強度(N/mm^2), f_{te} : 引張強度(N/mm^2)
τ_e : 付着強度(N/mm^2)

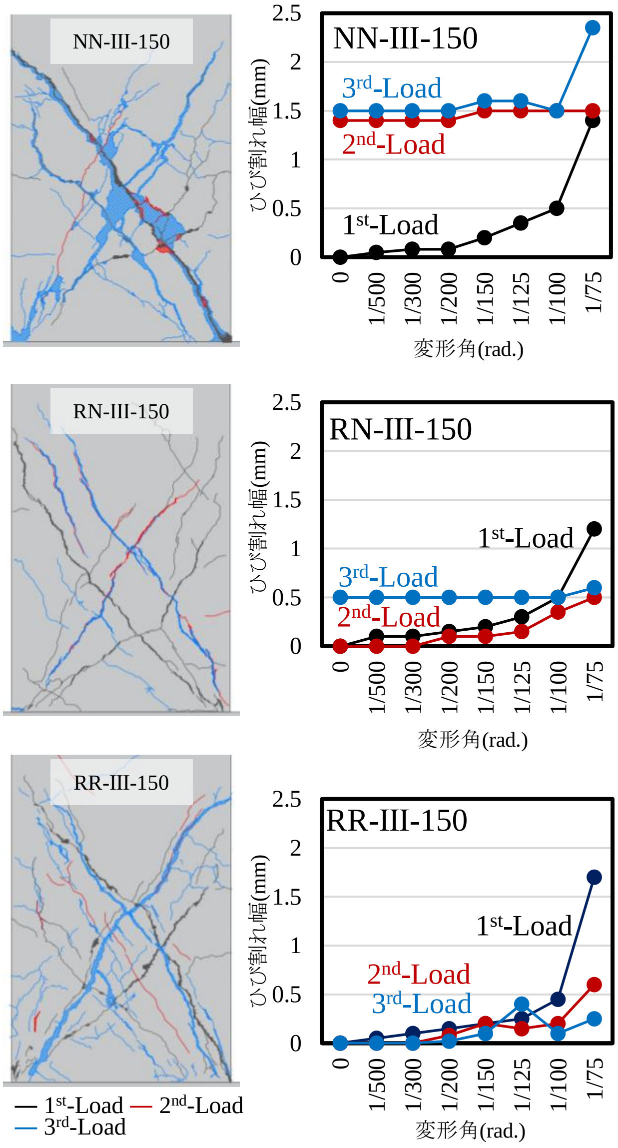
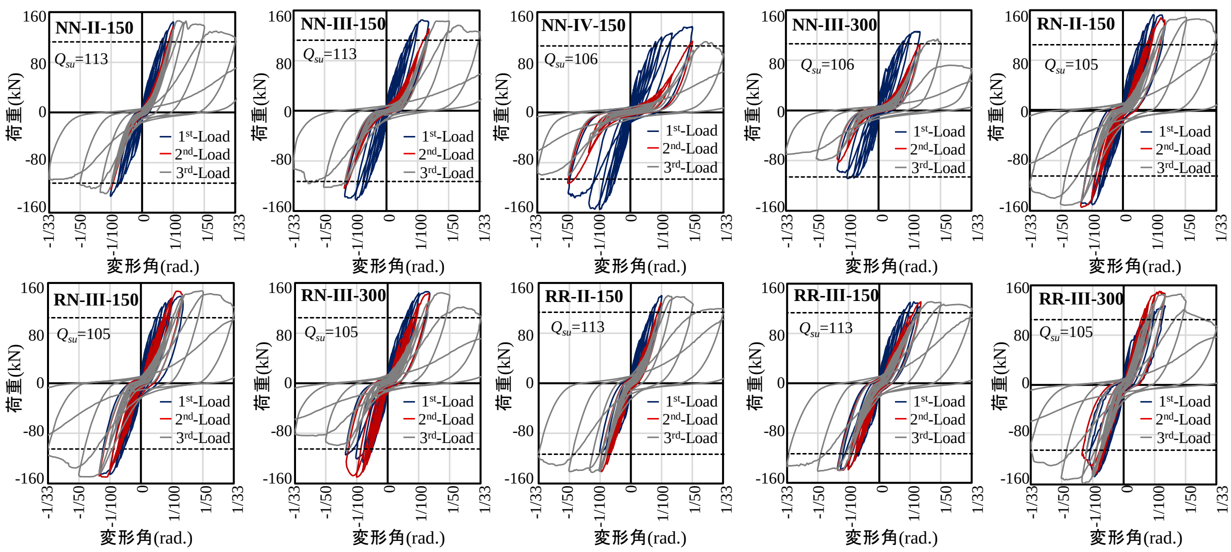


図-6　ひび割れ発生状況と最大残留ひび割れ幅の推移



図−7　荷重変形（Q −R ）曲線

で，残留ひび割れ幅もより小さくなることが明らかとなった。

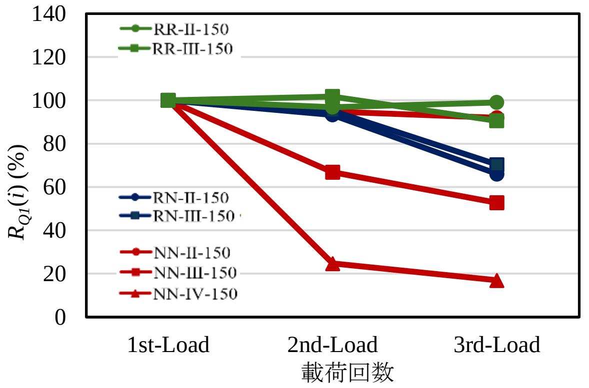
3.2 荷重変形曲線と耐力評価

図−7 に各試験体の荷重変形(Q-R)曲線，**表−6** に各試験体の最大荷重と 3 回目載荷時の安全率を示す。安全率は，3 回目載荷の最大荷重を，式(2)の計算値で除した値である。全試験体で，あばら筋が R = 1/150rad.～1/75rad.で降伏し，R = 1/100rad.～1/50rad.で最大荷重となり，その後 R = 1/50rad.～1/33rad.で最大荷重の約 8 割まで低下した。前項で触れたひび割れ発生状況も含め，本試験体の破壊形式は, せん断破壊であったと判断される。

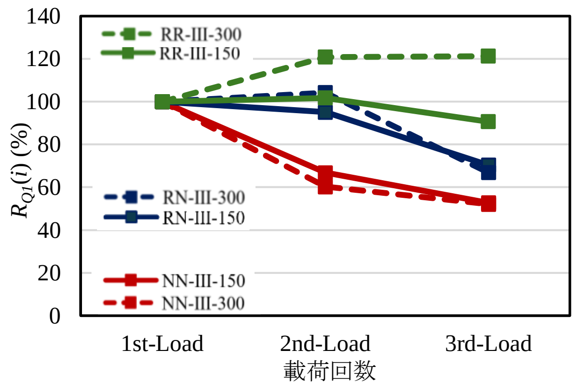
表−6 より，2 回目載荷時の最大荷重を見ると，未補修試験体は全て 1 回目載荷時の最大荷重より小さく，補修試験体は全て 1 回目載荷時の最大荷重よりも大きい。また, 安全率を見るとすべての試験体が 1.0 以上となったが未補修試験体 NN-Ⅳ-150, NN-Ⅲ-300 はそれぞれ 1.06, 1.07 となり計算値程度の値となった。NN-Ⅱ-150，NN-Ⅲ-150 は 3 回目載荷時に最大荷重となり，安全率も大きくなった。補修試験体の安全率は 3 回目載荷時でも全ての試験体で 1.25 以上となった。

表−6　最大荷重と3回目載荷時の安全率

	NN-II-150	NN-III-150	NN-IV-150	NN-III-300	RN-II-150
1st-Load	144.54	145.03	154.97	125.96	152.23
2nd-Load	136.63	130.37	113.61	104.99	154.56
3rd-Load	146.29	143.02	112.77	113.87	151.15
安全率	1.30	1.27	1.06	1.07	1.44
	RN-III-150	RN-III-300	RR-II-150	RR-III-150	RR-III-300
1st-Load	145.34	146.32	139.60	138.76	147.11
2nd-Load	149.56	149.64	140.92	139.65	150.18
3rd-Load	149.22	144.30	142.02	141.44	158.14
安全率	1.42	1.38	1.25	1.25	1.51



(a)　損傷度の影響



(b)　鉄筋間隔の影響

図−8　荷重低下率比較

4. 実験結果の評価と考察

4.1 荷重比較

図−8 に, 各試験体の 1 回目載荷に対する，2 回目，3 回目載荷時の R = 1/100rad.の荷重低下率を示す。同図(a), (b)はそれぞれ損傷度と鉄筋間隔の影響を比較している。i 回目載荷の荷重を Qi として，1 回目載荷に対する荷重低下率 R_{Q1}(i)は，式(4)より算出される。

$$R_{Q1}(i) = Q_i / Q_1 \times 100 \qquad (4)$$

図−8 (a) の赤線で示す NN 試験体では, 損傷度が大きい程荷重が低下し，R_{Q1}(3)は損傷度Ⅲで 52%，損傷度Ⅳでは 17%まで低下した。損傷度の小さい NN-Ⅱ-150

は荷重の低下があまり見られなかった。青線で示す 1 回目載荷後のみ補修した RN 試験体では，2 回目載荷で荷重低下したが，NN 試験体ほど低下せず，$R_{Q1}(2)$は 90%以上となった。3 回目載荷時では 2 回目載荷時に比べ荷重が大きく低下し，$R_{Q1}(3)$は約 70%となったが，未補修試験体ほどは低下しなかった。同図の緑線で示す 2 度補修した RR 試験体の場合では，3 回目載荷時でもさほど荷重低下は見られず，$R_{Q1}(3)$は 90%以上となった。

次に，**図-8**(b)の点線で示す x=300mm の試験体に着目すると，x=150mm の試験体に比べ，補修効果が顕著に表れ，試験体 RR-Ⅲ-300 では $R_{Q1}(2)$，$R_{Q1}(3)$ともに 120%となり荷重が 1 回目載荷時よりも大きくなった。そこで，**図-9** に補修の有無による荷重低下率の差 $\Delta R_{Q1}(i)$を示す。同条件の RR 試験体または RN 試験体と NN 試験体の 2 回目載荷の荷重低下率を，それぞれ $R_{rQ1}(2)$，$R_{nQ1}(2)$とすると，$\Delta R_{Q1}(2)$は次式より算出される。

$$\Delta R_{Q1}(2) = R_{rQ1}(2) - R_{nQ1}(2) \quad (5)$$

ここで，$R_{rQ1}(2)$は RN 試験体と RR 試験体があるため，これらの平均値を採用した。また 3 回目載荷の $\Delta R_{Q1}(3)$は，同条件の RR 試験体と RN 試験体の $R_{rQ1}(3)$を，それぞれ $R_{rrQ1}(3)$，$R_{rnQ1}(3)$として次式より算出される。

$$\Delta R_{Q1}(3) = R_{rrQ1}(3) - R_{rnQ1}(3) \quad (6)$$

前述のとおり NN-II-150 の荷重低下が小さかったため，**図-9** でみられるように，損傷度Ⅱの 1 回目補修の有無による差はほとんどない。しかし，2 回目の補修後では，その差は 24 %となった。損傷度Ⅲになると，1 回目の補修の有無で 32 %の違いがあったが，2 回目補修では 20 %とその差が小さくなった。x=300mm の場合では，1 回目の補修で 52 %の違いがあり，3 回目になると 69 %まで差が大きくなった。**図-10** に 1 回目補修時における補修材注入量と R_{Q1} の関係を示す。x=300mm の試験体の方がひび割れ体積が多く，注入量が多い。このため注入量が多いほど荷重も大きくなり，x=300mm の試験体では，補修の有無による R_{Q1} の差が大きくなったと推測できる。

4.2 エネルギー吸収量

サイクル毎の Q-R 曲線の面積の総和をエネルギー吸収量(以下，En)とし，**図-11** に 各試験体における 1～3 回目載荷の En 比較を示す。i 回目載荷の E_n を E_i とし，1 回目載荷に対する 2 回目，3 回目載荷の E_n 低下率 $R_{E1}(i)$を式(7)を用いて算出する。なお，3 回目載荷の E_n は 1 回目と 2 回目と同一変形角の際の値である。

$$R_{E1}(i) = E_i/E_1 \times 100 \quad (7)$$

図-11(a)より NN 試験体に着目すると損傷度が大きい程 En が低下し，$R_{E1}(2)$は損傷度Ⅱで 44 %，損傷度Ⅳで 18 %となった。$R_{E1}(3)$は $R_{E1}(2)$よりやや小さく，損傷度Ⅱと Ⅳ でそれぞれ 36%，12%となった。RN，RR 試験体の

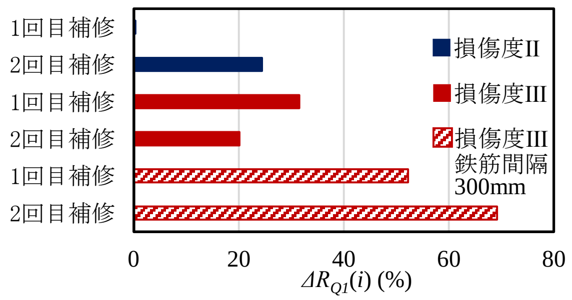


図-9　補修の有無による荷重低下率の差

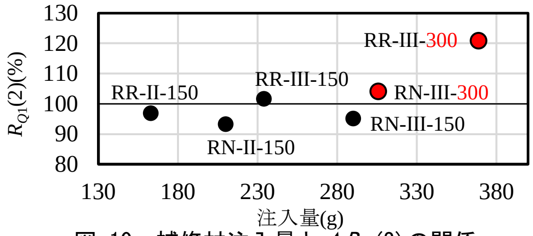
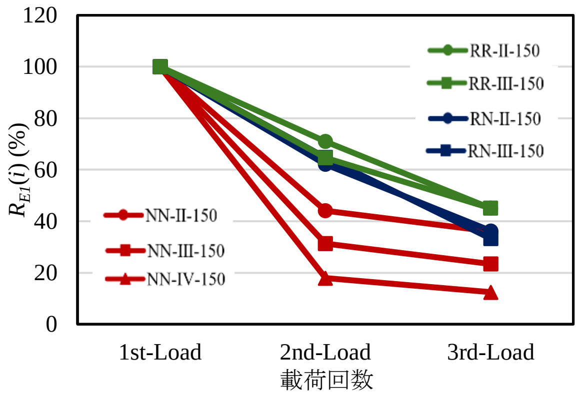
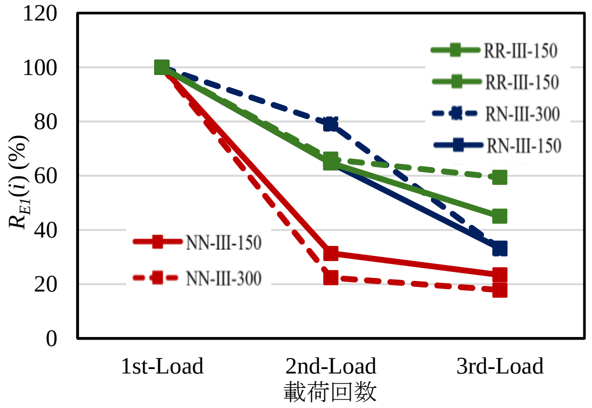


図-10　補修材注入量と $\Delta R_{Q1}(2)$ の関係



(a)　損傷度の影響



(b)　鉄筋間隔の影響

図-11　En 低下率比較

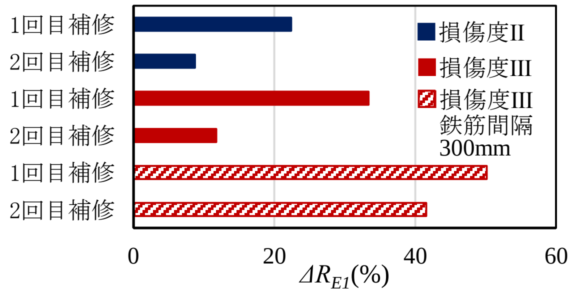


図-12　補修の有無による R_{E1} の差

$R_{E1}(2)$は 60%以上となったが，荷重低下率 $R_{Q1}(2)$が 90%以上であったことと比べると，大きく低下している。

また，3 回目載荷時は NN 試験体と同程度の 36%となった。2 回目載荷後にも補修した試験体は NN 試験体ほど低下しなかったが 45%となった。以上より，En は補修により未補修に比べ低下を軽減することはできたが，最大でも 1 回目載荷の 60%程度までしか回復しなかった。

図-12 に補修の有無による En 低下率の差$\varDelta R_{E1}(i)$を示す。この差分の算出方法は，**図-10** および式(5)，(6)と同様である。損傷度Ⅱ，損傷度Ⅲ，x=300mm の順で$\varDelta R_{E1}$(i)が大きくなっている。つまり損傷度が大きいほど，また鉄筋間隔が広がるほど，補修効果が大きい。

さらに全てのケースで，$R_{E1}(3)$の方が $R_{E1}(2)$より小さい。したがって，エネルギー吸収の観点からは，補修を繰り返すたびに，補修効果は小さくなった。

5. まとめ

本研究では，RC 片持ち梁試験体を用いて，損傷度，補修回数，鉄筋間隔をパラメータとし，一度せん断加力した後，ひび割れ補修とせん断加力を繰り返す実験を行った。本研究で得られた知見を，以下に列記する。

(1) ひび割れ幅について，未補修試験体 NN では再載荷の際に新たなひび割れは発生せずに，元々あるひび割れが拡幅した。補修試験体では補修したひび割れは拡がらず周辺に新たなひび割れが生じたが，1 回目載荷時のひび割れほど拡幅しなかった。さらに，1 回目，2 回加力後共に補修した RR 試験体と 1 回目加力後のみ補修した RN 試験体の 3 回目載荷では，前者の方がひび割れ幅が小さく，補修回数が多い程，ひび割れ幅が小さくなった。

(2) 3 回目載荷時の最大荷重は，2 回補修した RR 試験体では 1 回目載荷時と同程度まで回復した。1 度だけ補修した RN 試験体では，1 回目載荷時の約 7 割となった。エネルギー吸収量に関しては，補修回数の多い試験体ほど低下が軽減されたが，2 回目補修による改善または回復は 1 回目よりも小さくなった。

(3) 鉄筋間隔について，150mm よりも 300mm の試験体の方が荷重，エネルギー吸収量ともに補修による改善が大きく，荷重は最大で 1 回目載荷時の 120%まで増加した。その理由の 1 つとして，補修材注入量の影響が考えられる。

謝辞

本研究の実施に際し，科研費基盤研究(c) (23K04118)の助成を受け実施しました。また，室蘭工業大学大学院生・中越巧氏，室蘭工業大学学部生・加藤なつみ氏，篠田晴佳氏より，多大なご協力を賜りました。ここに深い謝意を表します。

参考文献

1) 土木学会地震工学委員会地震被害調査小委員会：2022 年 3 月 16 日福島県沖で発生した地震の被害調査の報告（構造物被害）,https://committees.jsce.or.jp/eec2/system/files/20220330_福島沖の地震被害調査報告(井上_植村）.pdf (jsce.or.jp) (2025.1.9 閲覧)

2) 古内仁，渡辺忠朋：ひび割れを注入補修した鉄筋コンクリート梁の疲労耐力，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.2，pp.1243-1248，2015

3) 貞末和史，坂本英輔，荒木秀夫：極低強度コンクリートの既存建物から切り出した RC 梁の構造性能とエポキシ樹脂注入による補修効果，日本建築学会構造系論文集，Vol.87，No.798，pp. 811-821，2022

4) 仁平達也，渡辺忠朋，谷村幸裕，岡本大：地震による損傷と修復を繰り返した RC 部材の性能に関する一考察，土木学会論文集 E2，Vol.68，No.2，pp.121-132，2012

5) 中村瓕月 他，複数回せん断載荷とひび割れ補修を経験する RC 梁の補修効果，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレードシンポジウム，Vol.24，No.19，pp.101-106，2024

6) Matsubayashi，M.，Takase，Y. and Mizoguchi，M.: Shear strength and cracking behavior of reinforced concrete nonstructural walls，Journal of Asian Archi. and Build. Eng.，Vol.21，Issue 2，pp.380-392，2020

7) 日本コンクリート工学会北海道支部：補修工法アンケート調査結果, http://www.jci-h.org/crack/index.html, 2018.7(2025.1.9 閲覧)

8) KONISHI 株式会社，”カタログ一覧”，E206(S・W)http://www.bond.co.jp/bond/catalog/pdf/ ，(2025.1.9 閲覧)

9) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の耐震性能評価指針(案)，日本建築学会，p.400，2004.1