

4 統計的手法による劣化モデルの作成

本章では、2 回以上点検された橋梁を対象に、様々な条件で分類した母集団について、損傷程度の遷移傾向を整理し劣化モデルの作成方法について検討する。

4.1 データの整理

本章では、主要部材において損傷程度の経年変化が比較的明瞭である損傷種類について、経年並びに劣化の進行等に差をもたらすと考えられる属性情報を組み合わせた劣化モデルを作成する。そして、属性情報が劣化の特徴に及ぼす影響を考察する。

表 4.1 に、本章で対象とする部材と損傷種類および属性情報の組み合わせ一式を示す。劣化モデルの作成は、属性情報を最大で 5 つ組み合わせて検討対象の母集団を区分し、4 つの部材種別（鋼主桁、コンクリート主桁、コンクリート床版、コンクリート下部構造）と 6 つの損傷種類（腐食、防食機能の劣化、ひびわれ（コンクリート主桁）、剥離・鉄筋露出（コンクリート主桁）、床版ひびわれ、ひびわれ（コンクリート下部構造）を組み合わせた合計 272 パターンの条件で行うこととした。

劣化モデルを作成するパターンは、属性情報を 1 つずつ加えながら整理した。付加する順番は、構造形式、要素の平面的な位置（鋼主桁、コンクリート床版の場合）、塗装仕様（鋼主桁の場合）、環境条件（コンクリート床版以外の場合）、適用基準（コンクリート床版の場合）、交通量（床版の場合）とした。属性情報を加えるときには、その度に条件に該当する母集団を整理した上で劣化モデルを作成することにした。劣化モデルは、表 4.1 の部材種別、損傷種類について、表 4.2～4.7 に示す属性情報の組み合わせで整理した。表 4.2～4.7 では、損傷種類と属性情報の種類にそれぞれ ID 番号を設定し、結合させて、劣化曲線の ID 番号とした。付録-2 には、この ID 番号毎にモデル化の過程と作成したモデル一式をまとめた。

表 4.1 対象部材および損傷種類とそれらの要素データが有する属性情報

材料	部材	損傷の種類	属性情報									
			構造形式、部材			部位*			塗装系	環境条件	適用基準	交通量
						橋軸方向	橋軸直角方向	その他				
鋼部材	主桁	腐食	鈹桁箱桁	-	-	端部 中間部	外桁 内桁	-	A・B塗装系 C塗装系	一般環境 塩害環境	-	-
鋼部材	主桁	防食機能の劣化	鈹桁箱桁	-	-	端部 中間部	外桁 内桁	-	A・B塗装系 C塗装系	一般環境 塩害環境	-	-
コンクリート部材	主桁	ひびわれ	RC桁 PC桁	プレテン ポステン	T桁 箱桁 中実床版 中空床版	-	-	-	-	一般環境 塩害環境	-	-
コンクリート部材	主桁	剥離・鉄筋露出	RC桁 PC桁	プレテン ポステン	T桁 箱桁 中実床版 中空床版	-	-	-	-	一般環境 塩害環境	-	-
コンクリート部材	床版**	床版ひびわれ	鈹桁の床版 箱桁の床版		-	一般部 張出部	中間部 桁端部 支点部	-	-	-	48道示前 48道示後	大型車多 大型車少
コンクリート部材	下部構造	ひびわれ	橋脚 橋台	-	-	-	-	(橋脚の場合) 梁部、柱部、隅角部 (橋台の場合) 縦壁、胸壁、翼壁	-	一般環境 塩害環境	-	-

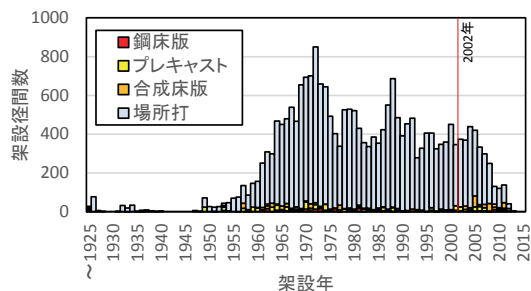
*要素の平面的な位置情報を「部位」と呼ぶ。

**表 4.1 では、鋼桁橋のコンクリート床版を対象としている。床版の区分について、RC床版かPC床版かを記録する区分はないものの、鋼桁橋において、PC床版を用いる機会があるとすれば、少数主桁で床版支間を長くする場合と考えられる。そして、PC床版は、場所打床版かプレキャスト床版が採用されることが多いと考えられる。また、道路橋示方書(平成14年3月)では、PC床版を鋼桁と組み合わせる場合について規定されており、2002年前後から少数主桁の事例の増加とともにPC床版の事例も増加していると考えられる。

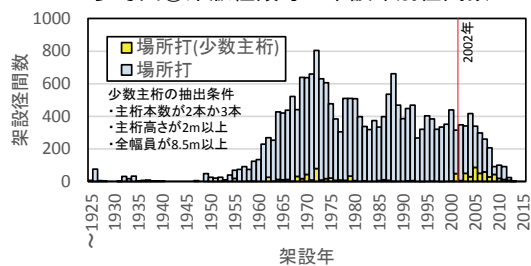
そこで、まず、床版種類ごとに架設年別径間数を整理し、それぞれの床版種類が全体に占める割合を調べ、プレキャスト床版がどの程度あるかを確認した(参考図①)。その結果、全体を通して、場所打床版が最も多く、プレキャスト床版は、明らかに少ないことがわかった。次に、場所打ち床版のうち、少数主桁がどの程度含まれているかを整理した(参考図②)。

この集計における少数主桁は、橋数の大略を把握するために、参考図②中に示す条件で抽出した。その結果、少数主桁は、2002年以降に限定すると全体の15%であったが、集計対象の全ての架設年では、4%程度であった。

プレキャスト床版や少数主桁として抽出した径間全てがPC床版ではない可能性も踏まえると、PC床版と考えられる径間は少ないため、全体の大多数がRC床版である可能性が高く、全数をRC床版とみなしてデータを解釈することでも大勢に影響はないと期待されるが、最終的なデータの解釈や利用はデータの利用目的により個々に考えるべきものである。



参考図① 床版種類毎の架設年別径間数



参考図② 場所打ち床版の架設年別径間数

表 4.2 属性情報の組合せと ID 情報
(鋼主桁の腐食)

構造形式	部位	塗装系	環境条件	No	損傷種類 ID	条件 ID	劣化曲線 ID
鋼主桁				001	01	01	0101
鋼主桁	鋼主桁			002	01	02	0102
鋼主桁	端部			003	01	03	0103
鋼主桁	外桁			004	01	04	0104
鋼主桁	A・B塗装系			005	01	05	0105
鋼主桁	一般環境			006	01	06	0106
鋼主桁	塩害環境			007	01	07	0107
鋼主桁	C塗装系			008	01	08	0108
鋼主桁	一般環境			009	01	09	0109
鋼主桁	塩害環境			010	01	10	0110
鋼主桁	内桁			011	01	11	0111
鋼主桁	A・B塗装系			012	01	12	0112
鋼主桁	一般環境			013	01	13	0113
鋼主桁	塩害環境			014	01	14	0114
鋼主桁	C塗装系			015	01	15	0115
鋼主桁	一般環境			016	01	16	0116
鋼主桁	塩害環境			017	01	17	0117
鋼主桁	中間部			018	01	18	0118
鋼主桁	外桁			019	01	19	0119
鋼主桁	A・B塗装系			020	01	20	0120
鋼主桁	一般環境			021	01	21	0121
鋼主桁	塩害環境			022	01	22	0122
鋼主桁	C塗装系			023	01	23	0123
鋼主桁	一般環境			024	01	24	0124
鋼主桁	塩害環境			025	01	25	0125
鋼主桁	内桁			026	01	26	0126
鋼主桁	A・B塗装系			027	01	27	0127
鋼主桁	一般環境			028	01	28	0128
鋼主桁	塩害環境			029	01	29	0129
鋼主桁	C塗装系			030	01	30	0130
鋼主桁	一般環境			031	01	31	0131
鋼主桁	塩害環境			032	01	32	0132
鋼主桁	箱桁			033	01	33	0133
鋼主桁	端部			034	01	34	0134
鋼主桁	外桁			035	01	35	0135
鋼主桁	A・B塗装系			036	01	36	0136
鋼主桁	一般環境			037	01	37	0137
鋼主桁	塩害環境			038	01	38	0138
鋼主桁	C塗装系			039	01	39	0139
鋼主桁	一般環境			040	01	40	0140
鋼主桁	塩害環境			041	01	41	0141
鋼主桁	内桁			042	01	42	0142
鋼主桁	A・B塗装系			043	01	43	0143
鋼主桁	一般環境			044	01	44	0144
鋼主桁	塩害環境			045	01	45	0145
鋼主桁	C塗装系			046	01	46	0146
鋼主桁	一般環境			047	01	47	0147
鋼主桁	塩害環境			048	01	48	0148
鋼主桁	中間部			049	01	49	0149
鋼主桁	外桁			050	01	50	0150
鋼主桁	A・B塗装系			051	01	51	0151
鋼主桁	一般環境			052	01	52	0152
鋼主桁	塩害環境			053	01	53	0153
鋼主桁	C塗装系			054	01	54	0154
鋼主桁	一般環境			055	01	55	0155
鋼主桁	塩害環境			056	01	56	0156
鋼主桁	内桁			057	01	57	0157
鋼主桁	A・B塗装系			058	01	58	0158
鋼主桁	一般環境			059	01	59	0159
鋼主桁	塩害環境			060	01	60	0160
鋼主桁	C塗装系			061	01	61	0161
鋼主桁	一般環境			062	01	62	0162
鋼主桁	塩害環境			063	01	63	0163

表 4.3 属性情報の組合せと ID 情報
(鋼主桁の防食機能の劣化)

構造形式	部位	塗装系	環境条件	No	損傷種類 ID	条件 ID	劣化曲線 ID
鋼主桁				064	02	01	0201
鋼主桁	鋼主桁			065	02	02	0202
鋼主桁	端部			066	02	03	0203
鋼主桁	外桁			067	02	04	0204
鋼主桁	A・B塗装系			068	02	05	0205
鋼主桁	一般環境			069	02	06	0206
鋼主桁	塩害環境			070	02	07	0207
鋼主桁	C塗装系			071	02	08	0208
鋼主桁	一般環境			072	02	09	0209
鋼主桁	塩害環境			073	02	10	0210
鋼主桁	内桁			074	02	11	0211
鋼主桁	A・B塗装系			075	02	12	0212
鋼主桁	一般環境			076	02	13	0213
鋼主桁	塩害環境			077	02	14	0214
鋼主桁	C塗装系			078	02	15	0215
鋼主桁	一般環境			079	02	16	0216
鋼主桁	塩害環境			080	02	17	0217
鋼主桁	中間部			081	02	18	0218
鋼主桁	外桁			082	02	19	0219
鋼主桁	A・B塗装系			083	02	20	0220
鋼主桁	一般環境			084	02	21	0221
鋼主桁	塩害環境			085	02	22	0222
鋼主桁	C塗装系			086	02	23	0223
鋼主桁	一般環境			087	02	24	0224
鋼主桁	塩害環境			088	02	25	0225
鋼主桁	内桁			089	02	26	0226
鋼主桁	A・B塗装系			090	02	27	0227
鋼主桁	一般環境			091	02	28	0228
鋼主桁	塩害環境			092	02	29	0229
鋼主桁	C塗装系			093	02	30	0230
鋼主桁	一般環境			094	02	31	0231
鋼主桁	塩害環境			095	02	32	0232
鋼主桁	箱桁			096	02	33	0233
鋼主桁	端部			097	02	34	0234
鋼主桁	外桁			098	02	35	0235
鋼主桁	A・B塗装系			099	02	36	0236
鋼主桁	一般環境			100	02	37	0237
鋼主桁	塩害環境			101	02	38	0238
鋼主桁	C塗装系			102	02	39	0239
鋼主桁	一般環境			103	02	40	0240
鋼主桁	塩害環境			104	02	41	0241
鋼主桁	内桁			105	02	42	0242
鋼主桁	A・B塗装系			106	02	43	0243
鋼主桁	一般環境			107	02	44	0244
鋼主桁	塩害環境			108	02	45	0245
鋼主桁	C塗装系			109	02	46	0246
鋼主桁	一般環境			110	02	47	0247
鋼主桁	塩害環境			111	02	48	0248
鋼主桁	中間部			112	02	49	0249
鋼主桁	外桁			113	02	50	0250
鋼主桁	A・B塗装系			114	02	51	0251
鋼主桁	一般環境			115	02	52	0252
鋼主桁	塩害環境			116	02	53	0253
鋼主桁	C塗装系			117	02	54	0254
鋼主桁	一般環境			118	02	55	0255
鋼主桁	塩害環境			119	02	56	0256
鋼主桁	内桁			120	02	57	0257
鋼主桁	A・B塗装系			121	02	58	0258
鋼主桁	一般環境			122	02	59	0259
鋼主桁	塩害環境			123	02	60	0260
鋼主桁	C塗装系			124	02	61	0261
鋼主桁	一般環境			125	02	62	0262
鋼主桁	塩害環境			126	02	63	0263

表 4.4 属性情報の組合せと ID 情報
(コンクリート主桁のひびわれ)

構造形式	環境条件	No	損傷種類 ID	条件 ID	劣化曲線 ID
コンクリート主桁		127	03	01	0301
RC桁		128	03	02	0302
T桁		129	03	03	0303
一般環境		130	03	04	0304
塩害環境		131	03	05	0305
中実床版		132	03	06	0306
一般環境		133	03	07	0307
塩害環境		134	03	08	0308
中空床版		135	03	09	0309
一般環境		136	03	10	0310
塩害環境		137	03	11	0311
PC桁		138	03	12	0312
プレテン桁		139	03	13	0313
T桁		140	03	14	0314
一般環境		141	03	15	0315
塩害環境		142	03	16	0316
中実床版		143	03	17	0317
一般環境		144	03	18	0318
塩害環境		145	03	19	0319
中空床版		146	03	20	0320
一般環境		147	03	21	0321
塩害環境		148	03	22	0322
ポステン桁		149	03	23	0323
T桁		150	03	24	0324
一般環境		151	03	25	0325
塩害環境		152	03	26	0326
箱桁		153	03	27	0327
一般環境		154	03	28	0328
塩害環境		155	03	29	0329
中空床版		156	03	30	0330
一般環境		157	03	31	0331
塩害環境		158	03	32	0332

表 4.5 属性情報の組合せと ID 情報
(コンクリート主桁の剥離・鉄筋露出)

構造形式	環境条件	No	損傷種類 ID	条件 ID	劣化曲線 ID
コンクリート主桁		159	04	01	0401
RC桁		160	04	02	0402
T桁		161	04	03	0403
一般環境		162	04	04	0404
塩害環境		163	04	05	0405
中実床版		164	04	06	0406
一般環境		165	04	07	0407
塩害環境		166	04	08	0408
中空床版		167	04	09	0409
一般環境		168	04	10	0410
塩害環境		169	04	11	0411
PC桁		170	04	12	0412
プレテン桁		171	04	13	0413
T桁		172	04	14	0414
一般環境		173	04	15	0415
塩害環境		174	04	16	0416
中実床版		175	04	17	0417
一般環境		176	04	18	0418
塩害環境		177	04	19	0419
中空床版		178	04	20	0420
一般環境		179	04	21	0421
塩害環境		180	04	22	0422
ポステン桁		181	04	23	0423
T桁		182	04	24	0424
一般環境		183	04	25	0425
塩害環境		184	04	26	0426
箱桁		185	04	27	0427
一般環境		186	04	28	0428
塩害環境		187	04	29	0429
中空床版		188	04	30	0430
一般環境		189	04	31	0431
塩害環境		190	04	32	0432

表 4.6 属性情報の組合せと ID 情報
(鋼桁橋のコンクリート床版の床版ひびわれ)

構造形式	部位	道示	交通量	No	損傷種類 ID	条件 ID	劣化曲線 ID
コンクリート床版	コンクリート床版			191	05	01	0501
	 鋼桁			192	05	02	0502
	 一般部			193	05	03	0503
	 中間部			194	05	04	0504
	 48道示前			195	05	05	0505
	 大型車多			196	05	06	0506
	 大型車少			197	05	07	0507
	 48道示後			198	05	08	0508
	 大型車多			199	05	09	0509
	 大型車少			200	05	10	0510
	 桁端部			201	05	11	0511
	 48道示前			202	05	12	0512
	 大型車多			203	05	13	0513
	 大型車少			204	05	14	0514
	 48道示後			205	05	15	0515
	 大型車多			206	05	16	0516
	 大型車少			207	05	17	0517
	 支点部			208	05	18	0518
	 48道示前			209	05	19	0519
	 大型車多			210	05	20	0520
	 大型車少			211	05	21	0521
	 48道示後			212	05	22	0522
	 大型車多			213	05	23	0523
	 大型車少			214	05	24	0524
	 張出部			215	05	25	0525
	 48道示前			216	05	26	0526
	 大型車多			217	05	27	0527
	 大型車少			218	05	28	0528
	 48道示後			219	05	29	0529
	 大型車多			220	05	30	0530
	 大型車少			221	05	31	0531
	 箱桁			222	05	32	0532
	 一般部			223	05	33	0533
	 中間部			224	05	34	0534
	 48道示前			225	05	35	0535
	 大型車多			226	05	36	0536
	 大型車少			227	05	37	0537
	 48道示後			228	05	38	0538
	 大型車多			229	05	39	0539
	 大型車少			230	05	40	0540
	 桁端部			231	05	41	0541
	 48道示前			232	05	42	0542
	 大型車多			233	05	43	0543
	 大型車少			234	05	44	0544
	 48道示後			235	05	45	0545
	 大型車多			236	05	46	0546
	 大型車少			237	05	47	0547
	 支点部			238	05	48	0548
	 48道示前			239	05	49	0549
	 大型車多			240	05	50	0550
	 大型車少			241	05	51	0551
	 48道示後			242	05	52	0552
	 大型車多			243	05	53	0553
	 大型車少			244	05	54	0554
	 張出部			245	05	55	0555
	 48道示前			246	05	56	0556
 大型車多			247	05	57	0557	
 大型車少			248	05	58	0558	
 48道示後			249	05	59	0559	
 大型車多			250	05	60	0560	
 大型車少			251	05	61	0561	

表 4.7 属性情報の組合せと ID 情報
(下部構造のひびわれ)

構造形式	部材	環境条件	No	損傷種類 ID	条件 ID	劣化曲線 ID
下部構造	下部構造		252	06	01	0601
	 橋脚		253	06	02	0602
	 梁部		254	06	03	0603
	 一般環境		255	06	04	0604
	 塩害環境		256	06	05	0605
	 柱部		257	06	06	0606
	 一般環境		258	06	07	0607
	 塩害環境		259	06	08	0608
	 隅角部		260	06	09	0609
	 一般環境		261	06	10	0610
	 塩害環境		262	06	11	0611
	 橋台		263	06	12	0612
	 縦壁		264	06	13	0613
	 一般環境		265	06	14	0614
	 塩害環境		266	06	15	0615
	 胸壁		267	06	16	0616
	 一般環境		268	06	17	0617
	 塩害環境		269	06	18	0618
	 翼壁		270	06	19	0619
	 一般環境		271	06	20	0620
 塩害環境		272	06	21	0621	

4.2 状態遷移確率モデルの作成

4.2.1 マルコフ数え上げによる方法

状態の経時変化（劣化）のモデルは、ある事象の変化の原理をモデル化した物理化学的なモデルと、物理化学的な原理とは関係付けずある状態量の変化を統計的に集計し近似する方法がある。本資料は、後者を扱っている。

H16 点検要領から要素単位の損傷程度の評価と記録を導入しており、複数回の点検が実施されていれば同じ要素の損傷程度の変化（定点変化）を追跡できる。このような定期点検結果を利用するとき、経時的な劣化過程を状態遷移確率で表現することがデータ処理でも都合がよい。また、状態遷移確率は、物理現象とそのメカニズムを再現するものではないが、これを用いて状態変化を予測することは、集団の遷移の変化を把握するのに便利である。同じ部材の同じ位置（同一要素）で、概ね5年間で得られた2回の点検記録で状態遷移確率を求める代表的な手法として、経年的な状態変化を要素も損傷種類も互いに独立なマルコフ連鎖過程と仮定して、マルコフ遷移確率を求める¹³⁾方法がある。すなわちデータの集計において次の特性を仮定する¹⁴⁾。

- 1) 状態の遷移確率は過去の状態に無関係であり、次の時点でどの状態にどのような確率で遷移するかはその時点の状態のみに依存する（マルコフ性）
- 2) 状態の遷移確率には時間依存性がなく、経年によらずどの時点においても同じである（斉時性）

ここでは、ある点検時点（時刻 t_A ）による損傷程度が次の点検時点（時刻 $t_B (=t_A+5 \text{年})$ ）において、どの損傷程度にどのような確率で遷移するかについて、橋梁定期点検で蓄積された要素単位の実データを数え上げて集計し、マルコフ遷移確率を求める。点検によって状態が確認された時刻も、状態の評価も離散的な記録であり、実際の状態変化が点検間のどの時点で生じたのかは不明である。すなわち、実際には連続的に変化する状態に対して、状態遷移点と点検時点が一致することはなく、点検記録から状態遷移点を特定することもできない¹⁵⁾。そこで本資料では、各橋梁における点検間隔には多少の幅があるが、大半は概ね5年間で行われているので、集計上、点検間隔は一律に5年として扱う。時刻 t_A における損傷程度を i 、時刻 t_B における損傷程度を j とすると、マルコフ推移確率は式(4.1)のとおりとなる。

$$p_{ij} = \frac{\text{時刻}t_A\text{点検時に}i\text{かつ時刻}t_B\text{点検時に}j\text{である個数}}{\text{時刻}t_A\text{点検時に}i\text{である個数}} \quad (4.1)$$

ここで、 $i = a, b, c, d, e$ 、 $j = a, b, c, d, e$ であり、 a, b, c, d, e は、H16 点検要領で示される損傷程度 $a \sim e$ である。また、全ケースのマルコフ遷移確率を状態遷移確率行列 P として、次の式 (4.2) により表すことができる。

$$P = \begin{pmatrix} p_{aa} & p_{ab} & p_{ac} & p_{ad} & p_{ae} \\ p_{ba} & p_{bb} & p_{bc} & p_{bd} & p_{be} \\ p_{ca} & p_{cb} & p_{cc} & p_{cd} & p_{ce} \\ p_{da} & p_{db} & p_{dc} & p_{dd} & p_{de} \\ p_{ea} & p_{eb} & p_{ec} & p_{ed} & p_{ee} \end{pmatrix} \quad (4.2)$$

式(4.2)は、前後の点検間で損傷程度の評価を維持した遷移確率、状態が悪くなった遷移確率、状態が改善した遷移確率を含んでいる。劣化予測を行うためにこれを用いる場合には、状態が改善した遷移確率を含むため、予測をしても状態が悪くならないことも考えられる。そこで、状態が改善した遷移確率(下三角の $p_{ba}, p_{ca}, p_{cb}, p_{da}, p_{db}, p_{dc}, p_{ea}, p_{eb}, p_{ec}, p_{ed}$)を取り除けば、損傷程度の評価を維持した要素と状態が悪くなった要素に着目した予測を行うことも可能である。式(4.3)に下三角部分を取り除いた状態遷移確率行列を示す。

$$P = \begin{pmatrix} p_{aa} & p_{ab} & p_{ac} & p_{ad} & p_{ae} \\ 0 & p_{bb} & p_{bc} & p_{bd} & p_{be} \\ 0 & 0 & p_{cc} & p_{cd} & p_{ce} \\ 0 & 0 & 0 & p_{dd} & p_{de} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_{ee} \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

遷移確率そのものは劣化メカニズムと無関係であるが、劣化の物理的メカニズムを考えれば、遷移確率を求める際に用いる母集団をある程度区分し直すことは考えられる。そこで本資料では、劣化の特徴を明らかにするために、さまざまな情報を付加して組み合わせ、細分化した母集団(表 4.2~4.7)で状態遷移確率行列を作成する。

表 4.8 に H16 点検要領による点検回数とその直近の点検実施年度を示す。対象とした道路橋については、概ね 2 巡目の定期点検が終わりつつあり、3 巡目が行われているものもある。

これまでに得られている橋梁定期点検結果(2014年4月時点まで)から点検間隔を調べるために、定期点検が 2~3 回行われた橋梁を対象に、点検 1 回目と点検 2 回目、点検 2 回目と点検 3 回目行われた年を表 4.9 に整理した。1 回目の点検を実施し、2 回目の点検を実施するまでの間隔は、ほとんどの橋梁で 5 年以内であり、2 回目の点検を実施してから、3 回目の点検を実施するまでの間隔もほとんどの橋梁で 5 年以内であることが確認できる。

本資料では、状態遷移確率行列を作成する対象橋梁を H16 点検要領で橋梁定期点検が実施されたもののうち、点検が 2 回および 3 回実施されている橋梁でかつ、点検間隔が 5 年以内の橋梁を対象とした。要素毎の 5 年以内の状態遷移を集計するにあたっては、n 回目点検時から n+1 回目点検時の遷移と n+1 回目点検時から n+2 回目点検時の遷移については、区別なく集計した。また、補修を受けている要素と受けていない要素の区別を行うにあたっては、実際の補修履歴を調べていないので、n 回目点検と n+1 回目点検の間に状態が改善していない要素は実際の補修の有無に関わらず n 回目点検と n+1 回目点検の間には、補修をしていないものとして等しく扱っている。ただし、損傷程度が回復している要素がある場合は、その要素を含んだ径間を補修補強等が実施された径間とみなし、当該径間を構成する当該部材種類の要素全てを除外した。

表 4.8 点検年度別橋梁数（2014年4月時点）

点検年度	点検回数							合計
	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	6回目	7回目	
2004	4,927	31						4,958
2005	4,789	28						4,817
2006	5,639	152	7					5,798
2007	6,037	156	2	1				6,196
2008	4,332	1,597	71	1				6,001
2009	1,640	4,756	64	3				6,463
2010	739	4,467	284	4	2			5,496
2011	663	5,183	469	15	3	1		6,334
2012	509	4,392	450	17	2	2	1	5,373
2013	552	2,916	1,790	56	4	5	3	5,326
合計	29,827	23,678	3,137	97	11	8	4	56,762

表 4.9 点検間隔の集計（点検1回目および点検2回目）

○点検1回目と2回目の橋梁数

	点検2回目									合計	
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013		
点検1回目	2004	46	121	115	1,179	2,473	286	86	25	29	4,360
	2005	-	28	15	329	1,510	2,311	149	67	23	4,432
	2006	-	-	22	69	424	1,399	3,229	198	48	5,389
	2007	-	-	-	17	189	284	1,206	3,467	267	5,430
	2008	-	-	-	-	156	153	406	511	2,257	3,483
	2009	-	-	-	-	-	33	79	92	259	463
	2010	-	-	-	-	-	-	27	9	14	50
	2011	-	-	-	-	-	-	-	22	11	33
	2012	-	-	-	-	-	-	-	1	7	8
	2013	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
合計	46	149	152	1,594	4,752	4,466	5,182	4,392	2,915	23,648	

※緑のハッチングは点検間隔1-5年、橙のハッチングは点検間隔6-10年

※値は橋梁数

○点検2回目と3回目の橋梁数

	点検3回目									合計	
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013		
点検2回目	2004			2	7	14	1	3	1	1	29
	2005	-	7		4	10	3	2			26
	2006	-	-		55	13	28	40	1	4	141
	2007	-	-	-	5	14	10	18	79	9	135
	2008	-	-	-	-	13	71	22	87	1,035	1,228
	2009	-	-	-	-	-	171	211	102	495	979
	2010	-	-	-	-	-	-	173	69	113	355
	2011	-	-	-	-	-	-	-	111	107	218
	2012	-	-	-	-	-	-	-	-	24	24
	2013	-	-	-	-	-	-	-	-	2	2
合計	0	7	-	71	64	284	469	450	1,790	3,135	

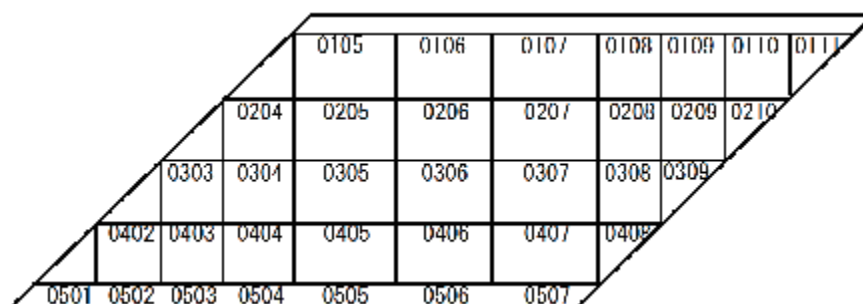
※緑のハッチングは点検間隔1-5年、橙のハッチングは点検間隔6-10年

※値は橋梁数

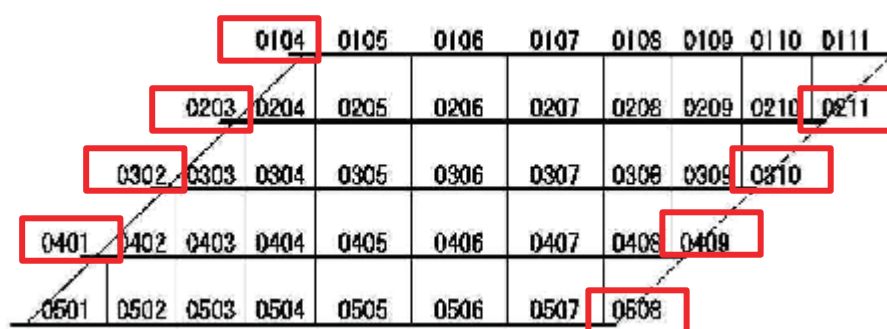
また、式 (4.1) ~ (4.3) を用いて点検結果を整理するにあたっては、1 回目と 2 回目の点検、もしくは、2 回目と 3 回目の点検でそれぞれの情報をつき合わせたとき、一部の情報が欠如していたり矛盾がある場合には、その要素を含んだ径間または橋梁全体を分析の対象から除外した。

例を以下に挙げる。

- ある径間について、 n 回目と $n+1$ 回目の点検で要素番号図が異なるために、ある要素の属性情報（部材の平面的な位置）が n 回目の点検では「端部」、 $n+1$ 回目の点検では「中間部」となり互いの情報に矛盾がある場合には、分析対象としている部材種類について当該要素が含まれる径間を除外する。（図 4.1 の例）
- ある橋について、 n 回目の点検では「鈹桁」、 $n+1$ 回目の点検では「箱桁」であった場合は、分析対象としている部材種類について当該橋梁を構成する要素全てを除外する。



n 回目の点検の場合



$n+1$ 回目の点検の場合

図 4.1 n 回目の点検と $n+1$ 回目の点検で要素番号図が異なる場合の例

4.2.2 劣化曲線の作成

状態遷移確率行列を利用すれば損傷程度 a~e の劣化曲線を作成することができる。供用開始時点の損傷程度を a として、状態遷移確率行列を基に 5 年後の損傷程度を確率的に予測する計算を何度も繰り返せば、遷移確率に基づいた多くの劣化過程を予測できる。また、ある経過年における損傷程度の割合がわかる。例えば、損傷程度 a~e を 1.00 から 0.00 まで 0.25 刻みでの数値で点数化（表 4.10）すれば、状態遷移確率に基づいて予測した損傷程度の変化の過程とそこから得られる損傷程度の期待値の時間変化が得られる（図 4.2）。図の赤線は、期待値を回帰した期待値曲線である。

図から、状態遷移確率に基づいて計算した劣化過程を見ると、経過 5 年時点で損傷程度 d や e に遷移するものもあれば、50 年以上経過しても損傷程度 a の状態のままの要素もある。そして、期待値曲線は数多くの劣化過程の平均的な挙動を表したものであり、これも平均値の標本に過ぎない。もちろん前述のように、期待値曲線は、物理化学的な劣化原理やモデルを表すものではない。

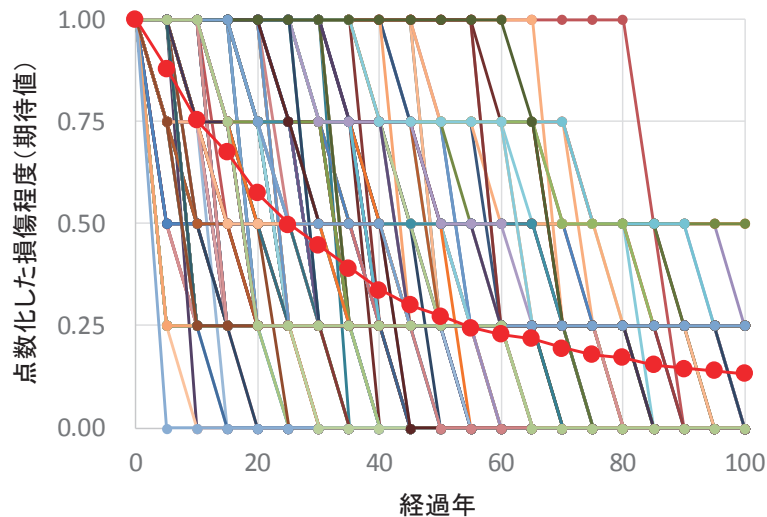


図 4.2 状態遷移確率に基づいて予測した損傷程度の劣化過程と経過 5 年毎の損傷程度の期待値および期待値曲線（鋼主桁・腐食の例）

表 4.10 各損傷程度の点数化

	損傷無	小 ← 損傷程度 → 大			
損傷程度	a	b	c	d	e
点数	1.00	0.75	0.50	0.25	0.00

換言すれば、損傷程度の a~e の割合と式 (4.3) で得られた状態遷移確率行列を用いれば、式 (4.4) によって経過 5 年毎の損傷程度 a~e の割合（以下、状態確率分布）の算出ができる。式 (4.4) の $[1, 0, 0, 0, 0]$ は、損傷のない状態（損傷程度 a が 100%、損傷程度 b~e が

それぞれ0%)で経過0年時点の状態を仮定している。[P]は、式(4.3)で表される状態遷移確率行列である。5年毎の損傷程度を表4.10のように点数化し、図4.3(1)のように頻度分布として整理すれば、損傷程度の分布を算出することができる。経過5年毎の損傷程度の分布について、平均値やばらつきを求めた上で、それらを経過年の関数として回帰すれば、期待値曲線(劣化曲線)や期待値まわりのばらつきを表す曲線を得ることができる(図4.3(2))。

$$\{\text{損傷程度 a-e の 5m 年後の割合}\} = [1, 0, 0, 0, 0][P]^m \quad (4.4)$$

ここで、mは整数であり、m=1とすると経過年が5年後のとき、m=2とすると経過年が10年後のとき損傷程度a~eの割合を示す。

図4.3(2)に鋼主桁の腐食を例に、状態遷移確率行列を利用して式(4.4)から得られる5年毎の状態確率分布の算出結果を示す。また、経過年毎に損傷程度の分布から求めた平均値と平均値±σの値を経過年の関数として回帰した結果を示す。図から、損傷程度aの割合は経年とともに減少、損傷程度b~eの割合をあわせた推移は、経年とともに増加しており、それぞれの損傷程度で増加、減少の傾向が異なる。一部の要素は、10~20年で損傷程度dになる一方で、50年経過しても損傷程度aの状態のままであることが予測される。また、桁端部(図4.3(2)左)と桁中間部(図4.3(2)右)では、各損傷程度の増減の推移が異なっており、損傷程度dとeを合計した結果の割合に着目すると、桁端部は、経過25年時点で50%を越えるのに対し、桁中間部は同時点で20%程度に留まっていることが確認できる。両者を比較すると桁端部の方が早期に劣化する傾向にあるといえる。

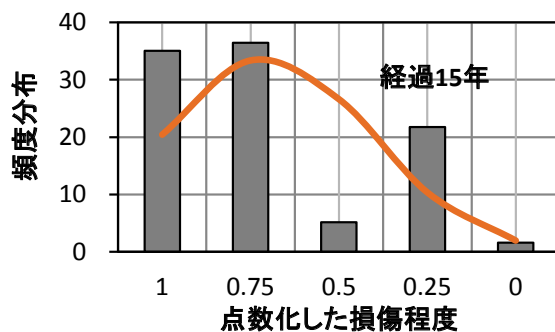


図 4.3(1) 鋼主桁・鉄桁・腐食・桁端部における経過15年の損傷程度の分布

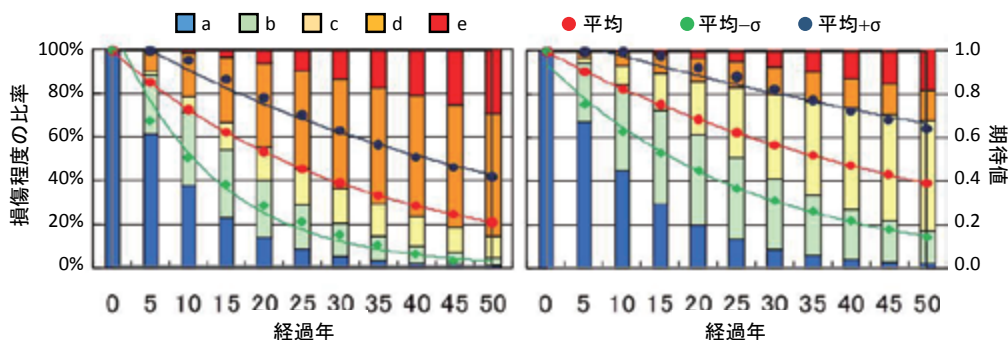


図 4.3(2) 経年に応じた損傷程度の比率と期待値曲線および期待値周りのばらつきの劣化曲線(鋼主桁・鉄桁・腐食の例 左:桁端部、右:桁中間部)

以上のように、劣化曲線は極めて精度の悪い期待値を示すに過ぎないことがわかる。劣化曲線は本来ばらつきのある劣化過程を1本の曲線に集約したものであり、また、劣化曲線の作成については、正しいとされている作成方法があるわけではない。しかしながら、以下では、各経過年の損傷程度の違い（縦軸方向のばらつき）とそれぞれの損傷程度ではなくなる時間（横軸方向のばらつき）に着目して2種類の算出方法で劣化曲線を作成してみた。また、本来あるばらつきの特徴を把握するために、ある経過年の損傷程度、または、ある損傷程度ではなくなる時点のばらつきを求め、期待値 $\pm 1\sigma$ の特徴を現す劣化曲線も求めることにする。ここに、 σ は標準偏差である。

(1) 縦軸方向のばらつきに着目した劣化曲線

縦軸方向の期待値周りのばらつきは、同じ経過年における損傷程度のばらつきを表現したものである。本資料では、算出方法として考えられる一例を紹介する。状態確率分布の各経過年の損傷程度の割合を度数とみなし、その分布形状から平均値 μ と標準偏差 σ を算出する事で得られる。ここに、 μ を期待値、 $\mu \pm \sigma$ を期待値周りのばらつきとして扱う。ここでは、損傷程度の分布形状を正規分布と二項分布で近似し、JB (Jarque-Bera) 検定にて正規分布ではないという帰無仮説が5%の有意水準で棄却できた場合は正規分布、棄却できなかった場合は二項分布と仮定して分布形状を決定する。算出した期待値(μ)と期待値周りのばらつき($\mu \pm \sigma$)の推移を経過年の関数として回帰することで、期待値周りのばらつきを表現した劣化曲線が得られる。そこで、本資料では、劣化曲線を複数の関数形(指数関数、ワイブル関数)で表現してみる(図4.4)。計算上の留意として、ここでは、実際の損傷程度の分布形状が山形にならなくとも、検定の結果のみで正規分布と二項分布のどちらかを選択することとしている。また、各経過年で検定をしているため、推計対象期間(例えば、経過0年から100年の間)で分布形状が正規分布と二項分布で混在しているものもある。

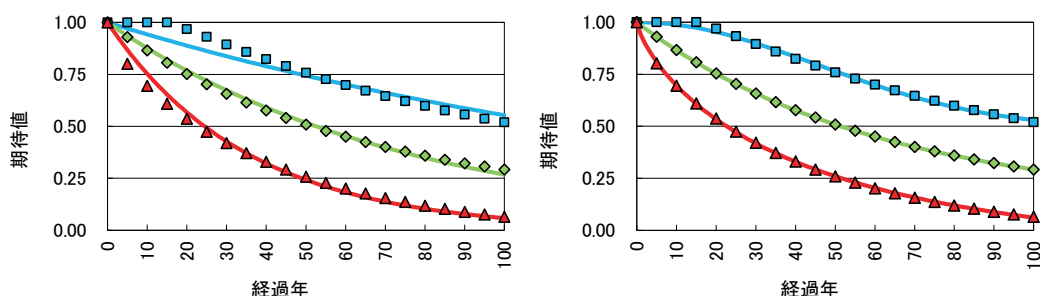


図 4.4 縦軸方向のばらつきに着目した離散値と回帰曲線

鋼主桁・腐食の例 (劣化曲線 ID : 0101)

(左 : 指数関数で回帰、右 : ワイブル関数で回帰)

(2) 横軸方向のばらつきに着目した劣化曲線

横方向の期待値と期待値周りのばらつきは、ある損傷程度ではなくなる経過年のばらつきを表現したものである。図 4.5 に各経過年の状態確率分布の各境界線と各損傷程度ではなくなる経過年の概念図を示す。図 4.5 は例として、全体の 50%がそれぞれの損傷程度ではなくなる経過年を示したものである。

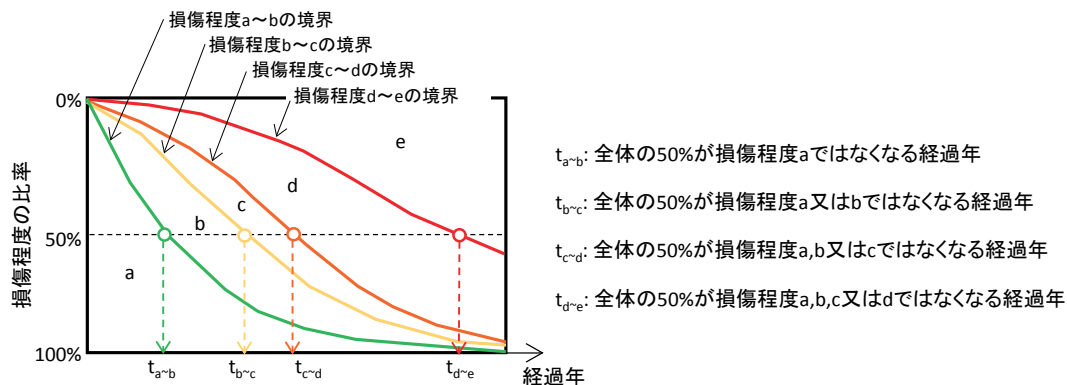


図 4.5 状態確率分布の損傷程度の各境界と全体の 50%が各損傷程度ではなくなる時点の概念

$t_{1a-b} \sim t_{1d-e}$ を表 4.10 で示す点数化した損傷程度とともに描画し、経過 0 年から離散値を何らかの関数で回帰した曲線を期待値曲線とする(図 4.6)。

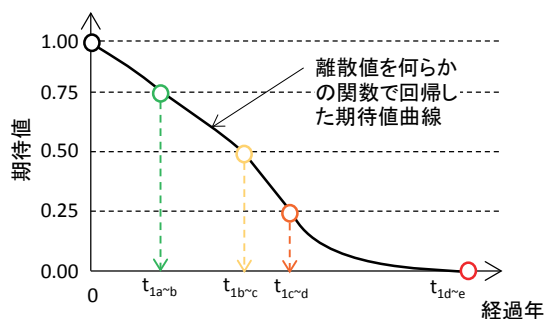


図 4.6 離散値と期待値曲線の描画の概念

上記で取得した離散値ごとに、横軸方向（時間軸方向）のばらつきを以下のように取得した。

損傷程度 a~b の境界は損傷程度 a の割合の推移と見ることができ、同時に損傷程度 b+c+d+e の割合の推移とも見ることができる。同様に、損傷程度 b~c の境界は損傷程度 c+d+e の割合の推移、損傷程度 c~d の境界は損傷程度 d+e の割合の推移、損傷程度 d~e の境界は損傷程度 e の割合の推移である。これを表 4.10 で示す点数化した損傷程度とともに横軸方向（時間軸方向）の頻度分布に描きなおすと図 4.7 のようになるだろう。本資料では、図中のそれぞれの分布形状が正規分布に当てはまると仮定し、それぞれの分布の平均値 μ と標準偏差 σ を算出した上で、 μ および $\mu \pm \sigma$ が対応する経過年を求めた (図 4.7)。こ

ここで、それぞれの分布の μ と対応する経過年を t_{1a-b} 、 t_{1b-c} 、 t_{1c-d} 、 t_{1d-e} 、それぞれの分布の $\mu-\sigma$ と対応する経過年を t_{2a-b} 、 t_{2b-c} 、 t_{2c-d} 、 t_{2d-e} 、 $\mu+\sigma$ と対応する経過年を t_{3a-b} 、 t_{3b-c} 、 t_{3c-d} 、 t_{3d-e} とした。このように取得した離散値を何らかの関数を用いて回帰すれば、横軸方向（時間軸方向）のばらつきに着目した期待値および期待値周りのばらつきを表現する劣化曲線が得られる。

図 4.8 は、損傷程度の割合の推移と時間方向の頻度分布における t_{1a-b} 、 t_{2a-b} 、 t_{3a-b} との対応関係を示したものである。図から、状態確率分布の損傷程度 a~b の境界と全体の 50% が損傷程度 a ではなくなる経過年が t_{1a-b} であり、全体の 32% が損傷程度 a ではなくなる経過年が t_{2a-b} であり、全体の 68% が損傷程度 a ではなくなる経過年が t_{3a-b} と対応する。

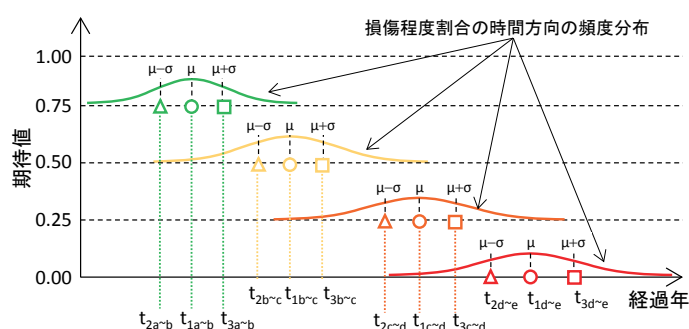


図 4.7 損傷程度の推移の頻度分布および読み取る経過年の概念

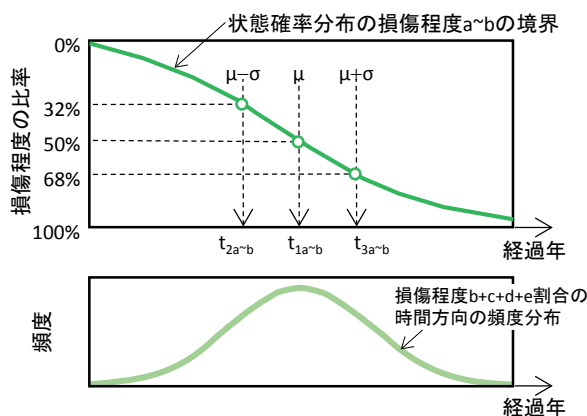
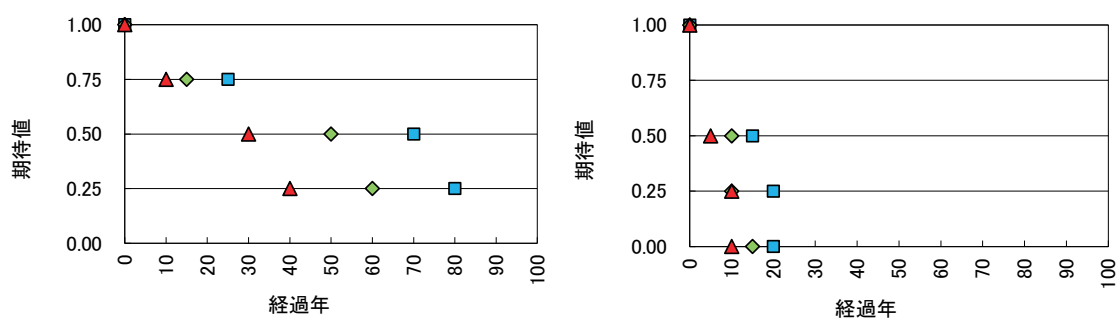


図 4.8 損傷程度割合の累積の推移と頻度分布との対応の概念
(損傷程度 a~b の境界の例)

図 4.9 は、以上の方法を用いて鋼主桁の腐食と防食機能の劣化を対象に期待値と期待値周りの離散値を取得した例である。鋼主桁の腐食では、損傷程度 a~d（期待値 1.0~0.25）の範囲は、概ね直線的に推移しているが、損傷程度 e（期待値 0.0）は表示範囲外（経過 100 年以上）にある。仮に、損傷程度 a~e（期待値 1.0~0.0）の範囲を直線で回帰すれば、離散値と回帰直線との乖離は大きくなる。一方で、鋼主桁の防食機能の劣化では、離散値が概

ね直線的に推移しており、損傷程度 $a \sim e$ (期待値 1.0~0.0) の範囲を直線で回帰しても、離散値と回帰直線との乖離は小さくなる。

損傷程度を点数化した離散値の時間的な推移は、部材種別毎、損傷種類毎、条件毎にそれぞれ異なるため、全てを同じ関数形で示すことには限界がある。そこで、本資料では、劣化曲線を複数の関数形 (1 次関数、2 次関数) で表現してみる (図 4.10)。劣化曲線の作成にあたっては、得られている状態遷移確率行列の性質に起因して、数百年経過しても損傷程度 d, e に遷移しない劣化パターンもあることから、試算の目的に応じて回帰する範囲を個々に調整する方法も考えられる。なお、1 次関数や 2 次関数では近似しきれない劣化の特徴を有する材料等もあれば、現実問題として、1 次関数や 2 次関数で期待値が 0 となる経過年が求めたとしても、その経過年で必ず損傷程度 e に達するわけでもないので利用するときには、その利用目的に応じて、利用の是非を判断すると共に結果の解釈にも利用の判断の理由を反映させる必要があると考えられる。



鋼主桁の腐食(劣化曲線 ID:0101) 鋼主桁の防食機能の劣化(劣化曲線 ID:0201)

図 4.9 それぞれの損傷程度ではなく経過年の推移

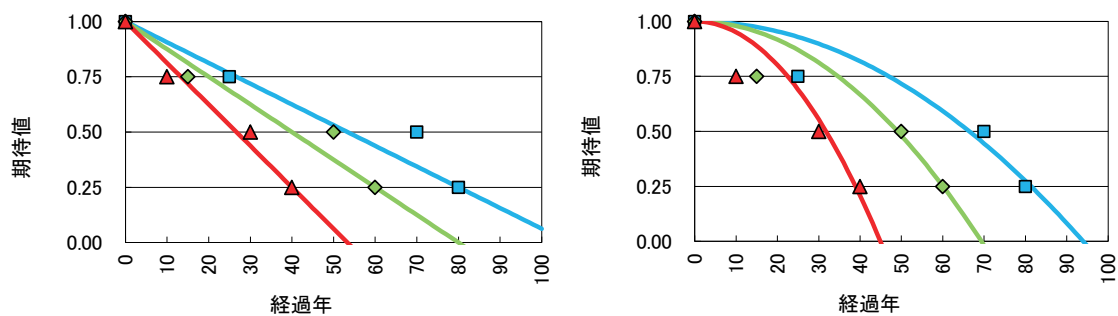


図 4.10 横軸方向のばらつきに着目した離散値と回帰曲線

鋼主桁・腐食の例 (劣化曲線 ID : 0101)

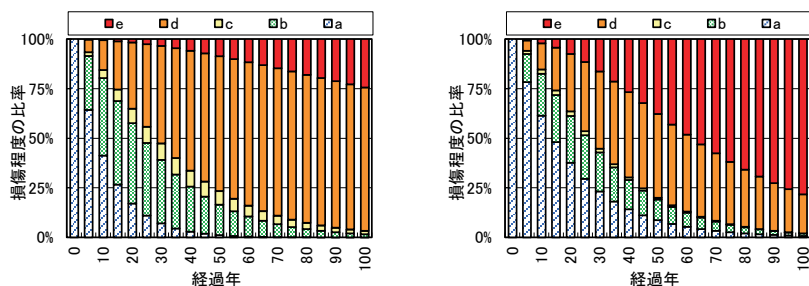
(左 : 1 次関数で回帰、右 : 2 次関数で回帰)

4.3 母集団の条件毎に異なる劣化特性

ここでは、鋼主桁の腐食と防食機能の劣化、コンクリート主桁のひびわれと剥離・鉄筋露出、鋼桁橋のコンクリート床版の床版ひびわれ、下部構造のひびわれについて、マルコフ数え上げによる方法で状態遷移確率行列を求めて、状態確率分布を比較した例を示す。状態遷移確率行列は、構造特性の相違や部位、塗装系について着目するために、それぞれの条件毎に母集団を整理した上で算出した。

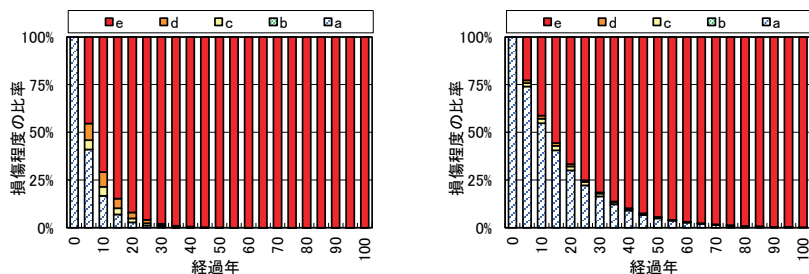
鋼主桁の腐食と防食機能の劣化特性は、塗装系に着目する。状態確率分布の算出結果を図 4.11、図 4.12 に示す。図 4.11 に示すように、鋼桁橋の A・B 塗装系と C 塗装系では、損傷程度の比率の変化傾向が大きく異なっている。A・B 塗装系では、ある時点で損傷程度 a の要素が 10 年経過すると半減する一方で、損傷程度 e まで悪化する要素は経過 50 年後でも 10%程度にとどまっている。C 塗装系では、損傷程度 a が半減に 15 年を要し、50 年後には損傷程度 e となる割合が 40%程度となっている。C 塗装系では、A・B 塗装系と比べ、比較的に健全なままで推移している割合が多いものの、早期に状態が悪化しやすい傾向にある。

図 4.12 に示すように、状態遷移確率行列を利用した劣化予測からは、C 塗装系の方が実績としても防食機能としての耐久性に優れることがわかる。



A・B 塗装系 (劣化曲線 ID : 0105) C 塗装系 (劣化曲線 ID : 0108)

図 4.11 状態確率分布の算出結果 (鋼主桁・鋼桁橋の腐食の例)



AB 塗装系 (劣化曲線 ID : 0205) C 塗装系 (劣化曲線 ID : 0208)

図 4.12 状態確率分布の算出結果(鋼主桁・鋼桁橋の防食機能の劣化の例)

コンクリート主桁のひびわれと剥離・鉄筋露出の劣化特性は、RC 桁と PC 桁の T 桁に着目し算出した。状態確率分布の算出結果を図 4.13、図 4.14 に示す。図 4.13 に示すように、ひびわれについて、50 年経過時点では、RC 桁では損傷程度 d+e の割合が 50 %を超える一方で、PC 桁（プレテン）では 10 %程度、PC 桁（ポステン）では 25 %程度となっており、RC 桁と PC 桁で大きく傾向が異なる。ポステン桁よりもプレテン桁の方が、損傷程度 b~e に遷移しにくい傾向にある。

図 4.14 に示すように、剥離・鉄筋露出についても、ひびわれと同様の傾向にある。どちらの損傷も共通して、損傷状態が比較的軽微な損傷程度 b、c が極端に少ない傾向にある。

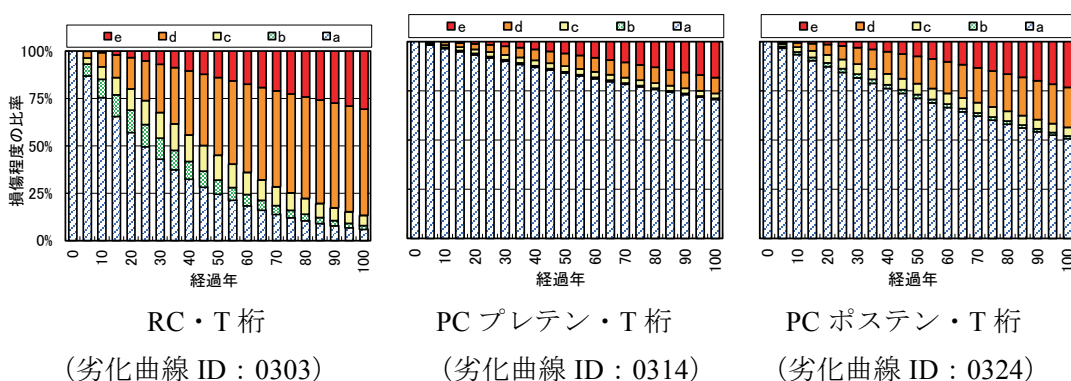


図 4.13 状態確率分布の算出結果（コンクリート主桁・ひびわれの例）

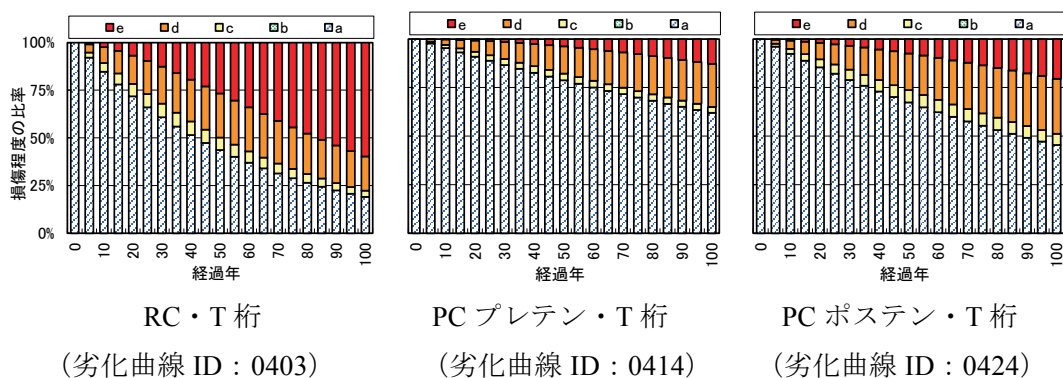
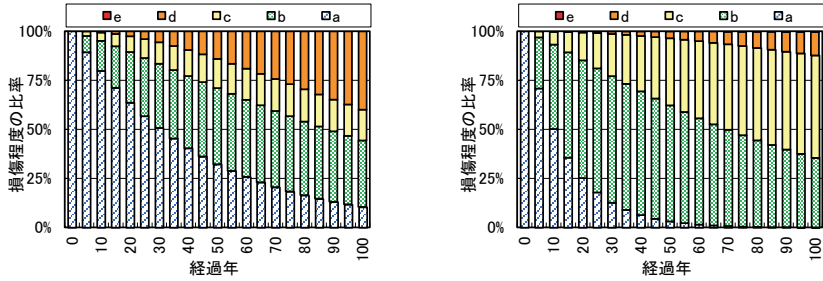


図 4.14 状態確率分布の算出結果(コンクリート主桁・剥離・鉄筋露出の例)

コンクリート床版の床版ひびわれの劣化特性は、設計で適用した道路橋示方書の違いと漏水、遊離石灰の併発の有無を考慮した場合で比較する。状態確率分布の算出結果を図 4.15、図 4.16 に示す。図 4.15 に示すように、床版の設計法が特に大きく改定された 1973 年（昭和 48 年）の道路橋示方書より前の床版（以下「48 道示前」と、以降の床版（以下「48 道示後」）を比較すると、48 道示前では、より悪い状態である損傷程度 d の割合が早期に増加しており、48 道示後と比べて、より悪い状態まで劣化が進行する。48 道示後は、損傷程度 b、c に推移するが、損傷程度 d、e に至るまでには時間がかかる傾向にある。

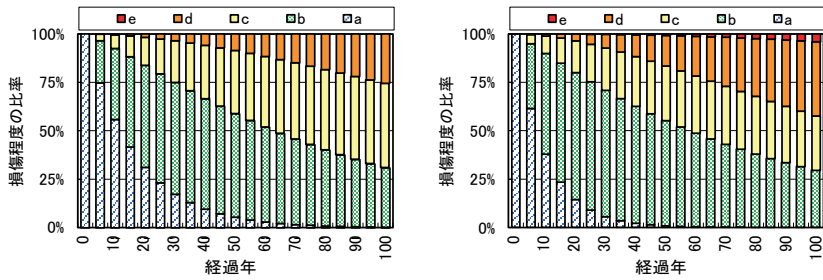
図 4.16 は、マルコフ数え上げを行う 2 回の点検の内、どちらも漏水・遊離石灰が発生している場合の母集団で整理した漏水・遊離石灰ありの方が、損傷程度 d へと推移する割合が高い傾向にあることがわかる。



48 道示前 (劣化曲線 ID : 0505) 48 道示後 (劣化曲線 ID : 0508)

図 4.15 状態確率分布の算出結果

(コンクリート床版・鉄桁・床版ひびわれの例)



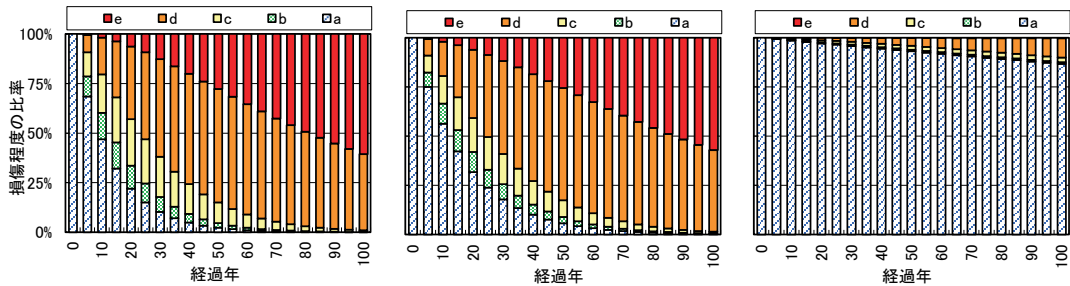
漏水・遊離石灰なし (ID なし) * 漏水・遊離石灰あり (ID なし) *

図 4.16 状態確率分布の算出結果

(コンクリート床版・鉄桁・床版ひびわれの例)

*文献¹⁶⁾の TABLE3(a)、(b)の状態遷移確率行列をもとに状態確率分布を作成した。同じ状態確率分布が参考文献⁸⁾の Figure 12 にも記載されている。

コンクリート橋脚については、橋脚の各部位の劣化傾向の違いについて比較を行った。状態確率分布の算出結果を図 4.17 に示す。また、コンクリート橋脚の各部位を図 4.18 に示す。図 4.17 の結果から、隅角部に比べると梁部、柱部において損傷が進行しやすい傾向を示した。



橋脚・梁部 (劣化曲線 ID : 0603) 橋脚・柱部 (劣化曲線 ID : 0606) 橋脚・隅角部 (劣化曲線 ID : 0609)

図 4.17 状態確率分布の算出結果 (コンクリート下部工・ひびわれの例)

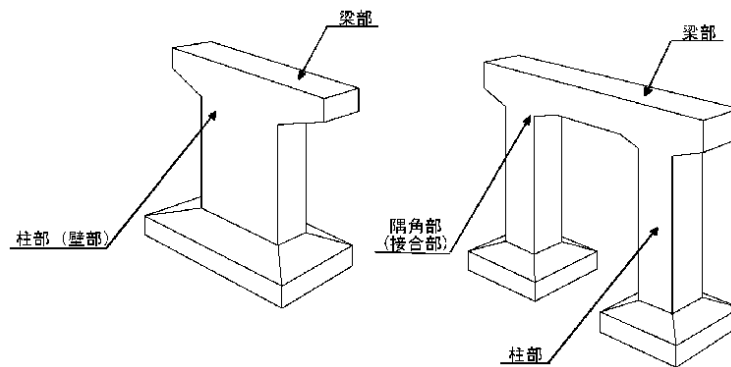


図 4.18 コンクリート橋脚の各部

4.4 まとめ

ここでは、主要な部材の主要な損傷に対して、マルコフ性と斎時性を仮定した点検データの数え上げを行い、状態遷移確率モデルを作成した。状態遷移確率行列から状態確率分布を作成し、状態確率分布から劣化過程を1本の線に集約した期待値曲線と、本来あるばらつきの特徴を把握するために、期待値 $\pm 1\sigma$ の特徴を表す劣化曲線を作成するための方法を2種類例示した。その結果、ある経過年における損傷程度のばらつきを考えるのか、ある損傷程度ではなくなる経過年のばらつきを考えるのかというばらつきの着目の仕方や離散値を回帰する関数の選択によっても予測結果に影響を与えることがわかった。

また、状態遷移確率モデル作成の対象とする母集団について、架設環境や塗装仕様などの属性情報の違いによっても劣化予測の結果に影響を及ぼすことがわかった。なお、272パターンの遷移確率行列は付録2を参照されたい。

参考文献：

- 13) 貝戸清之, 阿部充, 藤野陽三: 実測データに基づく構造物の劣化予測, 土木学会論文集, No. 744/IV-61, pp. 29-38, 2003.10
- 14) 森村英典, 高橋幸雄: マルコフ解析, 日科技連, pp. 1-40, 1979.3
- 15) 貝戸清之, 青木一也, 小林潔司: 実践的アセットマネジメント第2世代研究への展望, 土木技術者実践論文集, Vol. 1, pp. 67-82, 2010.3
- 16) Takashi Tamakoshi, Mari Ishio, Fumi Miyahara, Yoshiteru Yokoi, and Masahiro Shirato, FINITE ELEMENT-LEVEL BRIDGE INSPECTION DATA ANALYSIS AND EXPERIMENTS ON THE DURABILITY OF RC DECKS, 30th US-Japan Bridge Engineering Workshop, October 21-23, 2014, <http://www.pwri.go.jp/eng/ujnr/tc/g/30bws/agenda.htm>