

建築構造学 7

内藤多仲 監修

耐震・耐風構造

小高昭夫・那須信治・竹内盛雄
桜井讓爾・谷 資信 共著

鹿島出版会

目次

監修のことば……………内藤多仲
序……………小高昭夫

第1章 地震……………〔那須信治・竹内盛雄〕…	1
1.1 地球と地質時代区分……………	1
1.1.1 地球の形と内部構造……………	1
1.1.2 地質時代の区分……………	2
1.1.3 造山運動……………	4
1.1.4 造山帯と地震帯……………	6
1.2 地震波……………	6
1.2.1 実体波 (Bodily waves)……………	6
1.2.2 表面波 (Surface waves)……………	10
1.3 地震波の反射・屈折および地震探査法……………	17
1.3.1 地震波の反射・屈折 (Snell の法則)……………	17
1.3.2 地震探査法の反射法——平面波伝播の一例……………	18
1.4 地震の規模とエネルギー……………	21
1.4.1 地震規模の定義……………	21
1.4.2 地震のエネルギー E と M との関係……………	23
1.5 地震の強さ……………	23
1.5.1 震度階……………	23
1.5.2 地震の強さと地震動加速度……………	26
1.5.3 地震の強さと構造物の振動速度……………	26
1.6 建築物の震害……………	29
1.6.1 木造家屋……………	30
1.6.2 れんが造建物……………	30

3.4.1	モーダル・アナリシス	100
3.4.2	Root mean square 法	108
3.4.3	直接積分法	104
3.5	伝達関数と周波数応答	106

第4章	構造物の弾塑性振動	[小高昭夫] 110
4.1	構造物の弾塑性振動の意義	110
4.1.1	構造物のせん断力と変位について	110
4.1.2	構造物の耐震安全性と塑性率 (ductility factor)	111
4.1.3	構造物の復元力特性と塑性率	118
4.2	弾塑性定常強制振動	121
4.2.1	正弦波地動に対する1質点系の弾塑性応答	121
4.2.2	弾塑性定常振動に基づく最適震度の近似解	127
4.2.3	履歴減衰	182
4.3	地震動による弾塑性応答	185
4.3.1	構造物の弾塑性応答解析	185
4.3.2	弾塑性応答と耐震設計への応用	149

第5章	構造物のロッキング振動とねじれ振動	[小高昭夫] 159
5.1	構造物のロッキング振動	159
5.1.1	地盤のモデル化	159
5.1.2	ロッキング振動の固有値と振動形	168
5.2	構造物の地震動によるロッキング, スウェイを伴う応答	170
5.2.1	地震動によるロッキング振動	170
5.2.2	地震動による, スウェイとロッキング振動多伴う, 多質点系の弾性応答	171
5.2.3	地震動によるスウェイとロッキング振動を伴う多質点系の弾塑性応答	175
5.3	構造物のねじれ振動応答	181
5.3.1	ねじれ振動	181
5.3.2	地震動によるねじれ振動応答	189

1.6.3	鉄筋コンクリート造建物	82
-------	-------------	----

第2章	1 質点系の振動	[小高昭夫] 87
2.1	構造物の振動系へのモデル化	87
2.2	1 質点系の自由振動	40
2.3	1 質点系の減衰自由振動	43
2.4	1 質点系の強制振動	47
2.5	地震動による1 質点系の応答	51
2.5.1	運動方程式とその解	51
2.5.2	レスポンス・スペクトル (response spectrum)	54
2.5.3	電子計算機によるレスポンス・スペクトルの解析	56
2.6	レスポンス・スペクトルとベース・シャープ係数	60
2.6.1	レスポンス・スペクトルの重要性	60
2.6.2	レスポンス・スペクトルの標準化	65
2.6.3	ベース・シャープ係数	68

第3章	多自由度系の振動	[松井謙爾] 75
3.1	多自由度系	75
3.2	多自由度系の運動方程式	77
3.2.1	静力学問題のつりあい方程式	77
3.2.2	動力学の運動方程式	79
3.3	多自由度系の自由振動	83
3.3.1	振動特性	83
3.3.2	固有振動形の共役性	87
3.3.3	固有値問題の実用解法	89
3.3.4	非対称マトリックスの取扱い	96
3.3.5	自由振動	97
3.3.6	建築物の固有周期	98
3.4	強制振動	99

第6章 建物の固有周期および減衰	[竹内盛雄]	199
6.1 起振機による建物の強制振動		199
6.1.1 建物の振動性状		199
6.1.2 起振機		199
6.2 建物の固有周期		201
6.2.1 共振曲線による方法		201
6.2.2 周期傾度曲線による方法		202
6.3 建物の減衰		203
6.3.1 減衰定数の概算値(第1法)		203
6.3.2 減衰定数の概算値(第2法)		203
6.4 建物の振動試験例		204
6.4.1 建物の概要(図-6.5~6.8参照)		204
6.4.2 計器類および起振機		206
6.4.3 試験項目		206
6.4.4 試験結果およびその考察		207
第7章 建物の耐震設計	[谷 資信]	219
7.1 建物の静的耐震設計		219
7.1.1 静的耐震設計の歴史的考察		219
7.1.2 震度の意味		222
7.1.3 静的耐震設計の順序		224
7.1.4 静的耐震設計上の問題点		229
7.2 建物の動的耐震設計		234
7.2.1 動的耐震設計の歴史的考察		234
7.2.2 動的耐震設計の意味		236
7.2.3 動的耐震設計の順序		237
7.2.4 動的耐震設計上の問題点		244
第8章 耐風構造	[桜井譲爾]	245
8.1 風の特徴		245

ix	
8.1.1 風の定義	245
8.1.2 風が起る原因	246
8.1.3 強 風	250
8.2 再現期待値	251
8.3 風速の鉛直分布	252
8.3.1 対数法則	253
8.3.2 べき法則	253
8.4 ガスト	254
8.4.1 風の息	254
8.4.2 ガストファクター(gust factor)	255
8.4.3 変動風の統計的検討	257
8.5 静的設計	263
8.5.1 空気力・速度圧	263
8.5.2 風力係数	267
8.6 動的解析	269
8.6.1 剛性の大きい建造物の風による振動	269
8.6.2 剛性の小さい建造物の風による振動(自励振動)	274
8.6.3 カルマン渦による建造物の振動	275
8.7 建造物の風に関する実験	277
8.7.1 レイノルズ数	278
8.7.2 模型実験での相似則	280
8.7.3 風 洞	281
8.7.4 計 測	282
8.7.5 実在建物の風圧などの実測	283
8.8 結 語	283
建築基準法改正(第2次案)	283
索 引	289

目 次

はじめに

第1章 「宏観異常」とは 11

1.1 地震と予兆 11

- 1995年 兵庫県南部地震—阪神・淡路大震災— 11
- 紀元前より, 洋の東西を問わず 16
- 科学者の責務 19

1.2 問題の背景 20

- 過去の顕著な異常例 20
- Tributschのコメント 27
- 著者の取組み 29

1.3 先人の業績 30

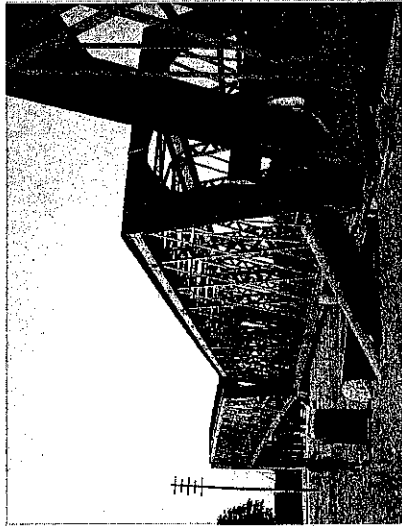
- 寺田貞彦—多才な物理学者— 30
- 末廣恭雄—著名な「お魚博士」— 33
- 畑井新喜司—ナマズ研究の先駆者— 36
- 武者金吉—清貧に耐えて— 37
- Hans von Hentig—西欧からの報告— 40

第2章 宏観異常概観 I 41

—地震別ケース・スタディ—

2.1 日本の大地震 41

- 1854年 安政東海地震 ($M=8.4$) 42
- 1855年 安政江戸地震 ($M=6.9$) 45



濃尾地震 ($M=8.0$) で倒壊した長良川鉄橋
1891 (明治24) 年10月28日発生

- 1891年 濃尾地震 (M=8.0) 51
 - 1923年 関東地震 (M=7.9) 57
 - 1944年 東南海地震 (M=7.9) 70
 - 1978年 伊豆大島近海地震 (M=7.0) 77
 - 1978年 宮城県沖地震 (M=7.4) 80
 - 1984年 長野県西部地震 (M=6.8) 82
 - 1995年 兵庫県南部地震 (M=7.2) 83
 - その他の大地震 86
2. 2 中国の大地震 89
- 中国の地震活動と地震史 89
 - 1975年 遼寧省海城地震 (M=7.3) 92
 - 1976年 河北省唐山地震 (M=7.8) 94
 - 1976年 四川省松潘・平武地震 (M=6.7~7.2) 97
 - その他の大地震 102

2. 3 アメリカ・旧ソ連・イタリアなどの大地震 104

- アメリカの大地震 104
- 旧ソ連の大地震 109
- ルーマニアの大地震 112
- 旧ユーゴスラビアの大地震 114
- トルコの大地震 114
- イタリアの大地震 115
- 中南米の大地震 117

第3章 宏観異常概観 II 119

一分類と特性一

- 3. 1 土地変形 119
- 3. 2 鳴動(音) 121
- 3. 3 前震 124
- 3. 4 動物異常行動 127
 - 哺乳類 127
 - 鳥類 130

- 魚類 132
 - へび・ミミズ・昆虫など 137
 - 動物は何に感じるか 141
3. 5 発光現象 144
- 発光現象事例の追加 145
 - 発光の形、色、輝度 146
 - 発光源の位置 148
 - 発光現象の先行時間 150
 - 発光の原因とそのメカニズム 150

3. 6 地下水・温泉 152

- 地下水・温泉変化事例の追加 152
- 異常出現地点の震央距離 153
- 先行時間 154

3. 7 異常気象 155

- 3. 8 異常電磁波 158
- 3. 9 超能力 159

第4章 宏観異常の特性と地震予知への応用 161

4. 1 宏観異常の解明に向けて 161

一アクトタイプな取り組み一

- 日本の研究 161
- 中国の研究 167
- アメリカの研究 167

4. 2 宏観異常の出現地点 176

- 最大出現距離一大地震ほど遠くまで出現一 176
- 震央もマグニチュードも予測可能 178

- 4. 3 宏観異常の先行時間 182
 - 先行時間の頻度分布 182
 - 最長先行時間と本震のマグニチュード 183
 - 先行時間のワイブル分布解析 185
- 4. 4 宏観異常による地震発生確率—信頼性をどうするか— 188
 - 宏観異常出現後の地震発生確率の算定 188
 - 複数のシグナルによる総合確率 189
 - 「にせ」シグナルをどうするか 190
 - 総合確率算定の事例 191
- 4. 5 果たして病的科学か 197

第5章 地球科学的前兆との対比 199

- 5. 1 最大出現距離の比較 200
- 5. 2 先行時間の比較 202

第6章 まとめとこれからの課題 204

- 〈資料1〉 濃尾地震の前兆 207
- 〈資料2〉 宮城県沖地震の前兆 220
- 〈資料3〉 長野県西部地震の前兆 225

- 参考文献 (和文) 233
- 参考文献 (欧文) 237
- 索引 242

第1章 「宏観異常」とは

1. 1 地震と予兆

○1995年 兵庫県南部地震—阪神・淡路大震災—

1995年1月17日、どういいうわけか早朝に目覚めた著者は、東京世田谷の自宅のリビング・ルームでテレビをつけて、新聞を広げていた。ところが、いきなりテレビ画面のテロップに「近畿で強震」と表示されたので「ギョッ」となったことを覚えている。かねてから活断層と地殻歪（ひずみ）の組合せによる地震危険度の研究に基づいて、関西方面に大地震の可能性を予測していたので（例えばRiditake, 1988; 力武, 1988, 1996), いよいよ来たかという思いであった。

引きつづいて、テレビの画面には各地の震度が報じられ、彦根5, 京都5, 豊岡5, …, ついに神戸6となり、マグニチュード（以下, M と書く）7.2という大地震となってしまう。地震後しばらくすると、あちこちのテレビ・ラジオ局から電話がかり出し、1日中解説や特別番組にかり出されることになった。地震問題の第一線で活躍している現役の研究者諸君は当然のことながら調査に忙しくなるので、著者のような定年教授が動員されることはやむを得ないところであろう。

出先のテレビ局でみるテレビ画面はきわめてショッキングであった。淡路島北淡町などの瓦葺き木造家屋がベチャンコに潰れた光景はまことに惨憺たるもので、かつて調査に出かけたことのある1948年の福井地震 ($M=7.1$, 死者3,769人, 家屋倒壊36,184棟, 半壊11,816棟, 焼失3,851棟) のときの現地の状況を思い出した。恐らく発震後5~10秒くらいで倒壊したと想像され、就寝中の人びとは逃げ出

動的解析と耐震設計
[第4巻]

ライフライン施設

土木学会 編

技報堂出版

『動的解析と耐震設計』第4巻幹事および執筆者

(1989年3月現在、五十音順)

第4巻 幹事	田 政 則	前掲
VII編 執筆者	池 尚 治	横浜国立大学工学部建設学科
	運 上 茂	建設省土木研究所
	恵 谷 舜	首都高速道路公団神奈川建設局
	角 谷 務	日本道路公団東京第一建設局
	加 島 延 行	本州四国連絡橋公団第三建設局
	片 山 恒 雄	前掲
	川 島 一 彦*	前掲
	北 沢 正 彦	阪神高速道路公団工務部
	田 村 敬 一	建設省土木研究所
	西 村 昭 彦	前掲
VIII編 執筆者	後 藤 洋 三	(株)大林組技術研究所
	志 波 由 紀 夫	大成建設(株)土木本部
	杉 正	東京電力(株)総合技術研究所
	手 塚 茂	首都高速道路公団神奈川建設局
	西 尾 宣 明	東京ガス(株)技術研究所
	浜 田 政 則*	前掲
IX編 執筆者	井 合 進	運輸省港湾技術研究所
	稲 富 隆 昌*	前掲
	上 部 達 生	運輸省港湾技術研究所
	白 石 悟	運輸省港湾技術研究所
	関 田 欣 治	新日本製鉄(株)鉄鋼海洋事業部
	善 功 企	運輸省港湾技術研究所
	丸 山 雅 淑	日本シーワールドエンジニアリング(株)構造技術部

(*は編担当幹事)

目 次

【VII編 橋の耐震設計と動的解析】

1. 橋の震害	3
1.1 橋の被害	3
1.2 主な地震による被害	4
1.2.1 1923年関東地震	4
1.2.2 1948年福井地震	4
1.2.3 1964年新潟地震	5
1.2.4 1978年宮城県沖地震	5
1.3 耐震技術の整備に伴う被害形態の変化	6
1.4 橋の震害要因の検討	9
2. 動的解析の役割とその適用	11
2.1 動的解析の役割	11
2.2 動的解析を必要とする橋	13
2.3 動的解析に用いる入力地震動	14
2.3.1 耐震設計上目標とする地震規模の決定	15
2.3.2 入力地震動強度の決定	15
2.4 動的解析の手法と橋のモデル化	17
2.4.1 動的解析の手法	17
2.4.2 モデル化の基本方針	17
2.5 上部構造のモデル化	18
2.5.1 鋼桁橋のモデル化	18
2.5.2 トラス橋のモデル化	18

2.5.3	ラーメン橋のモデル化	19
2.5.4	アーチ橋のモデル化	20
2.5.5	コンクリート連続橋のモデル化	21
2.5.6	斜張橋のモデル化	21
2.5.7	吊橋のモデル化	22
2.5.8	支承のモデル化	22
2.6	下部構造のモデル化	23
2.6.1	モデル化の方法	23
2.6.2	各種下部構造のモデル化	25
2.6.3	基礎と地盤の相互作用ばね定数	28
2.7	減衰	31
2.7.1	レイリー減衰	31
2.7.2	ひずみエネルギー比例減衰・運動エネルギー比例減衰	31
3.	橋の動的特性	33
3.1	一般	33
3.2	上部構造の動的特性	33
3.2.1	上部構造の固有振動特性	33
3.2.2	上部構造の減衰特性	48
3.3	下部構造の動的特性	56
3.3.1	固有振動特性	56
3.3.2	強制振動実験結果に基づく地盤ばね定数	58
3.3.3	振動モード形が固有振動特性に及ぼす影響	61
3.3.4	基礎の根入れが固有振動特性に及ぼす影響	62
3.4	強震観測記録からみた橋の動的特性	63
3.4.1	強震時の橋の地震応答	63
3.4.2	橋の増幅特性と基礎構造形式	66
3.5	橋脚の非線形動的特性	67
3.5.1	鉄筋コンクリート部材の特性	67
3.5.2	靱性の評価	68
3.5.3	靱性と耐震設計	73
3.5.4	復元力モデルによる解析	74
3.5.5	オンラインハイブリッド実験による検討方法	75
3.5.6	まとめ	77
4.	橋の動的解析および評価の事例	79
4.1	実測記録による動的解析の精度の検討	79
4.1.1	一般	79
4.1.2	連続橋の例	79
4.1.3	斜張橋の例	81
4.2	連続ラーメン橋の動的解析例	83
4.2.1	新鍛冶屋敷橋の概要	83
4.2.2	動的解析の基本方針	84
4.2.3	動的解析モデル	84
4.2.4	動的解析の結果	87
4.3	斜張橋の動的解析例(その1)	90
4.3.1	横浜港横断橋の概要	90
4.3.2	耐震設計の基本方針と構造系の設計	91
4.3.3	全橋モデルによる動的解析	94
4.3.4	動的解析の結果とその評価	95
4.4	斜張橋の動的解析例(その2)	98
4.4.1	東神戸大橋の概要	98
4.4.2	上部構造の耐震設計	99
4.4.3	大型ケーソンの耐震設計	103
4.5	吊橋の動的解析例	106
4.5.1	本州四国連絡橋の耐震設計基準	106
4.5.2	設計の流れと動的解析の位置づけ	107
4.5.3	南備讃瀬戸大橋の概要	109

2.1.2	沈埋トンネルの構造と建設工法	147
2.1.3	沈埋トンネルの動的挙動に関する研究	150
2.2	耐震設計の概要	154
2.2.1	設計の基本的な方法	154
2.2.2	設計の手順	154
2.2.3	耐震計算法	155
2.3	耐震設計の事例	156
2.3.1	トンネルの構造と地盤条件	156
2.3.2	入力地震動の設定	157
2.3.3	地盤定数の設定	158
2.3.4	横断面の耐震計算	159
2.3.5	横断面方向の地震時断面力	160
2.3.6	トンネル軸方向の構造系のモデル化	161
2.3.7	応答変位法による軸方向の耐震計算	164
2.3.8	動的解析による耐震計算	165
2.3.9	安全性の照査	167
3	埋設管の耐震設計例	169
3.1	耐震設計の基本的考え方	169
3.2	耐震設計基準・指針	171
3.2.1	石油パイプライン技術基準	171
3.2.2	ガス導管耐震設計指針	173
3.3	耐震計算の事例	176
3.3.1	石油パイプライン技術基準による耐震計算例	176
3.3.2	ガス導管耐震設計指針による耐震計算例	178
3.4	埋設管の地震時挙動の観測と数値シミュレーション	179
4	地下タンクの耐震設計例	184
4.1	LNG地下タンクの概要	184

4.5.4	下部構造(剛体基礎)の動的解析	110
4.5.5	上部構造の全橋モデルによる動的解析	112
4.6	免震橋の動的解析例(ニューゼーランドの例)	115
4.6.1	一般	115
4.6.2	免震設計法	116
4.6.3	免震設計により建設された橋の例	119
文 献		121

【VIII編 地中構造物の耐震設計と動的解析】

1	地中構造物の動的特性と耐震計算法	127
1.1	地中構造物の震害	127
1.2	動的特性に関する既往の研究	129
1.2.1	地震観測の事例	129
1.2.2	実験的研究	132
1.2.3	解析的研究	134
1.3	耐震設計基準と耐震計算法	136
1.3.1	耐震設計基準	136
1.3.2	耐震計算法と設計地震外力	137
1.4	耐震計算の問題点と今後の研究課題	142
1.4.1	入力地震変位	142
1.4.2	地盤物性の評価	144
1.4.3	地中構造物の非線形挙動と極限強度	145
2	沈埋トンネルの耐震設計例	147
2.1	沈埋トンネルの概要	147
2.1.1	沈埋トンネルの現状	147

5.3.1	対象トンネルおよび地盤	213
5.3.2	応答変位法による耐震計算	216
5.3.3	動的解析手法による耐震計算	219
5.4	計算結果の評価	225
5.4.1	セグメント応力の評価	225
5.4.2	リング継手応力および変形の評価	226
	文 献	228
	【IX編 港湾・海洋構造物の耐震設計と動的解析】	
1.	港湾構造物の動的特性	235
1.1	動的特性に関する研究の経緯と現状	235
1.2	震害事例	236
1.3	動的挙動の実例	243
1.3.1	地震観測の実例	243
1.3.2	振動実験の事例	253
2.	港湾構造物の耐震設計	259
2.1	耐震設計基準	259
2.2	耐震設計法	259
2.3	耐震設計における動的解析の位置づけ	262
3.	海洋構造物の耐震設計	264
3.1	動的特性に関する研究の経緯と現状	264
3.2	耐震設計基準	265
3.3	耐震計算法	265
3.4	耐震設計における動的解析の位置づけ	267

4.1.1	LNG地下タンクの現状	184
4.1.2	LNG地下タンクの構造	185
4.2	耐震設計の概要	185
4.2.1	設計の考え方	185
4.2.2	耐震設計手法	187
4.3	耐震設計事例	187
4.3.1	タンクの構造と地盤条件	187
4.3.2	地盤の物性値の設定	189
4.3.3	入力地震動	189
4.3.4	地盤応答解析	190
4.3.5	タンク躯体の応答解析	192
4.4	模型振動実験による地震時挙動のシミュレーション	194
4.4.1	実験の概要	195
4.4.2	実験結果	196
4.5	LNG地下タンクの地震観測例	198
4.5.1	地震観測計画	198
4.5.2	地震観測結果	199
4.5.3	設計手法の評価	202
5.	シールドトンネルの耐震計算例	205
5.1	耐震計算法	205
5.1.1	シールドトンネルの耐震計算上の特徴	205
5.1.2	覆工構造のモデル化手法	206
5.1.3	応答変位法	207
5.1.4	動的応答解析手法	209
5.2	覆工の長手方向剛性の評価法	210
5.2.1	軸剛性	210
5.2.2	曲げ剛性	211
5.3	耐震計算例	213

4. 動的解析のための土質調査・試験法	268
4.1 港湾構造物	268
4.2 海洋構造物	272
5. 動的解析の事例	275
5.1 栈橋	275
5.2 浮遊式構造物	279
5.3 シーバース	287
5.4 防波堤	293
5.5 セメント系改良地盤	300
5.6 有脚式海洋構造物	305
5.7 大水深域の重力式プラットフォーム	314
文献	320

動的解析と耐震設計
[第3巻]

エネルギー施設

土木学会編

技報堂出版

『動的解析と耐震設計』第3巻幹事および執筆者

(1989年3月現在、五十音順)

第3巻 幹事	川島一彦	前掲
V編 執筆者	大町達夫	前掲
	大本家正	水資源開発公団試験所
	塩尻弘雄	前掲
	馬場恭平	K馬場エンジニアリングコンサルタンツ
	渡辺啓行*	前掲
VI編 執筆者	伊藤洋	(財)電力中央研究所我孫子研究所
	江刺靖	(財)電力中央研究所我孫子研究所
	国生剛	(財)電力中央研究所我孫子研究所
	塩尻弘雄*	前掲
	塩見哲	(財)電力中央研究所 原燃サイクルプロジェクトチーム
	当麻純一	(財)電力中央研究所我孫子研究所
	徳田直明	石川島播磨重工業(株)技術研究所
	仲戸川哲人	三菱原子力工業(株)プラント設計部
	西好一	(財)電力中央研究所我孫子研究所
	本荘静光	(財)電力中央研究所我孫子研究所
	前野陽治	(財)電力中央研究所FBRプロジェクトチーム
	正木範昭	(株)日建設計土木設計事務所
	松田泰治	(財)電力中央研究所我孫子研究所

(*は編担当幹事)

目次

【V編 ダムの耐震設計と動的解析】

1. 耐震設計基準と耐震設計法	3
1.1 日本における考え方	3
1.2 米国における考え方	4
1.3 動的解析への移行	5
2. ダムの動的挙動の研究	7
2.1 動的解析手法の変遷	7
2.2 地震観測による研究	8
2.2.1 ダムの地震応答特性	8
2.2.2 日本のダムの地震時挙動	9
2.2.3 外国のダムの地震時挙動	14
2.3 振動実験による研究	17
2.3.1 ファイルダム	17
2.3.2 重力ダム	18
2.3.3 アーチダム	21
2.4 動水圧・動的相互作用理論	23
2.4.1 動水圧	23
2.4.2 ダム-貯水-地盤系の動的解析	25
3. ファイルダムの動的解析と実例	29
3.1 概要	29
3.2 静的初期状態解析	30

5. 今後の課題.....98

文献103

【VI編 産業施設の耐震設計と動的解析】

1. 原子力発電所の地盤および土木構造物109
1.1 耐震設計の基本的考え方.....109
1.2 地質および地盤調査.....113
1.3 安全性評価に必要な物性.....116
1.4 耐震安全性の評価手法.....120

1.4.1 原子炉建屋基礎地盤と周辺斜面 120

1.4.2 屋外重要土木構造物 123

1.5 耐震性評価の事例.....125

1.5.1 原子炉建屋基礎地盤 125

1.5.2 周辺斜面 130

1.5.3 屋外重要土木構造物 136

2. 送・変電施設143

2.1 変電施設.....143

2.1.1 耐震設計法 143

2.1.2 動的解析の事例 147

2.2 送電鉄塔.....155

2.2.1 耐震設計法 155

2.2.2 動的解析の事例 159

2.2.3 今後の検討課題 170

3.2.1 築堤解析 30
3.2.2 湛水解析 34
3.3 動的解析37

3.3.1 入力地震動の選定 37

3.3.2 動的物性 38

3.3.3 動的解析の適用 47

3.4 安全性の評価52

3.4.1 すべりに対する安全率 52

3.4.2 Newmarkによる剛体すべり量 53

3.4.3 Makdisi-Seedによる剛体すべり量 55

3.4.4 渡辺・馬場によるすべり量 56

3.4.5 液化化に対する検討 57

3.5 動的解析の実例61

3.5.1 牧尾ダムの動的解析 61

3.5.2 岩屋ダムの動的解析 65

4. コンクリートダムの動的解析と実例.....72

4.1 概要72

4.1.1 重力ダム 72

4.1.2 アーチダム 73

4.2 動的解析に用いる物性74

4.2.1 動的変形特性 74

4.2.2 動的強度 77

4.3 重力ダムの動的解析例80

4.3.1 コンクリートの非線形物性 80

4.3.2 地震によるクラックの解析 84

4.4 アーチダムの動的解析例86

4.4.1 Pacoimaダムの動的解析 86

4.4.2 奈川渡ダムの動的解析 90

3.	地上貯槽および配管	171
3.1	地上貯槽	171
3.1.1	はじめに	171
3.1.2	耐震設計法	174
3.1.3	動的解析の方法と事例	185
3.1.4	今後の検討課題	190
3.2	配管	192
3.2.1	はじめに	192
3.2.2	耐震設計法	192
3.2.3	動的解析の方法と事例	197
3.2.4	今後の検討課題	203
4.	免震・防振構造	205
4.1	免震構造	205
4.1.1	免震設計法	205
4.1.2	動的解析の方法と事例	209
4.1.3	今後の課題	216
4.2	防振設計と弾性支持法	217
4.2.1	防振設計の考え方と振動絶縁理論	217
4.2.2	弾性支持法	221
4.2.3	弾性支持法の適用例	225
	文献	227



構造振動・制御

山口宏樹 著

1 2 3 4 5



共立出版株式会社

動論の応用問題として理解しうるパッシブ振動制御についてだけでなく、自動制御工学の応用としてとらえられるアクティブ振動制御にも言及した。この背景には、構造物の長大化に伴ってその振動問題が顕在化し、振動をいかに小さく制御するかが、構造物の安全性や使用性の観点から、ますます重要な学問領域・技術分野となっていることがある。もちろん、構造物の振動制御である以上、単なる制御工学ではなく、構造振動論的に見た「制御工学」をなるべくやさしく示すことを心がけた。したがって、制御工学の特徴の一つである数学的華麗さを多少犠牲にしたことは否めないが、制御問題を数学的に解く解析ツールが利用可能であることを考えれば、あまり問題とならない。より重要なのは構造物の振動制御の基本的概念とその特徴を理解することであろう。

西野文雄埼玉大学教授(当時東京大学)から本書の執筆を勧めて頂いたのは1990年10月、筆者がタイバンコクにあるアジア工科大学院(AIT)に派遣されていたときである。以来、実に5年半もの歳月が流れてしまった。しかし、この間、土木学会振動制御小委員会等において土木構造物への振動制御の適用に関する積極的な議論が行われたり、各種実構造物に振動制御技術が数多く導入されたことにより、構造振動制御に関する学問が急速に進展したことも事実であって、その成果の一部を本書に取り込むことができたと考えている。また、1995年1月の阪神淡路大震災は、土木工学における振動教育のあり方について再考を余儀なくさせた。しかし、設計の考え方はともあれ、構造物の地震応答解析を含めた振動解析や免震を含めた振動制御の重要性がこの震災によりクローズアップされたわけで、「構造振動・制御」を土木工学の専門基礎教育として位置づける必要性が強められたと考えている。

執筆を勧めて頂いた西野先生には原稿に目を通して頂き、貴重なご意見を頂いた。また、藤野陽三東京大学教授とは日頃から振動および振動制御に関する勉強会や数多くの議論をさせて頂いている。ここに記して深謝の意を表したい。最後に、拙著を恩師岡本舜三、秋山成興、伊藤学、宮田利雄、西野文雄各先生に捧げたい。

1996年4月

山口宏樹

目次

1章 構造物の振動問題

1.1 構造物に作用する外乱と振動問題	1
1.2 構造物の動力学	3
1.3 振動する構造物の基本要素	7
演習問題	9

2章 構造物のモデル化と定式化

2.1 振動の自由度	10
2.2 構造物の解析モデル	11
2.3 力のつり合いによる運動方程式の定式化	15
2.4 変分原理に基づく運動方程式の定式化	22
2.5 重み付き残差法による運動方程式の定式化	25
2.6 運動方程式の線形性	29
2.7 構造物の特性マトリクスの評価	31
演習問題	39

3章 構造物の固有振動

3.1 固有振動数と振動モード(固有値解析)	42
3.2 固有振動モードの直交性と正規化	46
3.3 分布パラメータ系の固有振動数と振動モード	49
3.4 減衰を考慮した固有振動数と振動モード(複素固有値解析)	53
演習問題	61

4章 構造物の振動解析

4.1 モード解析法	62
4.2 構造物の減衰評価	65
4.3 1自由度系の振動解析	67
4.4 振動数領域における振動解析	75
4.5 時間領域における振動解析	77
4.6 モード解析法による構造物の振動解析手順	80
4.7 数値時間積分	84
演習問題	90

5章 構造物の不規則振動解析

5.1 不規則振動の統計的性質	93
5.2 定常不規則過程とエルゴード性	95
5.3 自己相関関数—時間領域での統計的性質	97
5.4 パワースペクトル密度関数—振動数領域での統計的性質	99
5.5 不規則外力による構造物の振動応答	101
5.6 不規則振動解析例	104
演習問題	107

6章 構造物の振動制御

6.1 振動制御の基本概念	109
6.2 免震構造	112
6.3 空気力制御	123
6.4 減衰制御	126
6.5 ダンパーによる構造物の振動制御	129
6.6 TMD	133

演習問題	149
------	-----

7章 構造物のアクティブ制御

7.1 構造物のアクティブ制御の基本的考え方	151
7.2 単一モード(1自由度系)の振動制御	153
7.3 状態フィードバック制御	154
7.4 制御理論	155
7.5 構造物のフィードバック制御	160
7.6 構造物のロバスト制御	168
7.7 H^∞ 制御	177
演習問題	190

演習問題解答	191
--------	-----

参考文献	206
------	-----

索引	209
----	-----

土木

シリーズ
について
おこな
まとな
した、初
門書(部

鹿島

① 設

設計

② 地

盛土
物の

③ 基

基礎
擁壁

④ 海

海の
の

⑤

⑥

[土木設計の要点] ⑥

耐震設計法/ 限界状態設計法

鹿島建設 土木設計本部 編

鹿島出版会

第1巻では「設計の基本知識」として、どの工種でも共通する事項である土質および構造物の設計の基本知識を取り上げて解説した。また、記述に際し、設計上頻繁に使用する図表を多数収録するよう配慮した。

第2巻から第5巻では、工種別に具体的な構造物を対象としてその設計事例を中心に解説した。すなわち、第2巻では「地盤の安定」「仮設構造物」、第3巻では「基礎構造物」「地中構造物」、第4巻では「海洋・港湾構造物」「PC(プレストレストコンクリート)構造物」、第5巻では「トンネル」「土地造成」を取り上げ、合計27の代表的な構造物について設計事例を掲載している。

記述の基本方針として、それぞれの構造物について、まず、構造物の特徴、分類等の概要、および設計フローに従った設計上のポイントを解説し、次に、設計事例の設計計算書を記載するというスタイルで記述しており、必要に応じて数値、数式の説明を加えている。

第6巻では、わが国の土木構造物の設計にあたって最も留意すべき点の一つである「耐震設計法」と、各種基準類の改訂に伴い今後逐次実務に取り込まれるであろう「限界状態設計法」について、その適用事例を中心に解説している。

本書では紙面の都合もあり、若手設計技術者に必要とされる知識をすべて網羅することは不可能であるが、実務での設計を遂行するにあたって必要と考えられる内容は極力盛り込むよう配慮したつもりである。内容に不備な箇所があると思われるが、読者のご意見を賜れば幸いである。

最後に本書をまとめるにあたって、業務多忙な中を執筆して頂いた鹿島建設(株)土木設計本部の設計技術者、ならびに出版に際して多大のご便宜を頂いた(株)鹿島出版会の橋義雄氏および橋口聖一氏に対し、あらためて厚く御礼を申し上げる。

1993年10月

鹿島建設(株)常務取締役 建設総事業本部 土木設計本部長
編集総括 坂本 健次

目次

まえがき

第1編 耐震設計法

第1章 耐震設計の基本事項

- 1.1 耐震設計概説 3
 - 1.1.1 概要 3
 - 1.1.2 耐震計算法の種類 4
 - (1) 震度法 5
 - (2) 修正震度法 7
 - (3) 応答変位法 7
 - (4) 動的解析法 8
 - 1.1.3 耐震設計に関連した基準・指針類 13
- 1.2 耐震設計の基礎知識 18
 - 1.2.1 地震の基本事項 18
 - (1) 地震の概要 18
 - (2) 地震波の種類 21
 - (3) 地震動の強さ 23
 - (4) 地震波のスペクトル 26
 - (5) 地震危険度 28
 - 1.2.2 簡単な構造物の応答 34
 - (1) 構造物の振動系へのモデル化 34
 - (2) 1自由度の振動特性 35
 - (3) 多自由度系の振動 36

(4) 1 自由度系の応答	36
---------------	----

第2章 地盤の地震応答

2.1 概要	41
2.1.1 工学的地震基礎の定義	41
2.1.2 構造物と地盤の地震応答モデル	42
2.2 SHAKE の概要と事例	43
2.2.1 SHAKE の概要	43
2.2.2 入力地震波の設定	44
(1) 地震波の選定	44
(2) 入力地震波の設定	45
2.2.3 解析手法	45
(1) 解析フロー	45
(2) 解析手順	45
2.2.4 解析事例	48
(1) 入力地震波	48
(2) 地盤条件	48
(3) 解析結果	48

第3章 地盤の液状化

3.1 液状化判定法(予測法)	53
3.1.1 判定法の概要	53
3.1.2 簡易判定法	54
(1) 限界 N 値法	54
(2) FL 値法	55
(3) 簡易法における各基準の比較	56
(4) 各基準の判定フロー図	57
(5) FL 値法による液状化判定の例	57
3.1.3 詳細な判定法	65
3.2 液状化のメカニズム	67
3.2.1 液状化の原因	67

3.2.2 液状化の影響因子	69
(1) 密度	69
(2) 粒度分布	70
(3) 飽和度	71
(4) 有効上載圧または有効拘束圧	71

第4章 簡単な構造物の動的解析例

4.1 動的解析の考え方とフロー	73
4.1.1 一般	73
4.1.2 動的解析の基本方針	73
(1) 動的解析のフロー	73
(2) モデル化の基本方針	73
(3) 上部構造のモデル化	74
(4) 下部構造のモデル化	74
(5) 地盤のモデル化	75
(6) 減衰	76
4.2 簡単な構造物の動的解析	76
4.2.1 解析条件	76
(1) 対象構造物	76
(2) 解析モデルと諸元	79
(3) 入力地震波	81
4.2.2 解析方法	82
(1) 解析フロー	82
(2) 応答解析手法	82
4.2.3 解析結果	82
(1) 固有周期とモード	82
(2) 最大応答値分布	83
(3) 応答時刻歴と応答スペクトル	84

第II編 限界状態設計法

第1章 限界状態設計法の基本事項

1.1 限界状態設計法の位置づけ	89
(1) 許容応力度設計法	89
(2) 終局強度設計法	90
(3) 限界状態設計法	90
1.2 限界状態の定義	91
(1) 終局限界状態	91
(2) 使用限界状態	91
(3) 疲労限界状態	92
1.3 限界状態設計法	92
(1) 限界状態の定量的な定義	92
(2) 設計時点における不確定要因の合理的な取扱い	92
1.4 部分安全係数設計法	93
(1) 照査式	93
(2) 荷重および材料強度の特性値	93
(3) 部分安全係数	94
(4) 部分安全係数の決定方法	95
(5) 部分安全係数設計法の特徴	96

第2章 コンクリート標準示方書に基づく設計事例

2.1 設計手順	97
2.1.1 検討すべき限界状態	97
2.1.2 コンクリート標準示方書に基づく設計手順	97
2.2 ボックススカルパートの設計事例	101
2.2.1 設計条件	101
2.2.2 荷重	102
2.2.3 検討すべき限界状態	103

2.2.4 考慮する荷重	103
2.2.5 安全係数および修正係数	104
2.2.6 構造解析モデル	106
2.2.7 断面破壊の終局限界状態	106
(1) 荷重の公称値, 規格値の算定	106
(2) 設計荷重の算定	109
(3) 荷重の組合せ	109
(4) 断面力の算定	112
(5) 曲げモーメントおよび軸方向力に対する断面照査	113
(6) せん断力に対する照査	120
2.2.8 ひびわれの使用限界状態	126
(1) 荷重の公称値, 規格値の算定	126
(2) 設計荷重の算定	126
(3) 断面力の算定	127
(4) 曲げひびわれの使用限界状態に対する照査	127
(5) せん断ひびわれの使用限界状態に対する照査	133

土木設計の要点 ③

基礎構造物/ 地中構造物

鹿島建設 土木設計本部 編

鹿島出版会

土木
本シ
けて
要と
れた
入門

①

②

③

④

⑤

⑥

目次

第1巻では「設計の基本知識」として、どの工種でも共通する事項である土質および構造物の設計の基本知識を取り上げて解説した。また、記述に際し、設計上頻繁に使用する図表を多数収録するよう配慮した。

第2巻から第5巻では、工種別に具体的な構造物を対象としてその設計事例を中心に解説した。すなわち、第2巻では「地盤の安定」「仮設構造物」、第3巻では「基礎構造物」「地中構造物」、第4巻では「海洋・港湾構造物」「PC(プレストレストコンクリート)構造物」、第5巻では「トンネル」「土地造成」を取り上げ、合計27の代表的な構造物について設計事例を掲載している。

記述の基本方針として、それぞれの構造物について、まず、構造物の特徴、分類等の概要、および設計フローに従った設計上のポイントを解説し、次に、設計事例の設計計算書を記載するというスタイルで記述しており、必要に応じて数値、数式の説明を加えている。

第6巻では、わが国の土木構造物の設計にあたって最も留意すべき点の一つである「耐震設計法」と、各種基準類の改訂に伴い今後逐次実務に取り込まれるであろう「限界状態設計法」について、その適用事例を中心に解説している。

本書では紙面の都合もあり、若手設計技術者に必要とされる知識をすべて網羅することは不可能であるが、実務での設計を遂行するにあたって必要と考えられる内容は極力盛り込むよう配慮したつもりである。内容に不備な箇所があると思われるが、読者のご意見を賜れば幸いである。

最後に本書をまとめるにあたって、業務多忙な中を執筆して頂いた鹿島建設(株)土木設計本部の設計技術者、ならびに出版に際して多大のご便宜を頂いた(株)鹿島出版会の橋義雄氏および橋口聖一氏に対し、あらためて厚く御礼を申し上げます。

1993年9月

鹿島建設(株)常務取締役 建設総事業本部 土木設計本部長

編集総括 坂本 健次

まえがき

第1編 基礎構造物

第1章 基礎構造物の基本事項

1.1 基礎構造物の概要	3
1.1.1 基礎形式の分類	3
(1) 直接基礎	3
(2) 地盤改良	4
(3) 杭基礎	4
(4) ケーソン基礎	5
(5) 地中連続壁基礎	5
1.1.2 基礎工の選定	5
1.2 直接基礎の設計法	7
1.2.1 設計フロー	7
1.2.2 安定計算	9
(1) 鉛直支持に対する安定	9
(2) 水平支持に対する安定	9
(3) 転倒に対する安定	10
1.2.3 地盤の許容支持力	12
1.2.4 断面設計	17
(1) 設計用荷重	17
(2) フーチングの設計	21
1.3 杭基礎の設計法	23

1.3.1	設計フロー	23
1.3.2	杭の配置	24
(1)	杭配置の原則	24
(2)	杭の最小中心間隔	24
1.3.3	許容変位量	25
1.3.4	杭の鉛直支持力	26
(1)	支持機構	26
(2)	押し込み許容支持力の推定	26
(3)	引抜き許容支持力の推定	27
(4)	負の周面摩擦力の影響	30
1.3.5	杭の水平支持力	31
(1)	水平支持力の考え方	31
(2)	水平支持力の推定	31
1.3.6	群杭効果	33
1.3.7	杭反力の計算方法	35
(1)	慣用法	35
(2)	変位法	37
1.3.8	杭本体の設計	40
(1)	押し込み力に対する設計	40
(2)	引抜き力に対する設計	41
(3)	水平力に対する設計	42
(4)	曲げ応力度の計算	46
(5)	細部設計	46
(6)	留意事項	49
1.4	ケーソンの設計法	50
1.4.1	概要	50
1.4.2	設計条件	52
1.4.3	設計フロー	52
1.4.4	形状寸法および部材寸法の仮定	53
(1)	形状寸法	53
(2)	部材寸法	54
1.4.5	安定計算	54
1.4.6	沈下計算	56
1.4.7	部材の検討	58
1.5	地中連続壁基礎の設計法	61
1.5.1	地中連続壁基礎の概要	61
1.5.2	基礎の設計条件	62
(1)	使用材料	62
(2)	土質条件	63
(3)	荷重条件	64
1.5.3	設計フロー	64
1.5.4	基礎の平面形状	65
1.5.5	基礎の安定	66
(1)	鉛直地盤反力度	67
(2)	せん断地盤反力	68
(3)	許容鉛直支持力	68
(4)	許容引抜き力	69
(5)	基礎底面の許容せん断抵抗力	69
(6)	許容変位量	69
1.5.6	部材の検討	69
(1)	有効壁厚	70
(2)	配置鉄筋	70
(3)	継手部の配筋	71
(4)	鉛直方向部材の検討	72
(5)	水平方向部材の検討	72
(6)	エレメント間継手部の検討	74
1.5.7	頂版の検討	75
1.5.8	溝壁の安定	76
第2章 橋梁の基礎		
2.1	橋梁基礎の概要	81
2.1.1	定義	81
2.1.2	各部の名称	82
(1)	橋台の各部の名称	82
(2)	橋脚の各部の名称	82
2.1.3	下部工を計画するための調査	82
2.1.4	基礎形式の選定	83

2.1.5 橋台・橋脚の種類と選択	86
2.2 直接基礎の橋台事例	88
(1) 設計条件	88
(2) 形状寸法	91
(3) 安定計算	91
(4) 躯体各部の設計	96
2.3 橋脚の設計法	103
2.3.1 杭基礎の橋脚事例	103
(1) 設計条件	103
(2) 形状寸法	105
(3) 許容支持力	105
(4) 水平方向地盤反力係数	108
(5) 杭のばね定数	110
(6) 杭反力および変位量の計算	110
(7) 杭本体の設計	115
(8) 杭頭部の設計	118
2.3.2 地中連続壁基礎の橋脚事例	120
(1) 形状寸法	121
(2) 設計条件	121
(3) 地盤の許容支持力	123
(4) 安定計算	134
(5) 部材の設計	137
(6) 頂版の設計	150

第3章 装置の基礎

3.1 装置の基礎の概要	157
3.1.1 機器基礎の設計	158
(1) 荷重	158
(2) 荷重の組合せ	158
(3) 地震係数	158
(4) 熱交換器に関する特殊荷重	158
(5) 安定性の検討	159
3.1.2 パイプラック	159

(1) プラント内に設置される P/R	160
(2) ヤードパイプラック	161
(3) パイプスタクション	161
3.1.3 振動機械基礎の防振設計	162
(1) 振動を伴う機器の種類	162
(2) 設計用データ	163
(3) 振動機械基礎選択の条件	163
(4) 振幅および固有振動数	165
(5) 土の地盤係数	168
(6) 地盤のばね定数および減衰定数	169
(7) 防振材料	172
(8) 許容振幅	172
(9) 基礎形式と振動モデルの選択	172
3.2 設計事例	179
3.2.1 架台の設計例	179
(1) 設計条件	179
(2) 形状寸法	180
(3) 荷重の計算	180
(4) 柱および鉛直斜材の計算	183
(5) 柱頭部水平斜材	186
(6) 細部の設計	186
3.2.2 振動基礎の設計例 (直接基礎形式)	190
(1) 設計条件	190
(2) 一般要求事項のチェック	191
(3) 振動系のモデル化	191
(4) 地盤の鉛直ばね定数	191
(5) 地盤の等価減衰係数	192
(6) 固有振動数および振幅の照査	193
3.2.3 振動基礎の設計例 (杭基礎形式)	194
(1) 設計条件	194
(2) 形状寸法	195
(3) 一般要求事項のチェック	195
(4) 振動計算の記号一覧	196
(5) 杭へ土系のモデル化	197
(6) 動的ばねの計算	198

- (7) 動的減衰の計算 200
 (8) 固有振動数および振幅の照査 205

第4章 擁壁

- 4.1 擁壁の概要 209
 4.1.1 擁壁の形式 209
 (1) ブロック積(石積)擁壁 209
 (2) 重力式擁壁 209
 (3) 半重力式擁壁 209
 (4) もたれ式擁壁 209
 (5) 片持ち梁式擁壁 209
 (6) 控え壁式擁壁 210
 (7) 支え壁式擁壁 210
 4.1.2 擁壁の設計計画 210
 4.1.3 構造形式の選定 211
 4.2 逆T型擁壁の設計法 213
 (1) 設計条件 213
 (2) 形状寸法 215
 (3) 安定計算 216
 (4) 躯体各部の設計 219

第II編 地中構造物

第1章 地中構造物の概要

- 1.1 地中構造物の種類 229
 1.1.1 生活施設 229
 1.1.2 交通施設・都市施設 230

- 1.1.3 工場施設 231
 1.1.4 エネルギー施設 231
 1.2 地中構造物の設計上の特徴 232
 1.2.1 断面形状 232
 1.2.2 荷重 232
 1.2.3 耐震設計 232

第2章 地中構造物の設計

- 2.1 ボックスカルパートの設計法 233
 2.1.1 設計方法 233
 (1) 設計フロー 233
 (2) 設計条件 233
 (3) 断面の仮定 236
 (4) 解析モデル 241
 (5) 土圧などの荷重計算 241
 (6) 部材の応力計算 246
 (7) 設計上の注意事項 247
 2.1.2 設計事例 248
 (1) 設計条件 248
 (2) 解析モデル 249
 (3) 荷重の計算 250
 (4) 断面力 252
 (5) 応力度計算 252
 2.1.3 標準設計 256
 (1) 収録範囲 256
 (2) 標準設計例 256
 2.2 立坑の設計法 259
 2.2.1 立坑の概要 259
 (1) 目的による分類 259
 (2) 平面形状による分類 259
 (3) 工法による分類 259
 2.2.2 設計方法 259

- (1) 設計フロー 260
- (2) 設計条件 261
- (3) 断面の仮定 261
- (4) 解析モデル 261
- 2.2.3 設計事例 262
 - (1) 設計条件 262
 - (2) 荷重の計算 264
 - (3) 断面力の計算 266
 - (4) 応力度 273

土

本シリーズ
けてお
要とな
れた、
入門書

角

① 設

設計

② 地

盤物

③ 基

基礎

④ 計

算

⑤

⑥

第 I 編 基礎構造物

防災研究会 第Ⅳ期（平成13～14年度）

活動報告書「都市型防災」

平成15年3月

（社）日本技術士会北海道支部 北海道技術士センター

防災研究会