

# ニューラルネットワークによる岩盤グラウチング のルジオン値推定システムの提案

貝沼憲男<sup>1</sup>・安田 登<sup>2</sup>・松島 学<sup>3</sup>・中川貴之<sup>4</sup>・神藤健一<sup>5</sup>・吉野尚人<sup>6</sup>

<sup>1</sup>フェロー 東京電力(株)電力技術研究所土木グループ(〒230-8510 神奈川県横浜市鶴見区江ヶ崎町4-1)

<sup>2</sup>正会員 工博 東京電力(株)電力技術研究所土木グループ(〒230-8510 神奈川県横浜市鶴見区江ヶ崎町4-1)

<sup>3</sup>正会員 工博 東電設計(株)技術開発本部コンクリート・材料チーム(〒110-0015 東京都台東区東上野3-3-3)

<sup>4</sup>正会員 東電設計(株)技術開発本部コンクリート・材料チーム(〒110-0015 東京都台東区東上野3-3-3)

<sup>5</sup>工修 前田建設工業(株)技術研究所研究第3グループ(〒179-8914 東京都練馬区旭町1-39-16)

<sup>6</sup>工修 前田建設工業(株)技術研究所研究第3グループ(〒179-8914 東京都練馬区旭町1-39-16)

ダム建設ではグラウチング工事が不可欠であり、施工管理にルジオン値が一般的に用いられている。グラウチング工事では、ルジオン値が目標の値になるまで繰り返される中央内挿法にしたがった方法が一般的に採用されている。本研究では、隣接孔から対象孔のルジオン値をニューラルネットワークを利用し、予測することを試みた。その結果対象孔のルジオン値を精度良く予測でき、経験豊富な現場技術者のもつ定性的な判断を定量的に表現することが可能となった。

*Key Words: neural network, grouting, Lugeon value, estimation, rock mass,*

## 1. はじめに

ダム建設では、グラウチング工事<sup>1)</sup>が不可欠であり、グラウチング工事の一つにカーテングラウチングがある。カーテングラウチングは、ダム堤体下部および貯水池周辺部でライン状に施工され、貯水池からの漏水量を低減させることを目的として実施される。通常、カーテングラウチングの施工は「中央内挿法」と呼ばれる工法で実施される。中央内挿法とは、目標とする止水性が確保されるまでボーリング孔間に新たなボーリング孔を削孔しグラウチングが行われるものである。グラウチングでは岩盤の止水性を評価する方法としてルジオン値<sup>2)</sup>(Lu)が採用されている。新たなボーリング孔が必要か否かは、周辺のルジオン値および単位注入セメント重量等から現場技術者の経験等で判断されている。グラウチングの施工完了基準は現場技術者により個人差があり、豊富な経験が無ければ判断できない。

このような状況を鑑み、従来より多くの研究者がグラウチング工事の経済的・合理的な施工方法を模索している<sup>3)~6)</sup>。物理探査の分野では、比抵抗トモグラフィ、弾性波トモグラフィ等を使用し、岩盤の透水性と相関のある物性値を把握する研究が報告されている<sup>3,4)</sup>。しかし、代用された物性値と透水性との相関のばらつきが大きいことから、実用には至っていない。また、対象とする孔

に隣接する孔の平均的なルジオン値と対象とする孔のルジオン値を比較した報告もある<sup>5)</sup>が、定性的な評価にとどまっている。これらの研究は全て岩盤の透水性を正確に把握することを目的としたものであり、未施工部分の透水性を簡便に予測した研究はほとんど報告されていない。ボーリング削孔前に岩盤の透水性が把握できれば、無駄な施工を省くことができ、経済的な施工が可能となる。

一方、脳神経細胞を模擬したニューラルネットワーク<sup>6)</sup>が近年注目されている。ニューラルネットワークは、非線形性の高い現象を評価することに優れ、本研究で取り扱う岩盤のルジオン値を推定するには有効であると考えられる。

本研究では、Kダム建設地点の左岸リム部で施工されたグラウト工事の際に得られた岩盤内のルジオン値に影響している因子を整理した。その結果をもとに、同一地点でニューラルネットワークを用い、対象とする部分の透水性を隣接孔から推定する手法を提案することで、グラウチング工事の経済的・合理的な施工実現を目指すことを目的としている。

## 2. カーテングラウチングとルジオン値の評価因子

カーテングラウチングはセメントと水を混合した「グラウト」と呼ばれる液体をボーリング孔から岩盤内に圧

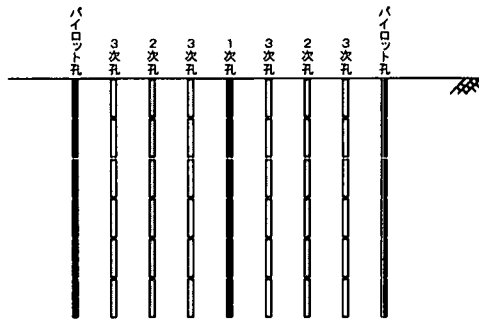


図-1 中央内挿法でのボーリング孔配置図

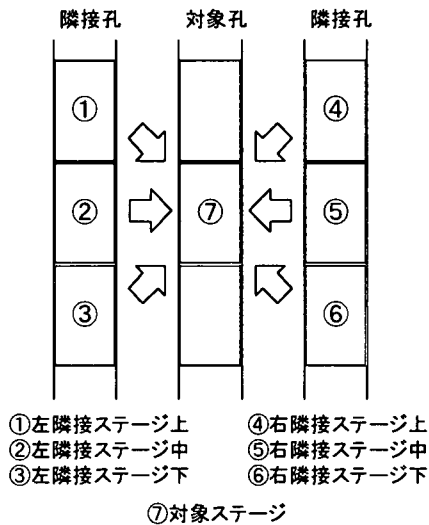


図-2 対象ステージと隣接ステージの模式図

入することで実施される。カーテングラウチングは1つの施工区間長を5mにしており、この5m区分を1単位として「ステージ」と呼び、グラウチング工事用のトンネルのインバートから深度方向順に1ステージ、2ステージ、3ステージ…としている。本研究で用いる各種データもステージ毎のデータとなっている。

カーテングラウチングのボーリング削孔順序は一般に中央内挿法にしたがっている。図-1に中央内挿法でのボーリング孔の配置断面図を示す。中央内挿法の施工手順を以下に示す。

- ①ある一定間隔(本研究では24m)で設けられた「パイロット孔」と呼ばれる地質調査兼用のボーリング孔を削孔する。削孔されたパイロット孔はルジオン試験、グラウチングが施される。
- ②パイロット孔の中間地点に「1次孔」と呼ばれるボーリング孔を削孔する。1次孔もパイロット孔と同様な施工を施す。
- ③パイロット孔と1次孔の中間地点に「2次孔」と呼ばれるボーリング孔を削孔し、パイロット孔および1次孔

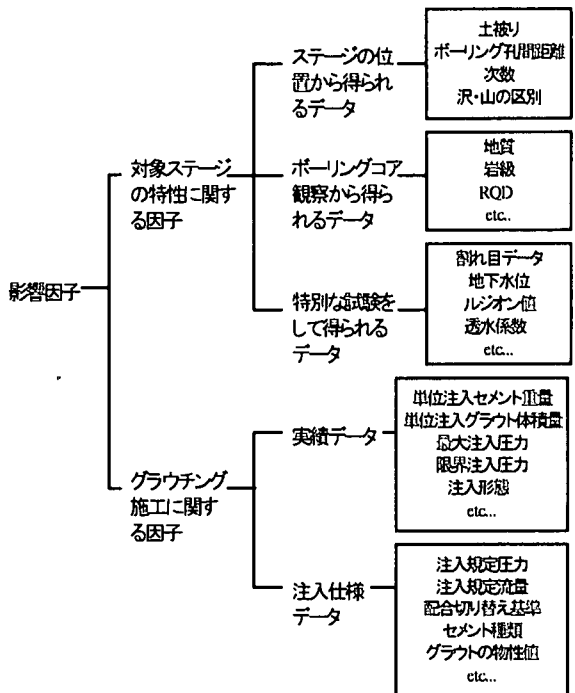


図-3 影響因子の分類

と同様な施工をする。

- ④以降「3次孔」、「4次孔」…と目標とする止水性が確認されるまで施工を繰り返す。

グラウトがボーリング孔から同心円状に注入されるとすると、グラウトの到達距離は施工深度にもよるが最高でも約5~10m程度とされている<sup>7)</sup>。本研究では、対象とする孔のあるステージのルジオン値を予測する際にグラウトの到達可能距離を考慮し、左右の隣接する孔の同一ステージと上下ステージの計6ステージのデータを採用することにした。予測するステージを含む孔を「対象孔」、予測するステージを「対象ステージ」、対象孔に隣接する孔を「隣接孔」、対象ステージに隣接する上、同一、下ステージを「(左)(右)隣接ステージ(上)(中)(下)」と以降表記する。図-2に対象ステージおよび隣接ステージの模式図を示す。

一般に、中央内挿法に従ったカーテングラウチングでは、深度が約100m以深の深部では岩盤の初期状態が目標の改良値(約2Lu)より透水性が低いことが多く、パイロット孔および1次孔で施工が終了する 경우가多い。一方、パイロット孔間距離が24mであることを考慮すると、深度が約100m以浅の浅部では2次孔まではライン状にグラウトが岩盤内に注入されていない場合が多く<sup>7)</sup>、2次孔までは前の次数孔でどのようなルジオン値が確認されても施工する。つまり、ルジオン値を予測する際に最も重要となるのは深度が約200m以浅の浅部での3次孔以降の予

表-1 特別な試験を実施して得られるデータ

因子	採取方法
割れ目データ	ボアホールスキャナ <sup>8)</sup> ボアホールテレビ <sup>9)</sup>
地下水位	地下水位試験 <sup>10)</sup>
ルジオン値	ルジオン試験 <sup>2)</sup>

測である。本研究では上記の理由により3次孔でのルジオン値を予測することにした。

### 3. ルジオン値に影響する因子の分析

#### (1) 対象ステージのルジオン値に影響する因子

本節では予めどのような因子が対象ステージのルジオン値に影響しているかを検討した。

図-3に対象ステージに影響すると考えられる因子(以降「影響因子」と表記する)の分類を示す。影響因子は、対象ステージの特性に関する因子とグラウチング施工に関する因子の2種類がある。

##### a) 対象ステージの特性に関する因子

対象ステージの特性に関する因子は、対象ステージの位置から得られるデータ、ボーリングコア観察から得られるデータ、特別な試験を実施して得られるデータの3種類である。

対象ステージの位置から得られるデータは、対象ステージの上方にある被りの高さ(以降「土被り」と表記する)、ボーリング孔間距離、次数、沢部であるか山部であるかの区別等である。これらのデータは施工時に自動的に得られ、対象ステージのルジオン値の評価因子として十分な数量を得ることができる。ボーリングコア観察から得られるデータは、地質、岩級、RQD等である。通常、ボーリングコアは調査孔でのみ採取されるため、これらの値は1次孔以降の次数孔では採取が困難となる。特別な試験を実施して得られるデータは、割れ目データ(走向、傾斜、割れ目数、割れ目幅等)、地下水位、ルジオン値等である。それぞれのデータの採取方法を表-1に示す。表-1の各データのうち、グラウチング実施時に常時得られるデータはルジオン値のみである。

##### b) グ라우チング施工に関する因子

グラウチング施工に関する因子は、実績データと注入仕様データの2種類がある。

実績データはグラウチングが実施されたことで岩盤内の透水性をどの程度改良したかを把握するものであり、単位注入セメント重量、単位注入グラウト体積量、注入最大圧力、注入限界圧力、注入形態(浸透注入、割裂注入等)等があげられる。このうち岩盤内の透水性をどの程度改良したかを最も端的に表しているのは単位注入セメント重量である。単位注入グラウト体積量が同一でも

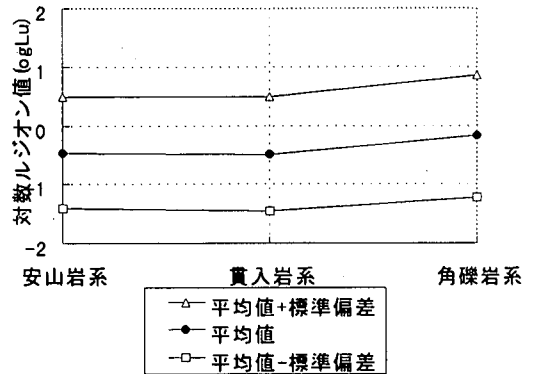


図-4 地質区分と対数ルジオン値の関係

表-2 地質区分のデータ数

	安山岩系	貫入岩系	角礫岩系	合計
データ数	456	1251	527	2234

グラウトの配合によってセメント重量に変化があり、対象ステージのルジオン値との関係を考えるには問題がある。注入限界圧力、注入形態(浸透注入、割裂注入等)はグラウチングの効果として対象ステージのルジオン値に影響しているが、評価の方法が難しく、評価する個人によって大きく左右されるため対象ステージのルジオン値との関係を考えるには問題がある。

注入仕様データはグラウチングを実施する際に予め設けるものであり、注入規定圧力、注入規定流量、配合切り替え基準、使用セメントの種類、グラウト材料の物性値(粘性係数、フロー値、比重等)等がある。注入仕様データは、対象ステージのルジオン値に影響するが、同一の地点では同様な注入仕様でのグラウチングが行われる場合が多く、対象ステージのルジオン値の評価因子とはならない。

#### (2) 対象ステージのルジオン値と影響因子の相関

各影響因子と対象ステージのルジオン値との相関について具体的なカーテングラウチングのデータを用いて検討する。影響因子を検討する際には、Kダム建設地点の左岸リム部で施工されたカーテングラウチングの全データを使用した。したがって、地盤の生成過程や、変状による基本的な性質は同じ母集団に属すると判断し、本研究で設定した因子でグラウチングの施工を説明できるとした。対象地点の状況については、各影響因子の検討の項目で詳述する。なお、本節ではルジオン値の対数をとった対数ルジオン値(logLu)を採用している。

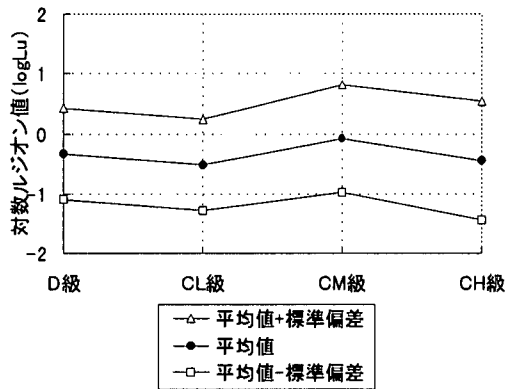


図-5 岩級区分と対数レジオン値の関係

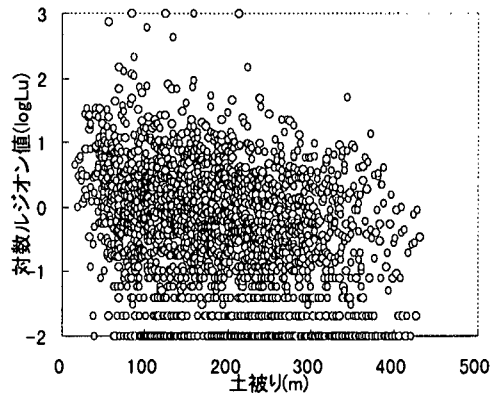


図-6 土被りと対数レジオン値の関係

表-3 岩級区分のデータ数

	D級	CL級	CM級	CH級	合計
データ数	27	54	242	1911	2234

a) 地質と対数レジオン値の関係

地質と対数レジオン値の関係を図-4に示す。表-2には各地質のデータ数を示す。

対象地点ではパイロット孔のみでボーリングコアが採取されているため、図-4はパイロット孔での地質と対数レジオン値の関係を示している。確認された地質は、安山岩系、貫入岩系、角礫岩系の3種類であった。

図中に各地質での対数レジオン値の平均値および平均値±標準偏差を示す。同図より、角礫岩系が他の2つの地質よりも対数レジオン値が大きくなっているが、明確には判断できない。岩盤を構成する地質は、巨視的には透水性を把握する際に有用なデータであり、微視的な透水性にも若干影響していることが従来より指摘されている<sup>11)</sup>。しかし、本研究で取り扱う対数レジオン値との相関を考えるには他の影響因子のばらつきの中に本因子の傾向が埋もれてしまい、地質のみで評価することが困難である。つまり、単相関での検討では、本因子がレジオン値に影響しているかどうかは判断できないと考えられる。

b) 岩級と対数レジオン値の関係

岩級と対数レジオン値の関係について図-5に示す。表-3に各岩級のデータ数を示す。対象地点ではパイロット孔のみでボーリングコアが採取されているため、図-5ではパイロット孔での岩級と対数レジオン値の関係を示している。対象地点の岩級はCH級、CM級、CL級、D級の4種類であった。表-3より他の岩級と比較してCH級のデータ数が極めて多いことから、対象地点は堅硬な岩が多く分布していると考えられる。図-5中には各岩級での対数レジオン値の平均値および平均値±標準偏差を示している。一般に岩級は、対数レジオン値とは密接な関係があ

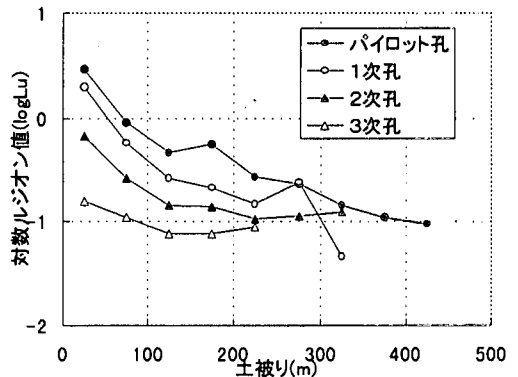


図-7 土被りと対数レジオン値の関係(区間平均)

表-4 次級別の土被り各区間のデータ数

データ区間 (深さ) (m)	中央 値 (m)	パイ ロット 孔	データ数			合計
			1次孔	2次孔	3次孔	
0~50	25	65	61	113	105	344
50~100	75	342	356	670	350	1718
100~150	125	410	420	788	347	1965
150~200	175	410	410	719	216	1755
200~250	225	405	335	511	74	1325
250~300	275	311	99	182	-	592
300~350	325	201	30	44	-	275
350~400	375	88	-	-	-	88
400~450	425	22	-	-	-	22
合計		2254	1711	3027	1092	8084

るとされている<sup>12)</sup>。しかし、D級の岩盤でも岩が粘土質に変化していたりすると逆に低透水性を示したりすることがあり、一概に対数レジオン値と相関があるとは言えない。図-5は、そのような現象も含んでおり、岩級と対数レジオン値には明確な相関が見られない。さらに、対象地点の岩級はほとんどがCH級であり、岩級のみで対数レジオン値との相関を評価するのは困難があると考えられる。これは、地質の検討と同様な結果であり、単相関で

の検討では、本因子がルジオン値に影響しているかどうかは判断できないと考えられる。

c) 土被りと対数ルジオン値の関係

パイロット孔での土被りと対数ルジオン値の関係を図-6に示す。1次孔～3次孔の図も図-6と同様なものであり、一見しただけではその相関について考えるのは難しいものであった。図-7には、土被りを50m区切りで区分し、それぞれの領域での対数ルジオン値の区間平均の値を次数孔別に示している。表-4には次数別の土被り各区間のデータ数を示している。図-7には示していないが標準偏差（各領域でのばらつき程度）は全ての区間で約1(logLu)であり、次数孔による差は無かった。図-7より、土被りが小さい領域では次数増に伴い対数ルジオン値が小さくなる傾向にある。しかし、土被りの大きい領域では次数が増加しても対数ルジオン値に変化が無い。これは、土被りの小さい領域でグラウチングによる改良が大きくなされたことを示している。各次数孔別にみると、土被りが大きくなるほど対数ルジオン値が小さくなる傾向にある。これは土被りが大きくなることで割れ目幅が小さくなったり、割れ目数が少なくなったりするためと考えられる。このように、定性的ではあるが土被りと対数ルジオン値は相関があると考えられる。

d) 上ステージの単位注入セメント重量と対数ルジオン値の関係

グラウチングが浅部から深部に向かって施工される場合（フォアステージ工法<sup>13)</sup>）、上ステージのグラウトが下ステージに回り込み、ルジオン値が過小評価されることがある。本研究では、この現象を「目薬効果」と以降呼称する。図-8にパイロット孔での上ステージの単位注入セメント重量と対数ルジオン値の関係を示す。1次孔～3次孔の図も図-8と同様なものであり、一見しただけではその相関について考えるのは難しいものであった。同図は、単位注入セメント重量の対数をとった対数単位注入セメント重量(log(kg/m))を採用している。図-9に単位注入セメント重量を1(log(kg/m))で1区切りした場合の各領域での対数ルジオン値の区間平均の値を次数別に示している。表-5には、次数別の上ステージ対数単位注入セメント重量の各区間のデータ数を示している。各区間での標準偏差はほぼ等しく、約1(logLu)であった。図-9からは、目薬効果の傾向を読みとることは困難である。しかし、100～1000(kg/m)および1000(kg/m)以上の領域では、上ステージ単位注入セメント重量が増加しても対数ルジオン値に変化が無いような傾向がある。これは、上ステージの単位注入セメント重量が極めて大きい場合、対数ルジオン値が過小評価されていることを示していると考えられる。あるステージが目薬効果の影響を受けるかどうかは、割れ目の走向、傾斜、上ステージの単位注入セメント重量等が複雑に影響していると考えられるが、簡略化して

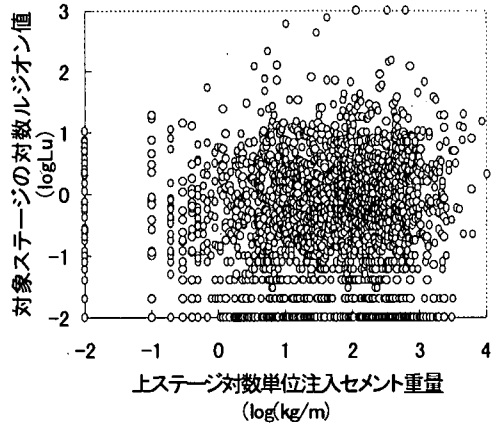


図-8 上ステージ対数単位注入セメント重量と対象ステージ対数ルジオン値の関係

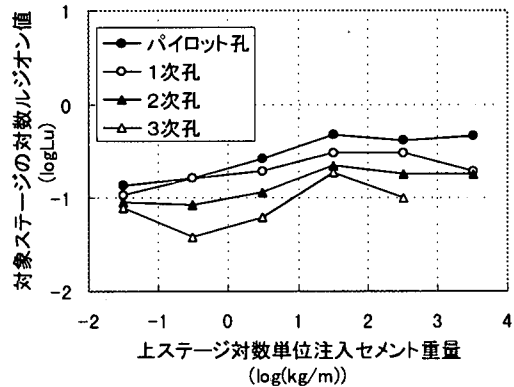


図-9 上ステージ対数単位注入セメント重量と対象ステージ対数ルジオン値の関係（区間平均）

表-5 次数別上ステージ対数単位注入セメント重量各区間のデータ数

データ区間	中央値	パイロット孔	1次孔	2次孔	3次孔	合計
log(kg/m)		データ数				
-2~-1	-1.5	75	29	73	16	193
-1~0	-0.5	157	110	301	227	795
0~1	0.5	423	373	901	343	2040
1~2	1.5	705	497	972	2319	2493
2~3	2.5	779	602	692	120	2193
3~4	3.5	130	63	32	-	225
合計		2269	1674	2971	1025	7939

上ステージの単位注入セメント重量のみに限定して考えると、図-9より100(kg/m)以上は目薬効果の影響を受けている可能性があると考えられる。本研究では、上ステージの単位セメント重量が500(kg/m)以上であれば、対象ステージが明らかに目薬効果を受けたステージであると仮定し、ニューラルネットワークの入力項目として使用した。

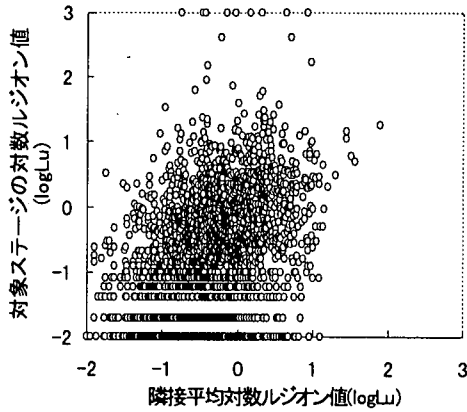


図-10 隣接平均対数レジオン値と対象ステージの対数レジオン値の関係

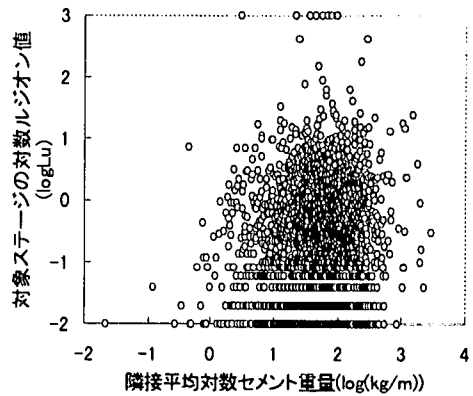


図-12 隣接平均対数セメント重量と対象ステージの対数レジオン値の関係

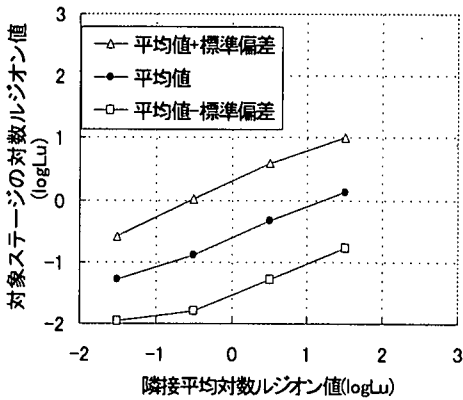


図-11 隣接平均対数レジオン値と対象ステージの対数レジオン値の関係 (区間平均と標準偏差)

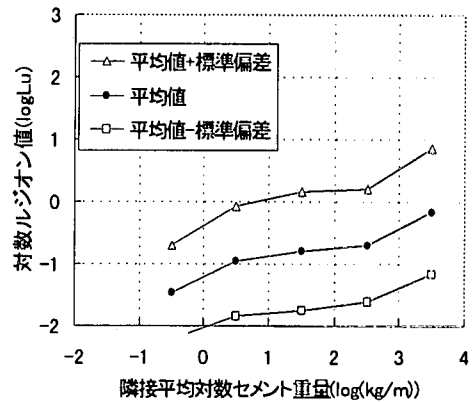


図-13 隣接平均対数セメント重量と対象ステージの対数レジオン値の関係 (区間平均と標準偏差)

表-6 隣接平均対数レジオン値の各区間のデータ数

データ区間 (logLu)	中央値 (logLu)	データ数
-2~-1	-1.5	353
-1~0	-0.5	1518
0~1	0.5	717
1~2	1.5	22
合計		2610

表-7 隣接平均対数セメント重量の各区間のデータ数

データ区間 (log(kg/m))	中央値 (log(kg/m))	データ数
-1~0	-0.5	19
0~1	0.5	255
1~2	1.5	1558
2~3	2.5	765
3~4	3.5	13
合計		2610

e) 隣接孔のレジオン値と対象ステージの対数レジオン値の関係

本節では隣接孔の対数レジオン値と対象孔の対数レジオン値の関係を対象孔が2次孔である場合を例にして示す。

図-10に左右隣接ステージ上中下(パイロット孔および1次孔)の対数レジオン値の平均値(「隣接平均対数レジオン値」と以降呼称する)と対象ステージ(2次孔)の対

数レジオン値の関係を示す。図-11に隣接平均対数レジオン値を1(logLu)で1区切りした領域での対象ステージの対数レジオン値の区間平均の値を示す。表-6に、隣接平均対数レジオン値の各区間のデータ数を示す。隣接平均対数レジオン値と対象ステージのレジオン値は岩盤内の割れ目が連結している場合に密接な関係がある。図-11より隣接孔のレジオン値が大きくなると対象孔のレジオン値は大きくなることかわかる。以上より、対象ステージ

のルジオン値は大きくばらつきはするものの、隣接孔のルジオン値が密接に関係していることがわかる。

#### f) 単位注入セメント重量と対象ステージの対数ルジオン値の関係

本節では隣接孔の対数単位注入セメント重量と対象孔の対数ルジオン値の関係を対象孔が2次孔である場合を例に示す。図-12に左右隣接ステージ上中下(パイロット孔および1次孔)の対数単位注入セメント重量の平均値(「隣接平均対数セメント重量」と以降表記する)と対象ステージ(2次孔)の対数ルジオン値の関係を示す。図-13に隣接平均対数セメント重量を1(log(kg/m))で1区切りした領域での対象ステージの対数ルジオン値の区間平均の値を示す。表-7に隣接平均対数セメント重量の各区間のデータ数を示す。隣接平均対数セメント重量と対象ステージのルジオン値は、e)での結果と同様に岩盤内の割れ目が連結している場合には密接な関係がある。図-13より、隣接孔の単位注入セメント重量が大きくなると対象ステージのルジオン値は大きくなる。以上より、対象ステージのルジオン値は大きくばらつくものの隣接孔の単位注入セメント重量が密接に関係している。

以上 a)~f)の検討より、対象ステージのルジオン値に影響しているデータの概要が明らかとなった。しかし、その相関は極めて曖昧なものであり定性的なものでしかない。さらに、各々のデータの相関は線形ではなく、非線形性に卓越したものであると考えられる。これらのデータの相関を定量的に把握するには非線形性の問題に有効な解析モデルが必要であると考えられる。

#### 4. ニューラルネットワークシステムの入出力項目

ニューラルネットワークは脳神経細胞におけるニューロンとシナプスを数学的にセルとネットワークでモデル化し、よく吟味された入出力の組み合わせを学習させることで、複雑な非線形性の強いモデルに対しても適応能力が高くなる<sup>14)</sup>。入出力項目の決定には、事前にデータを吟味し、採取されたデータのスケールリングを行う必要がある。本研究では、3.で検討した影響因子の中から比較的簡単に入手でき、対象ステージのルジオン値と相関があると考えられる因子を入出力項目として採用することにした。ニューラルネットワークのシステムの入出力に使用したデータは、Kダム建設地点左岸リム部のカーテングラウチング施工の一部領域のうち、出力値が3次孔のものである。Kダム建設地点左岸リム部の初期ルジオン値の傾向は、領域によって異なっていた。明らかに傾向の異なる領域を1つのシステムとして評価することはシステムの精度を低下させると考え、深度に対して同様な傾向を示す領域を左岸リム部から選択した。

ニューラルネットワークの入出力項目の関係を図-14

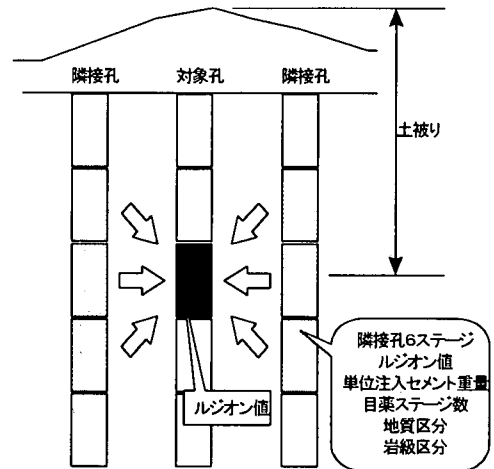


図-14 ニューラルネットワークの入出力項目の関係

に示す。以下に各入出力項目の詳細を示す。

##### (1) 隣接孔のルジオン値

隣接孔のルジオン値は定量的な数値データであり、対象ステージのルジオン値と密接に関係していると考えられる。入力データは、左右隣接ステージ上中下の合計6データであり、入力ニューロン数は6とした。ルジオン値の分布は次数孔によって異なるが、全般的に極めて小さい値(0~1Lu)に集中しており、突出して大きい値のデータをそのまま学習させると全体の傾向を捉えにくくし、感度に問題のあるデータとなる。実施工では、隣接孔で極めて大きいルジオン値が確認された場合には安全を考慮し必ず次のボーリング孔を削孔する。つまり、極めて大きいルジオン値の推定は問題ではなく、最も施工完了基準が曖昧となる領域は0~20Lu程度のルジオン値が確認された場合となる。本研究では隣接孔で0~20Luが確認された場合の対象ステージのルジオン値を予測することに重点をおき、20Lu以上のデータも20Luとしてスケールリングし入力することにした。つまり、ルジオン値の最小値として0(Lu)、最大値として20(Lu)を設定した。

##### (2) 隣接孔の単位注入セメント重量

隣接孔の単位注入セメント重量は、定量的な数値データであり、単位孔長(1m)あたりに注入されたセメントの重量である。入力データは、左右隣接ステージ上中下を採用し、ニューロン数は6とした。単位注入セメント重量は0~約10000(kg/m)の範囲でデータが採取されたが、2000(kg/m)を超えるデータは全体数の約1%程度であった。学習範囲をむやみに広くするとシステム構築に問題がある場合が多く<sup>14)</sup>、数値の上限を設け、2000(kg/m)以上の

表-8 岩級区分の変換数

岩級区分	変換数
CH級	1.00
CM級	0.66
CL級	0.33
D級	0.00

表-9 地質区分の変換数

地質区分	変換数
安山岩系	0 0
貫入岩系	0 1
角礫岩系	1 0

表-10 目薬効果影響ステージ数の変換数

目薬ステージ数	変換数
0	0
1	1
2	2
3	2
4	2
5	2
6	2

データも 2000(kg/m)として入力した。つまり、隣接孔の単位注入セメント重量は、最小値として 0(kg/m)、最大値として 2000(kg/m)を設定した。

### (3) 土被り

土被りは定量的な数値データであり、ニューロン数は 1 とした。土被りの最小値は約 90m であり、最大値は約 210m である。

### (4) 岩級区分

岩級区分は順序を有する定性的な区分データである。対象地点の岩級は CH 級、CM 級、CL 級および D 級の 4 種類であった。岩級区分の範囲境界は、ステージ毎に区分した領域の境界とは一致していないため、最も面積を専有している岩級区分により代表させた。岩級区分は強度の大きい順に CH 級、CM 級、CL 級、D 級となり、表-8 に示すような変換数を入力した。入力ニューロン数は 1 とした。

### (5) 地質区分

地質区分も岩級区分と同様にステージ中で最も面積を占有しているものを採用した。地質区分は、順序を有さない定性的な区分データである。対象地点のデータは安山岩系、貫入岩系、角礫岩系の 3 種類に大別でき、1 つのデータに対して表-9 に示すような変換数を採用した。入力ニューロン数は 2 とした。

### (6) 目薬効果

隣接孔のルジオン値がその上ステージの影響を受けて過小評価されていると対象ステージのルジオン値の予測に問題が生じる。本研究では、3. (2) d) で検討したように左右隣接ステージ上中下の中でその上ステージの単位注入セメント重量が 500(kg/m)以上となっているステ

ージを目薬効果を受けたと仮定して、その合計数を「目薬ステージ数」とした。表-10 に採用した変換数を示す。目薬ステージ数が 2 以上のデータは全体数の約 1% 程度であったため目薬ステージ数が 2 以上のものは、まとめて変換数 2 を採用した。目薬ステージ数は定量的な数値データであり、入力ニューロン数は 1 とした。

### (7) 対象ステージのルジオン値

出力データは対象ステージのルジオン値である。対象ステージのルジオン値は定量的な数値データであり、出力ニューロン数は 1 とした。対象ステージのルジオン値も隣接ステージのルジオン値と同様な理由により、スケールリングをした。ルジオン値の最小値として 0(Lu)、最大値として 20(Lu)を設定した。

## 5. ニューラルネットワークシステムの構築

### (1) 利用したデータ

4. でも示したが、ニューラルネットワークシステムの構築に際しては、K ダム建設地点の左岸リム部カーテングラウチング施工部の 1 部領域のうち、出力値が 3 次孔のデータを利用した。図-15 に学習用領域、検証用領域、予測用領域を示す。前者の 2 つは、システムの構築に使用されるもので、後者は本システムの実用への妥当性を評価するために設けたデータである。学習用データは 2 ~5 ブロックのデータを採用し、検証用データは 2~5 ブロックの中から無作為に数量で約 10% を抽出した。予測用領域は 1 ブロックとした。

### (2) システムの決定

本研究では、教師付きの学習法である階層型ニューラルネットワークを採用した。中間層は一般的によく用いられる 1 層モデルを採用している。中間層のニューロン数はそれを決定する一般的な考え方は無いが、多くすると複雑な現象の説明もできるが過学習状態になりやすく、少なくすると複雑な現象を説明しづらくなるが過学習状態になりにくいという傾向がある<sup>15)</sup>。本研究では最適の中間層のニューロン数を決定するために、入力ニューロン数の 0.3~2.0 倍の中間層のニューロン数を設定し計算した。その中で推定認識誤差が最も小さい中間層のニューロン数として入力ニューロン数の約 0.5 倍の数(9 ニューロン)を採用した。また、シグモイド関数の温度は、0.2 ~2.0 が適切とされており、本研究では 1 を採用した。本研究で採用したニューラルネットワークシステムを図-16 に示す。

図-17 に学習回数と平均誤差の推移を示す。図より、約 1000 回の学習で平均推定誤差が最小となっており、そのときの平均認識誤差は約 1.5(Lu)であった。本研究では



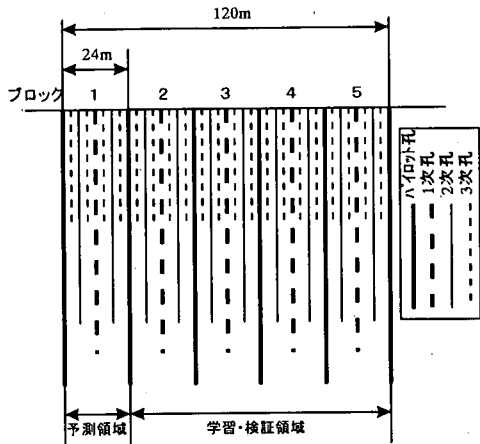


図-15 学習・検証・予測領域の模式図

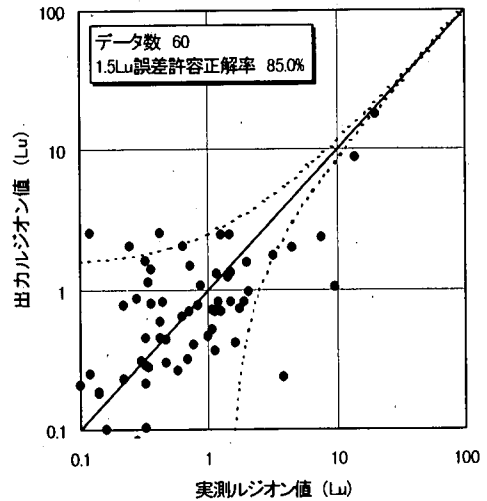


図-18 学習データの認識結果

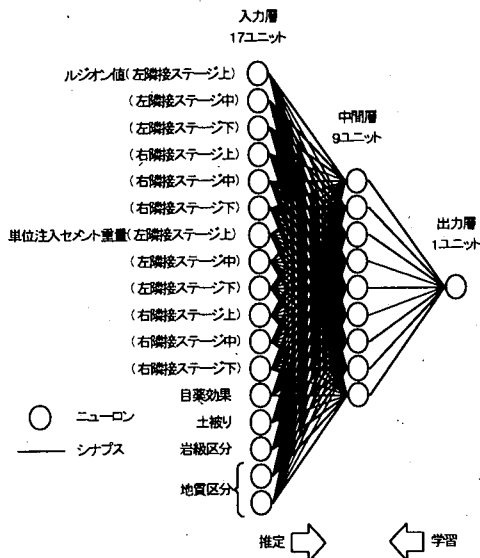


図-16 ニューラルネットワークシステムの模式図

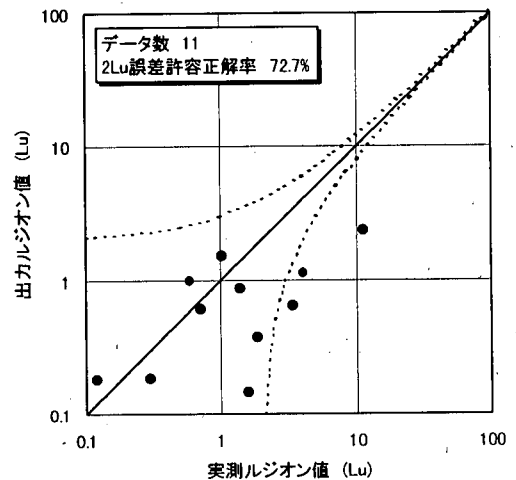


図-19 検証データの認識結果

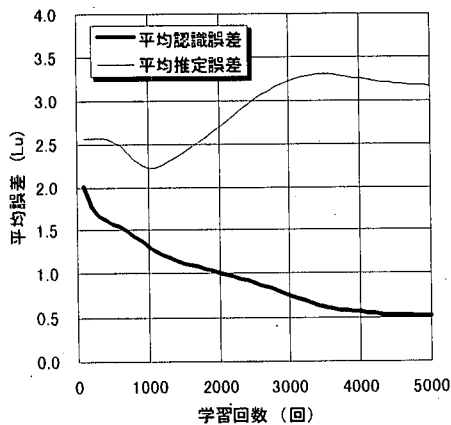


図-17 学習回数によるシステムの平均誤差の推移

図-17より平均推定誤差の最小となる学習回数1000回を採用することにした。図-18, 19に学習データおよび検証データの認識結果を示す。図中のルジオン値はそれぞれ対数軸で表現している。さらに極めて小さいルジオン値は誤差の範囲に含まれると考えられるため、実測ルジオン値および出力ルジオン値は0.1(Lu)以上のデータのみ限定して示している。学習回数1000回での平均認識誤差は約1.5(Lu)、平均推定誤差は約2.0(Lu)であることから、実測ルジオン値と出力ルジオン値の差分が学習データは $\pm 1.5(Lu)$ 以内、検証データは $\pm 2.0(Lu)$ 以内となるものを正解、その他を不正解データとする。図-18, 19では、正解・不正解領域を分ける線を破線で示している。

表-11 感度解析の各項目の基準値

項目	基準値			
	CASE-1S	CASE-1D	CASE-2S	CASE-2D
隣接孔ルジオン値	2Lu		10Lu	
隣接孔セメント量	100kg/m		300kg/m	
土被り	100m	200m	100m	200m
地質区分	貫入岩系			
岩級区分	CH級			

学習データでは約85%、検証データでは約73%の正解率であった。学習データおよび検証データの誤答したデータは極めて外れているものは少なく、システムとしては良好なものであるといえる。

(3) 感度解析

本ニューラルネットワークシステムの各因子が経験的な感度と合致するかどうかを検討するために感度解析を実施した。感度解析とは、各入力因子が出力値にどの程度影響しているかを検証するものである。本研究の感度解析では、感度を知りたい入力因子以外の入力因子は基準値を入力し、感度を知りたい入力因子を最小値から最大値まで変化させたときの出力値の変化を感度として算出した<sup>16)</sup>。基準値は平均値もしくは最頻値を採用する 경우가多く、本研究では表-5に示すような4ケースの感度解析を実施した。CASE-1Sは隣接孔のルジオン値が小さく土被りが小さい場合、CASE-1Dは隣接孔のルジオン値が小さく土被りが大きい場合、CASE-2Sは隣接孔のルジオン値が大きく土被りが小さい場合、CASE-2Dは隣接孔のルジオン値が大きく土被りが大きい場合の感度解析である。隣接孔の単位注入セメント重量はルジオン値と相関があるため、ルジオン値が小さいときは100(kg/m)、ルジオン値が大きいときは300(kg/m)を採用した。地質区分、岩級区分は最も多い種類として貫入岩系とCH級を採用した。目録ステージ数は対象ステージのルジオン値に直接影響する因子ではないので感度解析の対象外とした。図-20(a)～(e)に感度解析結果を示す。以下に各入力項目の感度の傾向について示す。

a) 隣接孔のルジオン値

図-20(a)より、全てのケースにおいて隣接孔のルジオン値は大きくなるほどニューラルネットワークの出力値は大きくなる。土被りが小さく、隣接孔の単位注入セメント重量が小さいものほどその傾向は顕著である。土被りが小さいことは表層部に近く、岩盤が高透水性であることを示しており、隣接孔の単位注入セメント重量が小さいことはグラウチングによる改良度合いが少ないことを意味している。どちらの場合にも対象ステージのルジオン値は大きくなることから感度解析結果が妥当である

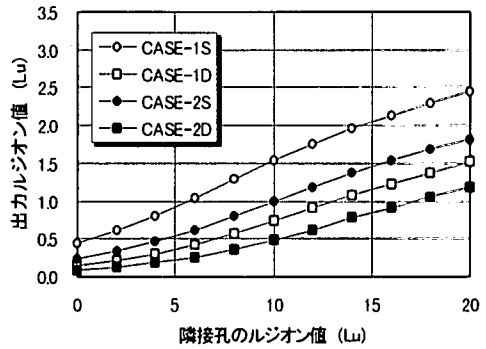


図-20(a) 感度解析結果（隣接孔のルジオン値）

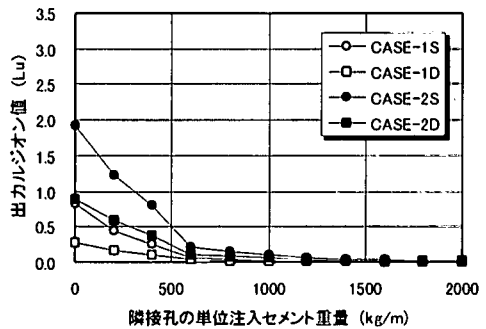


図-20(b) 感度解析結果（隣接孔の単位注入セメント重量）

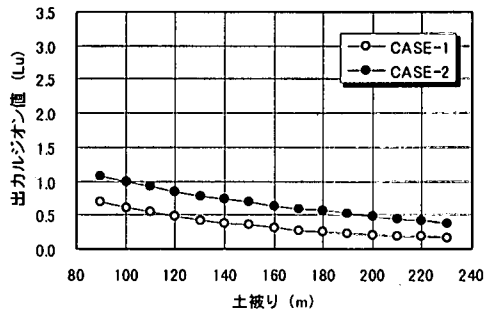


図-20(c) 感度解析結果（土被り）

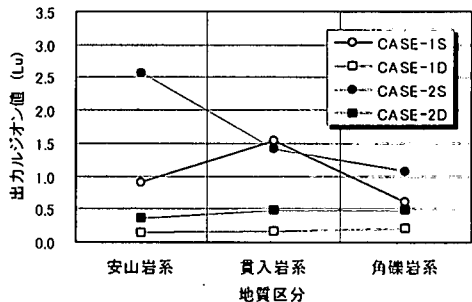


図-20(d) 感度解析結果（地質区分）

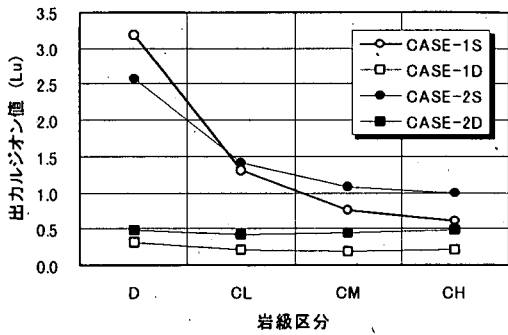


図-20(e) 感度解析結果 (岩級区分)

ことがわかる。

### b) 隣接孔の単位注入セメント重量

一般に単位注入セメント重量が大きくなると対象ステージのルジオン値は大きくなる。図-20(b)より、全てのケースにおいて隣接孔の単位注入セメント重量は大きくなるほどニューラルネットワークの出力値は小さくなっており、前述の傾向とは逆になっている。単位注入セメント重量はルジオン値と追従するものであり、その値の中には岩盤内の透水性を示す部分とグラウチングの改良度合いを示す部分が含まれている。図-20(b)の各値はルジオン値を一定にした場合の感度解析であり、グラウチングの改良度合いの部分のみを示している。つまり、感度としては従来からの知見と一致している。グラウチングの改良効果は隣接孔の単位注入セメント重量が0(kg/m)のときの出力ルジオン値と隣接孔の単位注入セメント重量がある値のときの出力ルジオン値の差分で与えられる。隣接孔の単位注入セメント重量が約600(kg/m)以上ではグラウチングによる改良効果がほとんど一定に収束している。これは、高透水性の領域では極めて大量のセメントが注入されるため、隣接孔の単位注入セメント重量が対象ステージのルジオン値に対して無感度になるためである。

### c) 土被り

図-20(c)より、全てのケースにおいて土被りは大きくなるほどニューラルネットワークの出力値は小さくなる。これは、土被りの増加に伴って岩盤内の透水性が小さくなっていることを表している。

### d) 地質区分

図-20(d)より、地質区分は土被りが大きい場合にはほとんど無感度になっている。これは土被りが大きくなると地質に関係なく、透水性が小さくなることを表している。土被りが小さい場合には、貫入岩系および角礫岩系ではニューラルネットワークの出力値に大差は無いが、安山岩系では大きく異なっている。これは、安山岩系の地質の分布位置に偏りがあるためと考えられるが、明確に判断はできない。

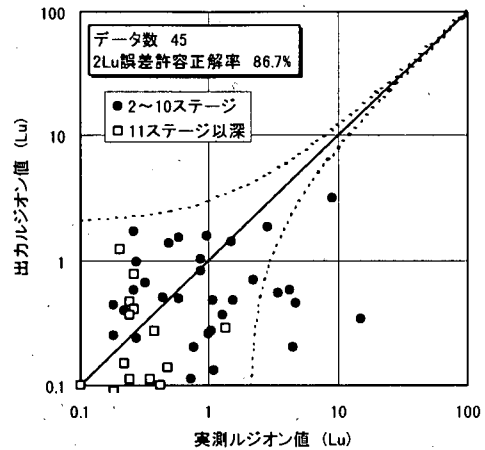


図-21 予測解析結果

### e) 岩級区分

図-20(e)より、岩級区分は土被りが大きい場合にはほとんど無感度になっている。これは土被りが大きくなると岩級区分に関係なく、透水性が小さくなることを表している。土被りが小さい場合にはルジオン値に関係なくD級が最もニューラルネットワークの出力値が大きい。これは既往の知見と一致する。

以上より、各感度は現場技術者のもつ豊富な経験と合致しており、本解析で構築したニューラルネットワークシステムの有効性が明らかとなった。

## 6. システムの実適用

構築されたシステムを用い、未施工部分のルジオン値を予測することが可能かどうかについての検証を行った。予測用領域(1ブロック)のルジオン値を左右隣接ステージ上中下から予測し、実測値とどの程度合致するかを検討した。図-21に予測解析結果を示す。図は予測ルジオン値と実測ルジオン値の差分が $\pm 2Lu$ 以内にあるものを正解、その他を不正解としている。図より約87%の正解率でルジオン値の予測が可能であることがわかる。さらに、図のデータは深度0~10(ステージ)と11ステージ以深とで区分して示している。不正解データの全てが0~10(ステージ)にあり、本システムにより3次孔の11ステージ以深の予測が十分可能であることがわかる。実施工では施工深度を決定する際に深部のデータが重要となることから、3次孔以降の施工深度を決定する際に本システムが有効であり、グラウチング工事のコスト縮減に寄与できる可能性があることがわかる。

## 7. まとめ

本研究は、対象ステージのルジオン値に影響する因子について検討し、様々な影響因子と対象ステージのルジオン値との関係について明らかにした。その結果をもとにニューラルネットワークを利用して、隣接孔のデータから対象孔のルジオン値を予測するシステムを提案し、実用上有効であるとの知見を得た。本研究で得られた知見を以下に列挙する。

(1) 対象ステージのルジオン値に影響する因子について統計解析を行い整理した。その結果、隣接孔のルジオン値、隣接孔の単位注入セメント重量、土被り、岩級区分、地質区分、目薬ステージ数と対象ステージのルジオン値との関係を明らかにした。

(2) 構築されたニューラルネットワークシステムの正解率は学習データで約85%程度、検証データで約73%程度と高く、システムとして十分適用可能であった。さらに、感度解析より、ルジオン値に影響する因子として従来より経験的に把握されていたものを定量的に示すことができた。

(3) 構築されたニューラルネットワークシステムを用いて未施工部分の予測解析を実施した。その結果、約87%程度の正解率で実測値と整合するものであり、特に3次孔の深部での予測では良好な出力値が得られた。これらの結果からグラウチング工事のコスト縮減に寄与できる可能性があるとの知見を得た。

以上より、本解析で使用したニューラルネットワークがルジオン値の推定に有効であることが実証できた。ルジオン値の定量的な予測が可能となったことは極めて意義があり、グラウチング工事管理の手段の一つとして用いられると考えられる。今後は、より精度の良いシステムの開発を目指すつもりである。

## 参考文献

- 1) (社)土木学会：ダム基礎岩盤グラウチングの施工指針、啓文堂、1972。
- 2) 建設省河川局開発課監修：ルジオンテスト技術指針・同解説 (財)国土開発技術研究センター、1984。
- 3) 例えば、島裕雅、斎藤秀樹：ジオトモグラフィの岩盤調査への適用性について—数値実験による検討—、第7回岩の力学国内シンポジウム講演論文集、pp.175-180、1987。

- 4) 例えば、島裕雅、斎藤秀樹：弾性波トモグラフィと比抵抗トモグラフィを用いた岩盤調査、物理探査学会第80回学術講演会論文集、pp.51-56、1989。
- 5) 播田一雄、田淵弘、浅津直樹、古川浩平、中川浩二：ダムの止水グラウチングに関する一考察、第21回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp.101-105、1989。
- 6) 例えば、合原一幸：ニューロコンピュータ、東京電気大学出版局、1988。
- 7) 奥田宏明、西野健三、飯酒益久夫、古田島信義：グラウチング改良効果に関する現場実験とその考察、応用地質、第33巻、2号、1992。
- 8) 宇田進一、重田嵩、中尾誠司：孔壁展開画像による調査精度の向上について、ダム工学、No.17、1995.3。
- 9) 西山孝、楠田啓、陳友晴、寺田直道、蛭子清二、萩森賢治：蛍光法とポアホールテレビジョンシステムを用いた孔壁の割れ目の抽出、応用地質、第36巻、6号、1996。
- 10) 「土と基礎」講座委員会：地下水位の測定、土と基礎、Vol.17、No.11、pp.40-1969。
- 11) 中屋真司、西垣誠：地質学的情報を用いた亀裂性岩盤の透水性評価、地下水技術、第35巻、第9号、1993。
- 12) 吉中龍之進、桜井春輔、菊地宏吉：岩盤分類とその適用 pp.39-61、土木工学社、1989.7。
- 13) 寺戸康隆：ダム基礎グラウチング(1)~(IX)、ダム日本 No.443-452、1981.9-1982.6。
- 14) 市川敏：階層型ニューラルネットワーク—非線形問題の応用—、共立出版(株)、1993.6。
- 15) 矢川元基：計算力学とCAE シリーズ12「ニューラルネットワーク—計算力学・応用力学への応用」、pp.146-148、培風館、1992.5。
- 16) 安田登、松島学、安田武、飯島健：ニューラルネットワークを用いた岩盤グラウト注入効果の評価システムの構築、土木学会、構造工学論文集、Vol.42A、1996.4。

(1998. 5. 22 受付)

# PREDICTION SYSTEM FOR LUGEON VALUES IN ROCK MASS USING NEURAL NETWORK SYSTEM

Norio KAINUMA, Noboru YASUDA, Manabu MATSUSHIMA,  
Takayuki NAKAGAWA, Kenichi KANTOU and Naoto YOSHINO

In generally, the quality control using Lugeon values is carried out in order to construct the curtain line for water tightness on dam construction. The grouting construction has been completed by the decision of engineers who have rich experience.

The system to predict the Lugeon value of target hole by the Lugeon value of next hole is proposed using neural network system in this paper. Then, prediction of Lugeon value of target hole can be carried out successfully by using proposed system instead of engineer who has rich experience on grouting.