

礫含有量を考慮した幅広い粒径を含む埋立土の液状化評価手法

地盤工学研究室 中村 幸太郎
指導教員 豊田 浩史

1. はじめに

既に多くの研究が行われ液状化特性の解明が進められてきた砂質土に比べ、粒径分布が広く、礫分まで含んだ土に関しては未だ未解明の部分が多いためこのような地盤の液状化強度特性を解明することは非常に重要である。本研究では、礫含有量を考慮した幅広い粒径を含む埋立土の液状化評価手法を構築するための第一歩として、近年施工された和歌山県有田郡広川町沿岸域を埋め立てることによって造成された地区を対象とした現地調査を行い埋立地盤の特性を見出すとともに、実際に埋立工事に使用された粒径分布の広い礫分を含んだ土試料を用いた各種室内試験を実施し、強度・変形特性および液状化強度特性を求めることを目的とする。そして、現地調査および室内試験の結果を総合的に考察し、埋立土の液状化評価を行う。

2. 埋立地概要

広川町は、和歌山県のほぼ中央に位置し、広川町の沿岸域の広湾を埋立ててできた埋立地は、湯浅御坊道路建設のトンネル掘削時に発生した掘削残土を主な埋立材料として建設され、平成5年に着工し同7年に完成した。この埋立地の北側には町役場、町民体育館、保険福祉センターや町民多目的広場など中枢機関が設置され、南側は平成9年以降住宅地として利用されている。Fig.2.1に埋立地盤のボーリング柱状図および地質断面図を示す。当該地盤は、地表面から約5mほど埋立土の F_L 層が広く分布している。この埋立層は主に砂質粘土で構成されているが $\Phi 300\text{mm}$ 程度の以上の岩塊なども多く混入している。それ以深、傾斜した薄い粘土層を挟んで砂や礫(玉石混じりも

含む)を中心とした砂礫層が10m程度続いており、その後は砂岩主体の S_S 層が続く。また、地下水位は地表面から約2.7m程度の位置にあると推測される。

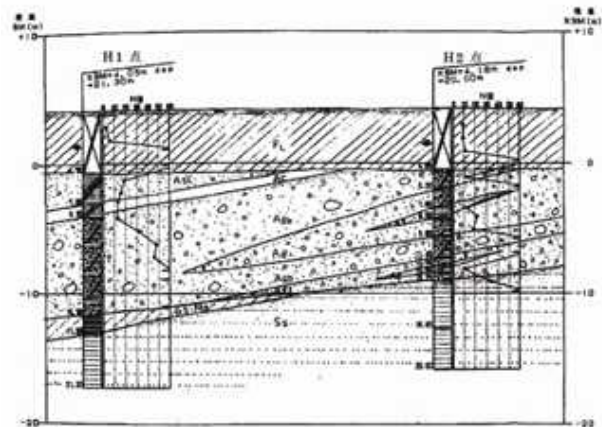


Fig.2.1 広川町埋立地の地質断面図

3. 現地踏査

埋立地の北側では、建物重量が大きい公共の施設が多数建設されている。現地踏査より、広川町役場を中心に Fig.3.1 に示すような著しい陥没が建物周辺に連続的に発生しており、地盤沈下に伴って発生したと考えられる、壁の損傷、床に敷設されたタイルの剥がれ等が多数散見された。一方南側では、主に公園や住宅地として利用されている。住宅地では、建築面積が大きく2階建ての住宅が多く建築されており、比較的重量の大きいものであるにも係わらず、地盤改良・補強がされていない住宅が多く見られた。

4. 現地調査

(1) 埋立土のサンプリング

室内試験に供するための試料は、埋立地盤の埋立土を直接採取する許可が町役場から得られなかったため、当該地盤を建設する際、埋立土のストックヤードとして利用された風力発電所(埋立

地の南西約 1km) の敷地近傍の中から乱れが比較的少ない場所を選定し、埋立土の残土をスコップ、ツルハシを用いてサンプリングした。サンプリングした試料はビニールでくるんだ土嚢袋に詰め、常温で保管した。

(2)原位置試験

埋立地盤の深さ方向の硬さや密度等地盤特性を調べるため、原位置におけるスウェーデン式サウンディング試験(以下、SWS 試験という)および砂置換による現場密度試験を行った。Fig.4.1 に原位置試験を実施した調査地点および調査項目をまとめたものを示す。埋立地盤の特性を面的に掴むため、SWS 試験を南北方向に 2 列、Fig.2.1 に示したボーリング調査データが得られている箇所を交差するように東西方向に 1 列実施するよう計画した。また、地盤の現場密度試験は、そのばらつきを見るため北端の 2 箇所、中央部東西方向に 3 箇所、住宅地中央(図中 SWS9 地点) に分けて実施した。SWS 試験の結果、全ての測点において深度 2m 以内で礫当たりにより換算 N 値が 50 以上を示し、一部を除いて液状化に対する抵抗力を十分有する地盤であることがわかった。現場密度試験の結果、各調査地点の現場乾燥密度が $1.712 \sim 1.263 \text{ g/cm}^3$ の範囲で大きく異なったが、SWS2 の地点で埋立土と同様の物理的性質を有する土が地表部に存在していたため、この地点で観測された現場乾燥密度 1.624g/cm^3 をこの地盤の代表値とすることとした。

5. 埋立土の物理的性質

Fig.5.1 に現地より採取した埋立土(以下、広川土という)の粒径加積曲線を示す。広川土は、細粒分を多く含み、礫を含む様々な土粒子が混在しており、均等係数が大きく、間隙比の変化する幅が大きいため、圧縮性に富んだ土であることがわかる。また、一般的に液状化の可能性があるとされている粒径範囲にその大部分が含まれていることがわかった。



Fig.3.1 広川町役場周辺の地盤変状



Fig.4.1 原位置試験調査位置図

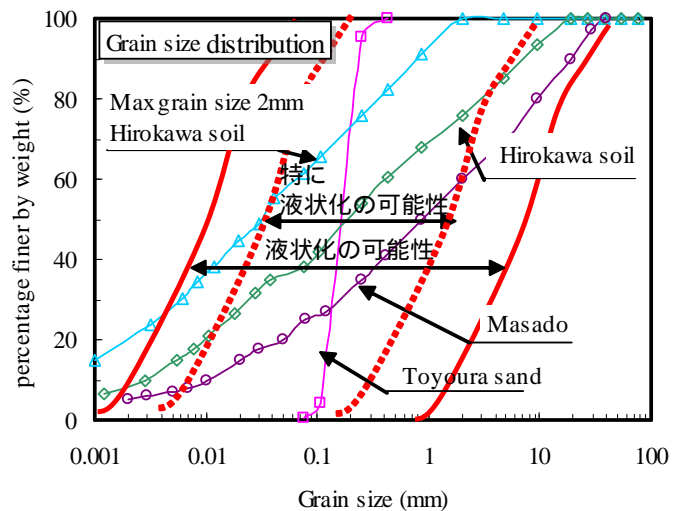


Fig.5.1 粒径加積曲線

6 埋立土の液状化特性

(1) 試験方法

埋立土の液状化特性を求めめるため、現地より採取した土試料を用いて飽和非排水繰返し三軸試験を行った。試験は、供試体の相対密度および礫含有量を変化させたケースに対して、背圧を200kPa 載荷し $p' = 100\text{kPa}$ 、軸ひずみ速度 0.1%/min の条件で、繰返しせん断を行った。なお、試験は、ひずみ制御で行い、軸ひずみ $DA=5\%$ に達した段階で終了した。試験ケースを Table.6.1 に示す。

(2) 供試体作製方法

試験で用いた供試体は、現場密度試験で得られた埋立地盤の乾燥密度 $\rho_d = 1.624\text{g/cm}^3$ を基準とし、試験で対象とする礫含有率に応じて補正¹⁾した乾燥密度 ρ_d' から算出した間隙比を初期条件として与えた。各試料における礫補正された乾燥密度を Table.6.2 に示す。

本研究では、含水比を調整してから突固めを行う湿潤締固め法を用いた。供試体は円柱形で、直径 5.05cm、高さ 12cm を標準とし、含水比を 12% 程度に調整後、10 層に分け、突き棒で所定の間隙比になるように突き固めた。広川土を用いた試験では、最大粒径 2mm、4.75mm、9.5mm に粒度調整した供試体の 3 種類と、供試体作製時に意図的に礫分で分級させた 2 種類（最大粒径 4.75mm、9.5mm）の計 5 種類の供試体を用いて行った。分級構造を有する供試体を作製する場合、予め 2mm ふるいを用いて、礫分（2mm 以上）とそれ以外の試料（2mm 以下）に分級させておいた試料を 2 種類用意し、粒径加積曲線から求められる礫含有率に応じて計算された重量の試料を、礫以外、礫、礫以外の順で詰め 3 層構造にする方法で行った。

また、最大粒径 4.75、9.5mm の供試体を作製する場合に限り、メンブレンペネトレーションの影響を低減するために、供試体表面に 425 μm 通過試料を薄く塗布して、表面を平滑に処理した。

また、最大粒径 4.75、9.5mm の供試体を作製する場合に限り、メンブレンペネトレーションの影響を低減するために、供試体表面に 425 μm 通過試料を薄く塗布して、表面を平滑に処理した。

(3) 液状化特性

繰返しせん断挙動

Fig.6.1 に有効応力経路, Fig.6.2 に応力 - ひずみ関係を示す。Fig.6.1 より、広川土の場合、繰返し載荷初期では、間隙水圧の増加とともにせん断ひずみも徐々に増加しており、間隙水圧およびせん断ひずみの急激な増加は見られない。また、最終的に有効応力が 0 に至らず、10kPa 程度の有効応力が残る。一方、豊浦砂の場合、繰返し載荷初期で間隙水圧が徐々に増加しているが、せん断ひずみはほとんど進展していない。しかし、繰返し載荷が進むと急激に間隙水圧が上昇し、それに伴いせん断ひずみも大きく進展している。そして、最終的には有効応力が 0 になり、サイクリックモビリティに至っていることがわかる。Fig.6.2 より、サイクリックモビリティに至った後の挙動では、広川土の方が豊浦砂よりもせん断ひずみの進展が小さいことがわかる。また、両試料ともに圧縮側より伸張側の方が、せん断ひずみが進展している。このように、豊浦砂と広川土の繰返し載荷における間隙水圧やせん断ひずみの挙動の違いは、塑性のある細粒分（粘着成分）が大きく影響していると考えられる。

Table.6.1 試験ケース

試料	最大粒径 G_{max} (mm)	試料の状態	間隙比 e	礫含有率 G_c (%)	
広川土	2.00	中詰め	0.978	0	
		密詰め	1.298		
	4.75	非分級	0.878		9.3
		分級			
	9.5	非分級	0.808		17.5
		分級			
豊浦砂	0.425	ゆる詰め	0.834	0	
		中詰め	0.754		
		密詰め	0.676		

Table.6.2 各試料における礫補正された乾燥密度

試料	最大粒径 G_{max} (mm)	礫分補正した乾燥密度 ρ_d (g/cm^3)
広川土	2.00	1.382
	4.75	1.456
	9.5	1.512

相対密度の違いによる液状化強度

Fig.6.3 に広川土の初期相対密度の異なる 2 種類の供試体の繰返しせん断応力比と繰返し載荷回数関係を示す。図示したデータは $DA=5\%$ につ

いてまとめたもので、広川土は最大粒径 2mm を、また参考値として豊浦砂の $Dr=40, 60, 75\%$ を示した。なお、初期相対密度として供試体作製時の相対密度を示しているが、広川土においては、飽和・圧密過程を経ることにより、せん断前にはほぼ同じ相対密度となった。Fig.6.3 より豊浦砂は初期相対密度の増加に応じて R_{LI} が増加傾向を示しているのに対し、広川土では、初期相対密度が増加しても液状化強度はほぼ同程度を示すことがわかる。これは、広川土に含まれる細粒分の影響が考えられる。また、広川土の液状化強度は豊浦砂の $Dr=60\%$ の液状化強度とほぼ同程度であった

分級構造が液状化強度に与える影響

Fig.6.4 に広川土の分級構造の有る供試体と分級構造の無い供試体において $DA=5\%$ における繰返しせん断応力比と繰返し回数との関係を示す。なお図示したデータは、広川土の最大粒径 9.5mm における分級構造有り・無しおよび最大粒径 4.75mm における分級構造有り・無しの試験結果を示した Fig.6.4 より、両供試体とも分級構造が有る方が無い方に比べ、液状化強度が僅かながら減少していることがわかる。繰返し回数 20 回の時の繰返しせん断応力比 R_{LI} で比較すると、最大粒径 9.5mm においては、分級構造無しの場合 $R_{LI}=0.188$ 、分級構造有りの場合 $R_{LI}=0.175$ であった。一方、最大粒径 4.75mm においては、分級構造無しの場合 $R_{LI}=0.182$ 、分級構造有りの場合 $R_{LI}=0.173$ であった。これは、分級構造により、礫部分の粘着成分が無くなり、そこが弱面になったことが要因の一つと考えられる。

礫含有率の違いによる液状化強度

Fig.6.5 に各試料における繰返し载荷回数 20 回時の礫含有率と繰返しせん断応力比の関係を示す。礫含有率は、最大粒径 9.5mm で 17.5%、最大粒径 4.75mm で 9.3%、最大粒径 2mm で 0% であり、 $DA=5\%$ における試験結果を示した Fig.6.5 より礫含有率が増加しても液状化強度はあまり変化していないことがわかる。最大粒径 2mm では、

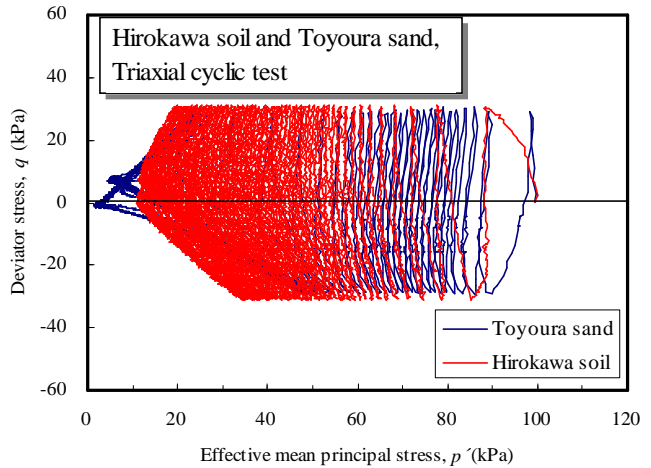


Fig.6.1 有効応力経路

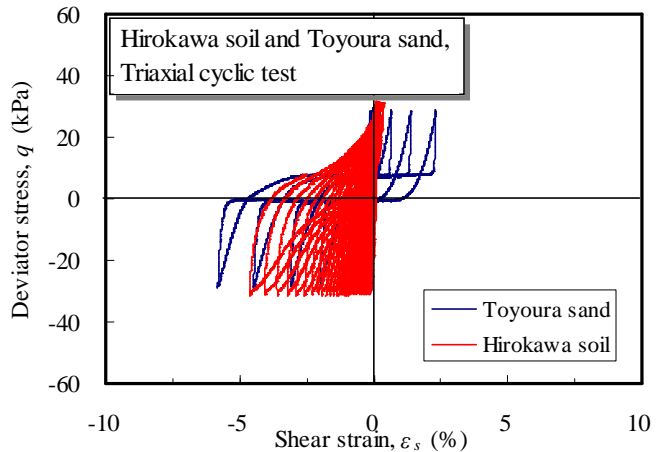


Fig.6.2 応力 - ひずみ関係

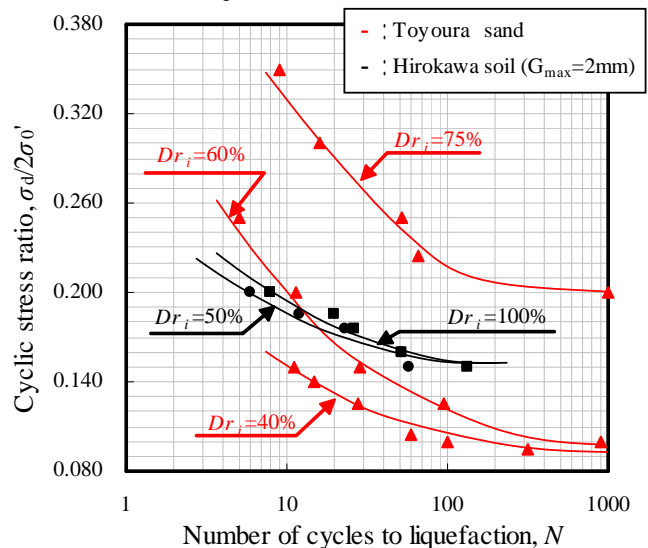


Fig.6.3 広川土の液状化強度

$R_{LI}=0.180$ 、最大粒径 4.75mm では $R_{LI}=0.182$ であった。この 2 つと最大粒径 9.5mm のものを比較しても、最大粒径 9.5mm の方が僅か大きい程度である。一般に礫分を多く含んだ地盤は、乾燥密度・均等係数が大きいいため繰返しせん断に対する抵

抗力が強いことや地震動によって間隙水圧が発生しても透水性が高いためすぐに排水されるなどといったことから液状化に対する抵抗力が強いとされているが、粒径幅の広い試料において、液状化強度は、礫分が含まれてもそれほど強くないことが明らかとなった。

7. 埋立土の液状化評価

原位置試験(SWS 試験)の結果をもとに道路橋示方書から算出した換算 N 値 N_a と繰返し三軸試験から求めた繰返し液状化強度比 R_{LI} の関係を Fig.7.1 に示す。Fig.7.1 より、繰返し三軸試験から求めた N_{al} および R_{LI} より原位置試験結果から求めた N_a および R_{LI} の方が値が大きいことがわかる。そのため、コーン貫入試験において礫分混入による貫入抵抗値を調べた。Fig.7.2 にコーン貫入試験機を示す。コーン貫入試験は載荷台を上昇させることによりモールド内に詰められた供試体にコーンを連続的に貫入させる方法で行った。試験で用いた供試体は、最大粒径を変化させた(2mm, 9.5mm) 2種類とした。Fig.7.3 にコーン貫入状況の写真、Fig.7.4 に試験で用いたコーン先端形状の模式図を示す。供試体は、10cm×12.7cm の鋼製モールドを使用し、含水比を12%程度に調整後、5層に分け、三軸圧縮試験で設定した間隙比と同様のもの(最大粒径2mm: $e=0.978$, 最大粒径9.5mm: $e=0.808$)になるよう突き固めて作製した。Fig.7.5 に貫入力と貫入量の関係を示す。Fig.7.5 より両供試体ともにコーンの貫入量の増加に伴って貫入力が増加していることが分かる。また、貫入量38.5mmの時の貫入力をコーン底面積で除して求められるコーン指数 q_c は $q_{c9.5}/q_{c2.0}=1.7$ と礫含有量が多い最大粒径9.5mmの供試体のコーン指数が大きい値を示すことが分かった。コーンを60mm貫入させたときのコーン指数 q_{cr} は $q_{cr9.5}/q_{cr2.0}=1.5$ となった。以上のことから2~9.5mmの礫が17%程度入ることにより、貫入抵抗力が約1.5~1.7倍となることが分かる。

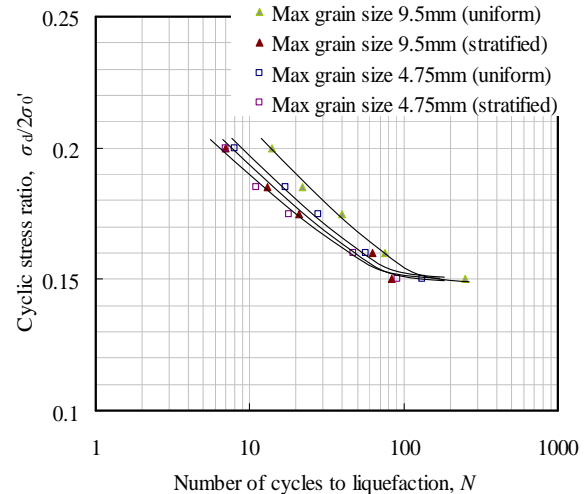


Fig.6.4 分級構造有り・無しによる液状化強度

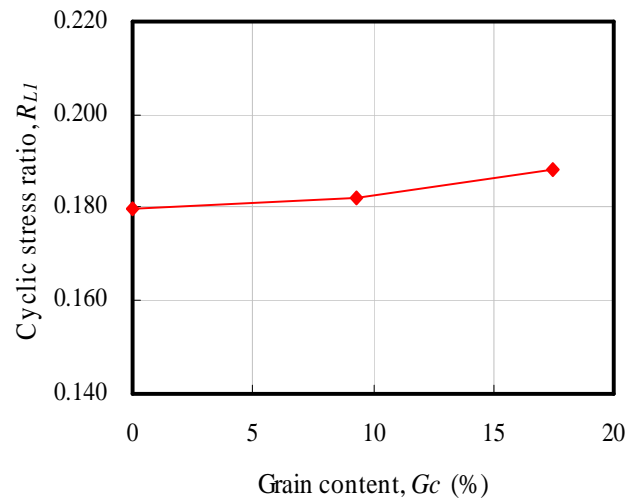


Fig.6.5 繰返しせん断応力比と礫含有率の関係

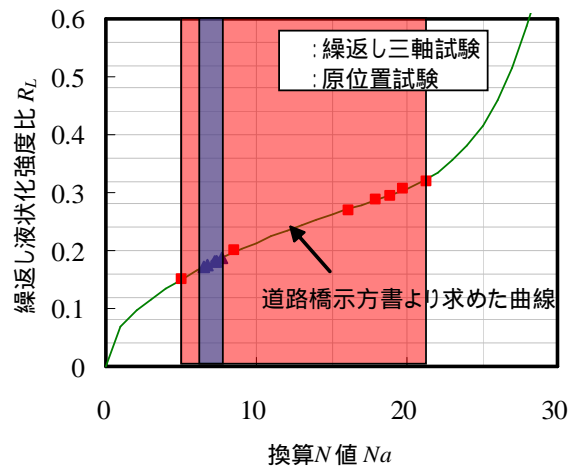


Fig.7.1 N_a と R_{LI} の関係

繰返し三軸試験結果から貫入抵抗値と N_a が比例関係にあると仮定し、コーン貫入試験から原位置試験の N_a を $1/1.7$ 倍した結果、繰返し三軸試験結果の N_{al} および R_{LI} の値に近づいた(Fig.7.6)。また、原位置試験の結果から N_a を算出する際、道路

橋示方書においては用いた試料が砂質土であると判定され、砂質土の場合の算出式で N_a を求めた結果、Fig.7.1 のように値に大きなばらつきが見られた。そのため礫分が混入していることを考慮し、礫質土として N_a および R_L を算出した結果、繰返し三軸試験結果の N_{a1} および R_{L1} の値に近づいた (Fig.7.6)。

8. 結論

本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) 飽和非排水繰返し三軸試験を行った結果、広川土の液状化強度は豊浦砂の $D_r=60\%$ とほぼ同程度あり、強振動の地震を想定した場合、液状化の可能性はある。
- 2) 粒径の揃った砂では、供試体作製時の締固めにより密度を大きく変化させることができ、この密度が液状化強度に大きな影響を及ぼすが、細粒分を多く含む土においては、供試体作製時の締固めより、飽和と圧密により密度が大きく支配される。つまり、細粒分を多く含む土の締固め管理は、液状化防止より、圧密沈下抑制効果が強い。
- 3) 礫分を含む幅広い粒径をもつ土において、乾燥密度が同じ供試体では、礫分とそれ以外で分級構造をつけると、液状化強度は少し小さくなる。これは、礫部分で粘着成分がなくなることにより、液状化強度が低下したためと考えられる。
- 4) 幅広い粒径をもつ土において礫分が質量で20%程度まで増えても液状化強度はそれほど変化しない。
- 5) 礫を多く含む地盤において原位置試験を行う場合、礫の存在により貫入抵抗値は大きくなるが、必ずしも液状化抵抗が増加するとは言えない。
- 6) 広川土のように粒径分布が広い土においては、 D_{50} の値は小さくなってしまいが、貫入抵抗は礫分とともに確実に増加するため、礫質土としての判定しなければ、液状化強度が過大に評価される結果を示した。したがって、道路橋示方書におけ

る礫質土の判定基準として、 D_{50} での判定の他に、礫含有量による規定を設けることが必要であると考えられる。

参考文献

- 1) (社)地盤工学会：地盤調査の方法と解説，p.557，2004.



Fig.7.2 コーン貫入試験機



Fig.7.3 コーン貫入状況

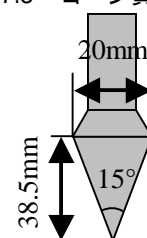


Fig.7.4 コーン寸法

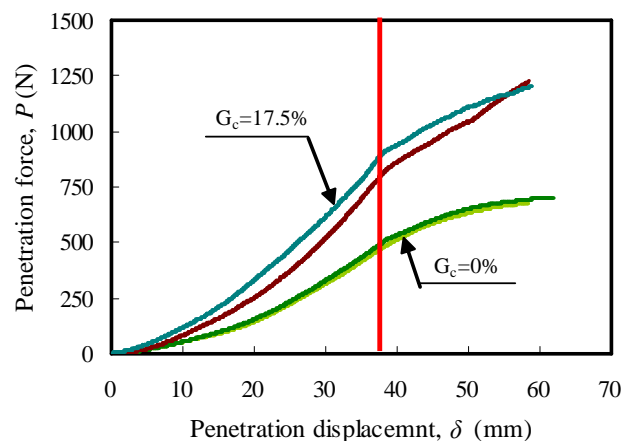


Fig.7.5 貫入力と貫入量の関係

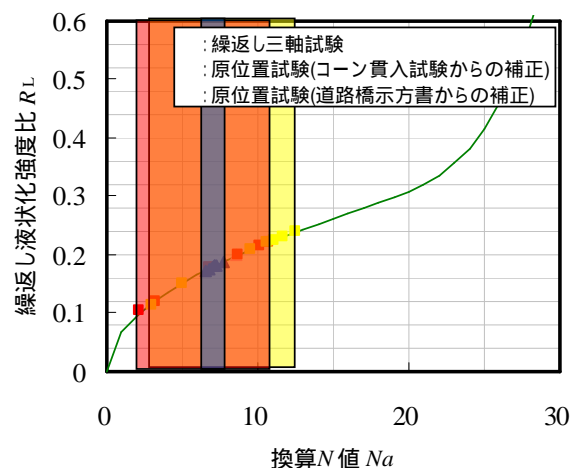


Fig.7.6 礫含有量を考慮した N_a と R_L の関係